

И. Ф. ПОДАК

КУРС  
ОБЩЕЙ  
АСТРОНОМИИ



И. Ф. ПОЛАК

# КУРС ОБЩЕЙ АСТРОНОМИИ

ИЗДАНИЕ ШЕСТОЕ  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

*Допущено Министерством высшего образования  
СССР в качестве учебника для государственных  
университетов и педагогических институтов*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД



## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| Предисловие к шестому изданию . . . . .   | 9         |
| Из предисловия к первому изданию . . . . .  | 10        |
| Введение . . . . .  | 11        |
| § 1. Предмет астрономии (11). § 2. Небесные светила (11). § 3. Общая картина вселенной (13). § 4. Методы астрономических исследований (14). § 5. Разделение астрономии (15). § 6. Значение астрономии для социалистического общества (16). § 7. Достоверность астрономических открытий (18). § 8. Зарождение и развитие астрономии (18). § 9. Астрономия в России (21). § 10. Астрономия в СССР (22). § 11. Борьба материализма против идеализма в астрономии (24).   |           |
| <b>Глава первая. Небесная сфера и её вращение . . . . .</b>   | <b>27</b> |
| § 12. Небесный свод и небесная сфера (27). § 13. Голубой цвет небесного свода (27). § 14. Свойства небесной сферы (28). § 15. Вращение небесной сферы (29). § 16. Основные точки и круги небесной сферы (30). § 17. Вращение небесной сферы как следствие вращения Земли (32). § 18. Суточное вращение неба на разных широтах (33). § 19. Звёзды незаходящие и звёзды невосходящие (34). § 20. Измерения на небесной сфере (35). § 21. Астрономические координаты (35). § 22. Горизонтальные координаты (36). § 23. Первая система экваториальных координат (36). § 24. Вторая система экваториальных координат (37). § 25. Звёздное время и звёздные сутки (38). § 26. Высота светила в меридиане (38). Упражнения к главе I (39). |           |
| <b>Глава вторая. Солнце и время . . . . .</b>   | <b>41</b> |
| I. Видимое движение Солнца. § 27. Доказательства годичного движения Солнца (41). § 28. Эклиптика (41). § 29. Движение Солнца по эклиптике. Времена года и климатические пояса (42). § 30. Эклиптическая система координат (44). § 31. Зодиак (45). § 32. Неравномерность движения Солнца (45). § 33. Движение Солнца — отражение движения Земли (46). § 34. Определение наклона эклиптики из наблюдений (47).   |           |
| II. Измерение времени. § 35. Звёздные сутки (47). § 36. Звёздное время (48). § 37. Истинные солнечные сутки (49). § 38. Истинное солнечное время (50). § 39. Среднее солнечное время (51). § 40. Уравнение времени (51). § 41. Точная зависимость между единицами звёздного и среднего солнечного времени (53). § 42. Звёздное время в средний полдень и среднюю полночь (54). § 43. Счёт времени гражданский и астрономический (54). § 44. Местное время и долгота (54). § 45. Поясное время (55). § 46. Декретное время (56). § 47. Линия изменения даты (58).  |           |
| III. К а л е н д а р ь. § 48. Единицы времени (59). § 49. Календари лунные и лунно-солнечные (59). § 50. Календари солнечные (60). § 51. Юлианский календарь (старый стиль) (60). § 52. Григорианский календарь (новый  |           |

стиль) (61). § 53. Достоинства и недостатки обеих календарей (61).  
 § 54. Современное состояние вопроса о календаре (62). § 55. Эра от  
 «рождества Христова» (63). Упражнения к главе II (63).

### Глава третья. Задачи на время и координаты . . . . . 65

- I. Задачи на звёздное время. § 56. Задача 1-я. Звёздное время в среднюю местную полночь (65). § 57. Задача 2-я. Обращение среднего времени в звёздное (65). § 58. Задача 3-я. Обращение звёздного времени в среднее (65). § 59. Задача 4-я. Определение среднего времени верхней кульминации звезды с данным прямым восхождением  $\alpha$  (66). § 60. Задача 5-я. Определение часового угла звезды с данным прямым восхождением  $\alpha$  в данный момент среднего времени  $T_c$  (66).
- II. Основные сведения по сферической тригонометрии. § 61. Сферический треугольник (66). § 62. Основные формулы для решения косоугольного сферического треугольника (66). § 63. Прямоугольный сферический треугольник (68).
- III. Задачи на применение сферической тригонометрии § 64. Астрономический треугольник (69). § 65. Задача 6-я. Преобразованные системы координат  $(\lambda, \delta)$  в  $(A, z)$  (69). § 66. Задача 7-я. Вычисление восхода и захода светила (69). § 67. Задача 8-я. Определение времени по высоте светила (70). § 68. Задача 9-я. Определение положения точки весеннего равноденствия (70). Упражнения к главе III (71).

### Глава четвёртая. Астрономические инструменты и наблюдения . . . . . 72

- I. Телескопы. § 69. Астрономические наблюдения (72). § 70. Рефракторы (зрительные трубы) (72). § 71. Увеличение телескопа (72). § 72. Затруднения, возникающие при сильных увеличениях (73). § 73. Ахроматический объектив (73). § 74. Яркость изображения (74). § 75. Предел увеличения рефрактора (75). § 76. Рефлекторы (зеркальные телескопы) (75). § 77. Сравнительные достоинства рефракторов и рефлекторов (77). § 78. Величайшие телескопы нашего времени (77). § 79. Телескоп Д. Д. Максудова (77).
- II. Измерительные инструменты и определение координат светил. § 80. Наблюдения в меридиане (80). § 81. Меридианный круг (81). § 82. Наблюдения с помощью меридианного круга (82). § 83. Поправки наблюдений (83). § 84. Часы (84). § 85. Поправка часов (85). § 86. Пассажный инструмент (86). § 87. Рефракция (87). § 88. Следствия рефракции (89). § 89. Универсальный инструмент (теодолит) (90). § 90. Применение универсального инструмента (90). § 91. Экваториал (92). § 92. Наблюдения экваториалом. Нитяный микрометр (93). § 93. Небесная фотография (астрофотография) (94). § 94. Астрофотографические инструменты (95). § 95. Обсерватории (96). Упражнения к главе IV (98).

### Глава пятая. Основные задачи астрометрии . . . . . 100

- I. Определение времени. § 96. Способ равных высот Цингера (100).
- II. Определение географической широты. § 97. Способ меридианных наблюдений (100). § 98. Наблюдение около полярных звёзд (101). § 99. Способ Талькотта (101).
- III. Определение долготы. § 100. Общий план решения задачи (102). § 101. Перевозка хронометров (102). § 102. Наблюдение естественных (небесных) сигналов (102). § 103. Приём радиосигналов (103).
- IV. Определение размеров и формы Земли. § 104. Шарообразность Земли (первое приближение) (103). § 105. Триангуляция (104). § 106. Земной сфероид (второе приближение) (105). § 107. Понятие о геодезических и тригонометрических работах (107).

- V. Измерение расстояний и размеров светил. § 108. Измерение расстояний по параллактическому смещению (108). § 109. Параллакс (109). § 110. Зависимость между параллаксом и расстоянием (110). § 111. Влияние параллакса на координаты светила (110). § 112. Определение параллакса и расстояния светила из наблюдений (111). § 113. Определение размеров светил (111). § 114. Суточный и годичный параллаксы (112). § 115. Измерение расстояний планет (113).
- VI. Параллакс Солнца. § 116. Важность и трудность задачи (113). § 117. Определение солнечного параллакса по наблюдениям Марса (114). § 118. Наблюдения малых планет (115). § 119. Величина параллакса Солнца (115).
- VII. Годичный параллакс звёзд. § 120. Связь между параллаксом и расстоянием звезды (116). § 121. История определения звёздных параллаксов (117). § 122. Расстояния звёзд (117).
- VIII. Аберрация света. § 123. Открытие Брайля (118). § 124. Объяснение аберрации (119). § 125. Влияние аберрации на положение звёзд (121). Упражнения к главе V (122).

## Глава шестая. Движение Луны. Затмения . . . . . 123

- I. Движение Луны. § 126. Видимое движение Луны (123). § 127. Звёздный месяц и синодический месяц (123). § 128. Путь Луны между звёздами (124). § 129. Движение лунных узлов и его следствия (125). § 130. Фазы Луны (125). § 131. Пепельный свет (127). § 132. Орбита Луны (127).
- II. Солнечные и лунные затмения. § 133. Покрытие светила Луной (128). § 134. Солнечные затмения (полное и частное) (128). § 135. Кольцеобразное солнечное затмение (129). § 136. Описание солнечного затмения (131). § 137. Лунное затмение (132). § 138. Условия наступления затмений (133). § 139. Число затмений в году (133). § 140. Цикл затмений (134). Упражнения к главе VI (135).

## Глава седьмая. Движение планет . . . . . 136

- § 141. Общее понятие о движении планет (136). § 142. Движение нижних планет (137). § 143. Движение верхних планет (137). § 144. Геоцентрическая система Птолемея (138). § 145. Усложнение системы Птолемея (139). § 146. Мысли о движении Земли (140). § 147. Книга «Об обращениях небесных тел» (140). § 148. Гелиоцентрическая система Коперника (141). § 149. Объяснение движений нижних планет теорией Коперника (142). § 150. Объяснение движения верхних планет (142). § 151. Звёздное и синодическое обращение планет (143). § 152. Объяснение времён года системой Коперника (144). § 153. Значение Коперника в астрономии (145). § 154. Борьба за гелиоцентрическое мировоззрение (147). § 155. Тихо Браге и Кеплер (148). § 156. Законы Кеплера (149). § 157. Постоянная величина III закона (150). § 158. Значение законов Кеплера (151). § 159. Элементы планетных орбит (152). § 160. Определение координат планеты по элементам её орбиты (153). Упражнения к главе VII (156).

## Глава восьмая. Закон всемирного тяготения . . . . . 158

- § 161. От Кеплера до Ньютона (158). § 162. Положение точных наук к концу XVII в. (159). § 163. Аксиомы движения (159). § 164. Динамический смысл законов Кеплера (160). § 165. Сила притяжения и сила тяжести (160). § 166. Закон всемирного тяготения (161). § 167. Исключительные свойства тяготения (163). § 168. Задача двух тел (163). § 169. Постоянная тяготения (164). § 170. Уравнение живых сил в задаче двух тел и его применения (165). § 171. Возмущения (167). § 172. Возмущающая сила (168). § 173. Возмущающая сила движения Луны (169). § 174. Возмущения движения Луны (170). § 175. Возмущения (171).

§ 176. Устойчивость солнечной системы (171). § 177. Открытие Нептуна (172). § 178. Определение масс небесных тел (173). § 179. Движение земной оси (174). § 180. Следствия прецессионного движения земной оси (175). § 181. Объяснение прецессии (176). § 182. Прецессия лунно-солнечная и планетная (177). § 183. Нутация (178). § 184. Луна и прилив (178). § 185. Приливная волна (180). § 186. Солнечные приливы (180). § 187. Сложность приливных явлений (180). § 188. Небесные движения, не объясняемые законом тяготения (181). Упражнения к главе VIII (182).

#### Глава девятая. Спектральный анализ и фотометрия . . . . . 184

§ 189. Спектральный анализ и его значение (184). § 190. Свет простой и сложный (184). § 191. Получение спектра (185). § 192. Спектр плотных тел (непрерывный) (186). § 193. Спектр излучения разреженных паров и газов (линейчатый и полосчатый спектры) (186). § 194. Спектр поглощения (187). § 195. Открытие Кирхгофа (187). § 196. Химический анализ светил (188). § 197. Смещение линий и лучевые скорости (188). § 198. Гравитационное смещение (190). § 199. Спектр и физические свойства светил (190). § 200. Спектральные приборы (191). § 201. Фотометрия светил (192).

#### Глава десятая. Солнце . . . . . 194

§ 202. Солнце (194). § 203. Расстояние, размеры и масса Солнца (194). § 204. Общий вид и яркость Солнца (195). § 205. Вращение Солнца (196). § 206. Солнце — газовый шар (197). § 207. Фотосфера (197). § 208. Солнечные пятна (198). § 209. Природа солнечных пятен (199). § 210. Магнетизм пятен; рабочая гипотеза Хэла (200). § 211. Периодические изменения числа пятен и их магнетизма (201). § 212. Связь солнечных пятен с земными явлениями (202). § 213. Солнечная атмосфера (203). § 214. Обращающий слой и его химический состав (203). § 215. Неизвестные и отсутствующие линии солнечного спектра (204). § 216. Хромосфера и протуберанцы (205). § 217. Наблюдения хромосферы по всему диску Солнца (208). § 218. Астрономические явления во время полного затмения (209). § 219. Солнечная постоянная (212). § 220. Температура Солнца (212). § 221. Солнечная энергия и жизнь Земли (214). § 222. Внутреннее строение Солнца (215). § 223. Источники солнечной энергии (216). § 224. Проблема Земля — Солнце (220).

#### Глава одиннадцатая. Луна . . . . . 221

§ 225. Размеры Луны (221). § 226. Вращение Луны (221). § 227. Почему Луна обращена к Земле одной стороной? (222). § 228. Либрация Луны (224). § 229. Ничтожность лунной атмосферы (224). § 230. Судьба лунной атмосферы (225). § 231. Вода на Луне (226). § 232. Свет и теплота Луны (226). § 233. Строение лунной поверхности (226). § 234. Происхождение лунных гор (228). § 235. Изменения на Луне (230). § 236. Влияние Луны на Землю (230). § 237. Роль Луны в истории науки и мировоззрения человечества (230). Упражнения к главе XI (231).

#### Глава двенадцатая. Планеты . . . . . 232

§ 238. Обзор планетной системы (232). § 239. Правило Тициуса (234). § 240. Меркурий (234). § 241. Венера (235). § 242. Прохождение Меркурия и Венеры по диску Солнца (236). § 243. Земля — Луна (237). § 244. Движение земных полюсов (237). § 245. Марс. Его движение и блеск (238). § 246. Поверхность Марса. Сходство с Землей (239). § 247. Спутники Марса (242). § 248. Малые планеты (242). § 249. Наиболее интересные из малых планет (244). § 250. Общая характеристика четырех далеких планет (245). § 251. Юпитер (246). § 252. Спутники Юпитера (247).

§ 253. Сатурн (248). § 254. Спутники Сатурна (250). § 255. Уран и Нептун (250). § 256. Плутон (251). Упражнения к главе XII (252).

### Глава тринадцатая. Кометы и падающие звёзды . . . . . 253

§ 257. Общая характеристика комет (253). § 258. Движение комет (253). § 259. Изменения кометных орбит (255). § 260. Периодические кометы (255). § 261. Вид кометы (256). § 262. Образование хвоста кометы (256). § 263. Размеры и массы комет (259). § 264. Спектр комет (260). § 265. Природа комет (260). § 266. Различные типы хвостов (261). § 267. Сущность отталкивательной силы (263). § 268. Некоторые замечательные кометы (264). § 269. Столкновение кометы с другим мировым телом (266). § 270. Вопрос о происхождении комет (267). § 271. Падающие звёзды (метеоры). (268). § 272. Метеорные потоки (270). § 273. Определение орбиты метеорного тела (272). § 274. Связь метеоров с кометами (273). § 275. Наблюдения метеоров (273). § 276. Болиды и метеориты (274). § 277. Гигантские метеоритные падения XX века (276). § 278. Значение метеорных тел во вселенной (278). § 279. Зодиакальный свет (279).

### Глава четырнадцатая. Звёзды . . . . . 280

§ 280. Звёзды (280). § 281. Блеск и «величина» звёзд (280). § 282. Абсолютный блеск и абсолютная величина (282). § 283. Обозначения звёзд (283). § 284. Видимые и средние места звёзд (284). § 285. Звёздные каталоги и карты (284). § 286. Число звёзд (286). § 287. Цвета звёзд (287). § 288. Спектры звёзд (288). § 289. Классификация спектров (288). § 290. Температуры звёзд (290). § 291. Гипотетическая зависимость спектрального класса от возраста звезды (290). § 292. Звёзды-гиганты и звёзды-карлики (291). § 293. Гипотеза звёздной эволюции Расселла (293). § 294. Светимость звёзд (294). § 295. Диаметры звёзд (294). § 296. Массы звёзд (295). § 297. Плотности звёзд (296). § 298. Двойные звёзды (297). § 299. Вычисление орбит двойных звёзд (299). § 300. Определение масс двойных звёзд (300). § 301. Спектрально-двойные звёзды (300). § 302. Определение орбиты спектрально-двойной звезды (301). § 303. Свойства спектрально-двойных звёзд (302). § 304. Планетные системы вокруг звёзд (302). § 305. Переменные звёзды. Их изучение в СССР (303). § 306. Затменные переменные звёзды (304). § 307. Определение элементов затменно-переменной звезды (305). § 308. Цефеиды (306). § 309. Теория цефеид (308). § 310. Долгопериодические переменные звёзды (309). § 311. Неправильные переменные звёзды (309). § 312. Новые звёзды (309). § 313. Новоподобные звёзды (311). Упражнения к главе XIV (312).

### Глава пятнадцатая. Строение вселенной . . . . . 314

- I. Движения звёзд. § 314. Собственные движения звёзд (314). § 315. Движения по лучу зрения (314). § 316. Истинные скорости звёзд (315). § 317. Движение солнечной системы (315). § 318. Звёздные потоки Каптейна (316). § 319. Движущиеся скопления (318). § 320. Определение параллакса движущихся скоплений (319). § 321. Связь между спектральным классом и скоростью (320). § 322. Звёзды, не принадлежащие к большим потокам (320). § 323. Разрежённая материя в межзвёздном пространстве (321).
- II. Звёздные скопления. § 324. Млечный Путь (322). § 325. Галактические координаты (324). § 326. Галактические звёздные скопления (324). § 327. Звёздные ассоциации (330).
- III. Туманности. § 328. Два класса туманностей (330). § 329. Галактические туманности (330). § 330. Внегалактические туманности (333). § 331. Метагалактика (338).



|   |     |
|---|-----|
| IV. Строение звёздного мира. § 332. Исследования звёздной системы (340). § 333. Трудность изучения Галактики (342). § 334. Теория галактического вращения Оорта (342). § 335. Подсистемы, составляющие Галактику (345).   |     |
| Глава шестнадцатая. Эволюция небесных тел . . . . .   | 348 |
| § 336. Космология начала XVIII века (348). § 337. Гипотеза Канта (348). § 338. Идси Гершеля об эволюции туманностей (349). § 339. Гипотеза Лапласа (350). § 340. Оценка гипотезы Лапласа (351). § 341. Приливное трение (352). § 342. Происхождение Луны и приливная эволюция (353). § 343. Видоизменения гипотезы Лапласа (355). § 344. Гипотезы механической эволюции звёзд (355). § 345. Гипотезы полустолкновения (356). § 346. Космогонические гипотезы советских учёных (357). § 347. Гипотезы о происхождении спиральных туманностей (359). § 348. Физическая эволюция звёзд (359). § 349. Возраст звёзд и планет (360). § 350. Превращения материи (361). |     |
| Приложение I. Ознакомление с небом . . . . .  | 362 |
| § 351. Ознакомление с созвездиями (астрогнозия) (362). § 352. Вечернее небо в разные времена года (363). § 353. Практические указания для наблюдений простым глазом (366). § 354. Движения Луны и планет (366). § 355. Телескопическое знакомство с небом (367).  |     |
| Таблицы . . . . .   | 370 |
| Литература . . . . .  | 378 |
| Именной указатель . . . . .   | 382 |
| Предметный указатель . . . . .  | 384 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ШЕСТОМУ ИЗДАНИЮ

Переработка учебника для шестого издания потребовала сравнительно большой затраты труда, так как при этом приходилось решать ряд задач различного характера. Прежде всего возникли требования технического порядка и притом противоречащие одно другому: с одной стороны, требовалось уменьшить объём книги примерно на три листа, с другой — необходимо было дополнить учебник изложением успехов астрономии за последние одиннадцать лет (пятое издание вышло в 1939 г.). Поэтому пришлось не только выбросить или сильно сократить ряд отделов (вывод закона тяготения из законов Кеплера, задачу двух тел, астрономические наблюдения и др.), но и тщательно пересмотреть весь текст с целью ещё большей сжатости изложения. Когда же я перешёл к работе над внесением дополнений, то с особенным удовлетворением отмечал большие успехи, достигнутые за эти годы советской астрономией. Больше всего дополнений было внесено в главы, посвящённые методам и результатам астрофизики и звёздной астрономии. Также значительно больше места и внимания уделено в новом издании философским и методическим вопросам.

Приношу искреннюю благодарность рецензентам С. К. Всехсвятскому и К. А. Куликову, давшим мне весьма ценные советы и указания, и редакторам И. Е. Рахлину и М. М. Дагаеву, которые внесли в текст ряд поправок и улучшений, а М. М. Дагаев, кроме того, проделал большую работу по подбору рисунков.

Сентябрь 1950 г.

*И. П.*

## ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Настоящая книга имеет в виду прежде всего студентов педагогических вузов, в которых на астрономию отведено сравнительно немного часов. Основу книги составляют сжато изложенный курс общей астрономии и некоторые отделы сферической, практической и теоретической астрономии, важные в педагогическом и общеобразовательном отношении.

Книга может оказаться пригодной и для студентов физматов, и эта цель также имела в виду. Если исключить перечисленные выше отделы, то остальная часть даст сжатое, но достаточно полное пособие по «Введению в астрономию» или по «Описательной астрономии».

Особенное внимание было уделено вопросам и упражнениям. Некоторые из них не встречались в доступной мне литературе.

Москва, май 1929 г.

## ВВЕДЕНИЕ

**§ 1. Предмет астрономии.** Астрономия, т. е. наука о небесных светилах, гораздо старше остальных естественных наук. Все культурные народы древности уже на первых ступенях своей истории настолько изучили небесные явления, что могли удачно предсказывать не только времена года и фазы Луны, но даже затмения и появление планет; между тем их сведения по другим естественным наукам были в те времена крайне ничтожны.

Долгое время астрономы могли изучать только *движения* светил; теперь же они имеют возможность изучать и самые светила, например, определять их размеры и массу, исследовать их физическую природу, химический состав и процессы их развития. Можно сказать поэтому, что современная астрономия измеряет, взвешивает и анализирует светила.

**§ 2. Небесные светила.** а) Звёзды. Самый многочисленный класс небесных тел составляют *звёзды*; в безлунную ночь они видны тысячами даже для невооружённого глаза. С появлением Луны более слабые из них исчезают, а в сиянии Солнца исчезают все. В действительности же звёзды и днём остаются на небе, и более яркие из них можно видеть в телескоп и при Солнце.

Звёзды разбросаны по небу разнообразными неправильными, но неизменными группами. Заметив какую-нибудь из звёздных групп, мы прийдём её через много лет. Она может оказаться в другой стороне неба, но ни её очертание, ни число и блеск составляющих её звёзд заметно не изменятся. Эти группы, на которые люди разделили звёзды, чтобы легче было их изучать, называются *созвездиями*. В глубокой древности созвездиям были даны названия, которые остались до наших дней и кажутся нам теперь большею частью очень странными.

Созвездия остаются неизменными в течение тысячелетий, но вид звёздного неба сильно изменяется уже через немного часов, так как звёзды, подобно Солнцу и Луне, восходят и заходят. Создаётся впечатление, что они прикреплены к небесному своду, а самый свод всё время вращается, как поверхность твёрдого шара, которую мы рассматриваем изнутри, и делает один оборот в сутки. Теперь всем известно, что никакого свода в действительности не существует. Суточ-

ное вращение светил также есть явление кажущееся: оно объясняется вращением нашей Земли в обратном направлении. Так как звёзды не изменяют своих относительных положений, то их часто называют *«неподвижными звёздами»*.

Невооружённому глазу доступно лишь несколько тысяч звёзд (число это сильно зависит от остроты зрения), но в телескопы они видны миллионами. Светлая полоса, так называемый Млечный Путь, представляет собой скопление таких «телескопических» звёзд, свет которых для невооружённого глаза сливается в сплошное сияние. Все звёзды, видимые простым глазом, и многие из телескопических давно уже сосчитаны, зарегистрированы и занесены на карты. При этом выяснилось, что на самом деле звёзды движутся, так что название «неподвижные звёзды» — неправильно, и фигуры созвездий на небесных картах постепенно изменяются. Но эти изменения происходят почти так же медленно, как изменения очертаний материков на земных картах.

Среди звёзд в разных местах телескоп открывает *туманности*, похожие на маленькие слабо свягающиеся облака; они так же «неподвижны», как и звёзды. Большинство их подобно Млечному Пути является в действительности скоплением телескопических звёзд (§ 3).

б) Светила, движущиеся относительно звёзд. Самые яркие светила не принадлежат к числу «неподвижных звёзд», а постепенно перемещаются из одного созвездия в другое, — это Солнце, Луна, *планеты* и *кометы*. Планеты по виду почти не отличаются от звёзд, но если их положение нанести на карту, то уже через несколько месяцев, а иногда даже дней, они окажутся среди других звёзд, в другом созвездии. Невооружённым глазом видно всего 5 планет. Две из них, Венера и Юпитер, всегда значительно ярче любой из звёзд.

Луну и планеты можно видеть почти каждую ясную ночь. Гораздо реже появляются *кометы*, имеющие туманную светящуюся оболочку и светлый «хвост». *Падающие звёзды* или *метеоры*, наоборот, очень обыкновенны. Ничего общего со звёздами они не имеют; они несравненно меньше звёзд и их вспышки происходят, собственно говоря, на Земле, в верхних слоях нашей атмосферы.

Изучением всех перечисленных тел и занимается астрономия. Оказалось, что из наблюдений над ними можно узнать много и о нашей Земле: астрономические наблюдения открыли нам, что Земля, как и другие небесные тела, имеет форму шара, что подобно им она движется и что размеры её в сравнении с размерами многих небесных тел совсем невелики. Таким образом, Земля тоже принадлежит к числу небесных тел, которыми занимается астрономия; их правильнее поэтому называть не «небесными», а мировыми телами. Выяснилось также, что различные свойства мировых тел нередко бывает вызвано тем, что разные тела находятся в данный момент на разных ступенях эволюции; сопоставляя между собой свойства различных светил, можно

проследить ход этой эволюции и раскрыть природу космических процессов в окружающем нас мире.

Таким образом, *астрономия* есть, в сущности, *наука о строении и развитии вселенной*.

**§ 3. Общая картина вселенной.** В результате научной работы, которая велась в течение тысячелетий, было выяснено строение той части вселенной, к которой принадлежит наша Земля, именно, строение так называемой *солнечной системы*; в настоящее время благодаря работам в основном советских астрономов начинает раскрываться в своих главных чертах и строение гораздо более грандиозной *системы звёздного мира*.

а) *Солнечная система*. Главным телом в нашей области вселенной является Солнце — раскалённый газовый шар, диаметр которого в 109 раз больше диаметра Земли. Вокруг Солнца на различных расстояниях обращаются планеты — холодные, тёмные тела, гораздо меньшие по своим размерам, чем Солнце. Одной из таких планет является наша Земля. Планеты видны потому, что они освещаются Солнцем. Вокруг некоторых планет обращаются тёмные тела ещё меньшей величины — это *спутники* планет. У Земли есть один спутник — Луна. Она значительно меньше Земли; её большие видимые размеры объясняются тем, что она в сотни раз ближе к Земле, чем Солнце и самые близкие планеты.

К солнечной системе принадлежат ещё кометы, которые тоже обращаются вокруг Солнца, но большую часть своего пути проходят далеко от Солнца и от Земли и поэтому наблюдаются редко. Наконец, небольшие по размерам метеорные тела носятся в безвоздушном межпланетном пространстве по всем направлениям и наблюдаются в виде «падающих звёзд», или «метеоров», только тогда, когда влетают в земную атмосферу.

б) *Звёздная система*. Расстояния планет от Солнца выражаются числами от десятков миллионов до нескольких миллиардов километров. Но расстояния эти ничтожны в сравнении с расстояниями до звёзд; самая близкая звезда в тысячи раз дальше от нас, чем самая далёкая известная планета. Звёзды гораздо больше планет: это далёкие *солнца*, громадные раскалённые самосветящиеся тела. Можно сказать и иначе: Солнце — это ближайшая к нам звезда.

Звёзды, окружающие нашу солнечную систему, образуют гигантское скопление, называемое системой Млечного Пути, или *Галактикой* (греческое название Млечного Пути). Одним из членов этой системы является наше Солнце. Вокруг него движутся маленькие тёмные тела — планеты, — к числу которых принадлежит и Земля. Недавно доказано, что вокруг многих звёзд также обращаются планеты, что существуют, таким образом, и другие планетные системы, подобные нашей. Все звёзды Галактики находятся в движении; движется и наше Солнце и, стало быть, вся солнечная система в целом. Сама Галактика также движется в пространстве.

В сравнении с солнечной системой размеры Галактики огромны, но не бесконечны. За пределами Галактики, во всех направлениях, на расстояниях, огромных даже в сравнении с диаметром Млечного Пути, движутся другие звёздные системы, другие галактики, такие же грандиозные, как наша Галактика. Науке известно сейчас около 100 миллионов таких звёздных систем, ближайших к нашей Галактике, но истинное число их бесконечно, как безгранична и бесконечна вселенная в целом. С Земли эти звёздные системы давно уже наблюдались в виде небольших туманных пятен (туманностей), но их истинная природа раскрыта только в XX веке.

Если бы мы перенеслись на самую далёкую из известных теперь звёздных систем, то наша Галактика выглядела бы также крошечным туманным пятном и затерялась бы среди сотен миллионов других «крошечных туманностей». Но мы несколько не приблизились бы к границе вселенной. Её не существует: вселенная бесконечна как во времени, так и в пространстве.

**§ 4. Методы астрономических исследований.** Истинная картина мира стала раскрываться перед человечеством только после исследовательской работы сотен поколений. Работа эта складывается из двух элементов: астрономической практики (*наблюдений*) и астрономической *теории*.

Астрономические *наблюдения* состоят не только в рассматривании светил в телескоп; они сводятся всегда к *измерению* каких-нибудь величин, например углов, определяющих положение или размеры светила. Чтобы астрономические наблюдения дали ценные для науки результаты, они должны быть произведены с наивысшей точностью, достижимой при данном состоянии техники, с «астрономической точностью», вошедшей в поговорку. Такая точность достигается: 1) тщательно разработанной методикой исследований, 2) наивысшим совершенством измерительных инструментов и 3) тщательнейшим исправлением каждой измеренной величины с учётом влияния инструментальных и других ошибок; учёт влияния различных погрешностей называется *вычислением* наблюдений, или их обработкой. Вычисление астрономических наблюдений отнимает обычно гораздо больше времени, чем сами наблюдения. Окончательные результаты наблюдений получаются в виде *чисел*, дающих, например, положение светила в данный момент.

Результаты наблюдений дают материал для астрономической *теории*. Основываясь на добытых наблюдениями частных, конкретных данных, теория при содействии философии, математики, физики и других наук выводит научные обобщения, или законы. Каждый научный закон должен охватывать целую область фактов, включающую в себя как частные случаи те наблюдённые факты, из которых он был получен.

Итак, астрономическая теория основывается на наблюдениях, но, с другой стороны, она планирует работу астрономов-практиков, ука-

зывая им, какие задачи астрономии требуют в данный момент решения путём наблюдений.

Именно так развивались все отделы астрономии и прежде всего тот отдел, который изучен лучше всех других, — строение солнечной системы. В течение тысячелетий накаплился наблюдательный материал, изучались *видимые* движения светил. Постепенно выяснилось, что видимые движения в значительной своей части не являются реальными, а вызываются движением Земли (Коперник, XVI в.). Это открытие позволило определять *истинные* движения планет в пространстве. Изучив эти движения, Кеплер в начале XVII в. нашёл, что они подчиняются простым *математическим* правилам, и выразил эти правила в виде известных *законов движения планет вокруг Солнца*. В то же время Галилей путём простых опытов открыл главные законы движения вообще. После этого стал намечаться путь к решению вопроса о физической причине кеплеровых законов. Он был решён в конце того же XVII в. Ньютоном, который показал, что сила, управляющая движением планет, есть *сила тяготения*, т. е. тяжести. *Закон всемирного тяготения*, выведенный Ньютоном из астрономических законов Кеплера и физических законов Галилея, оказался необыкновенно широким научным обобщением. Из него как простое следствие выводятся не только те же кеплеровы законы движения планет, но и вообще законы движения всех небесных тел. Оказалось, что движения светил, выведенные этим математическим путём, в точности согласуются с их истинными движениями. Таким образом, астрономия получила возможность точно предвычислять (*предсказывать*) многие небесные явления (ср. § 1). Но наблюдения должны продолжаться, чтобы давать материал для усовершенствования и развития теории.

**§ 5. Разделение астрономии.** Астрономия подразделяется на несколько отделов; перечислим главнейшие из них.

а) *Сферическая астрономия* разрабатывает математические правила для определения видимых положений светил на воображаемой небесной сфере с помощью чисел, называемых координатами, а также рассматривает изменения координат от различных причин. Она является подготовительной ступенью к следующему отделу.

б) *Практическая астрономия* описывает и применяет способы точного определения видимых положений светил на небесном своде путём наблюдений и относящихся к ним вычислений, описывает устройство инструментов, употребляющихся для этих целей, правила их выверки, обращения с ними, учёта их ошибок. Методы практической астрономии широко применяются для решения практических задач, например, для определения точного времени, географических широт и долгот на суше (*полевая астрономия*), на море (*мореходная астрономия*) и в воздухе (*авиационная астрономия*). Этот отдел астрономии имеет большое применение в практике социалистического строительства (см. § 6).



Отделы «а» и «б» вместе часто называются *астрометрией*, т. е. наукой о небесных измерениях.

в) Небесная механика занимается теоретическими исследованиями истинных движений небесных тел в пространстве на основе закона всемирного тяготения, а также определением масс небесных тел и математическим изучением их фигур. Все свои задачи небесная механика стремится решать *в общем виде*, с полной математической строгостью.

г) Теоретическая астрономия излагает способы, с помощью которых по видимым движениям светил можно определять их истинные движения, и наоборот. Первая задача называется определением *орбит*; обратная задача — вычисление видимых положений светил для некоторых определённых моментов (например, на будущее время) — называется вычислением *эфемерид*.

д) Астрофизика, т. е. физика светил, изучает физическое строение небесных тел, их яркость, температуру, химический состав, природу их поверхностей и атмосфер и происходящие на них явления.

е) Звёздная астрономия изучает строение звёздного мира и движения звёзд.

ж) Космогония разрабатывает теории происхождения и развития мировых тел, в том числе и нашей Земли.

з) Описательная астрономия (или общая астрономия) не является самостоятельной отраслью науки; она представляет систематическое изложение результатов, полученных другими отделами астрономии.

Все отделы астрономии не резко разграничены, а находятся между собой в тесной связи. Так, некоторые вопросы сферической астрономии принадлежат в то же время к области теоретической или практической астрономии; многие вопросы звёздной астрономии переплетаются с вопросами небесной механики и т. п.

## § 6. Значение астрономии для социалистического общества.

а) Знание *точного времени* необходимо для разносторонней деятельности советского государства. Современные крупные заводы-гиганты, оборудованные конвейерами и машинами-автоматами, мощные электрические станции, автоматизированная телефонная сеть, транспорт, научные лаборатории и т. д. — всё это для своей бесперебойной и точной работы требует знания точного времени и учёта его секундами и даже долями секунд. Плановость социалистического хозяйства требует также точного и удобного учёта длительных промежутков времени (месяц, квартал, год). Отсюда вытекает первая практическая задача астрономии — определение и хранение точного времени и составление календаря.

б) Осуществление гениального Сталинского плана преобразования природы, строительство железных дорог, шоссейных и водных путей сообщения, создание новых водных каналов и оросительных систем и других колоссальных строек в нашей необъятной стране требуют точного

знания *географических координат* (широты и долготы) множества пунктов территории Советского Союза.

Многочисленные экспедиции и изыскательные партии различных отраслей науки и техники для успеха своих работ постоянно должны знать точные географические координаты, а также уметь точно определять направления стран света по наблюдениям светил.

Подобным же образом морякам в открытом море, лётчикам в дальних перелётах, разведчикам при выполнении их заданий постоянно приходится ориентироваться по положению светил и определять по ним свои географические координаты.

Составление географических и топографических карт также требует знания широты и долготы пунктов земной поверхности. Наука *геодезия*, изучающая форму и размеры Земли, находится в тесной связи с практической астрономией.

Разработка методов ориентировки по светилам и определения по ним географических координат точек земной поверхности составляет второе практическое применение астрономии в социалистическом строительстве.

в) Исследование некоторых движений мировых тел и в особенности процессов, происходящих на поверхности и в атмосферах Солнца и звёзд, позволяет изучать такие состояния материи, которые ещё не осуществлены в земных лабораториях.

Это изучение оказывает огромную помощь развитию физики, механики, химии, на базе которых развивается современная техника. Отсюда вытекает третья практическая задача астрономии — всестороннее изучение процессов движения и развития материи не только на Земле, но и во всей доступной нам части вселенной.

г) Социалистическому обществу нужны строители коммунизма, овладевшие марксистско-ленинской теорией и своей специальностью, хорошо разбирающиеся в явлениях природы, понимающие место человека и Земли во вселенной и чуждые всяких суеверий и предрассудков.

Советская астрономия, изучая явления природы на основе марксистско-ленинской философии, опытным путём подтверждает гениальное учение Маркса — Энгельса — Ленина — Сталина о том, «что мир по природе своей материален, что многообразные явления в мире представляют различные виды движущейся материи, что взаимная связь и взаимная обусловленность явлений, устанавливаемые диалектическим методом, представляют закономерности развития движущейся материи, что мир развивается по законам движения материи и не нуждается ни в каком „мировом духе“» (И. Сталин, Вопросы ленинизма, изд. 11-е, стр. 541). Отсюда вытекает четвёртая практическая задача советской астрономии — раскрытие закономерностей мира, пропаганда астрономических знаний, беспощадная борьба против идеализма и идеалистических извращений в толковании явлений природы, борьба против религии, суеверий и предрассудков, активное участие в пропаганде естественно-научных знаний.

**§ 7. Достоверность астрономических открытий.** Результаты астрономических исследований так же достоверны, как и результаты других точных наук, так как они получаются теми же способами. Расстояния и размеры планет определяются теми же приемами, посредством которых геодезист определяет расстояние и высоту далекой горы. Массы небесных тел определяются по закону тяготения, на основе которого определяются и массы земных предметов. Химический состав далеких светил определяется тем же спектральным анализом, с помощью которого изучается химический состав веществ в земных лабораториях.

Результаты, полученные астрономией, доказывают, что материя во всей вселенной подчиняется одним и тем же законам. Подтверждение этого принципа материального единства вселенной составляет громадную заслугу астрономии.

Изучение природы на основе диалектического метода познания полностью подтверждает тезис марксистско-ленинской философии, «что мир и его закономерности вполне познаваемы, что наши знания о законах природы, проверенные опытом, практикой, являются достоверными знаниями, имеющими значение объективных истин, что нет в мире непознаваемых вещей, а есть только вещи, еще не познанные, которые будут раскрыты и познаны силами науки и практики» (И. Сталин, Вопросы ленинизма, изд. 11-е, стр. 543).

**§ 8. Зарождение и развитие астрономии.** Астрономия, как и другие науки, возникла из практических потребностей развивавшегося человеческого общества. Кочевым племенам первобытного общества нужно было ориентироваться при своих странствиях, и они научились находить дорогу по Солнцу и по звездам, разобрались в странах света и в созвездиях. Первобытный земледелец при своих полевых работах должен был заранее учитывать наступление то теплой, то холодной погоды, и он присмотрелся к движению Солнца, заметил, что смена времен года связана с появлением определенных созвездий.

В «Диалектике природы» Ф. Энгельс пишет: «Необходимо изучить *последовательное развитие* отдельных отраслей естествознания. — Сперва *астрономия*, которая уже из-за времен года абсолютно необходима для пастушеских и сельскохозяйственных народов. Астрономия может развиваться только при помощи *математики*. Следовательно, приходилось заниматься и последней. — Далее, на известной ступени развития земледелия и в известных странах (поднимание воды для орошения в Египте), а в особенности вместе с возникновением городов, крупных построек и развитием ремесла развилась и *механика*» (Ф. Энгельс, Диалектика природы, изд. 1948 г., стр. 147).

Развитие человеческого общества вызвало потребность в *летосчислении* и *календаре*, а также в способах *ориентировки* по небу, которые при развивающейся торговле были крайне необходимы для вождения караванов в пустынях и кораблей в открытом море. Всё это могла дать только астрономия. Поэтому у всех народов на ранних

ступенях их исторической жизни мы встречаем более или менее сложившийся круг астрономических знаний. Так, примерно за 3 тысячелетия до нашей эры египетские жрецы подметили, что разлив Нила, регулирующий хозяйственную жизнь страны, наступал вскоре после того, как на востоке, в лучах утренней зари, появлялась самая яркая из звёзд, Сирнус, после двух месяцев невидимости. Это открытие жрецы сумели использовать в классовых интересах: заметив появление Сирнуса, они объявляли о близости разлива, и исполнение этого предсказания создавало им репутацию людей, находящихся в сношениях с богами. «Необходимость вычислять периоды разлива Нила создала египетскую астрономию, а вместе с тем господство касты жрецов как руководителей земледелия» (К. Маркс и Ф. Энгельс, Сочинения, т. XVII, стр. 562).

Подобным же образом задолго до начала нашей эры у древних вавилонян, китайцев и других народов появились астрономы-специалисты, обязанные регулярно наблюдать и даже предсказывать небесные явления. Наблюдения они вели вначале без всяких инструментов: срисовывали фигуры созвездий, отмечали восходы и заходы более ярких светил, затмения, появления комет и т. п. Необходимые при этом расчёты велись также самыми грубыми способами.

Но с развитием экономического базиса человеческого общества и его политических и идеологических надстроек перед астрономией выдвигались новые задачи, требовавшие более совершенных способов наблюдений и вычислений.

Постепенно создаются простейшие астрономические инструменты, которые со временем усложняются. Совершенствуются математические способы вычислений, необходимые для развития астрономии. Уже в древней Греции астрономия была одной из наиболее развитых наук, обобщившей достижения народов с более древней культурой, главным образом вавилонян и египтян.

С крушением древнегреческой демократии науки в Греции постепенно приходят в упадок, и дальнейшим своим развитием астрономия обязана учёным Кавказа, среднеазиатских стран, ныне входящих в состав Советского Союза, и арабским астрономам, систематизировавшим в X—XIV вв. достигнутые астрономией результаты.

В мрачную эпоху средневековья в экономической, политической и научной жизни феодальной Европы наступил полный застой. Астрономия, как и другие науки, пришла в совершенный упадок — было забыто даже учение древнегреческих астрономов о шарообразности Земли. Пышным цветом в Европе расцвела астрология — наукообразное мракобесие, утверждавшее, что жизнью обитателей Земли управляет изменение положений планет и созвездий. Но работы среднеазиатских, кавказских и арабских учёных по наблюдениям планетных движений подготовили материал, который послужил основой революции в астрономии. Революция эта была произведена выдающимся славянским учёным Николаем Коперником, опубликовавшим в 1543 г. свой многолетний труд

«Об обращениях небесных тел». Революция в астрономии была обусловлена экономическим развитием Европы в период, когда в недрах феодального строя складывались капиталистические отношения. Нарождался и креп новый класс — буржуазия, которая в погоне за прибылью вела торговлю с дальними странами, снаряжала экспедиции для открытия новых земель с целью их эксплуатации. Складывавшиеся капиталистические отношения требовали развития и использования наук и в первую очередь астрономии, математики и механики. Возросла точность наблюдений небесных светил, которая показала ложность учения о неподвижности Земли. Взамен старого, прогнившего учения о центральном положении Земли во вселенной, Коперником было выдвинуто революционное учение о движении Земли, послужившее началом современной астрономии.

Развитие мореплавания показало всю важность астрономии для экономической жизни, и во всех странах стали создаваться астрономические обсерватории, причём содействие мореплаванию и геодезии ставилось одной из основных задач их работы.

Но перед астрономией возникли новые задачи по исследованию движений и физической природы небесных тел.

Бессмертные работы Галилея (XVII в.), впервые применившего в астрономии зрительную трубу и заложившего основы современной механики, открытие законов движения планет (Кеплер, начало XVII в.) и объяснение этих законов более общим законом всемирного тяготения (Ньютон, конец XVII в.) вызвали небывалый расцвет астрономии. Открытие великим русским учёным М. В. Ломоносовым атмосферы на Венере и другие его астрономические работы положили начало изучению *физической* природы мировых тел. Работы члена Петербургской Академии наук Л. Эйлера в очень большой мере способствовали развитию небесной механики.

Свержение феодального строя и утверждение политического господства буржуазии в передовых странах Европы того времени вызвало в конце XVIII в. и начале XIX в. новый скачок в развитии астрономии. Возникают и развиваются новые отделы, выросшие к настоящему времени в специальные отрасли науки: развивается небесная механика, трудами английского астронома В. Гершеля и русского академика В. Я. Струве положено начало звёздной астрономии, появляется астрофизика, сделавшая к концу XIX в. большие успехи благодаря блестящим работам русских учёных и в первую очередь академиков Ф. А. Бредихина и А. А. Белопольского. В начале XX в. астрономия, в основном сравнительно глубоко изучившая солнечную систему, смогла перейти к такому же углублённому изучению звёздного мира. Этому содействовало развитие астрономической инструментальной техники.

Но капитализм, вступивший в конце XIX — начале XX вв. в последнюю стадию своего развития, империалистическую, характеризующуюся загниванием и общим упадком, резко затормозил развитие наук,

в особенности таких, как физика и астрономия, которые помогают выработке правильного научного мировоззрения.

В настоящее время в капиталистических странах, особенно в фашизирующихся США и Англии, астрономия снова приходит в упадок, всё более и более смыкаясь с религией и самой открытой мистикой. Регресс науки в странах империализма доходит до того, что там снова начинают проповедываться «идеи» неподвижности Земли, её центрального положения во вселенной и конечности мира, как это было в мрачную эпоху средневековья в феодальной Европе. Вновь получает широкое распространение астрология.

И только в Советском Союзе, народы которого сбросили с себя иго капитализма, астрономия быстро и уверенно идёт вперёд, успешно исследуя окружающий нас мир с помощью марксистского диалектического метода познания.

В странах народной демократии, народы которых следуют по пути Великого Советского Союза, астрономия также начинает делать свои первые успехи в правильном изучении вселенной на основе марксистско-ленинской философии диалектического материализма.

**§ 9. Астрономия в России.** Русские летописцы, по словам историка Карамзина, «были в России первыми наблюдателями тверди небесной, замечая с великой точностью явления комет, солнечные и лунные затмения». Изучение сделанных ими записей небесных явлений действительно доказывает «великую точность» русских наблюдений в сравнении с сообщениями западноевропейских хронистов. Некоторые из этих наблюдений и сейчас имеют научную ценность (наблюдения затмений, появлений кометы Галлея в XIII в. и др.).

В X в. вместе с «православной» христианской религией в Киевскую Русь проникла из Византии реакционнейшая система мира греческого монаха Козьмы Индикоплова, согласно которой Земля имеет приблизительно форму плоского прямоугольника, со всех сторон окружённого океаном; за океаном — рай, окружённый стенами, которые наверху сходятся в виде купола, небесного свода. С системой Птолемея (§ 144) русские ознакомились лишь в XVI в., когда уже появилась книга Коперника, а первая переводная книжка о коперниканской системе вышла в России только в середине XVII в., т. е. с опозданием более чем на сто лет. Положительным явлением на Руси было необычайно слабое распространение астрологии.

Русская астрономия как наука возникла в середине XVII в., когда беломорские поморы начали разрабатывать и применять астрономические методы ориентировки. В 1692 г. помором А. Любимовым была основана в Холмогорах первая русская астрономическая обсерватория для обслуживания потребностей мореходства. В 1701 г. в Москве Петром I была создана школа, готовившая морских астрономов и картографов, а затем (1725 г.) в Петербурге — Академия наук с астрономической обсерваторией. С этих пор науки в России, в том числе и астрономия, стали быстро развиваться.

Академия наук была в начале не только научным учреждением, но также и высшим учебным заведением и быстро подготовила первые отечественные научные кадры. Величайшим из питомцев академического университета был М. В. Ломоносов, первый русский академик, сделавший и в астрономии ряд выдающихся открытий.

В 1755 г. в Москве был основан первый университет, ныне с гордостью носящий имя его великого основателя М. В. Ломоносова.

Русские астрономы XVIII в. провели грандиозные работы по геодезической съёмке нашей страны. К 1783 г. академическими экспедициями были определены географические широты и долготы более 60 астрономических пунктов; ни в одной стране мира подобные работы не проводились в таких больших масштабах, хотя условия для них там были несравненно благоприятнее.

В XIX в. началось создание ряда университетских астрономических обсерваторий, и развитие астрономии в России пошло более быстрыми темпами. Основание (1839 г.) одной из величайших в мире Пулковской обсерватории, заслуженно завоевавшей своими точными определениями положений звёзд звание «астрономической столицы мира», содействовало быстрому развитию в России астрономии, геодезии, географии. В России возникает и развивается ряд новых отраслей астрономии: звёздная астрономия, астрофизика и кометная астрономия (Ф. А. Бредихин). В России было положено начало успешному применению спектрального анализа к исследованию вращения небесных тел (А. А. Белонольский), фотографическому исследованию Солнца (А. П. Ганский, С. К. Костинский и др.).

В начале XX века в Пулкове Г. А. Тихов впервые провёл исследования планет с помощью светофильтров. Впоследствии эти работы привели его к выводу о существовании растительности на Марсе (см. § 246). Московский астроном С. Н. Блажко впервые в истории астрономии получил и исследовал спектры метеоров.

Но, несмотря на эти крупные работы, развитие астрономии в России тормозилось реакционным царско-помещичьим строем, вместе с духовенством душившим прогрессивные силы России. Развитие науки о Вселенной было бесплановым, случайным, обязанным лишь воле, энергии и уму выдающихся русских учёных, тем более, что оптико-механической промышленности в России не существовало, и все астрономические инструменты ввозились из-за границы.

**§ 10. Астрономия в СССР.** Великая Октябрьская социалистическая революция в корне изменила положение науки в нашей стране. Установив свободный народный социальный строй и превратив труд «в дело чести, в дело славы, в дело доблести и героизма» (И. Сталин, Сочинения, т. 12, стр. 315), Великая Октябрьская социалистическая революция всколыхнула и подняла к политической, хозяйственной, культурной и научной жизни многомиллионные массы трудящихся Советского Союза.

Наука и техника в СССР сделали в своём развитии гигантский скачок вперёд. Быстрыми темпами развивается и советская астрономия. В научную жизнь страны влились новые, свежие кадры, вышедшие из глубоких слоёв народа.

За годы Советской власти в нашей стране создано 20 новых астрономических обсерваторий, в то время как в царской России их было всего 15. Создана сеть научно-исследовательских институтов, развивающих астрономию трудами научных коллективов (а не одиночек). На базе общей индустриализации страны развилась молодая советская опτικο-механическая промышленность, ныне снабжающая астрономов высококачественным астрономическим оборудованием.

Развитие советской астрономии идёт по путям, коренным образом отличающимся от путей развития буржуазной астрономии.

В своей работе советские астрономы руководствуются марксистско-ленинской философией; изучение природы ведётся диалектическим методом познания.

Для советской астрономии характерна плановость развития, обусловленная руководством Астрономического совета Академии наук СССР. Научно-исследовательские астрономические институты и обсерватории ныне в основном специализированы и ведут работу по заранее составленному плану. При разработке планов учитываются запросы строительства коммунизма в нашей стране. Работы ведутся коллективно, особенно при разрешении крупных научных проблем. В практику работы астрономических учреждений и коллективов широко внедряется большевистская критика и самокритика.

Советские астрономы проявляют большевистскую непримиримость к вражеской идеалистической идеологии и ведут беспощадную борьбу даже с малейшими её проявлениями.

Ведётся систематическая подготовка специалистов-астрономов в университетах и аспирантуре. Множество астрономов-любителей привлекается к научной работе в школьных астрономических кружках и секциях Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО) при Академии наук СССР.

Советские астрономы проводят широкую и всестороннюю пропаганду астрономических знаний среди народных масс, принимают повседневное участие в работе по коммунистическому воспитанию граждан нашей страны.

Астрономы Советского Союза чувствуют повседневную заботу, поддержку и помощь со стороны Коммунистической партии, Советского Правительства и лично товарища Сталина, ярко проявляющиеся в строительстве новых астрономических обсерваторий, в присуждении Сталинских премий за выдающиеся работы советской астрономической мысли.

Астрономия успешно развивается во всех республиках, входящих в состав Советского Союза, астрономы которых внесли ценный вклад в науку о вселенной.



Новая обсерватория в Ереване (Армянская ССР) завоевала себе прочный авторитет первоклассными работами по изучению тёмной материи и звёздных скоплений; Абастуманская обсерватория (Грузинская ССР) выделилась исследованиями структуры нашей звёздной системы (Галактики); обсерватория в Алма-Ате (Казахская ССР) добилась крупных успехов в изучении планеты Марс и выполнила замечательные работы по исследованию земной атмосферы; Сталинабадская обсерватория (Таджикская ССР) известна глубокими исследованиями метеорной материи; Киевская университетская обсерватория (Украинская ССР) ведёт обширные исследования Солнца, комет и малых планет; множество работ по изучению планет было проведено на Харьковской обсерватории. Работы обсерваторий Российской Федерации (Пулково — ГАО; Москва — ГАИШ; Казань — обсерватория им. Энгельгардта и др.) обеспечили советской астрономии ведущую роль в области изучения переменных звёзд, комет, астероидов, создания точнейших каталогов звёзд и прекрасной организации службы времени.

**§ 11. Борьба материализма против идеализма в астрономии.** Правильные представления о строении и развитии вселенной создавались в упорной борьбе материалистического лагеря в философии против идеализма.

Классическое определение этих двух принципиально непримиримых лагерей дал Ф. Энгельс в «Людвиге Фейербахе»:

«Философы разделились на два больших лагеря... Те, которые утверждали, что дух существовал прежде природы, и которые, следовательно, в конечном счёте, так или иначе признавали сотворение мира... составили идеалистический лагерь. Те же, которые основным началом считали природу, примкнули к различным школам материализма» («Людвиг Фейербах и конец классической немецкой философии», К. Маркс и Ф. Энгельс, Избранные произведения, изд. 1948 г., т. II, стр. 350). Неправильные, идеалистические представления о вселенной родились на заре человечества, когда люди не понимали многих явлений природы, и для объяснений этих явлений придумывали духов и богов, якобы управляющих людьми по своему усмотрению. С развитием классового общества эти фантастические представления о мире были использованы правящими классами в целях эксплуатации и подчинения трудящихся.

Так возникла религия, являющаяся в классовом обществе духовным орудием порабощения трудящихся масс, задача которой — внушить трудящимся мысль об их бессилии в борьбе против эксплуататорского строя. Религия является наиболее открытой формой идеализма, «который считает мир воплощением „абсолютной идеи“, „мирового духа“, „сознания“» (И. Сталин, Вопросы ленинизма, изд. 11-е, стр. 541).

В противоположность идеализму материализм считает первичной вечно существующую и неуничтожимую материю и доказывает отсутствие в мире сверхъестественных сил.

Эти два направления философии всегда отражали (и отражают поныне) классовые интересы социальных групп общества.

Реакционные классы, сходящие со сцены мировой истории, стремясь удержаться у власти, всегда обращаются за помощью к идеализму, к религии.

Наоборот, революционные классы, призванные низвергнуть старые общественные отношения, своим действующим орудием выбирают материализм. Высшего своего развития материализм достиг в марксистско-ленинской философии, которая является законченным, стройным и цельным, единственно правильным научным мировоззрением, развитым гениальными трудами Маркса, Энгельса, Ленина и Сталина.

Одним из первых философов-материалистов был греческий учёный Демокрит (V—IV вв. до н. э.), который учил, что «ничто из ничего не бывает, ничто из того, что есть, не может быть уничтожено».

Греческие астрономы, последователи Демокрита, выдвинули учение о движении Земли (Аристарх, III в. до н. э.). Но замечательные мысли древнегреческих материалистов были задушены средневековой реакцией и не получили дальнейшего развития. Вспомнили о них лишь через полторы тысячи лет. Появление гениального учения Коперника о движении Земли нанесло сильный удар идеализму и явилось подлинно революционным актом в развитии астрономии.

Прекрасно понимая, что материалистическое учение Коперника подрывает основы идеализма, религии и приводит к расшатыванию позиций правящего класса, церковь объявила беспощадную войну коперниканству. Особенно усердствовала в преследовании нового учения и учёных-материалистов католическая церковь. Несмотря на жестокие преследования со стороны мракобесов, развивающаяся астрономия наносила удар за ударом лженаучным фантастическим представлениям о мире и раскрывала перед человечеством истинную картину вселенной. Смертельные удары идеализму наносит советская астрономия.

На современном этапе развития астрономии буржуазные учёные, слуги англо-американского империализма, пытаются пока ещё не объяснённые научкой явления трактовать как проявление мудрости и всемогущества бога или «мирового духа». Снова выдвигаются идеи о конечности вселенной, о сотворении мира из единого «атома-отца». Основываясь на идеалистической трактовке «красного смещения» в спектрах далёких звёздных систем (см. § 330), которое астрономы-идеалисты стараются истолковать как разбегание галактик во все стороны от Земли, они выдвигают «теорию» конечной расширяющейся вселенной.

Советская астрономия вскрыла истинную, классовую сущность этого «учения» идеалистов, показав ложность и абсурдность их выводов, справедливо указала на целый ряд причин, которые материалистически могут объяснить «красное смещение». Работы советских учёных показали абсурдность утверждения о едином возрасте всех звёзд, показали, что звёзды образуются и в наше время,

Современные реакционеры от науки стремятся доказать «божественное» происхождение планетной системы и её исключительное положение во вселенной. Советские учёные разоблачили идеалистическую сущность этих попыток и выдвинули новые материалистические гипотезы о закономерном происхождении планет.

В наше время, когда мир открыто раскололся на два лагеря — на лагерь мира, демократии и социализма во главе с Советским Союзом и лагерь войны, реакции и империализма во главе с правящими кругами США и Англии, борьба на идеологическом фронте приобрела особенно острое и важное значение. И задача советской астрономии заключается в том, чтобы беспристрастно вскрывать и разоблачать идеалистические выверты слуг империализма в астрономии и убедительно раскрывать справедливость и величие марксистско-ленинской философии, приведшей нас к правильному познанию окружающего нас мира и направляющей наше дальнейшее исследование вселенной.

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### НЕБЕСНАЯ СФЕРА И ЕЁ ВРАЩЕНИЕ

**§ 12. Небесный свод и небесная сфера.** В каком бы месте земной поверхности мы ни находились, мы неизменно видим над собой небо в форме громадного *свода*, на внутренней поверхности которого расположены Солнце, Луна, звёзды. Этот свод представляется нам половинной *сферы*, т. е. шара, и куда бы мы ни переместились, всегда кажется, что мы остаёмся в его центре. Можно подумать, что над Землёй на самом деле возвышается какой-то гигантский голубой купол, на внутренней поверхности которого находятся светила. Так и думали все древние народы.

Но это неверно. Впечатление шаровой поверхности создаётся от того, что наши глаза не могут различить, какие из небесных светил ближе к нам, какие дальше; поэтому мы бессознательно относим все светила на одинаковое расстояние от нас и представляем себе, что все они расположены на поверхности какой-то сферы, в центре которой всегда находится наблюдатель. То же рассуждение относится и к точкам голубого дневного неба. Уже давно известно, что светила находятся на самых различных расстояниях и что никакой *твёрдой сферы* на самом деле нет; тем не менее наука сохранила *воображаемую* сферу как вспомогательное средство для изображения видимых небесных движений. На этой сфере отмечаются воображаемые точки и линии, и относительно них определяется видимое положение светил.

**§ 13. Голубой цвет небесного свода.** Так называемого неба, собственно говоря, не существует; существуют только отдельные светила, движущиеся в беспрельном пространстве. Тот голубой небесный свод, который виден днём, есть земная атмосфера. Она окутывает земной шар сравнительно тонким слоем толщиной около одной тысячи километров, а дальше простирается безвоздушное мировое пространство.

Атмосфера не вполне прозрачна: молекулы воздуха, а также пылинки и капельки водяного пара рассеивают падающий на них солнечный свет, т. е. разбрасывают его по всем направлениям. При этом лучи разных цветов рассеиваются неодинаково, в зависимости от размеров освещаемых частиц. При тех размерах, которые имеют молекулы воздуха, рассеиваются преимущественно голубые лучи. Происходящее от этого освещение атмосферы настолько сильно, что мешает нам видеть звёзды днём. Если бы атмосферы не было, дневное небо казалось бы совершенно чёрным, и звёзды были бы видны в любое время суток. Таким образом, голубое «небо» — это не задний «фон», на котором разыгрываются небесные явления, а передний полупрозрачный «занавес».

**§ 14. Свойства небесной сферы.** Круги и точки небесной сферы необходимо для полного уяснения отмечать и находить не только на чертеже, но и на звёздном небе. Поэтому для начинающего наиболее удобно следующее представление небесной сферы.

Вообразим вокруг нас сферу, радиус которой произволен, но гораздо больше расстояния самой далёкой видимой нами звезды; такой радиус для краткости иногда называют сколь угодно большим. Вследствие таких больших размеров всякое перемещение наблюдателя будет незаметно в сравнении с радиусом сферы, и наблюдатель всегда будет оставаться в её центре ( $O$ ). На поверхность этой сферы мы проецируем светила  $A, B, D, \dots$ , продолжая до пересечения со сферой прямые, проведённые к светилам из глаза наблюдателя. Проекция светила  $a, b, d, \dots$  на сферу даст нам *видимое положение* светила (рис. 1).

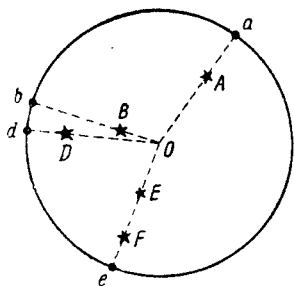


Рис. 1.

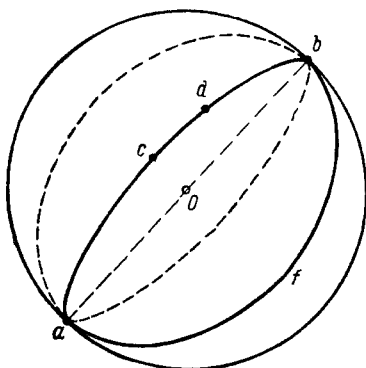


Рис. 2.

Из условия, что всякое доступное нам расстояние исчезающе мало в сравнении с размерами сферы, вытекает важное свойство небесной сферы: система параллельных линий, продолженных в одном направлении, пересекается со сферой в *одной точке*.

Кроме того, небесная сфера обладает всеми свойствами шара, известными из геометрии. Перечислим те свойства, которые нам понадобятся:

1) Плоскость, проведённая через центр сферы, делит её на две полусферы (полушария) и пересекает поверхность сферы по *большому кругу*, радиус которого равен радиусу сферы.

2) Через две точки ( $c$  и  $d$ , рис. 2) поверхности сферы, не лежащие на одном диаметре, можно провести только один большой круг ( $acdb$ ).

3) Два больших круга всегда пересекаются и притом в двух диаметрально противоположных точках ( $a$  и  $b$ , рис. 2); параллельных больших кругов быть не может.

Выгода введения небесной сферы. Когда мы желаем выразить числами относительное положение *двух* светил, расстояния

которых неизвестны, то единственное, что мы можем измерить, это угол между направлениями к этим светилам.

Но гораздо удобнее, спроектировав эти светила на небесную сферу, рассматривать вместо угла между направлениями *дугу* большого круга на сфере между их проекциями. Если у нас *три* направления ( $OA$ ,  $OB$  и  $OC$ ), то вместо того, чтобы рассматривать трёхгранный угол между ними, проще получить три проекции данных направлений на сферу ( $a$ ,  $b$  и  $c$ ) и рассматривать «сферический» треугольник  $abc$ , образованный этими тремя точками и дугами больших кругов между ними (рис. 3).

**Замечание.** Можно дать другое определение небесной сферы. Небесной сферой называется сфера произвольного радиуса, описанная из произвольной точки пространства. Из центра этой сферы проводят прямые, *параллельные* направлениям на светило или вообще тем направлениям, которые рассматриваются в данной задаче. Пересечение каждого из этих направлений с поверхностью сферы даёт вполне определённую точку. Однако такую сферу лучше называть не «небесной», а *вспомогательной* сферой.

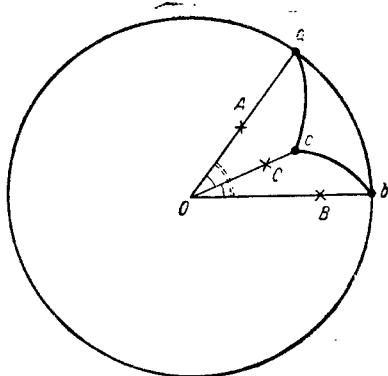


Рис. 3.

**§ 15. Вращение небесной сферы.** Наблюдения показывают, что вид ночного неба всё время изменяется: западные созвездия мало-помалу опускаются и некоторые из них совсем заходят; наоборот, восточные созвездия постепенно поднимаются, и на их месте появляются новые, которые раньше не были видны.

При этом отдельные звёзды не отстают и не уходят одна от другой, и фигуры созвездий не изменяются. Движение происходит так, как будто звёзды укреплены неподвижно на определённых местах небесного свода, а самый свод плавно вращается как одно целое, как **твёрдый шар**. Так как небесный свод совершает одно обращение за *сутки* (точное понятие суток будет определено дальше), то это движение называется *суточным вращением*.

У всякого вращающегося шара должна быть *ось вращения*, т. е. прямая линия, все точки которой остаются неподвижными. Есть такая воображаемая ось и у небесного свода; она называется *осью мира*. Эта ось проходит через центр сферы, т. е. через глаз наблюдателя; с небесной сферой она пересекается в двух диаметрально противоположных точках — *полюсах мира*. Положение полюса мира на небе легко определить из наблюдений. Если бы в полюсе находилась какая-нибудь звезда, то она оставалась бы неподвижной. Такой звезды

нет, но очень близко к одному из полюсов (северному) находится довольно яркая звезда из созвездия Малой Медведицы. При наблюдении невооружённым глазом она кажется стоящей всегда на одном месте. Эта звезда, называемая *Полярной звездой*, указывает приблизительно положение *северного* полюса мира. Противоположный ему *южный* полюс мира в северном полушарии Земли не виден.

Звёзды благодаря суточному движению описывают круги различной величины; чем ближе звезда к полюсу мира, тем меньше её *суточный круг*. Суточные круги всех светил параллельны между собой;

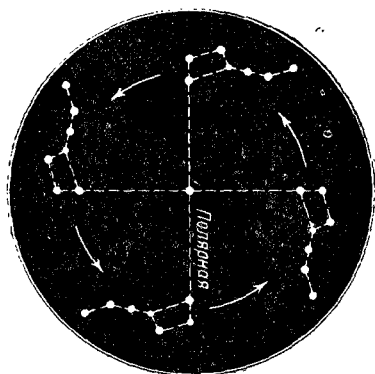


Рис. 4.

поэтому их называют обыкновенно *суточными параллелями*. Круги околополярных звёзд целиком помещаются над горизонтом, и звёзды эти, таким образом, никогда не заходят. Пример созвездия, не заходящего в наших широтах, представляет Большая Медведица (рис. 4). В любой день и час после захода Солнца можно найти на небе эту характерную фигуру «ковшика» из семи звёзд. То она располагается невысоко вдоль северного горизонта, то, наоборот, у самого зенита; «ручка ковша» («хвост» Б. Медведицы) бывает направлена то вниз, то вверх. Но Полярная звезда остаётся почти неподвижной; мы её всегда найдём, проведя прямую линию через две крайние звёзды Б. Медведицы, обозначаемые буквами  $\alpha$  и  $\beta$ .

Направление *суточного движения*, или направление «по Солнцу», общезвестно. Все определения этого направления, как, например, «вращение по часовой стрелке», «с востока на запад», «слева направо», в некоторых случаях могут оказаться неверными. Так, вращение околополярных звёзд для наблюдателя в северном полушарии Земли происходит, как видно из рис. 4, *против* часовой стрелки, причём звёзды под полюсом движутся *с запада на восток*, а звёзды над полюсом — *справа налево*. Тем не менее все выше приведённые определения можно употреблять с соответствующими оговорками.

§ 16. Основные точки и круги небесной сферы. Основное направление даёт *вертикальная*, или *отвесная*, линия, по которой направлена сила тяжести в данном месте. Точка, в которой пересекается с небесной сферой вертикальная линия, продолженная вверх, называется *зенитом*. Точка, противоположная зениту, носит название *надир* (оба названия — арабские).

Плоскость, проведённая через глаз наблюдателя (центр сферы) перпендикулярно к вертикальной линии, называется *горизонтальной* плоскостью. Продолжим эту плоскость во все стороны до пересечения

с небесной сферой; по свойству сферы эта плоскость пересечётся с ней по большому кругу. Большой круг, по которому горизонтальная плоскость пересекается с небесной сферой, называется математическим или *истинным горизонтом*.

Не следует смешивать с истинным горизонтом *видимый горизонт*, т. е. линию, по которой «небо сходится с землёй». Видимый горизонт на суше есть неправильная линия, точки которой лежат то выше, то ниже истинного горизонта. В открытом море видимый горизонт всегда круг, лежащий ниже истинного горизонта и параллельный ему, т. е. это уже не большой круг небесной сферы, а малый.

Небесную сферу можно изобразить на чертеже так же, как изображают всякий шар. Для наблюдателя, всегда находящегося в центре сферы  $O$ , большой круг  $SWNE$  будет представлять собой горизонт,  $Z$  и  $Z'$  — точки зенита и надира (рис. 5).

Наблюдателю видно только верхнее полушарие небесной сферы; нижнее, под горизонтом, закрыто от него Землёй.

Для ясного понимания рис. 5 и подобных ему необходимо помнить, что все они изображают сферу, как она представлялась бы, если бы на неё смотреть снаружи. Между тем в действительности *наблюдатель всегда находится в центре сферы и видит её изнутри*.

Второй основной точкой является северный полюс мира  $P$  (см. § 15). Если провести через полюс  $P$  и зенит  $Z$  большой круг, то мы получим *небесный меридиан*; он пересекается с горизонтом в точках, которые называются точками *севера* ( $N$ ) и *юга* ( $S$ ).

Плоскость меридиана перпендикулярна к плоскости горизонта; линия пересечения этих двух плоскостей  $NOS$  называется *полуденной линией*. На ней лежат точки севера и юга. Прямая, проведённая через центр сферы в плоскости горизонта перпендикулярно к полуденной линии, пересекается с горизонтом в точках *востока* и *запада* ( $E$  и  $W$ , рис. 5).

Каждое светило проходит через меридиан два раза в сутки: 1) к югу от полюса, когда светило занимает самое высокое положение (*верхняя кульминация*), и 2) к северу от полюса (*нижняя кульминация*, самое низкое положение светила).

*Небесным экватором* называется большой круг  $QQ'$ , проведённый на одинаковом расстоянии от обоих полюсов. Его плоскость перпендикулярна к оси мира. С горизонтом экватор пересекается в точках

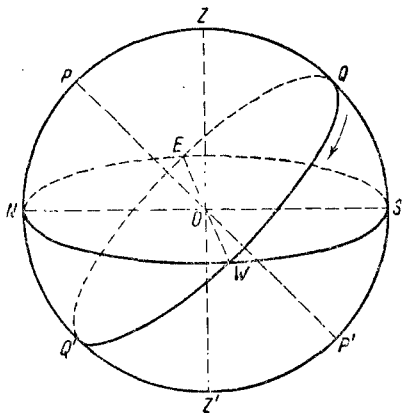


Рис. 5.



востока и запада —  $E$  и  $W$  (рис. 5); небесную сферу он делит на два полушария — северное и южное.

Суточные параллели звёзд (§ 15), очевидно, параллельны небесному экватору.

### § 17. Вращение небесной сферы как следствие вращения Земли.

Вращение небесной сферы есть явление кажущееся; в действительности вращается не вся вселенная с востока на запад, а вращается наш земной шар с запада на восток. Так называемая «ось мира» параллельна оси вращения земного шара, а плоскость небесного экватора параллельна плоскости земного экватора.

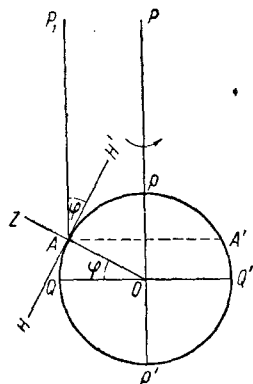


Рис 6.

Выяснить это можно по рис. 6. В виде круга здесь изображена Земля. Круг  $pQp'$  представляет один из земных меридианов,  $pp'$  — ось Земли,  $QQ'$  — земной экватор. Небесную сферу пришлось бы изобразить кругом сколь угодно большого радиуса. Северный полюс мира  $P$  пришёлся бы на этом круге на продолжении прямой  $p'p$  (вверху).

Пусть наблюдатель находится на северном полюсе Земли в точке  $p$ . Для него полюс мира  $P$  будет совпадать с зенитом. Вследствие вращения Земли около оси  $OP$  наблюдателю будет казаться, что весь небесный свод вращается в обратном направлении вокруг точки  $P$ , т. е. вокруг зенита.

Пусть теперь наблюдатель находится на поверхности Земли в точке  $A$ , имеющей широту  $\varphi$ . Для него зенит виден по направлению  $AZ$ , а полюс мира — по направлению  $AP_1$ , параллельному  $OP$ . Вследствие вращения Земли наблюдатель в течение суток описывает круг, параллельный экватору, с диаметром  $AA'$  (перпендикулярный к плоскости чертежа). Поступательное движение по этому кругу, например перенос наблюдателя в течение полусуток из  $A$  в  $A'$ , остаётся для него незаметным, так как размеры земного шара ничтожны в сравнении с расстояниями светил; поэтому полюс мира для него не изменит своего положения среди звёзд ( $AP \parallel AP_1$ ). Перемещение по кругу  $AA'$  всё время сопровождается вращением наблюдателя; так, через полсуток он поворачивается лицом в противоположную сторону, т. е. на  $180^\circ$ . Только это вращательное движение он и замечает. Так как он считает себя неподвижным, то осью вращения для него будет не  $OP$ , а параллельная ей прямая  $AP_1$ , проходящая через место наблюдения. Она пересекается с небесной сферой в той же точке, что и ось вращения Земли  $OP$  (§ 14). Таким образом, и для этого наблюдателя кажущееся вращение неба будет происходить вокруг полюса мира. Но теперь полюс мира не будет совпадать с зенитом. Его положение определяется следующей важной теоремой.

**Теорема:** В каждой точке земной поверхности высота полюса над горизонтом равна географической широте места. Доказательство очевидно из рис. 6, на котором прямая  $NN'$  указывает положение плоскости горизонта наблюдателя  $A$ , находящегося на широте  $\varphi$ . Угол  $P_1AN'$ , измеряющий высоту полюса, равен углу  $AOQ$ , т. е. широте  $\varphi$ , так как стороны их взаимно перпендикулярны.

**§ 18. Суточное вращение неба на разных широтах.** Условия вращения небесной сферы изменяются с изменением географической широты места ( $\varphi$ ), так как в разных широтах наклон оси мира имеет различную величину.

а) На земном полюсе [ $\varphi = 90^\circ$ ; рис. 7 (1)]. Для наблюдателя на северном полюсе Земли северный полюс мира ( $P$ ) совпадает с зенитом ( $Z$ ), а небесный экватор ( $QQ'$ ) — с горизонтом. Все звёзды северного небесного полушария описывают суточные круги, например,  $AA'$ , параллельные горизонту. Ни одна из них не только не заходит и не восходит, но даже не изменяет своей высоты. Зато все звёзды южного полушария не видны.

б) На земном экваторе [ $\varphi = 0$ ; рис. 7 (2)]. Северный полюс мира ( $P$ ) здесь лежит на горизонте, в точке севера ( $N$ ), а южный

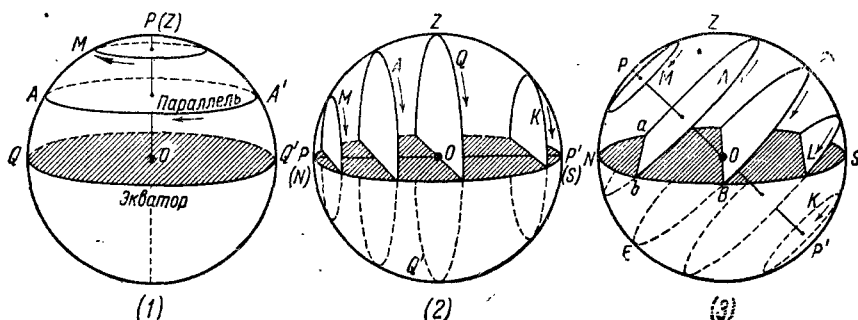


Рис. 7.

полюс ( $P'$ ) — в точке юга ( $S$ ). Небесный экватор ( $QQ'$ ) проходит через зенит ( $Z$ ); все суточные круги звёзд перпендикулярны к плоскости горизонта. Поэтому все светила восходят и заходят перпендикулярно к горизонту, видны в течение 12 часов и столько же часов не видны. Очевидно, на земном экваторе можно видеть все звёзды обоих небесных полушарий (плохо видны только оба полюса).

в) Между полюсом и экватором [ $0 < \varphi < 90^\circ$ ; рис. 7 (3)]. Ось мира наклонена к горизонту под углом  $\varphi$ . В северных широтах полюс мира  $P$  близок к зениту; при перемещении наблюдателя в более южные широты полюс  $P$  опускается, и наблюдатель видит всё больше и больше звёзд южного неба.

Суточные круги звёзд на широтах, близких к полюсу, наклонены к горизонту под очень острыми углами. Поэтому светила при восходе

поднимаются по очень отлогим путям, сильно уклоняясь к югу. Подобным же образом происходит и заход светил. В низких широтах суточные пути светил образуют с горизонтом углы, более близкие к прямому; восходящие светила поднимаются круто вверх и скорее достигают значительной высоты, чем под высокими широтами.

**§ 19. Звёзды незаходящие и звёзды невосходящие.** Если наблюдатель, находящийся в северном полушарии Земли, опишет около северного полюса мира, как около центра, на сфере круг ( $NK$ ), касающийся горизонта (в точке севера  $N$ ), то все звёзды внутри него будут *незаходящими* <sup>1)</sup> (рис. 8).

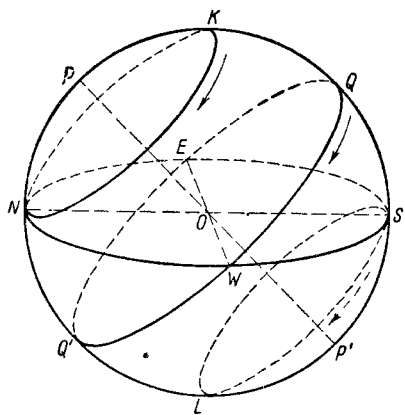


Рис. 8.

Светила, находящиеся на небе за пределами этого круга, часть своего суточного пути совершают под горизонтом; чем дальше звезда от полюса, тем больше невидимая часть её суточной параллели. При этом у звёзд, лежащих к северу от экватора (т. е. в северном небесном полушарии), невидимая часть суточного пути меньше видимой, и звёзды остаются над горизонтом больше полусуток; восходят

они к *северу* от точки востока и заходят к *северу* от точки запада. Звёзды, лежащие к югу от экватора (в южном небесном полушарии), наоборот, большую часть своего пути совершают под горизонтом; восходят они к *югу* от точки востока и заходят к *югу* от точки запада. Звёзды, лежащие на небесном экваторе, находятся над горизонтом ровно полусуток и столько же времени под горизонтом, так как плоскость горизонта делит экватор пополам; восходят они в точке востока, заходят в точке запада. У всех «*восходящих и заходящих*» звёзд можно наблюдать только верхнюю кульминацию; нижняя происходит под горизонтом.

Наконец, в южном полушарии неба существуют звёзды, которые весь свой суточный круг описывают под горизонтом. Круг  $LS$  этих *невосходящих* звёзд, центром которого является южный полюс мира, в точности равен кругу звёзд незаходящих (рис. 8). Как видно из рис. 8, радиус круга незаходящих (и невосходящих) звёзд равен высоте полюса мира над горизонтом.

<sup>1)</sup> Для наблюдателя, находящегося в южном полушарии Земли, соответствующие круги описываются около южного полюса, и кругом незаходящих звёзд будет круг, касающийся горизонта в точке юга.

Таким образом, вблизи географических полюсов Земли радиус круга незаходящих (невосходящих) звёзд близок к  $90^\circ$ , а при движении к экватору он уменьшается до нуля.

**§ 20. Измерения на небесной сфере.** Чтобы точно отметить положение светила на небесной сфере, надо это положение выразить *числами*, которые получаются в результате некоторого *измерения*. Непосредственные наблюдения дают нам только *направления* к светилам или к их проекциям на небесную сферу; разные направления образуют между собой некоторый *угол*. Поэтому все астрономические измерения представляют собой *измерение углов*, и большинство астрономических инструментов является, в сущности, *угломерными приборами*.

При астрономических измерениях приходится решать такие задачи: 1) измерить *видимый* диаметр какого-нибудь светила; 2) измерить *видимое* расстояние между двумя точками небесной сферы, например, между двумя звёздами, между звездой и зенитом, звездой и полюсом; 3) измерить *видимое* расстояние между звездой и каким-нибудь кругом небесной сферы, например, расстояние звезды от горизонта.

Все эти расстояния должны измеряться в угловых (или дуговых) мерах, в градусах, минутах и секундах, так как здесь измеряется не длина, а угол. Полезно запомнить, что угловой диаметр Луны равен в среднем  $31'$ , т. е. около  $1\frac{1}{2}^\circ$ . Угловой диаметр Солнца приблизительно такой же. Угловое расстояние двух звёзд  $\alpha$  и  $\beta$  Большой Медведицы (рис. 4) около  $5^\circ$ , расстояние первой из них от Полярной  $27^\circ$  и т. д.

Замечание. Угловые расстояния часто выражаются ещё в отвлечённой мере, в так называемых *радианах*. Радиан есть угол, измеряемый дугою, длина которой равна радиусу. Радиан содержит приблизительно

$$\frac{360^\circ}{\pi} = \frac{360^\circ}{3,1416} = 57^\circ 17' 45'' = 206\,265''.$$

Последнее число у нас будет часто встречаться. На него надо умножить угол, выраженный в радианах, чтобы выразить его в секундах.

**§ 21. Астрономические координаты.** Координатами называются числа, определяющие положение точки. Так, например, географические широта и долгота называются географическими координатами, так как посредством их выражается положение точки на земной поверхности. Существует несколько систем астрономических координат, с помощью которых определяется положение точек на небесной сфере. Системы эти отличаются одна от другой выбором основной плоскости и началом счёта. В каждой такой системе — всегда две координаты, одна из которых вполне аналогична земной широте, другая — долготе. В одних задачах удобнее употреблять одну систему координат, в других — другую.

§ 22. **Горизонтальные координаты.** Примем за основную плоскость горизонта  $SWNE$ ; основной точкой тогда будет зенит  $Z$  (рис. 9). Проведём через зенит  $Z$  и звезду  $M$  большой круг  $ZR$ . Все большие круги, проходящие через зенит, будут перпендикулярны к горизонту; они называются *вертикальными кругами* или просто *вертикалами*.

Очевидно, меридиан есть один из вертикалов. Перпендикулярный к меридиану вертикал, проходящий через точки востока и запада, называется *первым вертикалом*. Положение светила определяется двумя координатами: *высотой* и *азимутом*.

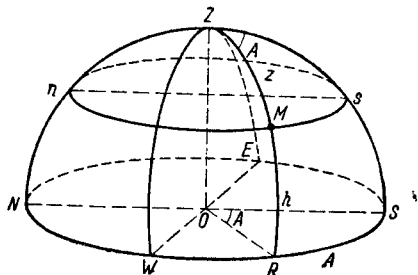


Рис. 9.

Высотой светила  $h$  (дуга  $RM$ ) называется его *угловое расстояние от горизонта*, измеряемое по вертикальному кругу. Вместо высоты часто употребляется зенитное расстояние  $z$ , т. е. угловое расстояние светила от зенита (дуга  $ZM$ ). Очевидно,  $h + z = 90^\circ$ . Все точки, лежащие на круге  $ns$ , параллельном горизонту  $SWNE$ , имеют одинаковую высоту.

Азимут  $A$  есть *угол при зените между меридианом и вертикалом* светила, т. е. угол  $SZM$ . Ещё удобнее измерять его дугой горизонта  $SR$  от точки юга до основания вертикала звезды. Азимут отсчитывается от точки юга к западу (по часовой стрелке), от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ <sup>1)</sup>. Иногда он отсчитывается в обе стороны от точки юга: западный азимут считается положительным, от  $0^\circ$  до  $+180^\circ$ , восточный — отрицательным, от  $0^\circ$  до  $-180^\circ$ . Все точки, лежащие на одном вертикале  $ZR$ , имеют одинаковый азимут.

Вследствие суточного вращения *обе* горизонтальные координаты непрерывно изменяются.

§ 23. **Первая система экваториальных координат.** Основной плоскостью здесь служит плоскость экватора  $EQW$  (рис. 10), которая соответствует плоскости горизонта предыдущей системы. Роль вертикала выполняет *круг склонения*, или *часовой круг*. Так называется круг, проведенный через звезду  $M$  и полюс  $P$ ; он, очевидно, перпендикулярен к экватору. Координатами здесь являются *склонение* и *часовой угол*.

Склонением светила называется его *угловое расстояние от экватора* ( $MR$ ), отсчитываемое по кругу склонения. Склонение к северу от экватора считается положительным, к югу — отрицательным. Полезно запомнить для дальнейшего, что Солнце, которое принадлежит к светилам,

<sup>1)</sup> В геодезии азимут отсчитывается от точки севера к востоку, т. е. тоже по часовой стрелке.

движущимся относительно звёзд (§ 2, б), в течение нашей весны и лета имеет положительное склонение, а осенью и зимой — отрицательное. Склонение обыкновенно обозначается греческой буквой  $\delta$  (дельта). Очевидно, склонение соответствует высоте в горизонтальной системе.

Часовой угол  $t$  есть угол  $ZPM$  при полюсе между *меридианом* и *кругом склонения* звезды. Его можно также измерять дугой экватора  $QR$  между плоскостью меридиана и плоскостью данного круга склонения. Обыкновенно он отсчитывается от южной части меридиана к западу, от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Если светило находится к востоку от меридиана, его часовой угол будет больше  $180^\circ$ .

Вследствие суточного вращения в этой системе изменяется только одна координата  $t$ : она растёт *равномерно*, и в течение суток, за 24 часа, изменяется от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Поэтому часовой угол обычно выражают не в градусах, а в часах ( $h$ ), минутах ( $m$ ) и секундах ( $s$ ) времени. При этом  $1^h$  соответствует  $15^\circ$ ,  $1^m$  соответствует  $15'$ ;  $1^s$  соответствует  $15''$ . Например,  $265^\circ = 17^h 40^m$ ;  $11^h 34^m = 173^\circ 30'$ .

**§ 24. Вторая система экваториальных координат.** Выгодно иметь такую систему, в которой *обе* координаты не изменялись бы от суточного вращения. Для этого предыдущую систему изменяют таким образом, чтобы начало счёта второй координаты участвовало в суточном вращении сферы. Так как вторую координату удобно измерять дугой экватора, то за начало счёта следует принять какую-нибудь точку небесного экватора. Наиболее удобной для этой цели является *точка весеннего равноденствия*, т. е. та точка небесного экватора, в которой Солнце переходит 21 марта, в день весеннего равноденствия, из южного небесного полушария в северное. В настоящее время она находится в созвездии Рыб и не отмечена никакой выдающейся звездой; тем не менее положение её точно известно. Эту точку обозначают знаком  $\Upsilon$  (не буквой). Она участвует в суточном вращении неба, как все другие точки экватора (объяснение знака  $\Upsilon$  см. § 180).

Первой координатой в новой системе остаётся склонение  $\delta$ ; вторая координата называется *прямым восхождением* и обозначается  $\alpha$ . Это — *угол при полюсе между часовым кругом звезды и часовым кругом точки весеннего равноденствия* (так называемым «равноденственным колюром» —  $P\Upsilon$ , рис. 10). Подобно часовому углу его можно измерить дугой экватора от точки весеннего равноденствия до основания часового круга звезды (угол  $\Upsilon PR$  или дуга  $\Upsilon R$ ).

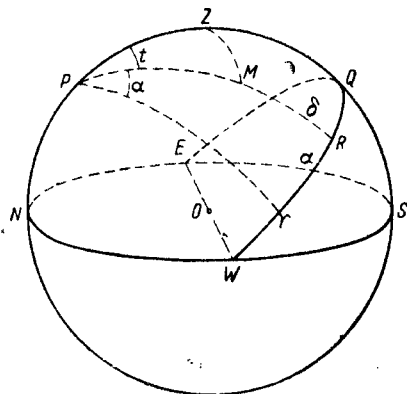


Рис. 10.

Прямое восхождение отсчитывается от точки весеннего равноденствия  $\Upsilon$  навстречу суточному вращению небесного свода, т. е. к востоку от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Большой частью его подобно часовому углу выражают в часах ( $h$ ), минутах ( $m$ ) и секундах ( $s$ ) времени.

**§ 25. Звёздное время и звёздные сутки.** *Часовой угол точки весеннего равноденствия*, выраженный в часах, минутах и секундах, называется звёздным временем (угол  $QP\Upsilon$ ). Когда точка  $\Upsilon$  находится в верхней кульминации, звёздное время равно 0; когда она отойдёт от меридиана к западу на  $15^\circ$ , будет  $1^h$  звёздного времени, затем  $2^h$ ,  $3^h$  и т. д., до  $24^h$ .

Промежуток времени, по истечении которого точка  $\Upsilon$  возвращается к верхней кульминации, называется *звёздными сутками* и содержит 24 звёздных часа. Иначе говоря, *звёздными сутками* называется промежуток времени, в течение которого Земля совершает один оборот вокруг оси.

Длина звёздных суток принимается в астрономии за основную единицу для измерения времени. Как будет объяснено дальше, звёздные сутки короче солнечных, или гражданских, суток на  $3^m 56^s$ , и потому часы, плущие по звёздному времени, сильно расходятся с нашими обыкновенными часами. Если обозначить звёздное время через  $s$ , то получим

$$s = t + \alpha,$$

т. е. сумма прямого восхождения звезды и её часового угла всегда равна звёздному времени в данный момент. Для случая, когда звезда в верхней кульминации,  $t = 0$ , и формула принимает вид

$$s = \alpha.$$

Таким образом, *звёздное время всегда равно прямому восхождению звёзд, находящихся в верхней кульминации.*

Правило это очень важно. Определив звёздное время для какого-нибудь момента, мы тем самым найдём те звёзды, которые находятся в меридиане, и с помощью звёздной карты составим представление о картине неба для этого момента.

О том, как определяется звёздное время для любого момента, см. § 36.

**§ 26. Высота светила в меридиане.** Пусть на рис. 11 полукруг представляет меридиан,  $P$  — северный полюс мира,  $OQ$  — след плоскости экватора. Угол  $PON$ , равный углу  $QOZ$ , есть географическая широта места  $\varphi$  (§ 17). Эти углы измеряются дугами  $NP$  и  $QZ$ , которые, следовательно, также равны  $\varphi$ ; склонение  $\delta_1$  светила  $M_1$ , находящегося в верхней кульминации, измеряется дугой  $QM_1$ . Обозначив зенитное расстояние его через  $z_1$ , получим для светила, кульминирующего к югу от зенита:

$$z_1 = \varphi - \delta_1. \quad (1)$$

Для таких светил, очевидно,  $\delta < \varphi$ .

Если же светило проходит через меридиан к *северу* от зенита (точка  $M_1'$ ), то его склонение будет  $QM_1'$ , и мы получим

$$z_1' = \delta_1' - \varphi. \quad (2)$$

В этом случае  $\delta > \varphi$ . Взяв дополнение до  $90^\circ$ , получим высоту звезды  $h$  в момент верхней кульминации.

Наконец, если  $\delta = \varphi$ , то звезда в верхней кульминации *проходит через зенит*.

Так же просто определяется высота светила ( $M_2$ ) в нижней кульминации, т. е. в момент его прохождения через меридиан между полюсом мира ( $P$ ) и точкой севера ( $N$ ).

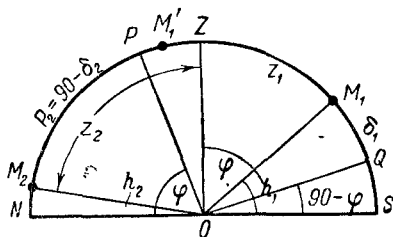


Рис. 11.

Из рис. 11 видно, что высота  $h_2$  светила ( $M_2$ ) определяется дугой  $NM_2$  и равняется  $h_2 = NP - M_2P$ . Дуга  $NP = \varphi$ ; дуга  $M_2P = p_2$ , т. е. расстоянию светила от полюса.

Так как  $p_2 = 90 - \delta_2$ , то

$$h_2 = \varphi - \delta_2 - 90^\circ. \quad (3)$$

Формулы (1), (2) и (3) имеют обширное приложение.

### Упражнения к главе I

1. Докажите, что экватор пересекается с горизонтом в точках, отстоящих на  $90^\circ$  от точек севера и юга (в точках востока и запада).
2. Чему равны часовой угол и азимут зенита?
3. Чему равны склонение и часовой угол точки запада? точки востока?
4. Какой угол с горизонтом образует экватор под широтой  $+55^\circ$ ?  $+40^\circ$ ?  $+10^\circ$ ?  $-40^\circ$ ?
5. Есть ли разница между северным полюсом мира и точкой севера?
6. Какая из точек небесного экватора находится выше всех над горизонтом? Чему равно зенитное расстояние этой точки для широты  $\varphi$ ?
7. Если звезда взошла в точке северо-востока, то в какой точке горизонта она зайдёт? Чему равны азимуты точек её восхода и захода?
8. Чему равен азимут звезды в момент верхней кульминации для места под широтой  $\varphi$ ? У всех ли звёзд он одинаков?
9. Чему равно склонение северного полюса мира? южного полюса?
10. Чему равно склонение зенита для места с широтой  $\varphi$ ? склонение точки севера? точки юга?
11. В каком направлении движется звезда в нижней кульминации?
12. Полярная звезда отстоит от полюса мира на  $1^\circ$ . Чему равно её склонение?
13. Чему равна высота Полярной звезды в верхней кульминации для места под широтой  $\varphi$ ? То же для нижней кульминации?
14. Какому условию должно удовлетворять склонение  $\delta$  звезды, чтобы она была незаходящей под широтой  $\varphi$ ? чтобы она была невосходящей?



15. Чему равен угловой радиус круга незаходящих звёзд в Ленинграде ( $\varphi = 59^{\circ}57'$ )? В Ташкенте ( $\varphi = 41^{\circ}18'$ )?

16. Какое склонение имеют звёзды, проходящие в Ленинграде и Ташкенте через зенит? Являются ли они незаходящими для этих городов?

17. На каком зенитном расстоянии проходит через верхнюю кульминацию звезда Капелла ( $\delta = +45^{\circ}57'$ ) в Ленинграде? в Ташкенте?

18. До какого склонения видны звёзды южного полушария в этих городах?

19. Начиная с какой широты можно при путешествии на юг увидеть Канопус — самую яркую звезду неба после Сириуса ( $\delta = -53^{\circ}$ )? Необходимо ли для этого покинуть территорию СССР (справиться по карте)? Под какой широтой Канопус станет незаходящей звездой?

20. Чему равна высота Канеллы в нижней кульминации в Москве ( $\varphi = +55^{\circ}45'$ )? в Ташкенте?

21. Почему счёт прямых восхождений ведётся с запада на восток, а не в обратном направлении?

22. Две самые яркие звезды северного неба — Вега ( $\alpha = 18^h 35^m$ ) и Капелла ( $\alpha = 5^h 13^m$ ). В какой стороне неба (в западной или восточной) и под какими часовыми углами они находятся в момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия? В момент нижней кульминации той же точки?

23. Какой интервал звёздного времени проходит от нижней кульминации Капеллы до верхней кульминации Веги?

24. Какой часовой угол имеет Капелла в момент верхней кульминации Веги? В момент её нижней кульминации?

25. В котором часу по звёздному времени точка весеннего равноденствия восходит? заходит?

26. Доказать, что для наблюдателя на земном экваторе азимут звезды в момент восхода ( $A_E$ ) и в момент захода ( $A_W$ ) очень просто связан со склонением звезды ( $\delta$ ).

---

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### СОЛНЦЕ И ВРЕМЯ

#### 1. ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА

**§ 27. Доказательства годичного движения Солнца.** Кроме *суточного* движения, в котором Солнце участвует вместе с остальными светилами, оно обладает ещё так называемым *годи́чным* движением. Это доказывается следующими явлениями.

а) Изменение вида звёздного неба. Если заметить расположение созвездий в какой-нибудь вечер, например через два часа после захода Солнца, и повторить это наблюдение через 1—2 месяца, то мы увидим, что картина неба меняется: созвездия, стоявшие высоко на южной стороне неба (близ меридиана), при втором наблюдении окажутся на западе, а звёзд, которые в первый вечер были видны у западного горизонта, мы теперь не увидим: они зашли вместе с Солнцем. Следовательно, Солнце за это время передвинулось навстречу этим созвездиям, т. е. *с запада на восток*.

Такое изменение вида звёздного неба происходит непрерывно; каждому времени года свойственна своя картина вечерних созвездий (§ 352) и каждая такая картина через год повторяется. Следовательно, по истечении года Солнце возвращается на прежнее место относительно звёзд.

б) Изменение полуденной высоты Солнца. При своём движении к востоку Солнце уклоняется то к северу, то к югу. Это видно из того, что его полуденная высота с декабря до июня увеличивается, а остальные полгода уменьшается. Между тем, если бы Солнце двигалось по небесному экватору или по параллели (§ 15), то его высота в полдень оставалась бы неизменной.

**§ 28. Эклиптика.** Чтобы определить путь Солнца относительно звёзд, надо ежедневно в момент верхней кульминации Солнца измерять высоту его центра над горизонтом и отмечать момент самой кульминации по часам, идущим по *звёздному времени*, т. е. уходящим вперёд против обыкновенных часов на 3 м. 56 с. в сутки (§ 25).

По тем же часам замечают момент кульминации какой-нибудь звезды. По высоте определяется *склонение* центра Солнца

[формула (1), § 26], а разность между моментом его кульминации и моментом кульминации звезды даёт разность их *прямых восхождений*. По этим данным можно положение центра Солнца нанести на звёздную карту.

Соединяя плавной линией ряд таких положений в течение года, получим *годовой путь* центра Солнца относительно звёзд, называемый *эклиптикой*. Эклиптика является большим кругом (§ 14); поэтому она пересекается с экватором в двух диаметрально противоположных точках. Плоскость эклиптики составляет с плоскостью экватора угол в  $23^{\circ}27'$ . Этот

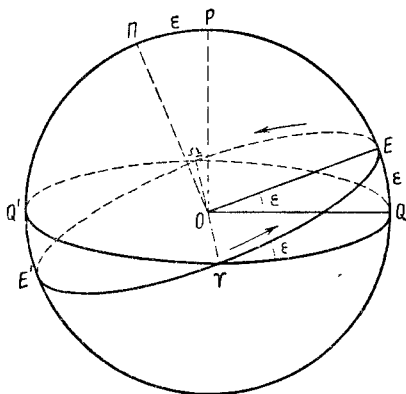


Рис. 12.

угол называется *наклоном эклиптики* и обозначается греческой буквой  $\varepsilon$  (энсиплон). Более строгое определение эклиптики будет дано в § 33.

Точки пересечения эклиптики с экватором называются точками весеннего ( $\Upsilon$ ) и осеннего ( $\varpi$ ) *равноденствий*. Точки, лежащие на эклиптике посредине между точками равноденствий, называются точками летнего и зимнего *солнцестояний* (точки E и E' на рис. 12). Расстояния точек солнцестояний от экватора, выраженные в угловой мере, равны наклону эклиптики  $\varepsilon$ .

**§ 29. Движение Солнца по эклиптике. Времена года и климатические пояса.** Полный оборот по эклиптике Солнце совершает приблизительно в  $365\frac{1}{4}$  суток. Таким образом, за сутки оно передвигается почти на  $1^{\circ}$ , т. е. на удвоенный видимый диаметр своего диска. Главные моменты годичного движения Солнца следующие:

21 марта: *весеннее равноденствие*. Солнце пересекает экватор в точке  $\Upsilon$ , переходя из южного полушария неба в северное. В северном полушарии Земли «начало астрономической весны».

22 июня: *летнее солнцестояние*, или начало лета (в северном полушарии). Солнце достигает наибольшего северного склонения:  $\delta = +\varepsilon$ , и в течение нескольких дней его высота в полдень остаётся почти одинаковой. В северном полушарии — самые длинные дни, в южном — самые короткие.

23 сентября: *осеннее равноденствие*. Солнце пересекает экватор в точке осеннего равноденствия  $\varpi$  и переходит в южное полушарие; начало осени для северного полушария.

22 декабря: *зимнее солнцестояние*, или начало зимы. Солнце достигает наибольшего южного склонения,  $\delta = -\varepsilon$ ; в северном полушарии — самые короткие дни,

Приближённые координаты Солнца:

|                    | $\alpha$      | $\delta$               |
|--------------------|---------------|------------------------|
| 21 марта $0^h$     | или $0^\circ$ | $0^\circ$              |
| 22 июня $6^h$      | » $90^\circ$  | $+23\frac{1}{2}^\circ$ |
| 23 сентября $12^h$ | » $180^\circ$ | $0^\circ$              |
| 22 декабря $18^h$  | » $270^\circ$ | $-23\frac{1}{2}^\circ$ |

Точная длина года называется *тропическим годом*. Это промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через точку весеннего равноденствия. Тропический год содержит 365,24220 суток, или  $365^d 5^h 48^m 46^s$ .

Годичное движение Солнца на разных широтах

а) На полюсе Солнце находится над горизонтом всё то время, пока оно находится над экватором. Например, на *северном* полюсе Солнце восходит около 21 марта, достигает наибольшей высоты ( $23^\circ 27'$ ) 22 июня и около 23 сентября заходит. При этом оно всё время вследствие суточного движения описывает круги, почти параллельные горизонту, так что его видимый путь по небу за полгода представляется *винтообразной* линией. Таким образом на полюсе *день продолжается полгода*, остальные полгода — ночь.

б) На экваторе все светила, в том числе и Солнце, находятся 12 часов над горизонтом и 12 часов под горизонтом. Следовательно, на экваторе *день всегда равен ночи*. Два раза в год, 21 марта и 23 сентября, Солнце в полдень бывает в зените. Наименьшая полуденная высота его будет  $90^\circ - 23^\circ 27' = 66^\circ 33'$ ; она наблюдается 22 июня (к северу от зенита) и 22 декабря (к югу от зенита).

в) На северном полярном круге (широта  $\varphi = +66^\circ 33'$ ). По правилу § 26 для этой широты незаходящими будут светила со склонением  $\delta = 90^\circ - \varphi = 90^\circ - 66^\circ 33' = +23^\circ 37'$ , светила же, имеющие склонение  $-23\frac{1}{2}^\circ$ , будут невосходящими. Но это как раз наибольшее и наименьшее склонения Солнца. Следовательно, на *полярном круге в день летнего солнцестояния Солнце не заходит*; в полночь оно только касается горизонта в точке *N*. В день же зимнего солнцестояния оно *не восходит*, лишь появляясь в полдень на горизонте около точки *S*.

В местах, лежащих за полярным кругом, летнее Солнце остаётся незаходящим светилом тем дольше, чем место ближе к полюсу. Но зато по мере приближения к полюсу увеличивается и *полярная ночь*, в течение которой Солнце совсем не восходит. В южной полярной области явления происходят подобным же образом.

г) На северном тропике (широта  $\varphi = +23^\circ 27'$ ). Солнце в день летнего солнцестояния *проходит через зенит*. В день зимнего солнцестояния оно бывает *в зените на южном тропике*.

В местах, лежащих между тропиками, Солнце бывает в зените *два раза* в год, в те дни, когда его *склонение равно широте места*.

Отсюда получим следующие *астрономические признаки географических поясов*: в *холодных* поясах бывают дни, когда Солнце *не заходит*, и дни, когда Солнце совсем *не восходит*; в *жарком* поясе Солнце по временам бывает *в зените*; в *умеренных* поясах Солнце каждый день восходит и заходит и в зените никогда не бывает.

Замечание. Все эти явления происходили бы в точности так, как здесь описано, только в том случае, если бы Солнце было светящейся точкой, а не диском, и если бы земная атмосфера не преломляла и не рассеивала световых лучей. В действительности же эти явления происходят несколько иначе.

а) Вследствие атмосферного *преломления*, или рефракции (§ 87—88), светила, особенно близ горизонта, видны не по тому направлению, по которому они действительно находятся, а несколько выше. По этой причине Солнце на полюсе бывает видно в течение нескольких дней после 23 сентября, и появляется на несколько дней раньше 21 марта. Точно так же на полярных кругах в дни солнцестояний в полдень и в полночь весь диск Солнца оказывается над горизонтом.

б) Вследствие шарообразности Земли (§ 104), земная поверхность, даже в открытом море, не плоская, а выпуклая. Поэтому Солнце освещает вершину горы в течение нескольких минут после того, как оно зашло для наблюдателя у её подножия. Ещё дольше оно освещает верхние слои земной атмосферы, и после захода Солнца начинается не полная ночь, а только *сумерки*. Полная темнота наступает, когда Солнце опустится под горизонт приблизительно на  $17^\circ$ . Таким образом явление сумерек в ещё большей степени, чем рефракция, удлиняет дневную часть суток за счёт ночной.

**§ 30. Эклиптическая система координат.** В глубокой древности было замечено, что Луна и планеты, при своём движении по созвездиям (§ 2), всё время остаются вблизи эклиптики. Поэтому эклиптика оказалась очень удобным кругом для определения положений этих светил. Так появилась эклиптическая система координат (рис. 13); исторически она древнее экваториальной.

Две точки, лежащие на  $90^\circ$  к северу и к югу от эклиптики  $EE'$ , называются *полюсами эклиптики*. Северный полюс  $\Pi$  находится в созвездии Дракона, приблизительно посредине между Полярной звездой и самой яркой звездой северного неба — Вегой ( $\alpha$  Лиры). Точное положение полюсов эклиптики определяется координатами

северный полюс:  $\alpha = 18^h$ ,  $\delta = +66^\circ 33'$ ;

южный полюс:  $\alpha = 6^h$ ,  $\delta = -66^\circ 33'$ .

Круги, проведённые через оба полюса эклиптики и, следовательно, перпендикулярные к её плоскости, называются *кругами широты*; они соответствуют вертикалам и кругам склонения других систем.

Координаты эклиптической системы называются *широтой*  $\beta$  и *долготой*  $\lambda$ . Широта звезды есть её угловое расстояние  $ML$  (рис. 13)

от плоскости эклиптики, отсчитываемое по кругу широты. В направлении к северному полюсу эклиптики широта считается положительной ( $\beta > 0$ ); в направлении к южному полюсу эклиптики — отрицательной ( $\beta < 0$ ). Долгота есть угол при полюсе эклиптики между кругом широты звезды и кругом широты, проведенным через точку весеннего равноденствия. Долготу можно измерять также дугой  $\gamma L$  эклиптики от точки весеннего равноденствия до круга широты звезды. Она отсчитывается от точки весеннего равноденствия против движения часовой стрелки (для наблюдателя в северном полушарии), т. е. к востоку, от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . В единицах времени долгота  $\lambda$  никогда не изменяется.

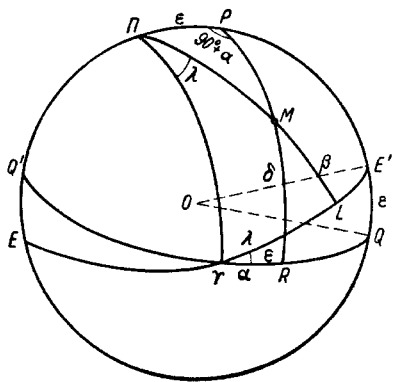


Рис. 13.

**§ 31. Зодиак.** Звёзды, расположенные вдоль эклиптики, ещё в древности были распределены в 12 созвездий, получивших большую частью названия живых существ и обозначенных кроме того каждое особым знаком. Полоса неба, занятая этими созвездиями, называется *зодиаком* («круг животных»). В каждом зодиакальном созвездии Солнце находится в среднем около месяца. Созвездия эти следующие:

| <i>Весна</i> | <i>Лето</i> | <i>Осень</i> | <i>Зима</i> |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| Рыбы ♈       | Близнецы ♊  | Дева ♍       | Стрелец ♐   |
| Овен ♈       | Рак ♋       | Весы ♎       | Козерог ♏   |
| Телец ♉      | Лев ♌       | Скорпион ♏   | Водолей ♑   |

Те созвездия, среди которых в данное время находится Солнце, недоступны наблюдениям, а лучше всего видна противоположная часть зодиака. Так, в июне, когда Солнце находится в Близнецах, мы наблюдаем созвездия, расположенные близ точки зимнего солнцестояния (Скорпион, Стрелец). Поэтому в летние ночи эклиптика стоит низко над горизонтом. В зимние ночи, наоборот, эклиптика поднимается высоко. В это время видны созвездия около точки летнего солнцестояния (Телец, Близнецы).

**§ 32. Неравномерность движения Солнца.** Путь, который Солнце проходит своим видимым движением в течение летнего полугодия (с 21 марта по 23 сентября), составляет  $180^\circ$  и в точности равен пути за зимнее полугодие. Между тем счёт дней показывает, что первое полугодие (весна и лето) содержит 186 дней, а второе (осень и зима) — только 179. Таким образом осенью и зимой Солнце движется быстрее, чем весной и летом. Быстрее всего Солнце движется

около 3 января (свыше  $1^{\circ}1'$  в сутки), всего медленнее — около 4 июля ( $57'$  в сутки).

Оказывается, что и видимый диаметр солнечного диска не остаётся одинаковым, он больше всего как раз в то время, когда и скорость Солнца наибольшая, т. е. в январе; меньше всего — в июле. Это значит, что Солнце зимой к нам ближе, чем летом. Изменение расстояния так невелико, что не оказывает влияния на смену времён года. Поэтому и изменение видимых размеров солнечного диска ничтожно и для простого глаза незаметно. Наибольший диаметр  $32',5$ , наименьший —  $31',5$ .

**§ 33. Движение Солнца — отражение движения Земли.** Годичное движение Солнца вызывается тем, что Земля, кроме суточного вращения вокруг оси, ещё обращается вокруг Солнца в течение года.

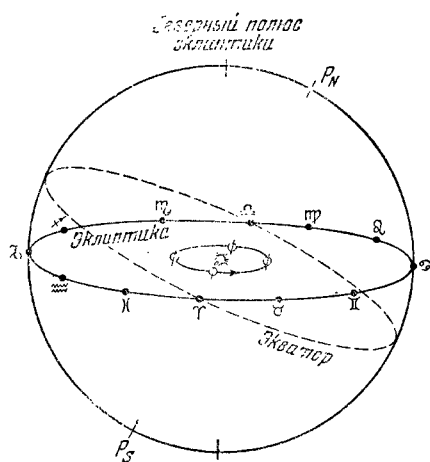


Рис. 14.

Обращение это совершается по орбите, которая лежит в плоскости, проходящей через Солнце. Подобно тому как небесный экватор есть пересечение с небесной сферой плоскости земного экватора, так и *эклиптика* есть пересечение с этой сферой *плоскости земной орбиты*. Угол между этими плоскостями равен наклону эклиптики к экватору, т. е.  $23^{\circ}27'$ . Для воображаемого наблюдателя на Солнце движение Земли будет происходить так же, как для нас происходит движение Солнца. Земля (которая с расстояния Солнца должна казаться довольно яркой звездой) будет двигаться по эклиптике в ту же сторону и с той же скоростью, с какой для нас движется Солнце. Но видеть Землю этот наблюдатель будет всегда в точке эклиптики, диаметрально противоположной той точке, в которой мы видим Солнце в данный момент (рис. 14). Так, в июне, когда Солнце видно в Близнецах, близ точки летнего солнцестояния, Земля с Солнца видна в созвездии Стрельца, около точки зимнего солнцестояния; в июле она перейдёт в созвездие Козерога и т. д.

Изменение расстояния от Земли до Солнца в течение года указывает на то, что Солнце находится не в центре земной орбиты. Орбита Земли в действительности — не круг, а эллипс, причём Солнце находится в так называемом фокусе. Движение Земли по орбите неравномерно: оно тем быстрее, чем ближе Земля к Солнцу. Точка, в которой Земля находится ближе всего к Солнцу, называется *перигелием*. В перигелии Земля бывает 3 января. Противоположная точка, в которой Земля находится в наибольшем удалении от Солнца, называется *афелием*. Через афелий Земля проходит 4 июля.

Замечание 1. Говорят и так: 3 января *Солнце* находится в *перигее*, т. е. на наименьшем расстоянии от Земли, а 4 июля — в *апогее*, т. е. на наибольшем расстоянии. Но при этом не следует думать, что эклиптика, по которой Солнце как бы обращается вокруг Земли, есть эллипс. Эклиптика — не орбита Земли, а пересечение плоскости этой орбиты с небесной сферой, т. е. большой круг. Когда Солнце имеет долготу  $281^\circ$  (долгота солнечного перигея), Земля находится на наименьшем расстоянии от него.

Замечание 2. Приведённые здесь дни прохождения Земли через перигелий и афелий являются только *средними* для нашей эпохи. Орбита Земли по причинам, которые будут объяснены в главе VIII, всё время несколько изменяется. Поэтому моменты наибольшей близости Земли к Солнцу в разные годы падают на всевозможные числа с 2 по 5 января, а моменты наибольшего удаления — с 1 по 5 июля.

**§ 34. Определение наклона эклиптики из наблюдений.** Для точного определения наклона эклиптики к экватору надо измерить наибольшую и наименьшую полуденную высоту центра Солнца (или его наибольшее и наименьшее зенитное расстояние) в течение года.

В день летнего солнцестояния полуденное зенитное расстояние центра Солнца будет (§ 26):

$$z_1 = \varphi - \varepsilon,$$

а в день зимнего солнцестояния:

$$z_2 = \varphi + \varepsilon.$$

Отсюда получаем

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(z_2 - z_1).$$

Таким способом наклон эклиптики был определён уже в глубокой древности. Одно из древнейших определений этой величины было произведено китайскими астрономами. Наклон эклиптики с течением времени изменяется, но очень медленно, так что величина его для данного момента всегда точно известна (см. упражнение 8).

Заметим ещё, что вследствие притяжения со стороны других небесных тел, главным образом Луны, Земля движется не строго в одной плоскости (плоскости эклиптики), а несколько отклоняется от неё то к северу, то к югу. Поэтому и центр Солнца для земного наблюдателя не всегда виден на эклиптике (широта центра Солнца не в точности равна нулю), а периодически отклоняется от неё на очень малую величину, которая лишь изредка достигает  $1''$ .

## II. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

**§ 35. Звёздные сутки.** Определение времени составляет одну из важнейших практических задач астрономии. За основную единицу при этом принимают время вращения Земли вокруг оси, или, что то же самое, время видимого вращения небесного свода, которое называют



*звёздными сутками* (§ 25). При объяснении звёздных суток будем пока предполагать, что измерение времени с помощью обыкновенных гражданских часов известно.

Промежуток времени от какого-нибудь момента по верно идущим часам до того же момента на следующий день составляет 1 сутки, ровно 24 часа. Заметим пока без объяснения, что эти сутки называются *средними солнечными сутками*, а их доли называются часами, минутами и секундами *среднего времени*.

Звёздные сутки короче средних на  $3^m 56^s$ ; следовательно, продолжительность их составляет  $23^h 56^m 4^s$  среднего времени. Убедиться в этом можно, если наблюдать несколько вечеров подряд, с одного и того же места, исчезновение одной и той же звезды за каким-нибудь отдалённым высоким зданием. Каждый вечер звезда будет исчезать по нашим часам на  $3^m 56^s$  раньше, чем накануне.

Звёздные сутки подобно средним делят на 24 часа, затем на минуты и секунды. Каждый час звёздного времени, а также звёздные минута и секунда несколько короче соответствующих единиц среднего времени.

За начало звёздных суток принимают момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия. Поэтому звёздные сутки можно определить как *промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия*.

**§ 36. Звёздное время.** Звёздное время (§ 25) есть часовой угол точки весеннего равноденствия; оно определяется по звёздным часам, которые отличаются от обыкновенных тем, что ежедневно уходят против них вперёд на  $3^m 56^s$  и поставлены так, что показывают  $0^h 0^m 0^s$  при каждом прохождении точки весеннего равноденствия через меридиан. В астрономических календарях даётся звёздное время для полудня или полуночи на каждый день года, и это позволяет вычислить звёздное время для любого момента. Приблизительно звёздное время можно найти на основании следующих соображений:

1) 21 марта Солнце проходит через меридиан почти одновременно с точкой весеннего равноденствия; следовательно, в этот день в полдень звёздное время должно быть близко к нулю, а в полночь — к 12 часам. Вследствие существования так называемого уравнивания времени (§ 40) в действительности это бывает 23, а не 21 марта. Запомним, что звёздное время в полночь приблизительно равно:

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| 23 марта    | 12 <sup>h</sup> , |
| 22 июня     | 18 <sup>h</sup> , |
| 22 сентября | 0 <sup>h</sup> ,  |
| 22 декабря  | 6 <sup>h</sup> .  |

2) Каждый день звёздное время в полночь уходит вперёд почти на 4 минуты, каждый месяц — на 2 часа.

3) Каждый интервал в  $6^h$  среднего солнечного времени составляет  $6^h 1^m$  звёздного времени.

Например, звёздное время в 8 час. вечера 7 ноября найдётся так: 22 сентября звёздное время в полночь равно нулю. С 22 сентября прошел 1 месяц и 16 дней; звёздное время в полночь 7 ноября (т. е. с 6-го на 7-е) будет:

$$\begin{array}{r} \text{Поправка за 1 мес.} = 2^h 0^m \\ \quad \gg \quad \gg 16 \text{ дней} = 1^h 4^m \\ \hline \text{Звёздное время в полночь 7 ноября} = 3^h 4^m \end{array}$$

В астрономическом календаре на 1949 г. находим точную величину:  $3^h 3^m$ ; мы ошиблись только на 1 мин. Остается к найденной величине прибавить время, протекшее с полуночи, выразив его в звёздных единицах. Сразу видно, что при таком переходе вместо  $8^h + 12^h = 20^h$  получится приблизительно  $20^h 3^m$  (так как на 24 часа поправка составляет всего  $4^m$ ) звёздного времени. Итак,

$$\begin{array}{r} + 3^h 4^m \\ \hline + 20^h 3^m \\ \hline 23^h 7^m \text{ звёздного времени.} \end{array}$$

Точное вычисление звёздного времени будет показано в гл. III. Звёздное время чрезвычайно важно для астрономии. Его *приближенное* определение даёт наблюдателю картину звёздного неба (§ 25), а *точное* знание звёздного времени необходимо для точного определения положений светил, особенно их прямых восхождений (§ 80). Поэтому значительная часть астрономических наблюдений отмечается по звёздному времени. Но для житейских целей звёздное время неудобно, так как начало звёздных суток приходится последовательно на всевозможные часы дня и ночи. То время, которое только и употребляется в обыденной жизни, есть время *солнечное*. Но это время оказывается значительно сложнее звёздного, так как Солнце не сохраняет неизменного положения относительно звёзд.

**§ 37. Истинные солнечные сутки.** Так называется промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями центра Солнца. Эти сутки, как мы видели (§ 35), длиннее звёздных суток почти на 4 минуты.

Происходит это от годичного движения Солнца. Предположим, что в какой-нибудь день Солнце прошло через меридиан одновременно с определённой звездой; в момент следующей верхней кульминации звезды оно окажется к востоку от звезды приблизительно на  $1^\circ$  и пройдет через меридиан позже её. Величина запоздания составит в *среднем*  $1/365$  часть суток, т. е. около  $3^m 56^s$ , и на столько минут истинные солнечные сутки выйдут длиннее звёздных. Если бы суточное приращение прямого восхождения Солнца было постоянно, то запоздание Солнца к меридиану было бы всегда одинаково, и длина истинных солнечных суток была бы постоянной. Но этого нет по двум причинам:

а) Солнце движется неравномерно (§ 32);

б) Солнце движется не по экватору, а по эклиптике, которая наклонена к экватору на значительный угол. Поэтому длина истинных суток была бы изменчива даже в том случае, если бы суточные перемещения Солнца (приращения его долготы  $\Delta\lambda$ ) были всегда одинаковы. Отложим их на эклиптике  $EE'$  в виде равных дуг (рис. 15 и 16):

$$\Delta\lambda = AB = BC.$$

Суточные приращения прямого восхождения Солнца  $\Delta\alpha$  равны проециям этих дуг на экватор  $QQ'$ . Близ *равноденствий* (рис. 15) полученные таким образом отрезки на экваторе ( $ab$ ,  $bc$ ) *короче* соответ-

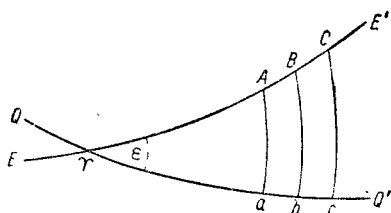


Рис. 15.

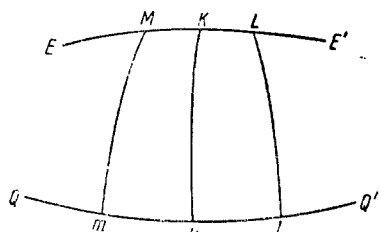


Рис. 16.

ствующих отрезков эклиптики,  $\Delta\alpha < \Delta\lambda$ , и истинные сутки имеют поэтому *наименьшую* длину. Около солнцестояний, наоборот, отрезки экватора ( $mk$ ,  $kl$ ) *длиннее* отрезков эклиптики (вследствие расхождения часовых кругов по мере их удаления от полюса). Поэтому, если, например,  $MK$  составляет  $1^\circ$ , т. е.  $1/360$  часть эклиптики, то  $mk$  будет больше  $1/360$  части экватора и, значит, больше  $1^\circ$ . Таким образом в это время  $\Delta\alpha > \Delta\lambda$  и длина истинных суток выходит наибольшей (рис. 16).

В результате действия обеих причин, например, 23 декабря истинные сутки оказываются на 51 сек. длиннее, чем 16 сентября.

**§ 38. Истинное солнечное время.** Звёздное время мы определяем как *часовой угол* точки весеннего равноденствия. Подобным же образом мы назовём *часовой угол центра Солнца истинным солнечным временем*. Это время указывается солнечными часами; обозначается оно  $t_\odot$ , где  $\odot$  есть знак Солнца.

Так как истинные солнечные сутки неодинаковы по длине, то и остальные единицы истинного солнечного времени (часы, минуты, секунды) также несколько изменяются. Если бы мы захотели построить механические часы, в точности идущие по Солнцу, то они должны были бы всё время менять ход — то отставать, то спешить, притом в разные дни года на вполне определённые величины. Это и неудобно, и неосуществимо. Поэтому вместо истинных солнечных суток употребляются сутки, имеющие всегда одну и ту же длину, равную средней

длине истинных суток в течение года. Такие сутки называются *средними солнечными сутками*, а время, измеряемое долями этих суток, — *средним солнечным временем*.

§ 39. Среднее солнечное время станет наглядным, если принять, что оно, подобно истинному солнечному времени, представляет собой *часовой угол* некоторой точки. Точка эта близка к Солнцу, но не совпадает с ним и движется более просто. Такая точка называется *средним солнцем*. Воображаемое среднее солнце совершает по небу полное обращение за столько же времени, как и действительное Солнце, т. е. за один тропический год, но движется не по эклиптике, а по экватору, и равномерно. Его прямое восхождение увеличивается в сутки всегда на одну и ту же величину, которую будем обозначать

$$\mu = \frac{24h}{365,2422} = 3^m56^s,56 \text{ в 1 ср. солн. сутки.}$$

Это есть *средняя величина* суточного смещения Солнца к востоку в течение года. Момент верхней кульминации этого фиктивного солнца есть *средний полдень*, а часовой угол среднего солнца — *среднее солнечное время*  $t_m$ . В средний полдень оно равно нулю, через час после полудня равно 1 ч., затем 2 ч. и т. д. до 24 часов. Начав счёт с полудня, получим так называемое *гражданское* или *местное время*  $T_c$ . Очевидно,

$$T_c = t_m + 12^h.$$

Ни *среднее*, ни даже *гражданское время* (несмотря на своё название) в гражданской жизни не употребляются с 1919 г. Но они совершенно необходимы при всех астрономических расчётах.

§ 40. Уравнение времени. Воображаемое среднее солнце может проходить через меридиан то раньше, то позже истинного Солнца, и среднее время может быть то впереди, то позади истинного. Разница между средним и истинным временем называется *уравнением времени*; другими словами, это — поправка, которую надо придать к истинному времени, чтобы получить среднее. Уравнение времени обозначается греческой буквой  $\eta$ . Очевидно,

$$\eta = t_m - t_{\odot}.$$

Величина уравнения времени со дня на день меняется вследствие а) неравномерности движения Солнца по эклиптике и б) наклона эклиптики.

а) Вследствие первой причины истинное Солнце в зимние месяцы ежедневно смещается к востоку больше чем на среднюю величину, и истинные солнечные сутки выходят длиннее средних. Разница эта достигает максимума (+8 сек.) в начале января, после чего начинает уменьшаться, но первые дни уменьшается очень медленно. *Условимся*, что наше воображаемое среднее солнце и истинное Солнце имеют одинаковое прямое восхождение в день прохождения перигелия, 3 января (§ 33). В этот день среднее время будет совпадать с истинным, но

уже на следующий день оно уйдёт вперёд против истинного на  $8^s$ , потом на  $16^s$  и т. д. Накопляющаяся разность времён и есть уравнение времени. Оно будет расти всё время, пока истинные сутки остаются длиннее средних, но всё медленней, и достигнет максимума через три месяца (в апреле), когда истинные сутки сравняются со средними. После этого суточный прирост уравнения времени станет отрицательным, и накопившаяся его величина постепенно будет уменьшаться, оставаясь положительной (пунктирная кривая на рис. 17).

До нуля уравнение времени уменьшится в афелии, т. е. к началу июля. Тогда среднее солнце и истинное Солнце опять совпадёт. Та-

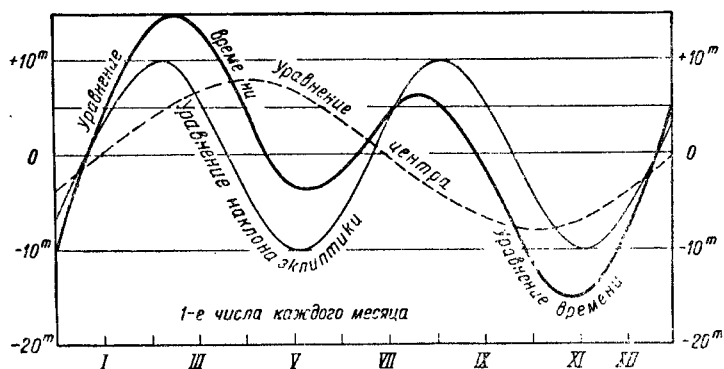


Рис. 17.

ким образом, если бы действовала только первая причина (неравномерность движения Солнца по эклиптике), то в течение всего первого полугодия уравнение времени оставалось бы положительным. Максимальное его значение (в апреле) составляло бы  $+8^m$  (среднее Солнце по суточному движению впереди истинного Солнца).

Подобным же рассуждением можно показать, что во втором полугодии уравнение времени должно быть отрицательным и что в октябре оно достигнет наибольшего значения —  $8^m$  (среднее Солнце позади истинного Солнца). Эта часть уравнения времени, вызываемая неравномерностью движения Солнца по эклиптике, называется *уравнением центра*. Его график — синусоида с годичным периодом (одна полная волна в год, пунктирная кривая на рис. 17).

б) Действие второй причины (наклон эклиптики) ещё значительней, и её надо считать главной. Так как около равноденствий суточное смещение Солнца к востоку меньше, чем около солнцестояний (§ 37, б), то в марте и сентябре истинные солнечные сутки на 20 сек. короче средних, а в июне и декабре на столько же длиннее. Если бы эта причина действовала одна, то она могла бы вызвать уравнение времени, достигающее до 10 мин. в ту и другую сторону. В нуль оно обращалось бы *четыре раза* в год — в дни равноденствий и солнцестояний.

График этого члена (рис. 17) — синусоида с полугодичным периодом (две полных волны в год).

Благодаря действию ещё и первой причины, в конечном результате уравнение времени обращается в нуль в моменты, не совпадающие с началом времён года, именно 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря. Максимумы бывают тоже 4 раза в год; наиболее значительные — 11 февраля, когда среднее время впереди истинного на 14 мин., и 2 ноября (на 16 мин. позади). Эти большие расхождения являются, как было показано выше, результатом постепенно накапливающихся ежедневных отклонений в немногие секунды (сплошная жирная кривая на рис. 17).

**§ 41. Точная зависимость между единицами звёздного и среднего солнечного времени.** Тропический год содержит 365,24220 *средних солнечных* суток, т. е. такое число видимых оборотов около Земли делает Солнце за это время. Но точка весеннего равноденствия сделает ровно на один оборот больше, так как Солнце движется навстречу обращению небесного свода и поэтому оно теряет один оборот; чтобы получить число его оборотов по числу оборотов какой-нибудь точки звёздного неба, надо из этого последнего числа вычесть единицу. Итак, 365,2422 средних солн. суток = 366,2422 звёздн. суток, откуда следует, что

$$1 \text{ средн. солн. сутки} = \frac{366,2422}{365,2422} = 1,002738 \text{ звёздн. суток,}$$

$$1 \text{ звёздн. сутки} = \frac{365,2422}{366,2422} = 0,997270 \text{ средн. солн. суток,}$$

или, произведя раздробление долей суток в секунды, получим:

$$1 \text{ ср. солн. сутки} = 1 \text{ звёздн. сутки} + 3^m 56^s, 56 \text{ звёздн. вр.}$$

$$1 \text{ звёздн. сутки} = 1 \text{ средн. солн. сутки} - 3^m 55^s, 91 \text{ средн. солн. вр.}$$

Если обозначить через  $i_m$  интервал, выраженный в единицах среднего времени, а через  $i_s$  — тот же интервал в единицах звёздного времени, то связь между числами  $i_m$  и  $i_s$  выразится формулой:

$$i_s = i_m (1 + \mu) = i_m + \mu i_m.$$

Для перевода интервала звёздного времени  $i_s$  в единицы среднего времени служит формула

$$i_m = i_s (1 - \nu) = i_s - \nu i_s.$$

Здесь

$$\mu = \frac{1}{365,2422} = 3^m 56^s, 56 \text{ в сутки} = 9^s, 856 \text{ в час,}$$

$$\nu = \frac{1}{366,2422} = 3^m 55^s, 91 \text{ в сутки} = 9^s, 830 \text{ в час.}$$

По этим формулам вычислены таблицы, служащие для превращения интервалов среднего времени в интервалы звёздного времени и обратно (табл. I и II в конце книги).

**§ 42. Звёздное время в средний полдень и в среднюю полночь.** Основной величиной для решения задач на звёздное время является звёздное время в средний полдень или в среднюю полночь данного дня. Величина эта растёт равномерно на  $3^m 56^s$ , 56 в сутки, или на  $9^s$ , 856 в час (§ 41). Приближённое её определение было показано в § 36, а точное значение даётся на каждый день в астрономических ежегодниках (календарях). До 1931 г. в ежегодниках давалось звёздное время *в средний гриничский полдень*, т. е. для того момента, когда наступает полдень на меридиане обсерватории в Гриниче (в пригороде Лондона). С 1931 г. ежегодники дают звёздное время *в среднюю гриничскую полночь*. Очевидно:

$$\begin{aligned} & \text{звёздн. вр. в средн. полдень} \\ &= \text{звёздн. вр. в средн. полночь} + 12^h 1^m 58^s, 28. \end{aligned}$$

Так как на разных земных меридианах полночь наступает не одновременно, то звёздное время в полночь на каком-нибудь другом меридиане будет несколько отличаться от гриничского в зависимости от долготы. Вычисление этой разницы будет объяснено дальше.

Во многих случаях всё-таки несколько удобнее звёздное время в средний *полдень*, тем более, что имеет место следующее важное соотношение, вытекающее из формулы § 25: *звёздное время в средний полдень равно прямому восхождению среднего солнца*.

Вспомнив определение уравнения времени, получим ещё правило: *прямое восхождение истинного Солнца в средний полдень равно звёздному времени плюс уравнение времени*.

Наконец: *прямое восхождение истинного Солнца в среднюю полночь равно звёздному времени + уравнение времени + 12 часов*.

**§ 43. Счёт времени гражданский и астрономический.** В гражданской жизни за начало суток принимается полночь; счёт времени ведётся или двумя сериями по 12 часов или же непрерывно, от 0 до 24 часов. Во втором способе не приходится к числу часов прибавлять указание «у» (утро) и «в» (вечер) или «полудни» и «полночи».

До 1925 г. *астрономические сутки* начинались *в полдень*, на 12 час. позже гражданских; часы при этом считались непрерывно от 0 до 24 час. Например, когда по гражданскому счёту считался понедельник 25 января, 10 час. утра, по астрономическому счёту было ещё воскресенье 24 января, 22 часа. О том, что такой счёт существовал, надо помнить при разборе старых астрономических наблюдений, иначе можно ошибиться на полсутки.

**§ 44. Местное время и долгота.** На рис. 18 изображено северное полушарие Земли; северный полюс находится в центре, земные меридианы представлены прямыми линиями. Меридиан, имеющий долготу 0, есть начальный, или «нулевой» меридиан.

Пусть в данный момент Солнце *S* находится в плоскости нулевого меридиана. Во всех точках этого меридиана, очевидно, будет полдень

(12 часов). На меридиане же, лежащем на  $15^\circ$  к западу, полдень ещё не наступил; он наступит, когда этот меридиан повернётся на  $15^\circ$  и займёт положение, в котором в данный момент находится нулевой меридиан. Это будет через час. Таким образом, в точках, находящихся под  $15^\circ$  западной долготы, в данный момент будет 11 час. Очевидно, что на меридиане  $30^\circ$  западной долготы будет в то же время 10 час., под  $15^\circ$  восточной долготы — уже 13 час. и т. д.

Отсюда следует, что все места, лежащие на одном земном меридиане, имеют одинаковое время, а у точек, находящихся на разных меридианах, *разность их местных времён равна разности долгот*, выраженной во времени. Так, например, во Владивостоке часы впереди на 6 ч. 46 м. против Ленинграда (долгота Владивостока  $101^\circ 30'$  к востоку от Ленинграда).

Обозначая географические долготы двух пунктов через  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а местное время в этих пунктах — через  $T_{c1}$  и  $T_{c2}$ , получим:

$$T_{c2} - T_{c1} = \lambda_2 - \lambda_1.$$

**§ 45. Поясное время.** Прежде каждый большой город жил по своему времени; при малоразвитых политических, экономических и культурных связях это не представляло больших неудобств. Но с развитием общества затруднения от разного счёта времени в разных местах становились всё более заметными.

Поэтому во многих случаях от системы множества местных времён стали переходить к системе одного времени. Так, например, уже давно на всех железных дорогах России был введён счёт по петербургскому времени. Предлагали даже ввести на всём земном шаре единое время, — например поставить все часы на Земле по времени Гриничской обсерватории. Но это вызвало бы новые неудобства. Например, в Советском Союзе середина дня приходилась бы в этом случае не на 12 часов, а на всевозможные часы от 2 до 10 часов, в зависимости от долготы. Поэтому план единого времени по всей Земле был проведен в жизнь не в чистом виде, а в виде так называемого *поясного времени* ( $T_N$ ).

Поясное время состоит в следующем. Весь земной шар разделён на 24 части, или пояса, меридианами, отстоящими один от другого на  $15^\circ$  (т. е. на один час). Внутри каждого пояса все часы поставлены одинаково, именно по среднему меридиану пояса. Это «поясное время» отличается от местного времени какой-нибудь точки внутри

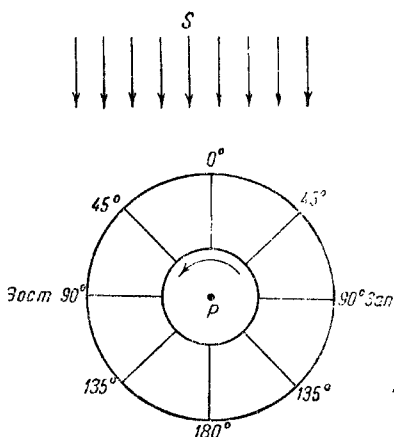


Рис. 18.



пояса самое большое на полчаса (на краях пояса). Таким образом путешественнику приходится переставлять свои часы только при переезде в другой пояс, причём переставлять всегда на целое число часов.

Нулевым поясом считается пояс, центральный меридиан которого проходит через Гринич.

Гриничское гражданское время, отсчитываемое от средней гриничской полуночи (от 0 до  $24^h$ ), называется *всемирным*, или *мировым*, *временем* ( $T_0$ ). Поясное время данного пояса  $N$  связано с гриничским временем очевидным соотношением:

$$T_N = T_0 + N.$$

В действительности границы поясов на суше проводятся не по меридианам, а по политическим и естественным границам. Так, с 1911 г. от Португалии до Голландии все часы поставлены одинаково, по гриничскому меридиану («нулевой пояс», или западноевропейское время); в Германии, Италии и др. (рис. 19) употребляется «среднеевропейское время», или время I пояса — на 1 час вперёд против Гринича. II пояс — «восточноевропейское время» (мировое время + 2 часа) — охватывает балканские государства, а также Финляндию.

В 1919 г. поясное время было введено и в нашем Союзе. Так как время II пояса на 1 м. 19 с. позади ленинградского, то для перехода к поясному времени старое «железнодорожное» время пришлось переставить только на 1 м. 19 с. назад. По этому времени II пояса были поставлены все часы от западной границы СССР до линии Архангельск — Рязань — Ростов-на-Дону включительно. В Москве, например, пришлось переставить часы на 30 м. 17 с. назад. Дальше идёт III пояс (мировое время + 3 часа), затем пояса IV, V и т. д. до XII (у Берингова пролива). Перевод поясного времени  $T_N$  в местное «гражданское» время  $T_c$  (§ 39) и обратно делается по очевидной формуле

$$T_c - T_N = \lambda - N,$$

где  $\lambda$  есть восточная долгота, а  $N$  — число часов, равное номеру пояса. Например, для Москвы ( $N = 2^h$ ,  $\lambda = 2^h 30^m 17^s$ )

$$T_c = T_2 + 30^m 17^s.$$

**§ 46. Декретное время.** В целях экономии электроэнергии, идущей на освещение предприятий и жилых домов, и наиболее полного использования дневного света, в особенности в летние месяцы года, во многих странах на летний период вводится так называемое декретное время. Декретное время отличается от поясного тем, что по всей стране часы переводят на 1 час вперёд и, таким образом, население каждого пояса живёт по времени соседнего восточного пояса.

В зимнее же время снова вводится поясное время. Также двукратное в течение года изменение счёта времени вносит значительную путаницу в хозяйственную жизнь страны. Поэтому в Советском Союзе



сезонный перевод часовых стрелок не практикуется, а с лета 1930 г. на всей территории нашей страны введено в постоянное действие *декретное время*, по которому ныне живут все народы Советского Союза.

Таким образом, декретное время

$$T_d = T_N + 1^h.$$

Перевод декретного времени  $T_d$  в местное «гражданское»  $T_c$  производится по формуле

$$T_c - T_d = \lambda - N - 1.$$

Например, для Москвы (§ 45)

$$T_c = T_d - 29^m 43^s.$$

**§ 47. Линия изменения даты.** Представим себе кругосветного путешественника, который отправился в путь 1 января и передвигается каждый день на  $15^\circ$  к востоку, так что всё путешествие он совершил бы в 24 дня. Каждый день ему придётся переставлять свои часы на 1 час вперёд, чтобы держать их в согласии с Солнцем. К моменту его возвращения это составит 24 часа разницы, т. е. целые сутки. Путешественник будет считать, что он вернулся 26 января, между тем как на самом деле будет 25 января. Если бы он отправился на запад, то потерял бы один день, ему казалось бы, что он вернулся 24 января. Такой именно случай и произошёл в действительности с первой кругосветной экспедицией Магеллана (1521 г.).

Причина ошибки заключается в том, что путешественник, объехавший земной шар с запада на восток, т. е. в том же направлении, в каком вращается Земля, сделает вокруг оси земного шара один лишний оборот. Для него Солнце взойдёт не 24 раза, а 25. При движении на запад, т. е. навстречу вращению Земли, он сделает, напротив, одним оборотом меньше.

Чтобы такие просчёты не повторялись, установлена «линия изменения даты», которая приблизительно совпадает с  $180^\circ$  меридианом от Гринича. Она проходит от Берингова пролива на Тихому океану, несколько восточнее Новой Зеландии, нигде не касаясь суши (кроме необитаемой Антарктиды). Корабль, пересекающий эту линию с запада на восток, считает один и тот же день два раза, например, если он пересек эту линию 1 января, то следующий день тоже будет 1 января. Наоборот, при переходе в обратном направлении один день выбрасывается из счёта, и следующий день будет 3 января.

На линии изменения даты начинается день. Так, например, новый год наступает раньше всего на Чукотском полуострове и острове Врангеля, через час — на Камчатке, в Австралии и т. д. В Москве он начинается на 10 часов позже, а на Аляске и Сандвичевых островах позже на 23 часа, т. е. почти на полные сутки.

### III. КАЛЕНДАРЬ

Календарём называется система счёта длинных промежутков времени. В древности составление календаря являлось одной из главнейших задач астрономии.

**§ 48. Единицы времени.** Основные «единицы времени» даны нам непосредственно в периодической смене небесных явлений. При этом в нашем распоряжении имеется несколько готовых единиц различной продолжительности; есть и более короткие, удобные для измерения только небольших промежутков времени, есть и длинные, как бы предназначенные для измерения больших периодов.

Основная мера времени — *средние солнечные сутки* — слишком коротка для выражения, например, возраста человека. Поэтому пришлось обратиться к двум другим единицам — к *тропическому году* (§ 29) и *месяцу*, т. е. к времени обращения Луны.

Эти три единицы времени совершенно независимы одна от другой и поэтому все они между собой несоизмеримы. Другими словами, ни год, ни лунный месяц не могут быть выражены никакой периодической дробью суток. Выражения этих величин в сутках, как и их долях, являются числами иррациональными, которые приблизительно имеют следующие значения:

Тропический год =  $365^d 5^h 48^m 46^s$ ,  $0,45 = 365,24220$  . суток.

Лунный месяц =  $29^d 12^h 44^m 2^s$ ,  $9 = 29,53059$  . . суток.

Вся сложность вопроса о календаре и вся та путаница, которой прежде постоянно сопровождалось летосчисление, объясняются невозможностью согласовать между собой эти основные единицы измерения времени.

**§ 49. Календари лунные и лунно-солнечные.** В древних религиях Луна играла выдающуюся роль. Поэтому календарь, находившийся в руках жрецов, был в те времена *лунный*. Примером такого лунного календаря является магометанский, употребляющийся и доныне. В основе его лежит лунный год, состоящий из 12 лунных месяцев, которые попеременно равны 29 и 30 дням, в среднем таким образом  $29\frac{1}{2}$  дням. Так как в действительности лунный месяц на 44 минуты длиннее, то для согласования с истинными новолуниями и полнолуниями вставляются по определённым правилам добавочные дни. Поэтому лунный год содержит то 354, то 355 дней.

Так как лунный год короче солнечного, то день мусульманского Нового года приходится по нашему календарю каждый раз на 11 дней раньше, чем в предыдущем году, и в течение 33 наших лет он обойдёт все времена года. Поэтому магометанский счёт постоянно обгоняет наш: каждые 33 наших года считаются за 34 магометанских.

При лунном календаре времена года быстро перелбываются по всевозможным календарным месяцам. Для устранения этого неудобства были придуманы *лунно-солнечные календари*, представляющие собой попытку согласовать лунный счёт времени с солнечным.

Пример календаря лунно-солнечного представляет календарь еврейский. Месяцы и годы в нём тоже лунные, но для согласования счёта годов с Солнцем к некоторым годам прибавляется лишний 13-й месяц. Календарь этот очень

сложен; и 12-месячные и 13-месячные годы имеют разную продолжительность; длина 12-месячного года изменяется от 353 до 355 дней, длина 13-месячного — от 383 до 385 дней. Ценой этой сложности достигнуто то, что 1 число каждого месяца почти точно совпадает с новолунием, а Новый год всегда приходится осенью, в сентябре или в начале октября.

**§ 50. Календарь солнечные.** Так как солнечный год несоизмерим с лунным месяцем, то уже в древности были введены календари, основанные исключительно на движении Солнца. Таким был, например, календарь древнего Египта. Хотя египтяне рано убедились, что год содержит  $365\frac{1}{4}$  дней, всё-таки для исчисления времени они пользовались годом, содержащим всегда 365 дней. Это привело к такому следствию: так как истинный год длиннее почти на 6 часов, то каждое определённое положение Солнца, например прохождение через точку весеннего равноденствия (начало весны), приходилось каждый следующий год на 6 часов позже, через 4 года оно наступало позже на целые сутки, т. е. приходилось уже на следующее календарное число, а через 120 лет запаздывало на месяц. Приблизительно через 1460 лет равноденствие, пройдя последовательно через все дни и месяцы года, возвращалось к начальной дате.

**§ 51. Юлианский календарь (старый стиль).** Родоначальником современного календаря был календарь римский. Римляне пользовались первоначально лунным годом, продолжительность всего в 354 дня (§ 49). Так как он был на 11 дней короче тропического года, то для согласования календарных чисел с временами года вставлялся через каждые два года добавочный месяц, содержавший 22 или 23 дня. Эта вставка вносила ещё большую путаницу, так как производилась без всякой правильности по усмотрению верховного жреца.

Беспорядок был прекращён реформой диктатора Юлия Цезаря, проведённой при участии египетского астронома Созигена. Цезарь отказался от попыток согласовать счисление времени с движением Луны и построил свой календарь исключительно на движении Солнца. Указом 46 г. до нашей эры продолжительность года была установлена в 365 дней, но к каждому четвёртому году прибавлялся один лишний день. Именно, так называемый «шестой день перед календами<sup>1)</sup> марта» (т. е. перед 1 марта, по нашему счёту 24 февраля) в этом году считался дважды: кроме «шестого дня» (шестой — по-латыни *sextus*) вставлялся накануне его день, называвшийся «ещё раз шестым» (*bis sextus*). Отсюда и произошло название этого года «*bissextilis*», превратившееся в русском языке в «високос». Таким образом февраль в високосном году содержит 29 дней. Очевидно, каждые три простых года вместе с одним високосным составляют в сумме столько же дней, сколько составляли бы четыре одинаковых года по  $365\frac{1}{4}$  дней каждый. Поэтому *юлианский год* равен 365 дням 6 часам.

---

<sup>1)</sup> От этого латинского названия первых чисел месяца (*calendae*) и произошло слово «календарь».

С тех пор, как был введён счёт годов «от рождества Христова», високосными годами стали считать все годы, число которых делится на 4, например 1944, 1948 и т. д.

**§ 52. Григорианский календарь (новый стиль).** Юлианский год длиннее тропического (§ 29) на 11 мин. 14 сек. Постепенно накапливаясь, эта разница составит в 400 лет уже более 3 суток ( $11^m 14^s \times 400 = 4493^m = 3^d 2^h 53^m$ ). Поэтому равноденствия и солнцестояния постепенно переходят на все более ранние числа, каждые 400 лет на 3 дня (в другую сторону, чем в египетском календаре, § 50). Так, в год Никейского собора (325 г. нашей эры), на котором были установлены правила христианского летосчисления, весна начиналась 21 марта, а к середине XVI столетия равноденствие передвинулось уже на 11 марта. Поэтому папа Григорий XIII решил произвести новую реформу календаря и буллой от 1 марта 1582 г. провёл в жизнь проект, предложенный в 1576 г. итальянским врачом Лилио. Реформа состояла в следующем.

1) Было приказано после 4 октября 1582 г. считать сразу не 5 октября, а 15 октября. Этим была исправлена ошибка, накопившаяся за 1200 лет, и начало весны в следующем году опять вернулось на 21 марта.

2) Чтобы избежать накопления ошибки в будущем, было решено каждые 400 лет выбрасывать из счёта те 3 дня, на которые за это время юлианский календарь разойдётся с Солнцем. Для этого пришлось несколько изменить правило чередования високосных годов, и оно приняло такую форму: високосным годом считается год, число которого делится на 4, *за исключением годов целых столетий* (1700, 1800 и т. д.). Эти последние годы считаются високосными только в том случае, если *число столетий* делится на 4. Следовательно, годы 1600 и 2000 остаются високосными, а годы 1700, 1800 и 1900 делаются простыми. Разница между новым и старым стилями составляла в XVI столетии 10 дней, в 1600 г. она не изменилась, так как этот год был високосным по обоим календарям. Но в 1700 г. разница достигла 11 дней, так как в феврале этого года по старому счёту было 29 дней, а по новому — 28. По той же причине в 1800 г. разница возросла до 12 дней, а с 1900 г. составляет 13 дней.

Григорианский календарь был сейчас же принят всеми католическими государствами; в протестантских странах эта реформа была произведена гораздо позже. В дореволюционной России вопрос о введении нового стиля поднимался несколько раз, но всегда разбивался об упорство церкви. После Великой Октябрьской социалистической революции он был введён почти немедленно, с 1 февраля 1918 г.

**§ 53. Достоинства и недостатки обоих календарей.** Так как год несомненно больше суток (§ 48), *то абсолютно точный календарь невозможен*. Неточен и григорианский календарь. При его введении принималось, что ошибка старого стиля за 400 лет составляет ровно 3 суток, между тем в действительности она на 2 ч. 53 м. больше

(§ 52). Эта часть ошибки осталась несправленной, но она может достичь целых суток только через 3 000 лет (в юлианском календаре такая ошибка накапливается уже через 128 лет). Таким образом равноденствия и солнцестояния в течение многих столетий будут приходиться всё на один и те же числа. В этом — неоспоримое преимущество нового стиля. Но зато старый стиль проще. Поэтому в астрономии расчёты для больших периодов времени и теперь ведутся в юлианских годах, представляющих удобную единицу времени. Числа месяцев астрономы всего мира давно уже считают по новому стилю.

**§ 54. Современное состояние вопроса о календаре.** Календарная реформа папы Григория XIII была вызвана не научными, а *церковными* соображениями: нужно было, чтобы весеннее равноденствие непременно наступало 21 марта, а то иначе нарушались церковные постановления о дне празднования пасхи. Если бы реформа была отложена до нашего времени, то она, по всей вероятности, была бы проведена как-нибудь иначе, так как можно изобрести более точные системы, чем григорианская. Возможно даже, что учёные высказались бы за сохранение юлианского календаря: он проще всех, какие только можно придумать, а переход времён года на другие числа в нём почти не заметен в течение даже 3—4 поколений, что вполне достаточно для целей гражданской жизни. Таким образом, когда в нашей стране в 1918 г. была проведена календарная реформа, то она состояла не в том, что вместо «неверного» счёта дней был введён «верный». Мы просто присоединились к тому счёту, который был принят уже во всех других странах.

Было придумано несколько календарных систем, ещё более точных, чем григорианская, но все они имеют чисто теоретический интерес, так как точность григорианского календаря более чем достаточна для целей обыденной жизни. Поэтому в изменении правила чередования високосных годов (т. е. в изменении средней длины календарного года) нет надобности. Желательна лишь реформа месяцев, которые, как показывает самое название, представляют последние следы древнего лунного календаря. Они неудобны тем, что имеют различную длину — от 28 дней до 31 дня. Тем же неудобством обладают и кварталы года. Предложено несколько проектов для устранения или ослабления этого недостатка. Наилучшим, навидимому, является следующий проект.

Все кварталы имеют одинаковую длину по 13 недель, т. е. по 91 дню. Первый месяц каждого квартала содержит 31 день, остальные — по 30 дней. Каждый квартал (и год) начинается всегда в один и тот же день недели. Так как  $91 \times 4 = 364$  дня, то между 30 декабря и 1 января вставляется день вне счёта месяцев; это международный нерабочий день Нового года. В високосном году такой же нерабочий день вставляется ещё после 30 июня.

Вопрос о введении этого календаря (или ему подобного) должен быть решён, конечно, в международном масштабе.

**§ 55. Эра от «рождества Христова».** В древнем Риме годы обычно считались и обозначались по императорам. Поэтому начало правления каждого нового императора являлось началом нового счёта (новой эры). Употреблялись и другие эры, например легендарная эра от «основания Рима». Этот счёт продолжался и после разрушения Римской империи. Только когда пошёл 1284 г. от «основания Рима», монах Дионисий, работая над составлением календаря, указал, что христианам неудобно придерживаться «языческого» счёта, а надо считать от рождения Христа. Без всяких доказательств он объявил, что это событие произошло 532 года тому назад и что поэтому следующий год надо нумеровать как 533 год «от рождества Христова». Только с этого года и начался счёт годов нашей эры, а вовсе не с первого года, и этот счёт несколько не доказывает, что Христос действительно существовал. Таким образом, наша эра является такой же фантастической, как, например, древнееврейская эра «от сотворения мира», и ведётся она от такого же, никогда не происходившего события.

На самом деле Дионисий взял число 532 потому, что оно удобно при некоторых календарных расчётах. Действительно,  $532 = 4 \times 7 \times 19$ , где 7 есть число дней недели, 4 — период високоса, а 19 — так называемый круг Луны: через 19 лет лунные фазы приходятся опять на те же календарные числа. Поэтому, например, дни подвижного праздника пасхи, которая вычислялась по Луне, через 532 года опять повторяются в том же порядке.

### Упражнения к главе II

1. Когда Солнце опускается под горизонт на  $17^\circ$ , наступает полная ночь (кончаются *астрономические сумерки*). Через сколько времени (приблизительно) после захода Солнца наступает ночь во время равноденствия на земном экваторе? под широтой  $45^\circ$ ? под широтой  $60^\circ$ ?

2. Какой угол с горизонтом образует эклиптика в момент восхода точки весеннего равноденствия для широты  $+55^\circ$ ? в момент захода этой точки? то же для широты  $+66\frac{1}{2}^\circ$ ?

3. В каких точках Земли и когда эклиптика может совпасть с горизонтом?

4. Какое склонение и прямое восхождение имеет северный полюс эклиптики?

5. Какую долготу и широту имеет северный полюс мира?

6. Какова, приблизительно, долгота Солнца 23 сентября? 1 октября? 1 января?

7. Какова высота Солнца в меридиане в день летнего солнцестояния в Ленинграде ( $\varphi = 59^\circ 57'$ )? в Ташкенте ( $41^\circ 18'$ )? под широтой  $+23\frac{1}{2}^\circ$ ? под широтой  $+66\frac{1}{2}^\circ$ ? то же для зимнего солнцестояния? Чем замечательны и как называются две последние широты?

8. Около 1100 г. до начала нашей эры китайские астрономы нашли, что в день летнего солнцестояния высота Солнца в полдень равнялась  $79^\circ 7'$ , а в день зимнего солнцестояния  $31^\circ 19'$  (к югу от зенита). Под какой широтой было сделано наблюдение? Каково было тогда наклонение эклиптики к экватору? *Ответ:* Широта  $+34^\circ 47'$ , наклонение  $23^\circ 54'$ .

9. Во сколько времени звёздные часы уходят вперёд против средних на 1 сек.?

10. Затмение Луны 29 января 1953 г. начнётся в  $23^h 09^m$  по мировому времени. В котором часу оно начнётся в Москве и Ташкенте по пояскому



времени? по декретному времени? по местному гражданскому времени? *Указание:* Восточная долгота Ташкента равна  $4^h37^m$ ; Москвы —  $2^h30^m$ . См. также карту часовых поясов на рис. 19.

11. В котором часу приблизительно проходит через верхнюю кульминацию Капелла ( $\alpha = 5^h13^m$ ) 1 февраля в Москве: а) по местному времени? б) по времени III пояса? в) во Владивостоке по времени X пояса? *Указание:* Долгота Москвы  $2^h30^m$ , Владивостока  $8^h47^m$ .

12. В какой день года Сириус, самая яркая звезда неба ( $\alpha = 6^h43^m$ ), кульминирует в полночь? *Ответ:* 1 января, т. е. в момент начала «Нового года».

13. Звезда  $\delta$  Ориона 14 ноября восходит в 8 час. вечера. В какой день она взойдет в 5 ч. 30 м. вечера? Каково приблизительно её прямое восхождение, если её склонение равно нулю?

14. Где стоит на небе Сириус (задача 12) 21 марта через час после захода Солнца? 23 сентября за час до восхода Солнца?

15. Выразить интервал  $14^h57^m38^s$ , 6 среднего времени в единицах звёздного времени (по табл. II, стр. 371).

16. Выразить интервал  $22^h44^m55^s$ , 1 звёздного времени в единицах среднего времени.

17. М. В. Ломоносов родился 1 сентября 1711 г. (предположительно) по старому стилю. Какое это было число по новому стилю?

18. Какой был день по новому стилю, когда по старому стилю считалось 15 февраля 1900 г.? 25 февраля 1900 г.?

19. Всегда ли весеннее равноденствие приходится на одно и то же число месяца и если переходит, то как?

20. Какова продолжительность григорианского года и какова его неточность? *Ответ:* 365, 2425 суток.

21. Был предложен проект календаря, в котором на каждые 128 лет должно было быть не 32 високосных года, как в юлианском календаре, а 31 високосный и 97 простых. Докажите, что неточность календарного года составляла бы в таком календаре только 0,00001 суток.

22. 26 сентября Солнце в Москве восходит по местному времени в  $5^h51^m$  утра, а заходит в  $5^h51^m$  вечера. Чему равно в этот день уравнение времени?

23. 11 февраля по декретному времени Солнце взошло в  $8^h6^m$ , зашло в  $17^h26^m$ . Чему равна разница между декретным и местным временем данного места? *Указание:* 11 февраля — максимум уравнения времени (§ 40). *Ответ:* +31 мин.

24. На полярном круге ( $\varphi = +66^\circ33'$ ) в течение одного полугодия восход Солнца приходится ежедневно в один и тот же момент звёздного времени; в течение другой половины года то же имеет место для солнечного захода. Докажите это без помощи тригонометрических вычислений и выясните детали явления. Чему равно это неизменное звёздное время солнечного восхода (захода)? Как в этот момент располагается эклиптика? В какой день года и каким образом постоянное звёздное время восхода Солнца сменяется постоянством звёздного времени захода? Как изменяется на полярном круге продолжительность дня и ночи в течение года?

25. Под какой широтой должна зимовать полярная экспедиция, чтобы в течение хотя бы одних суток видеть, даже в полдень, полную ночь, без сумерек (§ 29)?

26. В течение какого календарного отрезка времени экспедиция, зимующая на северном полюсе, видит полную бессумеречную ночь? *Указание:* Надо рассмотреть по астрономическому календарю изменение склонения Солнца в течение года.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### ЗАДАЧИ НА ВРЕМЯ И КООРДИНАТЫ

#### I. ЗАДАЧИ НА ЗВЁЗДНОЕ ВРЕМЯ

**§ 56. Задача 1-я. Звёздное время в среднюю местную полночь.**  
 Пусть некоторое место имеет долготу  $\lambda$  часов к востоку от Гринича; это значит, что полночь наступит там на  $\lambda$  часов раньше, чем в Гриниче. Поэтому звёздное время в полночь, которое растёт на  $9^s, 856$  в час (§ 42), будет для местной полночи на  $9,856\lambda$  сек. меньше, чем гриничское, данное в календаре. Для каждого места эта поправка постоянна. Например, для Москвы ( $\lambda = 2^h 30^m 17^s = 2^h, 505$ ) она составляет  $-9^s,856 \times 2,505 = -24,69$  сек. Такую величину надо прибавлять звёздному времени в среднюю гриничскую полночь, данному в астрономическом календаре, всякий раз, как определяется звёздное время в среднюю полночь для Москвы.

**§ 57. Задача 2-я. Обращение среднего времени в звёздное.**  
 Вместо вывода общего правила или формулы рассмотрим пример. Требуется определить звёздное время, соответствующее 22 час. 45 мин. 48,3 сек. местного московского времени 31 октября 1931 г. Для решения задачи будем пользоваться астрономическим календарём на данный год и таблицами для превращения среднего времени в звёздное.

|                                       |                           |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Звёздное время в средн. грин. полночь | $2^h 33^m 20^s, 0$        |
| Поправка для Москвы (задача 1-я)      | $- 24, 7$                 |
| Звёздное время в средн. моск. полночь | $2 \ 32 \ 55, 3$          |
| Интервал ср. времени от полуночи      | $22 \ 45 \ 48, 3$         |
| Редукция в звёздн. единицы (табл. II) | $\frac{+}{-} \ 3 \ 44, 4$ |
| Искомое звёздное время                | $25 \ 22 \ 28, 0$         |
|                                       | т. е. $1^h 22^m 28^s, 0$  |

**§ 58. Задача 3-я. Обращение звёздного времени в среднее.**  
 Обратим предыдущую задачу: найдём, в котором часу по местному московскому времени 31 октября 1931 г. звёздное время равно  $1^h 22^m 28^s, 0$ . Для этого надо узнать интервал, протекший от средней

полночи до данного момента, и выразить его в единицах среднего времени.

|   |                     |
|---|---------------------|
| Данное звёздное время $+24^h$               | $25^h 22^m 28^s, 0$ |
| Звёздн. время в средн. моск. полночь        | $-2 32 55, 3$       |
| Интервал звёздного времени от полуночи      | $22 49 32, 7$       |
| Редукция в единицы средн. врем. (табл. III) | $-3 44, 4$          |
| Местное время (средн. от полуночи)          | $22^h 45^m 48^s, 3$ |

**§ 59. Задача 4-я. Определение среднего времени верхней кульминации звезды с данным прямым восхождением  $\alpha$ .** Эта задача согласно § 25 является повторением предыдущей: надо определить, в какой момент по среднему или местному времени звёздное время  $s$  будет равно  $\alpha$ ; это и будет момент кульминации звезды.

**§ 60. Задача 5-я. Определение часового угла звезды с данным прямым восхождением  $\alpha$  в данный момент среднего времени  $T_c$ .** Обращаем среднее время  $T_c$  в звёздное время  $s$  (задача 2-я); часовой угол звезды  $t$  найдётся из формулы  $t = s - \alpha$ , выведенной в § 25.

Если  $t < 12^h$  — звезда к западу от меридиана, при  $t > 12^h$  — к востоку. Если в задачи 2—5 входит не среднее, а *поисное* время, то делается перевод по формуле § 45.

Следующий отдел содержит вывод формул сферической тригонометрии, необходимых для решения дальнейших задач.

## II. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО СФЕРИЧЕСКОЙ ТРИГОНОМЕТРИИ

**§ 61. Сферический треугольник.** Решение многих астрономических задач основано на свойствах так называемого сферического треугольника. Сферический треугольник получится, если три точки  $A, B, C$ , лежащие на поверхности сферы, соединить дугами *больших кругов*. Таким образом стороны сферического треугольника  $BC, AC, AB$  являются дугами больших кругов; поэтому их обычно выражают в *угловых* единицах — градусах, минутах и секундах.

Будем обозначать, как в плоской тригонометрии, углы треугольника буквами  $A, B, C$ , а противолежащие им стороны соответственно через  $a, b, c$ . Заметим, что сумма углов сферического треугольника всегда *больше*  $180^\circ$  и пропорциональна его *площади*. Между сторонами и углами сферического треугольника существует много соотношений, изучаемых в сферической тригонометрии. Важнейшие из них выводятся ниже.

**§ 62. Основные формулы для решения косоугольного сферического треугольника.**

Формула косинуса стороны. Предположим, что в сферическом треугольнике  $ABC$  (рис. 20) стороны  $b$  и  $c$  меньше  $90^\circ$ . Проведём в точке  $A$  касательные к этим сторонам до пересечения с продолженными радиусами сферы  $OB$  и  $OC$  в точках  $D$  и  $E$ . Радиус

сферы примем за единицу. В таком случае

$$\left. \begin{aligned} AD &= \operatorname{tg} c, & OD &= \sec c, \\ AE &= \operatorname{tg} b, & OE &= \sec b. \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

Для определения отрезка  $DE$  будем иметь из треугольников  $ADE$  и  $ODE$  соотношения

$$DE^2 = AD^2 + AE^2 - 2AD \cdot AE \cos A,$$

$$DE^2 = OD^2 + OE^2 - 2OD \cdot OE \cos a,$$

так как угол между касательными  $AD$  и  $AE$  равен  $A$ , угол между радиусами  $OB$  и  $OC$  есть  $a$ .

Приравняв правые части последних равенств и переставив члены, получим:

$$2OD \cdot OE \cos a = (OD^2 + AD^2) + (OE^2 + AE^2) - 2AD \cdot AE \cos A. \quad (б)$$

Выражения в скобках равны единице. Заменяя в выражении (б) все отрезки по соотношениям (а) и сокращая на 2, получаем:

$$\sec b \sec c \cos a = 1 + \operatorname{tg} b \operatorname{tg} c \cos A \quad (в)$$

Умножая (в) на  $\cos b \cos c$ , получим окончательную формулу (1), выражающую сторону  $a$  по двум другим сторонам и противолежащему углу:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A. \quad (1)$$

Напишем по аналогии выражения для двух остальных сторон:

$$\left. \begin{aligned} \cos b &= \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos B, \\ \cos c &= \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C. \end{aligned} \right\} \quad (1')$$

Из трёх формул (1) и (1') можно с помощью только тригонометрических и алгебраических преобразований вывести ещё следующие формулы (2) и (3).

Формула синусов:

$$\sin a \sin B = \sin b \sin A. \quad (2)$$

Первая формула пяти элементов:

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A. \quad (3)$$

Подобные соотношения можно вывести и для углов сферического треугольника. Для этого рассмотрим так называемый *полярный треугольник*.

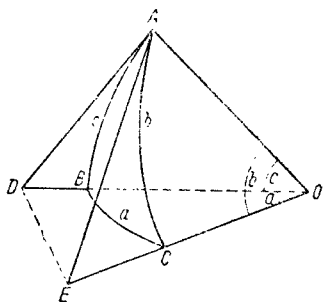


Рис. 20.

Проведём на сфере большие круги, для которых вершины  $A$ ,  $B$  и  $C$  данного треугольника  $ABC$  были бы полюсами. Такие круги можно назвать экваторами точек  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Взаимно пересекаясь, эти круги образуют новый треугольник, который называется полярным или дополнительным по отношению к данному треугольнику  $ABC$ . Стороны полярного треугольника  $a'$ ,  $b'$  и  $c'$  равны дополнениям до  $180^\circ$  соответственных углов  $A$ ,  $B$  и  $C$  данного треугольника  $ABC$ , т. е.

$$\begin{aligned}a' &= 180^\circ - A, \\b' &= 180^\circ - B, \\c' &= 180^\circ - C.\end{aligned}$$

Углы  $A'$ ,  $B'$  и  $C'$  полярного треугольника связаны со сторонами данного соотношениями:

$$\begin{aligned}A' &= 180^\circ - a, \\B' &= 180^\circ - b, \\C' &= 180^\circ - c.\end{aligned}$$

Применяя к полярному треугольнику формулы (1) и (3), получим соотношения (4) и (5).

Формула косинуса угла:

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a. \quad (4)$$

Вторая формула пяти элементов:

$$\sin A \cos b = \cos B \sin C + \sin B \cos C \cos a. \quad (5)$$

Произведя замену букв, можно написать ещё одну формулу (2), две формулы (4) и по пяти формул (3) и (5) (сделайте это).

**§ 63. Прямоугольный сферический треугольник.** Пусть  $C = 90^\circ$ , сторону  $c$  будем называть гипотенузой. Вставив  $C = 90^\circ$  в предыдущие формулы и сделав некоторые преобразования, получаем следующие формулы для прямоугольного треугольника:

$$\begin{aligned}\cos c &= \cos a \cos b, & (6) & \quad \begin{aligned} \operatorname{tg} b &= \sin a \operatorname{tg} B, \\ \operatorname{tg} a &= \sin b \operatorname{tg} A, \end{aligned} & (9) \\ \sin b &= \sin c \sin B, & & & \\ \sin a &= \sin c \sin A, & (7) & \quad \cos c = \operatorname{ctg} A \operatorname{ctg} B & (10) \\ \operatorname{tg} b &= \operatorname{tg} c \cos A, & & & \\ \operatorname{tg} a &= \operatorname{tg} c \cos B, & (8) & \quad \begin{aligned} \cos B &= \cos b \sin A, \\ \cos A &= \cos a \sin B. \end{aligned} & (11)\end{aligned}$$

**Правило Непера.** Вместо запоминания десяти формул (6—11) Непер предложил запоминать следующее правило для составления любой из них. Выбросим прямой угол, заменим катеты их дополнениями  $90^\circ - a$  и  $90^\circ - b$  и расположим (мысленно) полученные 5 «элементов» по окружности; каждый элемент будет иметь два прилежащих ему элемента и два противолежащих. Тогда косинус каждого элемента будет равен произведению котангенсов прилежащих ему элементов или произведению синусов противолежащих.

## III. ЗАДАЧИ НА ПРИМЕНЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ТРИГОНОМЕТРИИ

**§ 64. Астрономический треугольник.** Рассмотрим сферический треугольник *полюс — зенит — звезда* (треугольник  $PZM$ , рис. 21), который называют «астрономическим» или «параллактическим» треугольником. Стороны этого треугольника соответственно равны зенитному расстоянию светила  $z$ , дополнению склонения до  $90^\circ$  (т. е. полярному расстоянию  $p = 90 - \delta$ ) и дополнению до  $90^\circ$  широты места ( $90^\circ - \varphi$ ). Угол при полюсе равен часовому углу  $t$ , угол при зените составляет дополнение азимута до  $180^\circ$ , так как азимут отсчитывается от южной части меридиана (§ 22); угол при звезде нам не будет нужен. Зная три элемента этого треугольника, можно по формулам сферической тригонометрии вычислить три остальных элемента.

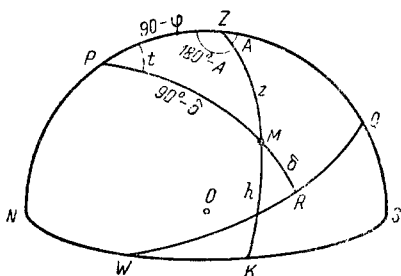


Рис. 21.

**§ 65. Задача 6-я. Преобразование системы координат  $(\alpha, \delta)$  в  $(A, z)$ .** Прямое восхождение звезды  $\alpha$ , склонение  $\delta$  и широта места  $\varphi$  даны, требуется вычислить зенитное расстояние ( $z$ ) и азимут ( $A$ ) для данного момента  $T_c$  среднего времени.

Сначала обращаем среднее время  $T_c$  в звёздное  $s$  (§ 57). Затем по формуле  $t = s - \alpha$  находим часовой угол звезды  $t$  (§ 60). Наконец, переходим от системы  $(t, \delta)$  к  $(A, z)$  с помощью параллактического треугольника. Именно, применяя к нему формулы (1) — (3) (§ 62) и считая данными  $90^\circ - \varphi$ ,  $90^\circ - \delta$  и  $t$ , находим для неизвестных  $z$  и  $A$  уравнения:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (12)$$

$$\sin z \cos A = -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos t, \quad (13)$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t. \quad (14)$$

Если требуется найти только  $z$ , достаточно одной первой формулы.

При полном вычислении делят третью формулу на вторую и определяют  $A$  по тангенсу. Очевидно, для азимута получатся два значения  $A_1 < 180^\circ$  и  $A_2 > 180^\circ$ . Из них берётся первое, если часовой угол  $t < 180^\circ$ , и второе, если  $t > 180^\circ$ . Найдя  $A$ , делят вторую или третью формулу на первую, чтобы  $z$  определить также по тангенсу.

**§ 66. Задача 7-я. Вычисление восхода и захода светила.** Когда светило в горизонте, его  $z = 90^\circ$ ,  $\cos z = 0$  и формула (12) принимает вид

$$0 = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t,$$

откуда получаем:

$$\cos t = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta. \quad (15)$$

Угол  $t$  иногда называется полудневной дугой светила (от меридиана до горизонта). При определении его по косинусу находим для него два значения  $+t$  и  $-t$ . Первое соответствует заходу, второе восходу. Звёздное время захода будет  $s_1 = \alpha + t$ , а для восхода  $s_2 = \alpha - t$ .

В случае Солнца полудневная дуга  $t$  даст заход Солнца по истинному солнечному времени (§ 38). Чтобы получить момент захода по *местному* времени, надо прибавить ещё  $12^h$  и уравнение времени, взятое из календаря (§ 40). Для восхода Солнца вычитаем полудневную дугу из  $12^h$  и опять прибавляем уравнение времени. Наконец, для перехода от местного времени к *поясному* или *декретному* (§ 46) надо приписать соответствующую поправку; для Москвы, например,  $+29^m 43^s$  (для декретного времени).

Заметим, что формула (15) даёт только приблизительные моменты восхода и захода, так как в ней не учтена рефракция (а для Солнца и Луны — и угловой радиус). Более точное решение см. в § 88.

**§ 67. Задача 8-я. Определение времени по высоте светила.** Пусть известны широта места  $\varphi$  и координаты  $(\alpha, \delta)$  светила; зенитное расстояние его  $z$  измеряем каким-нибудь прибором. Тогда часовой угол светила для момента измерения определяется из уравнения (12)

$$\cos t = \frac{\cos z - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}. \quad (16)$$

Звёздное время момента наблюдения будет

$$s = \alpha + t.$$

Если нужно, его можно превратить в среднее время (§ 58). Эта задача — одна из важнейших: она позволяет определить *точное время*.

**§ 68. Задача 9-я. Определение положения точки весеннего равноденствия.** Точка весеннего равноденствия ( $\gamma$ ) на небе ничем не отмечена. Чтобы определить её положение, надо измерить склонение

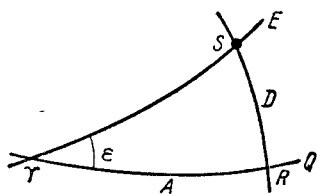


Рис. 22.

Солнца, проще всего по его зенитному расстоянию в истинный полдень, и по нему вычислить его прямое восхождение (рис. 22).

В прямоугольном сферическом треугольнике, образованном экватором ( $\gamma Q$ ), эклипкой ( $\gamma E$ ) и кругом склонения Солнца ( $SR$ ), угол наклона  $\epsilon$  известен (§ 34), сторона  $SR$  есть склонение центра Солнца  $D$ , сторона  $\gamma R$  — его прямое восхождение  $A$ . Формула (9) § 63 даёт

$$\sin A = \operatorname{tg} D \operatorname{ctg} \epsilon.$$

Точка  $\gamma$  лежит на экваторе на  $A$  часов к западу от Солнца,

## Упражнения к главе III

1. Вычислить зенитное расстояние и азимут Арктура для Саратова ( $\varphi = -51^{\circ}32'0''$ ) в  $13^h34^m54^s$  звёздного времени;  $\alpha = 14^h13^m22^s$ ,  $\delta = +19^{\circ}26'28''$ .  
*Ответ:*  $z = 32^{\circ}58'17''$ ;  $A = -16^{\circ}49'33''$ .

2. Вычислить момент верхней кульминации Фомальгаута ( $\alpha$  Южной Рыбы,  $\alpha = 22^h54^m53^s$ ) в Москве, по местному времени, для 19 октября 1950 г. *Ответ:*  $21^h04^m14^s$  местн. времени. *Указание:* Звёздное время в полночь для этой и следующей задачи рассчитать по задаче § 56 и § 42, где дан прирост звёздного времени в полночь за сутки.

3. Вычислить момент восхода Сириуса ( $\alpha = 6^h42^m56^s$ ,  $\delta = -16^{\circ}39'$ ) в Москве, 22 октября 1950 г., по поясному и по декретному времени; широта  $\varphi = 55^{\circ}45'$ .  
*Ответ:*  $T_N = 23^h53^m51^s$ ;  $T_g = 24^h52^m51^s$ , т. е.  $0^h53^m51^s$ .

4. Какие  $\alpha$  и  $\delta$  должны иметь две звезды, которые в  $7^h35^m$  звёздного времени кульминировали бы в Москве ( $\varphi = 55^{\circ}45'$ ) на зенитном расстоянии  $z = 40^{\circ}$ , одна к югу, другая к северу от зенита?

5. Вычислить  $\alpha$  и  $\delta$  звезды, которая в Москве в момент звёздного времени  $s = 11^h11^m36^s$  имела координаты:  $z = 49^{\circ}15'10''$  и  $A = 298^{\circ}28'50''$ . *Ответ:*  $\alpha = 14^h11^m35^s$ ,  $\delta = +19^{\circ}38',7$ .

6. Вычислить продолжительность самого длинного и самого короткого дня в Ленинграде ( $\varphi = 59^{\circ}57'$ ), в Москве ( $\varphi = 55^{\circ}45'$ ), в Самарканде ( $\varphi = 38^{\circ}39'$ ). Какова зависимость между длиной самого длинного и самого короткого дней в данном месте? *Ответ:* Самый короткий день в Ленинграде  $5^h31^m$ , в Самарканде  $9^h18^m$ .



## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ И НАБЛЮДЕНИЯ

#### 1. ТЕЛЕСКОП

**§ 69. Астрономические наблюдения.** В соответствии с разделением наблюдательной астрономии на два больших отдела, астрометрию (§ 5 б) и астрофизику, все астрономические наблюдения можно разделить на две группы.

а) Определение *положений* светил на небесной сфере. Оно позволяет изучать сначала *видимое движение* небесных тел, а затем узнать и их *истинное движение* в пространстве, расстояние и размеры. Видимое положение светила определяется посредством измерения его координат, чаще всего экваториальных. Поэтому измерения *прямых восхождений* и *склонений* являются важнейшими астрометрическими наблюдениями, а приборы, служащие для этих измерений, могут считаться главными астрометрическими инструментами.

б) Изучение *физических свойств* небесных тел. Сюда относятся: изучение поверхности светил, измерение их яркости, определение химического состава и т. д. Особенно важную роль в этих астрофизических наблюдениях играют *спектральный анализ* и *фотометрия*.

Одними из основных астрономических инструментов являются телескопы, которые подразделяются на две группы: рефракторы и рефлекторы.

**§ 70. Рефракторы (зрительные трубы).** Астрономическая труба, называемая рефрактором, в своей простейшей форме (рис. 23) состоит из двух *выпуклых* стёкол: большого объектива *О* с длинным фокусным расстоянием и маленького короткофокусного *окуляра о*. Лучи, идущие от светила *AB*, например, от Луны, собираются объективом в так называемой фокальной плоскости и дают действительное обратное изображение светила *ba*. Это изображение рассматривается при помощи окуляра *о*, который играет роль лупы. Астрономическая труба даёт, таким образом, обратные изображения предметов; при наблюдении небесных тел это не представляет никаких неудобств.

**§ 71. Увеличение телескопа.** Углы *COA* и *FOa* (рис. 23) равны; поэтому, если смотреть на изображение Луны *ab*, поместив глаз на продолжении оптической оси трубы *COF*, на расстоянии, равном фокусному рас-

стоянию объектива  $OF$ , то это изображение будет видно под таким же углом зрения, как сама Луна. А так как окуляр  $o$  (а стало быть, и глаз) устанавливается от изображения на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию окуляра, то отсюда следует:

1) Если фокусное расстояние окуляра ( $f$ ) равно фокусному расстоянию объектива ( $F$ ), то труба не даёт ни увеличения, ни уменьшения, или даёт увеличение в 1 раз: и предмет, рассматриваемый без телескопа и его изображение в телескопе имеют один и тот же угловой диаметр.

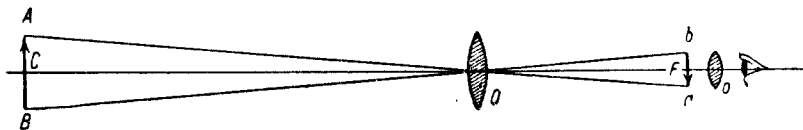


Рис. 23.

2) Если фокусное расстояние окуляра  $f$  в  $m$  раз меньше фокусного расстояния  $F$  объектива, то глаз помещается от изображения на расстоянии в  $m$  раз меньшем, и, следовательно, угловой диаметр изображения кажется нам в  $m$  раз больше, чем при увеличении в 1 раз. Это значит, что телескоп *увеличивает* в  $m$  раз. Таким образом увеличение телескопа  $m$  выражается формулой:

$$m = F:f,$$

т. е. *увеличение равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра*. При каждом большом телескопе имеется всегда несколько окуляров с различными фокусными расстояниями. Меняя их, мы можем получать разные увеличения.

**§ 72. Затруднения, возникающие при сильных увеличениях.** Из формулы предыдущего параграфа как будто вытекает, что при достаточно сильном (короткофокусном) окуляре можно получить какое угодно увеличение. Например, чтобы получить с рефрактором, объектив которого состоит из простой линзы с фокусным расстоянием в 1 м, увеличение в 1000 раз, надо снабдить его окуляром с фокусным расстоянием в 1 мм. Но если взглянуть при таком увеличении на какую-нибудь планету, то окажется, что её изображение: 1) чрезвычайно слабо, 2) края его неясны и 3) окрашены радужными цветами. Несмотря на большие размеры диска планеты, мы на нём увидим меньше, чем при слабом увеличении. Поэтому, чтобы сильные увеличения можно было применять с пользой, надо устранить отмеченные недостатки изображений. Для этого нужно, чтобы объектив сильного рефрактора обладал: 1) большой *светосилой* и 2) *ахроматизмом*.

**§ 73. Ахроматический объектив.** В первых рефракторах объектив состоял из одного выпуклого стекла, которое действует подобно призме, т. е. не только преломляет падающий на него свет, но также

и разлагает его на лучи разных цветов, так как фиолетовые лучи преломляются сильнее красных и собираются, следовательно, ближе к объективу, чем красные. Поэтому изображение звезды, образованное таким стеклом, имеет вид светлого пятнышка, окрашенного в разные цвета. Это явление названо *хроматической aberrацией*. Для её уничтожения объектив делают из двух отдельных стёкол. Первое стекло в таких сложных объективах, которые называются *ахроматическими*, имеет двояковыпуклую форму и состоит из кронгласа, обыкновенного стекла с зеленоватым оттенком; второе стекло, состоящее из более тяжёлого сорта стекла — флинтгласа, вогнуто. Степень разложения цветов (дисперсия) у этих сортов стёкол различна. Пользуясь этой разницей дисперсий, можно, как показал ещё в XVIII столетии член Петербургской Академии наук Л. Эйлер, отшлифовать поверхности обоих стёкол таким образом, что лучи двух различных цветов, например, красного и синего, пройдя через такой сложный объектив, соберутся в одной точке. Подбирая три стекла различного показателя преломления и различной дисперсии, можно достичь того, что в одной точке соберутся лучи трёх различных цветов. Лучи промежуточных цветов соберутся в очень близких точках, и изображение, даваемое объективом, окажется почти совершенным. Такие объективы называются *апохроматами*.

**§ 74. Яркость изображения.** Надо различать два случая: а) неподвижные звёзды, которые все так далеки, что даже в самые сильные трубы остаются *точками*; б) светила, имеющие заметные размеры (диск), например, Луна и планеты.

а) Телескоп можно рассматривать как искусственный глаз, причём объектив играет роль зрачка. Так как все лучи от звезды, падающие на объектив, попадают в глаз наблюдателя (если пренебречь поглощением и отражением света в стеклах трубы), то наблюдатель получает света от звезды во столько раз больше, чем при рассматривании простым глазом, во сколько раз площадь объектива больше площади зрачка, и звезда ему покажется во столько же раз ярче. Итак, телескоп *увеличивает яркость звезды* (но не видимые размеры) тем сильнее, чем больше площадь объектива. Это увеличение пропорционально квадрату диаметра (или «отверстия») объектива. Вот почему телескоп открывает множество «телескопических» звёзд, свет которых слишком слаб для невооружённого глаза.

б) Если светило имеет диск, то яркость его изображения в трубе всегда значительно *меньше*, чем для невооружённого глаза, так как увеличенное изображение занимает на сетчатке глаза большую поверхность. Предположим, что мы рассматриваем светило в один и тот же телескоп, приставляя всё более сильные окуляры. Количество света, собираемого объективом, будет всё время одинаково; между тем при более сильных увеличениях видимый диск планеты растёт, и одно и то же количество света распределяется на всё большую площадь. Поверхность планеты кажется поэтому всё *менее яркой*,

Это же относится и к яркости дневного неба. При рассматривании в телескоп небо кажется темнее, чем для простого глаза, и при достаточно сильном увеличении на его фоне можно в любой час дня увидеть наиболее яркие звёзды.

**§ 75. Предел увеличения рефрактора.** Сила рефрактора зависит от его объектива, а не от окуляров. Объектив должен быть *ахроматичен* и иметь возможно *большее отверстие*. Но при этом он должен иметь и достаточно *большое фокусное расстояние*, чтобы для получения сильных увеличений не приходилось применять слишком короткофокусные окуляры, которые дают плохие изображения. Обыкновенно фокусное расстояние объектива делается в 15—18 раз больше его диаметра.

Кроме неполного ахроматизма и слабого освещения есть ещё третья причина, которая ставит предел силе рефрактора: это — беспокойствие земной атмосферы, вызывающее всем известное явление мерцания звёзд. Рефрактор увеличивает производимые мерцанием искажения положений и вида светил во столько же раз, во сколько раз он увеличивает и угловые размеры самих светил. Поэтому наблюдения с сильными увеличениями возможны только при исключительно спокойном состоянии атмосферы. Хотя большие рефракторы нашего времени могут давать увеличения до 5—6 тыс. раз, этими увеличениями не пользуются, а применяют увеличения, не превышающие 1000. Увеличения от 1000 до 2000 раз употребляются крайне редко и только при наблюдениях двойных звёзд.

**§ 76. Рефлекторы (зеркальные телескопы).** В рефлекторах объективом служит вогнутое стеклянное зеркало, посеребрённое или алюминированное с передней стороны. В фокусе зеркала получается, как и в фокусе выпуклой линзы, действительное перевёрнутое изображение светила, которое рассматривается в окуляр; чтобы изображение было наиболее совершенным зеркалу при шлифовке дают не сферическую, а параболическую форму (кривизна его у краёв несколько меньше, чем у центра). Так как изображение получается перед зеркалом и наблюдателю пришлось бы заслонять собой часть падающих лучей, то вводится ещё плоское вспомогательное зеркальце, плоскость которого образует с оптической осью рефлектора угол в  $45^\circ$ . Световые лучи, собранные и отражённые главным зеркалом, падают на вспомогательное зеркальце, отражаются от него под углом  $90^\circ$  к оптической оси рефлектора и затем уже попадают в окуляр (система Ньютона). Таким образом голова наблюдателя не заслоняет света, падающего на главное зеркало.

Существуют и другие системы рефлекторов, в которых вспомогательные зеркала имеют вогнутую или выпуклую форму. Изображение в этих системах получается в отверстии главного зеркала, где расположен окуляр.

Однако само вспомогательное зеркальце всё-таки оно загораживает и поглощает часть света, идущего от небесного светила, и производит явления дифракции. Исходя из этого, М. В. Ломоносов отказался от

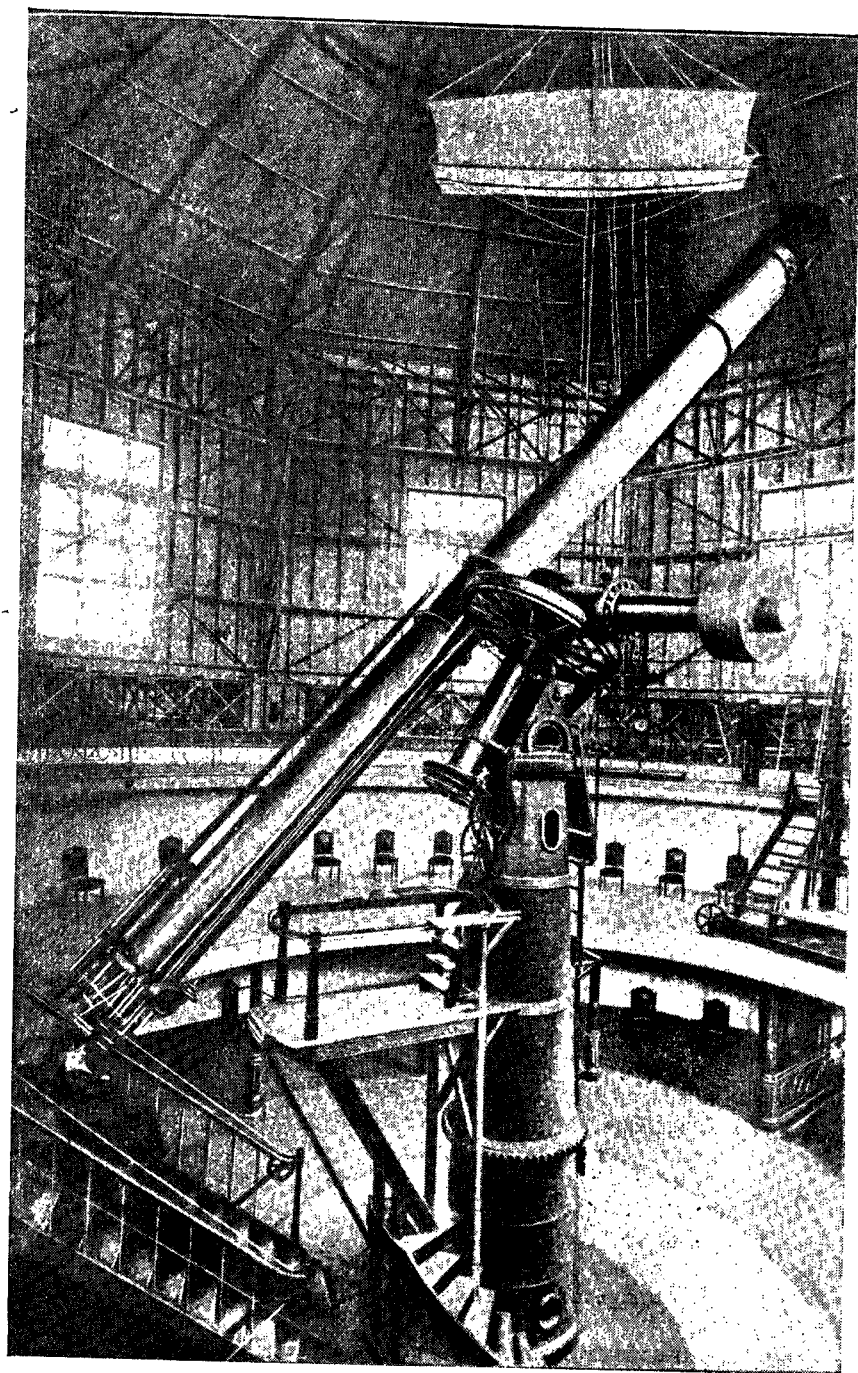


Рис. 24.

вспомогательного зеркальца и предложил рассматривать изображения светил непосредственно перед главным зеркалом. А чтобы наблюдатель своей головой не загораживал света, падающего на зеркало, Ломоносов предложил ставить зеркало не перпендикулярно к оси инструмента, а с небольшим наклоном, так, чтобы изображение получалось не в центре, а у края трубы телескопа. Такой инструмент был построен Ломоносовым и демонстрировался им в Петербургской Академии наук в 1762 г. Система Ломоносова в своё время получила большое распространение.

**§ 77. Сравнительные достоинства рефракторов и рефлекторов.** Главное достоинство рефлектора — это полный *ахроматизм*, что очень важно при *астрофизических* исследованиях. Но при *астрометрических* работах рефракторы безусловно имеют преимущество. Кроме того, они удобнее для обращения и прочнее, так как зеркальный слой (особенно серебряный) скоро тускнеет. Но зато изготовление рефракторов гораздо труднее, и поэтому большие рефракторы много дороже рефлекторов таких же размеров. Действительно, у зеркала надо отшлифовать чрезвычайно точно только одну поверхность, а у стеклянного объектива — четыре или даже шесть (у апохроматов). Но самую главную трудность при этом представляет отливка совершенно прозрачного и однородного стеклянного блока, между тем для зеркала внутренняя неоднородность стекла имеет меньшее значение.

**§ 78. Величайшие телескопы нашего времени.** а) Рефракторы. Самый крупный рефрактор, имеющий объектив диаметром в 1 метр, установлен на обсерватории Йеркса (близ Чикаго, США). Его длина достигает 19 м, объектив весит около 400 кг. Он построен в 1896 г. Самый большой рефрактор в Европе и в СССР установлен в 1885 г. на Пулковской обсерватории (рис. 24). Отверстие его 76 см, фокусное расстояние 13,9 м (в 1941 г. его установка была разрушена фашистами). Трудности изготовления гигантских объективов так велики, что за последние 50 лет ещё ни разу не удалось построить рефрактор больше перкского.

б) Рефлекторы. Так как изготовление больших зеркал значительно легче, чем больших стеклянных объективов, то в настоящее время построены десятки крупных рефлекторов. Наибольший из действующих рефлекторов, «стойкоймовый» телескоп, установлен на обсерватории на горе Вильсон в Калифорнии (рис. 25). Его стеклянное посеребрённое зеркало имеет в поперечнике  $2\frac{1}{2}$  м и весит 4 т, а вся движущаяся часть инструмента (труба, ось, противовес и т. п.) — до 100 т. В последнее время на горе Паломар (в Калифорнии) устанавливается рефлектор с зеркалом 5 метров в диаметре. Обращение с такими гигантскими телескопами крайне затруднительно и требует сложных механических приспособлений.

**§ 79. Телескоп Д. Д. Максудова.** Принципиально новую систему телескопа, качественно отличную от всех предыдущих, создал в 1941 г. советский учёный проф. Д. Д. Максудов, который использовал и объединил положительные качества рефрактора и рефлектора.

В телескопе Максутова (рис. 26 а) главное зеркало ( $O$ ) имеет сферическую (а не параболическую) форму; перед главным зеркалом устанавливается мениск ( $M$ ), т. е. выпукло-вогнутое стекло, ограниченное сферическими поверхностями. Мениск исправляет изображение светила, которое искажается сферической формой зеркала, и изображение полу-

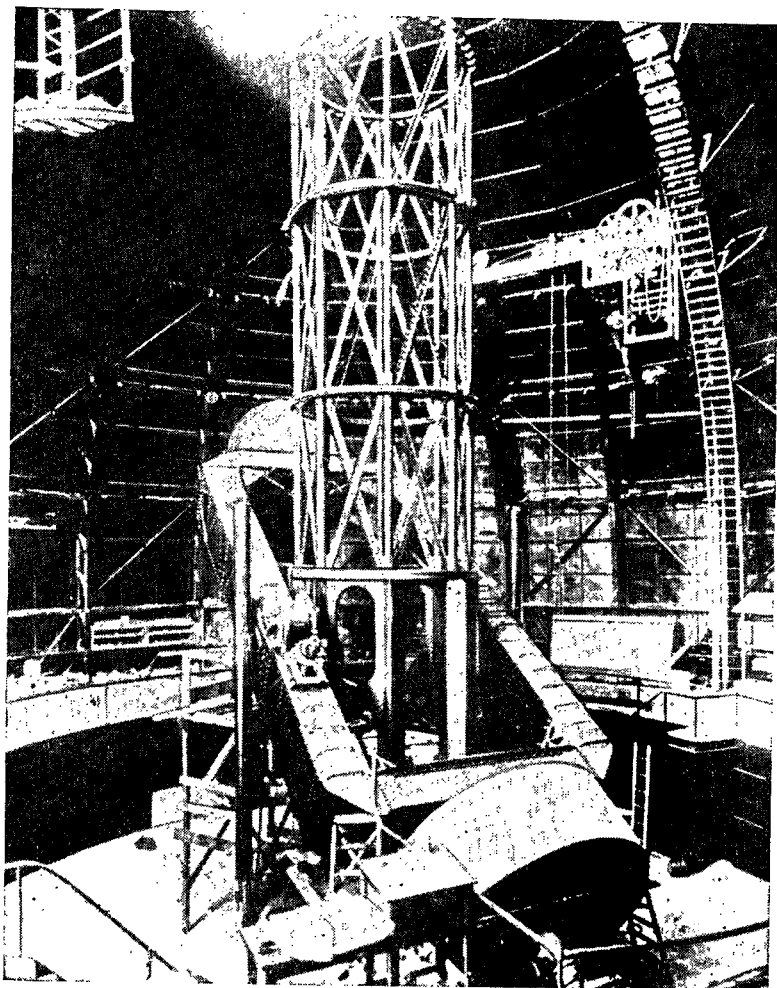


Рис. 25.

чается высокого качества, без искажений и окраски. Центральная часть мениска ( $ab$ ) покрывается тонким слоем алюминия и служит вспомогательным зеркалом для направления лучей в окуляр  $o$ .

Таким образом, все оптические поверхности телескопа Максутова имеют сферическую форму и поэтому легко могут быть изготовлены с наивысшей точностью. Алюминированная (или посеребрённая) поверхность зеркала защищена от атмосферных влияний менисксом и сохраняется в течение длительных промежутков времени. Размеры этого телескопа весьма скромны; например, рефрактор с объективом диаметром 200 мм имеет длину около 3 метров, рефлектор с зеркалом того же диаметра — около 1 метра, а телескоп Максутова (с тем же диаметром 200 мм) имеет длину всего лишь около 50 см

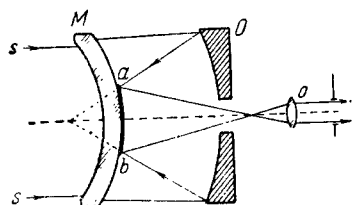


Рис. 26а.

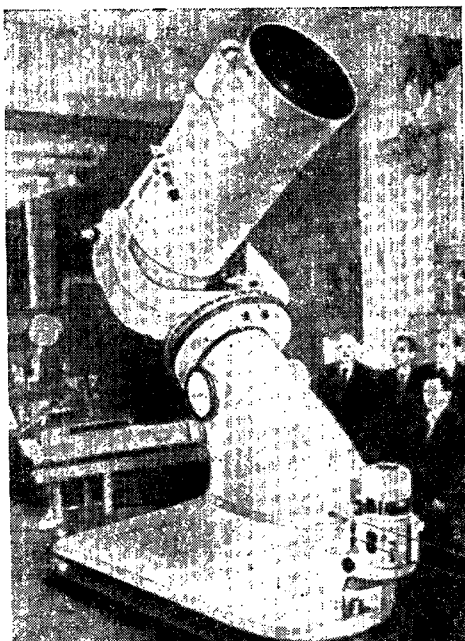


Рис. 26б.

Небольшой вес телескопа Максутова значительно упрощает его установку и эксплуатацию. Изобретение Д. Д. Максутова открывает новые пути к созданию высококачественных советских телескопов; оно получило высокую оценку со стороны Советского правительства, которое в 1946 г. присудило Д. Д. Максутову Сталинскую премию.

Ныне в Советском Союзе построен и установлен на Алмаатинской обсерватории телескоп Максутова отверстием в 50 см (рис. 26 б); конструируются телескопы более крупных размеров.

## II. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ СВЕТИЛ

Рефрактор почти всегда снабжается приспособлениями, которые превращают его в *измерительный* прибор. С помощью этих измерительных приборов измеряются координаты светил, чаще всего прямое восхождение ( $\alpha$ ) и склонение ( $\delta$ ).



**§ 80. Наблюдения в меридиане.** Экваториальные координаты определяются проще всего в момент прохождения светила через меридиан, большую частью во время *верхней* кульминации.

а) Определение склонения. Широту места  $\varphi$  считаем известной, так как её можно определить, не зная склонений звёзд (см. § 98). Поэтому для определения склонения достаточно измерить зенитное расстояние  $z$  звезды в момент верхней кульминации, и  $\delta$  найдётся по формуле

$$\delta = \varphi - z$$

(§ 26). Измеренное  $z$  должно быть исправлено за рефракцию, как будет объяснено дальше.

б) Относительное определение прямого восхождения. Прямое восхождение светила равно звёздному времени в момент его верхней кульминации (§ 25). Поэтому для определения прямого восхождения  $\alpha$  надо точно заметить по часам звёздное время  $s$  верхней кульминации светила. Если часы поставлены верно, то  $\alpha = s$ .

Такое определение  $\alpha$  звезды по показанию часов называется относительным определением, так как часы в свою очередь должны быть выверены по другой звезде, прямое восхождение которой  $\alpha_0$  известно. В момент её верхней кульминации показание часов должно равняться

$$s_0 = \alpha_0.$$

Однако в действительности астрономы никогда не требуют от часов, чтобы они были *поставлены* верно. Важно, чтобы они по возможности верно *шли*, т. е. показывали всегда одно и то же время в момент верхней кульминации одной и той же звезды (если часы отрегулированы по *звёздному* времени). Пусть в момент кульминации звезды с известным прямым восхождением  $\alpha_0$  показание часов было  $T_0$ , а в момент кульминации неизвестной звезды оно равно  $T$ . Тогда прямое восхождение последней звезды будет

$$\alpha = \alpha_0 + (T - T_0).$$

Другими словами, разность прямых восхождений равна разности показаний часов.

Таким образом, инструментом, измеряющим прямое восхождение, являются *точные часы*. Зрительная труба играет при этом второстепенную роль. Она только увеличивает видимую скорость суточного движения звезды и позволяет поэтому точнее заметить момент, в который звезда пересекает метку, обозначающую меридиан.

в) Абсолютное определение прямого восхождения. Звёзды, по которым выверяются астрономические часы, называются *фундаментальными* звёздами. Определение прямого восхождения фундаментальной звезды называется *абсолютным* определением, так как оно не зависит от координат других звёзд. При таком определении звезда связывается с невидимой точкой весеннего равноденствия через посред-

ство Солнца. Для этого с часами, идущими по звёздному времени, но поставленными как угодно, определяют в один и тот же день: 1) момент верхней кульминации центра Солнца  $T_{\odot}$ , 2) его склонение  $D$ , 3) момент верхней кульминации звезды  $T_0$ . Тогда прямое восхождение звезды будет

$$\alpha_0 = A + (T_0 - T_{\odot}).$$

Здесь  $A$  есть прямое восхождение Солнца, *вычисленное* по его склонению  $D$  (§ 68).

**§ 81. Меридианный круг.** Для точного определения прямых восхождений и склонений светил употребляется *меридианный круг* (рис. 27).

Зрительная труба этого инструмента ( $AB$ ) насажена на ось, перпендикулярную к трубе. Эта ось (полая внутри) лежит горизонтально,

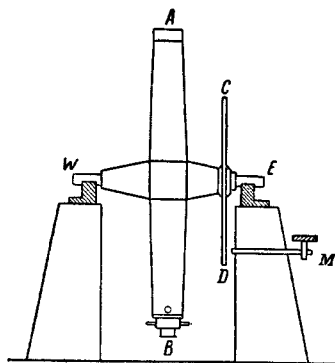


Рис. 27а.

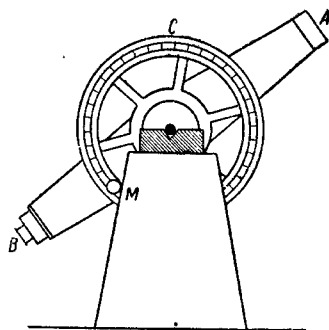


Рис. 27б.

по направлению с востока на запад, на двух подставках («лагерях»), укрепленных на неподвижных прочных столбах. При вращении оси труба вращается вместе с нею. Если инструмент установлен совершенно точно, то оптическая ось трубы описывает меридиан. Поэтому каждое светило можно наблюдать в трубу меридианного круга только во время кульминации.

Главную часть прибора, от которой весь инструмент получил свое название, составляет *круг*  $CD$ , наглухо насаженный на ось и вращающийся вместе с трубой. По его окружности нанесены деления через каждые  $2'$  или  $4'$  с чрезвычайно большой точностью. При поворачивании трубы против неподвижного указателя  $M$ , укрепленного на столбе, становятся различные деления круга. Когда труба направлена на небесный экватор, указатель должен показывать  $0^{\circ}$ . Увеличение точности отсчёта достигается установкой (около неподвижной метки  $M$ ) микроскопа с измерительным приспособлением — микрометром, который позволяет измерять расстояние метки от ближайшего деления круга в секундах и десятых долях секунды. Таким образом, хотя круг бывает разделён через  $2'$ , отсчёты производятся с точностью до  $0''.1$ .

Внутри трубы, в фокусе объектива, натянуты вертикальные и горизонтальные тонкие нити; если поле зрения осветить с помощью особого приспособления, то наблюдатель в окуляре будет видеть нити вместе со звёздами (рис. 28); средняя из вертикальных нитей должна изображать меридиан (при правильной установке инструмента). Расстояния остальных нитей от средней должны быть точно известны.

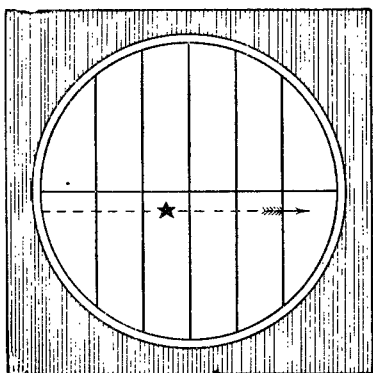


Рис. 28.

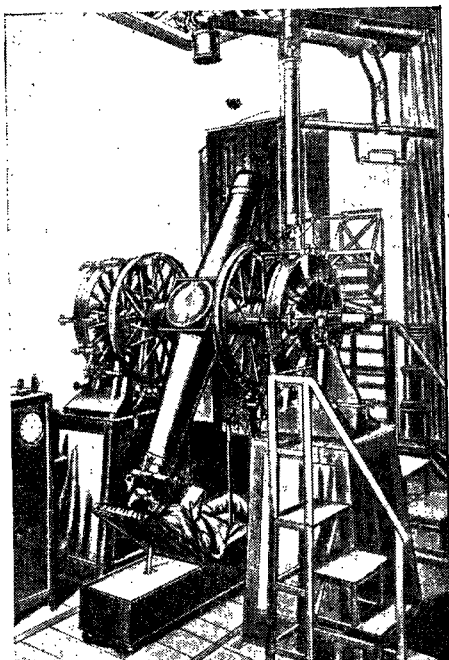


Рис. 29.

**§ 82. Наблюдения с помощью меридианного круга.** Зрительная труба меридианного круга (рис. 29) устанавливается так, чтобы наблюдаемая звезда суточным движением шла в точности по горизонтальной нити. Тогда указатель на разделённом круге покажет склонение звезды.

Для определения прямого восхождения звезды наблюдатель отмечает моменты пересечения звездой вертикальных нитей. Наблюдения производятся всегда на нескольких нитях, а не на одной средней, для увеличения точности. Существует несколько способов определения моментов прохождения звезды через нити. Исторически первым был:

1) *Способ «глаз и ухо».* Наблюдатель считает в уме секунды, слушая удары часов, и замечает моменты, когда звезда пересекает ту или другую нить. При некотором навыке можно научиться оценивать эти моменты в секундах и десятых долях секунды и записывать их сейчас же, не отрывая глаза от окуляра и не сбиваясь в секундном счёте.

2) *Применение хронографа.* Так как способ «глаз и ухо» довольно утомителен, то в конце прошлого столетия его стали заменять спосо-

бом электрической регистрации с помощью *хронографа*, который построен на принципе телеграфного аппарата и электрической проводкой соединён с часами. На равномерно движущейся бумажной ленте часы автоматически отмечают секунды, а наблюдатель нажатием клавиши отмечает на той же ленте моменты прохождения звезды через нити.

Точность наблюдения с хронографом ещё повышается при применении так называемого *безличного микрометра*. В этом случае в фокусе трубы, кроме неподвижных нитей, имеется ещё *подвижная* вертикальная нить. Наблюдатель устанавливает эту нить с помощью особого винта на звезду и ведёт нить так, чтобы она всё время рассекала изображение звезды. В те моменты, когда подвижная нить совпадает с неподвижными вертикальными нитями, хронограф автоматически делает отметки на ленте. Роль наблюдателя состоит лишь в том, чтобы точно вести нить, не давая звезде сходить с неё. Иногда даже и движение нити производится особым механизмом, а наблюдатель должен только его регулировать.

3) *Фотоэлектрический метод регистрации прохождений*, разработанный советским астрономом, лауреатом Сталинской премии Н. Н. Павловым и применённый впервые в Пулкове в 1939 г., произвёл полный переворот в технике астрономических наблюдений. В нём сама звезда своим светом воздействует на фотоэлемент, который посылает электрические сигналы, отмечаемые на ленте хронографа. Этот метод облегчает работу наблюдателя, исключает полностью его личные ошибки (§ 83, б) и значительно повышает точность получаемых результатов.

Отмеченные по часам моменты прохождений звезды через все нити приводятся к одной средней нити; после внесения ряда поправок по ним вычисляется *прямое восхождение* звезды.

**§ 83. Поправки наблюдений.** а) Погрешности инструмента. Меридианный круг, как и всякий прибор, не может быть изготовлен и установлен с абсолютной точностью.

Поэтому меридианный круг всегда имеет ряд ошибок (ошибки инструмента). Главнейшие из них: 1) ось, около которой вращается инструмент, никогда не бывает в точности горизонтальна (*наклонение*; оно определяется точным *уровнем*); 2) ось не в точности направлена по линии восток-запад (*азимут*); 3) труба не в точности перпендикулярна к оси инструмента (*коллимация*), так что оптическая ось трубы при вращении описывает не плоскость меридиана, а некоторую коническую поверхность; 4) круг насажен на ось не вполне правильно: его центр не совпадает с осью (*эксцентриситет*); 5) расстояния между штрихами круга не все в точности одинаковы (*ошибки делений*).

Погрешности инструмента обыкновенно не велики. Тем не менее наблюдения могут дать ценные результаты только в том случае, если все известные источники ошибок приняты во внимание. Определение этих постоянно меняющихся ошибок и исправление наблюдений от их влияния составляют одну из главных задач *практической астрономии*.

То, что сказано здесь о меридианном круге, относится и к другим измерительным инструментам. Все грандиозные результаты астрономии получены ценой кропотливой работы по учёту мелких поправок.

б) Личные ошибки. Некоторые ошибки наблюдений вызваны несовершенством самого *наблюдателя*. Даже самый искусный наблюдатель не может совершенно точно определить по часам момент прохождения звезды через нить (§ 82), а всегда делает при этом некоторую ошибку. Эта *личная ошибка* у разных наблюдателей различна, но у каждого наблюдателя остаётся почти неизменной. Личные ошибки необходимо принимать во внимание особенно в тех случаях, когда в одной и той же работе участвует несколько наблюдателей.

**§ 84. Часы.** Изобретение точных часов способствовало развитию астрономии почти в той же степени, как и изобретение зрительной трубы, так как часы представляют собой один из важнейших *измерительных* астрономических инструментов.

а) Часы с маятником — главный прибор для измерения времени в астрономии. Устройство большинства астрономических часов ничем не отличается от устройства обыкновенных очень хороших часов; изготавливаются они с величайшей тщательностью, какая только возможна.

Самой важной частью часов является *маятник*, делающий одно колебание в *секунду* (среднего или звёздного времени).

Система зубчатых колёс имеет целью: 1) слегка подталкивать маятник, чтобы он не останавливался, и 2) считать его секундные колебания и отмечать их число на циферблате с помощью стрелок. Силой, движущей систему колёс, является тяжесть гири; находясь под постоянным действием этой силы, колёса должны были бы вертеться ускоренно, и движение стрелок было бы неравномерным. Этому препятствует маятник: с помощью так называемого *спуска* он каждую секунду задерживает одно из колёс и делает, таким образом, вращение системы колёс равномерным, хотя и прерывистым. В то же время сам маятник получает небольшой толчок, который поддерживает его движение.

Главная причина, мешающая часам идти совершенно равномерно, — это изменение температуры. При повышении температуры маятник удлиняется, колеблется медленнее, и часы отстают; при понижении температуры, наоборот, часы уходят вперёд. Чтобы достигнуть равномерности хода, маятник всегда снабжается *компенсатором*. Так называется приспособление, благодаря которому центр качания маятника и при его удлинении и при укорачивании остаётся всё время на одном и том же расстоянии от точки привеса; время качания поэтому не изменяется. Главные часы обсерватории часто устанавливаются в подвале, где температура в течение года почти не меняется. Для уничтожения маленьких неправильностей хода, происходящих от изменения воздушного давления, часы помещают под стеклянный колпак, из-под которого частично выкачан воздух.

б) Хронометр. Так как часы с маятником нельзя переносить во время хода, то при переездах, особенно морских, употребляются хронометры. Это в сущности обыкновенные пружинные часы, сделанные чрезвычайно тщательно. *Балансир* хронометра, играющий роль маятника, также снабжается компенсатором; обыкновенно он отбивает *полусекунды*. По правильности хода даже лучшие хронометры уступают маятниковым часам.

**§ 85. Поправка часов.** Ни одни часы не идут абсолютно правильно. Но так как точное время крайне необходимо для политической, общественной и хозяйственной жизни нашей страны, то одной из важнейших задач советской практической астрономии является определение и хранение точного времени, определение *поправки* часов.

Поправкой часов называется величина, которую надо *придать* к показанию часов, чтобы получить верное время. Таким образом, поправка часов *положительна*, если часы *позади* верного времени, и *отрицательна*, когда часы *впереди*. Непосредственно из наблюдений определяется обычно поправка *звёздных* часов. Для этого отмечают показание звёздных часов в момент прохождения через меридиан какой-нибудь звезды, прямое восхождение которой ( $\alpha$ ) точно известно. Очевидно, в этот момент звёздное время равно  $\alpha$ . Сравнивая эту величину с показанием  $T$  проверяемых часов, мы получим их поправку. Теперь часы можно было бы переставить, чтобы они показывали правильно, но этого обыкновенно не делают. Поправку записывают и прибавляют с надлежащим знаком к тому времени, которое показывают часы. Поправку часов обозначают через  $u$ . Очевидно  $u = \alpha - T$ .

Зная поправку  $u$  звёздных часов, можно по их показанию для любого момента вычислить точное среднее солнечное время  $T_c$ , а также декретное время  $T_d$  (или поясное  $T_N$ ), и сравнить вычисленные результаты с показанием соответствующих часов — средних солнечных местных  $T'_c$  или декретных  $T'_d$ ). Разности между вычисленными моментами и показаниями часов дадут соответствующие поправки. Например, поправка декретных часов  $u_d = T_d - T'_d$ .

Зная поправку часов  $u_d$ , можно по показаниям часов  $T'_d$  определять точное время для любого момента суток:

$$T_d = T'_d + u_d.$$

Поправка часов не остаётся постоянной, а всё время меняется, и астрономам приходится систематически определять её из наблюдений. Этим занимаются специальные службы времени, имеющиеся при крупных обсерваториях.

Изменение поправки часов за сутки называется *ходом часов*. У хороших часов ход должен быть мал и главное — постоянен. Те часы, у которых суточные колебания хода превышают полсекунды, считаются очень плохими.

Чтобы все учреждения, службы, экспедиции и всё население Советского Союза знали точное время, астрономические обсерватории СССР передают сигналы точного времени по радио. Так, Государственный Астрономический институт им. П. К. Штернберга (ГАИШ), находящийся в Москве, передаёт сигналы точного времени ежедневно в 1 час, 7 час., 12 час. и 19 часов.

§ 86. **Пассажный инструмент.** Для определения поправки часов обыкновенно употребляется небольшой переносный инструмент, так

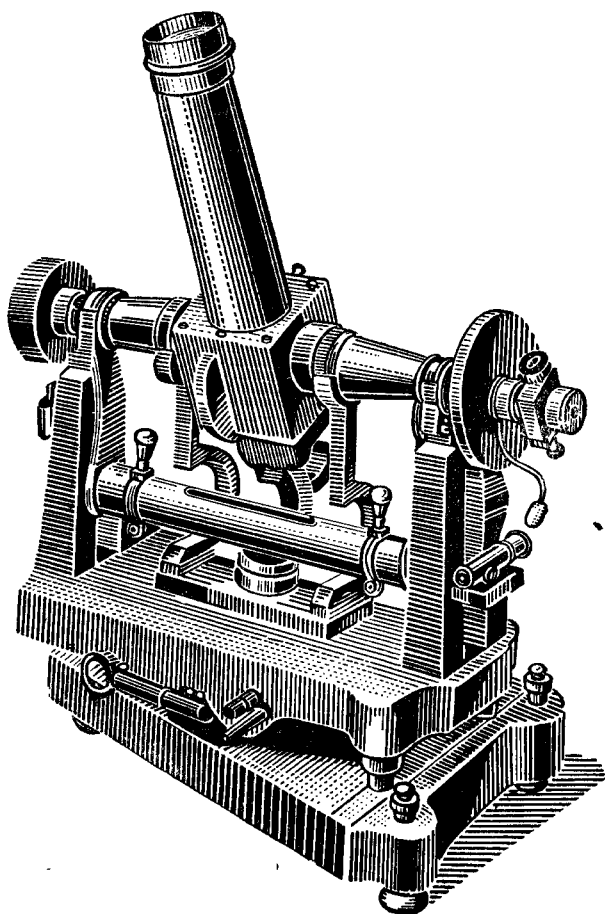


Рис. 30.

называемый *пассажный* (т. е. инструмент прохождений, рис. 30), который подобно меридианному кругу устанавливается в меридиане. Он отличается от меридианного круга отсутствием точно разделённого

круга. Важную особенность пассажного инструмента составляет *перекладка*: во время наблюдений его можно быстро переложить так, что восточный конец оси (восточная «цапфа») ляжет на западный «лагерь».

По наблюдениям нескольких звёзд в один вечер поправку часов можно определить с точностью до нескольких сотых долей секунды.

**§ 87. Рефракция.** Световой луч, идущий от звезды, при вступлении в земную атмосферу отклоняется от прямолинейного направления по законам *рефракции* (т. е. преломления). Преломления нет только в том случае, если светило в зените; тогда луч вступает в слои атмосферы перпендикулярно к ним. Наклонные же лучи рефракция изгибает, приближая их к вертикальной линии. Отклонение от начального направления тем больше, чем атмосфера плотнее. А так как плотность атмосферы увеличивается с приближением к земной поверхности, то луч, вступив в атмосферу, изгибается всё сильнее и принимает форму кривой линии. Мы видим светило по тому направлению, по которому луч вступил в наш глаз; поэтому благодаря рефракции светило нам кажется *выше* над горизонтом, на зенитном расстоянии  $z' < z$ , где  $z$  — истинное зенитное расстояние светила, т. е. то зенитное расстояние, какое имело бы светило, если бы не было преломления в земной атмосфере.

При выводе формулы, учитывающей рефракцию, представляют себе, что атмосфера состоит из ряда сферических слоёв, причём внутри каждого слоя преломление одинаково, а меняется только при переходе от слоя к слою (рис. 31). Луч от светила  $M$ , вступив в земную атмосферу в точке  $a$ , преломится, приблизившись к вертикали  $AO$ , где  $O$  есть центр Земли. В точке  $b$  он испытает новое преломление и т. д. Наблюдатель, находящийся в точке  $A$ , увидит светило по тому направлению, которое имел луч в его последней точке, т. е. по направлению прямой  $AM'$ . С вертикальной линией она составляет, очевидно, меньший угол ( $z'$ ), чем линия, по которой мы бы видели светило, если бы не было атмосферы.

В зените рефракция равна нулю, а по мере приближения к горизонту она значительно возрастает и у горизонта превышает полградуса.

Кроме того, рефракция зависит от плотности воздуха, следовательно, от его температуры и давления.

Рефракция при любых температурах ( $t^\circ$ ) и давлениях ( $p$ ) воздуха называется истинной. Рефракция при «нормальных условиях», т. е. при  $t^\circ = +10^\circ \text{C}$  и  $p = 760 \text{ мм}$  ртутного столба, носит название средней рефракции.

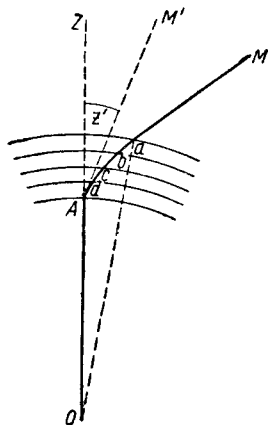


Рис. 31.



Точный учёт рефракции даётся сложными формулами. В первом же приближении можно пренебречь кривизной земной поверхности близ места наблюдения и изобразить земную атмосферу плоскими слоями с различными коэффициентами преломления  $n_1, n_2, n_3, \dots$ , (рис. 32). Пусть соответствующие углы падения светового луча на границах слоёв будут  $i_m, i_{m-1}, i_{m-2}, \dots, i_2, i_1$ .

Тогда, по закону преломления света, можно написать:

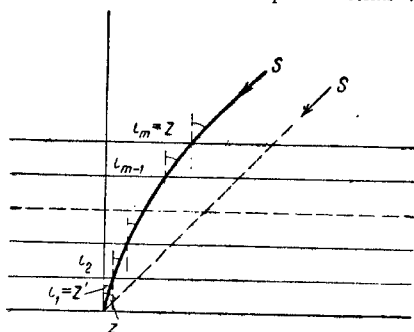


Рис. 32.

$$\frac{\sin i_m}{\sin i_{m-1}} = \frac{n_{m-1}}{n_m},$$

$$\frac{\sin i_{m-1}}{\sin i_{m-2}} = \frac{n_{m-2}}{n_{m-1}},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Перемножая левые и правые части написанных равенств, получим:

$$\frac{\sin i_m}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_m} \dots \quad (1)$$

Так как внешний слой атмосферы прилегает к безвоздушному пространству и его плотность весьма мала, то его коэффициент преломления может быть принят  $n_m = 1$ .

Далее,  $i_m = z$ , где  $z$  — истинное зенитное расстояние светила, а  $i_1 = z'$ , т. е. видимое зенитное расстояние светила.

Подставляя значения  $i_1, i_m$  и  $n_m$  в равенство (1), получим:

$$\frac{\sin z}{\sin z'} = n_1.$$

Обозначая величину рефракции (т. е. разность  $z - z'$ ) через  $\rho$ , получим:

$$z = z' + \rho$$

или

$$\frac{\sin z' \cos \rho + \cos z' \sin \rho}{\sin z'} = n_1. \quad (2)$$

Для зенитных расстояний  $z'$  от  $0^\circ$  до  $70^\circ$  величина  $\rho$  весьма мала; поэтому можно положить  $\cos \rho = 1$  и  $\sin \rho = \rho \sin 1''$ .

Тогда формула рефракции для  $z' < 70^\circ$  примет окончательный вид:

$$\rho = \frac{n_1 - 1}{\sin 1''} \operatorname{tg} z'. \quad (3)$$

При нормальных условиях ( $t^\circ = +10^\circ \text{ С}$  и  $p = 760 \text{ мм}$  ртутного столба) коэффициент преломления воздуха у земной поверхности  $n_1 = 1,00023$ , и средняя рефракция (помня, что  $\sin 1'' = 0,00000485$ ) определится:

$$\rho = \frac{1,00023 - 1}{0,00000485} \cdot \operatorname{tg} z'$$

или, окончательно:

$$\rho = 58'', 2 \operatorname{tg} z'. \quad (4)$$

Таким образом, для зенитных расстояний, меньших  $70^\circ$ , величина рефракции  $\rho$  может быть вычислена по формуле

$$\rho = 58'',2 \operatorname{tg} z'.$$

Коэффициент  $58'',2$  называется *постоянной рефракции*. При  $z' = 70^\circ$  эта формула даёт ошибку больше  $1''$ , а при дальнейшем приближении к горизонту становится совсем непригодной, так как даёт при  $z = 90^\circ$  бесконечно большую величину; между тем действительная величина рефракции в горизонте составляет около  $35'$ .

Истинная рефракция вычисляется по особым таблицам, наиболее точными из которых являются Пулковские таблицы. Средняя рефракция учитывается по таблице, приводимой ниже.

При очень низких температурах рефракция чрезвычайно усиливается. В полярных странах отмечены случаи, когда рефракция в горизонте превышала  $2^\circ$ .

На азимуты светил рефракция не влияет.

Таблица средней рефракции  
(при  $t^\circ = +10^\circ \text{С}$  и  $p = 760 \text{ мм рт. столба}$ )

| Зенитное<br>расстояние | Рефракция | Зенитное<br>расстояние | Рефракция | Зенитное<br>расстояние | Рефракция |
|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| $0^\circ$              | $0'00''$  | $60^\circ$             | $1'40''$  | $88^\circ 0''$         | $18'09''$ |
| $10^\circ$             | $0'10''$  | $70^\circ$             | $2'39''$  | $89^\circ 0''$         | $24'25''$ |
| $20^\circ$             | $0'21''$  | $80^\circ$             | $5'16''$  | $89^\circ 30''$        | $29'26''$ |
| $30^\circ$             | $0'33''$  | $82^\circ$             | $6'30''$  | $90^\circ 0''$         | $34'54''$ |
| $40^\circ$             | $0'48''$  | $84^\circ$             | $8'23''$  |                        |           |
| $50^\circ$             | $1'09''$  | $86^\circ$             | $11'39''$ |                        |           |

**§ 88. Следствия рефракции.** 1) Влияние на момент восхода и захода. У горизонта рефракция поднимает светила больше, чем на величину углового диаметра Солнца (§ 20). Поэтому, когда мы видим, что при восходе Солнца появился весь его диск, в действительности он ещё целиком находится под горизонтом. Таким образом, благодаря рефракции восход Солнца наступает несколько раньше (в умеренных широтах на несколько минут), а заход на столько же запаздывает, и день оказывается длиннее, чем был бы при отсутствии атмосферы.

Моментом захода Солнца считается момент захода его верхнего края, который приблизительно на  $16'$  выше центра Солнца, кроме того, рефракция поднимает Солнце в среднем ещё на  $35'$ . Поэтому, когда истинный центр Солнца находится ниже горизонта на  $51'$ , верхний видимый край его находится как раз на горизонте.

Вычисление захода идёт по формуле (12) § 65, причём  $z = 90^\circ 51'$ ,  $\cos z = -0,0148$ :

$$\cos t = -(0,0148 \sec \varphi \sec \delta + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta).$$

Формула даёт истинное солнечное время захода (или восхода  $24^h - t$ ); для перехода к среднему времени надо прибавить уравнение времени. Склонение центра Солнца ( $\delta$ ) берётся из календаря для момента захода (или восхода), который приблизительно известен заранее.

2) Рефракцией объясняется также изменение формы дисков Солнца и Луны у горизонта: рефракция сильнее поднимает нижний край светила, чем верхний (больше чем на  $5'$ , как видно из таблицы) и поэтому вертикальный диаметр его приблизительно на  $1/8$  делается короче; между тем горизонтальный диаметр рефракцией не изменяется. Поэтому диск светила принимает овальную форму. Увеличение же видимых размеров дисков Луны и Солнца у горизонта является следствием оптической иллюзии.

**§ 89. Универсальный инструмент (теодолит).** Этот небольшой переносный инструмент служит для определения *горизонтальных координат*, т. е. высоты и азимута. Он имеет *две оси* и два разделённых круга: один вертикальный, другой горизонтальный, оба значительно меньших размеров, чем у меридианного круга (рис. 33).

Вертикальный круг вращается вместе с трубой и *горизонтальной осью*; он укреплён так, что против указателя (микроскопа) становится деление  $0^\circ$ , когда труба направлена в зенит. На этом круге отсчитывается зенитное расстояние светил так же, как на меридианном круге отсчитывается склонение.

Вся верхняя часть прибора поворачивается вместе с главной *вертикальной осью*, и поэтому трубу можно направлять в любую точку неба. Инструмент можно установить так, что указатель-микроскоп, вращающийся вместе с вертикальной осью, показывает  $0^\circ$  на неподвижном горизонтальном круге, когда труба направлена на меридиан. Если же её направить на светило, находящееся вне меридиана, то указатель покажет азимут светила. Измерив зенитное расстояние и азимут и приняв во внимание рефракцию, можно вычислить прямое восхождение и склонение, *если известно точное время наблюдения*.

**§ 90. Применение универсального инструмента.** Универсальный инструмент имеет перед меридианным кругом то преимущество, что с его помощью можно наблюдать светила в любой точке неба, а не только в меридиане. Но он сложнее меридианного круга, следовательно, учёт его ошибок труднее, чем при наблюдениях меридианным кругом и пассажным инструментом. Поэтому универсальный инструмент употребляется почти исключительно как переносный инструмент в экспедициях. Там он имеет следующие применения: 1) по горизонтальному кругу определяются главным образом направления, или азимуты, земных предметов для геодезических съёмок; 2) зенитные расстояния

звёзд, измеренные близ меридиана, дают широту места; 3) зенитные расстояния, измеренные далеко от меридиана, дают поправку часов с точностью, немного уступающей пассажному инструменту.

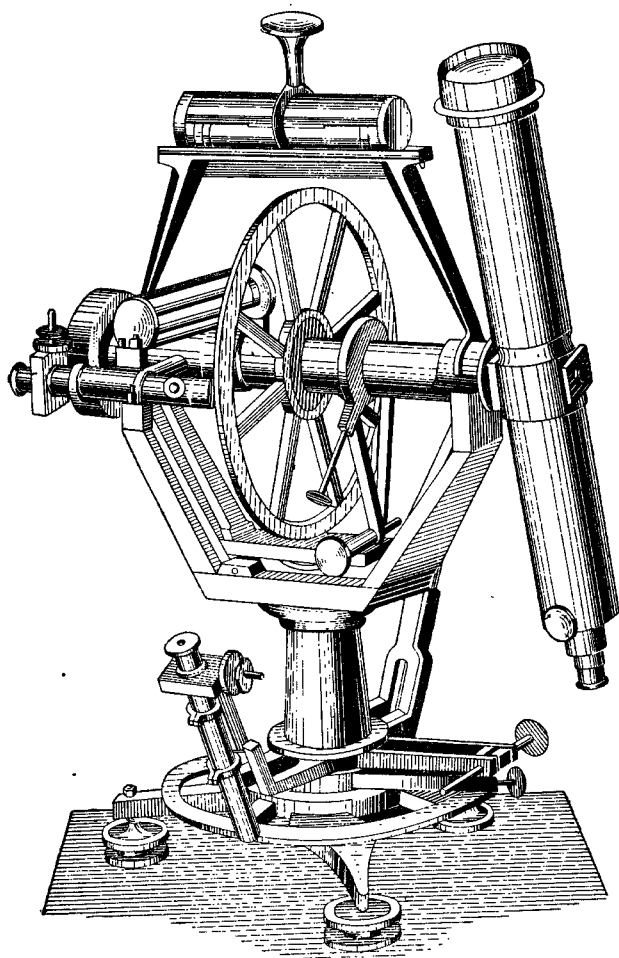


Рис. 33.

Для этого инструмент устанавливается неподвижно, и наблюдатель по часам точно отмечает момент, когда звезда, поднимаясь или опускаясь, пересекает горизонтальную нить в поле зрения трубы. Затем зенитное расстояние звезды определяется по отсчётам вертикального круга. При наблюдениях зенитных расстояний надо, кроме погрешностей инструмента, особенно точно учитывать *рефракцию*,

**§ 91. Экваториал.** Если одну ось телескопа установить параллельно оси мира, то скреплённый с нею круг будет параллелен небесному экватору. На этом круге можно будет отсчитывать часовые углы или прямые восхождения. Такую установку, в которой главная ось вращения направлена параллельно оси мира, называют экваториальной или *параллактической* установкой, а телескоп, установленный таким образом, называют *экваториалом*.

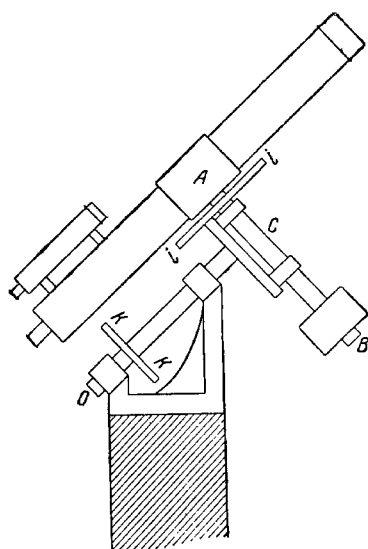


Рис. 34.

Параллактическая установка схематически представлена на рис. 34. Ось  $ОС$ , параллельная оси мира, называется *полярной осью*. На неё насажены и с нею вместе вращаются: 1) на одном конце — разделённый круг  $kk$ , параллельный небесному экватору и называемый *часовым* кругом, так как на нём отсчитываются часовые углы; 2) на другом конце — ободы, в которых вращается вторая ось, перпендикулярная к полярной оси, так называемая ось *склонений* (эта ось в универсальном инструменте была горизонтальной). На одном конце оси склонений прикреплена зрительная труба

$A$  и круг *склонений*  $ii$ , вращающийся вместе с трубой, на другом — противосес  $B$ . На рис. 34 труба направлена на полюс; при таком положении трубы указатель на круге склонений показывает  $90^\circ$  (склонение полюса). Предположим, что нам надо направить трубу на светило, имеющее склонение  $+60^\circ$ . Для этого: 1) отведём трубу от полюса на  $30^\circ$ , вращая её около оси *склонений*; тогда на круге склонений указатель покажет  $60^\circ$ , т. е. *склонение* светила; 2) будем вращать весь инструмент около *полярной* оси; так как оптическая ось трубы при этом всё время будет оставаться отклонённой от полярной оси на  $30^\circ$ , то она пойдёт по суточной параллели нашего светила. Когда светило окажется в центре поля зрения трубы, указатель на часовом круге покажет его *часовой угол*.

#### *Удобства экваториальной установки.*

1) Можно направить телескоп на светило, невидимое простым глазом, если только известны его экваториальные координаты и звёздное время. Установив телескоп так, чтобы один круг показывал данное склонение, а другой — часовой угол, мы в поле зрения увидим искомого светило.

2) Всякое светило вследствие суточного вращения быстро уходит из поля зрения неподвижной трубы. Для того чтобы следить за ним

в экваториал, надо инструмент всё время вращать равномерно около *одной* полярной оси. Это вращение обычно производится *часовым механизмом*, так что труба автоматически следует за звездой, и светило может оставаться в поле зрения сколько угодно времени. Если бы мы хотели следить за звездой, например в универсальный инструмент, то пришлось бы одновременно поворачивать трубу около *двух* осей, горизонтальной и вертикальной, и притом неравномерно. (Примеры экваториальной установки см. на рис. 24 и 36.)

**§ 92. Наблюдения с экваториалом. Нитяный микрометр.** В противоположность меридианному кругу в экваториале главное значение имеет зрительная труба, а. разделённые круги только облегчают поиски светила. Пробовали их применить для решения обратной задачи: направив трубу на неизвестное светило, отсчитывать его координаты  $t$  и  $\delta$  на часовом круге и круге склонения. Но этот способ даёт неточные результаты, так как оси и круги прогибаются вследствие наклонного положения; поэтому координаты светила определяются следующим косвенным путём.

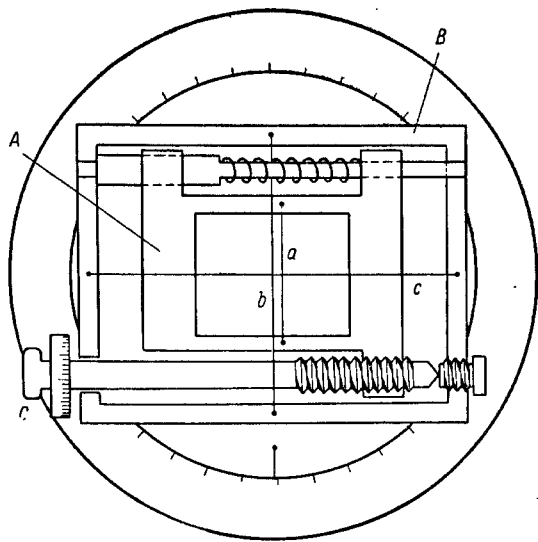


Рис. 35.

При окуляре рефрактора помещается небольшой вспомогательный прибор, называемый *микрометром*, служащий для измерения малых углов (в несколько минут дуги). Наиболее совершенные нитяные микрометры (рис. 35) измеряют такие углы точнее, чем меридианный круг. Принцип нитяного микрометра заключается в том, что одна из нитей ( $a$ ), натянутых в фокусе объектива рефрактора, укреплена на рамке ( $A$ ), которая может передвигаться посредством вращения особого винта ( $C$ ); число оборотов и долей оборота винта очень точно отсчитывается. Нити  $b$  и  $c$  укреплены на неподвижной рамке  $B$ .

Положим, что с помощью микрометра надо определить  $\alpha$  и  $\delta$  кометы  $K$ . Для этого выбираем звезду  $M$ , видимую в поле зрения трубы вместе с кометой; наведя нить  $a$  микрометра сначала, например, на  $M$ , потом на  $K$ , отмечаем, сколько оборотов и долей оборота винта сделал при этом микрометрический винт ( $C$ ); число оборотов винта

можно потом выразить в минутах и секундах дуги. Таким образом, микрометр даёт лишь *разности*  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$  между координатами определяемого светила и «звезды сравнения». Такое вычисление координат называют их *относительным* определением (см. § 80, б); *абсолютное* определение координат производится только с помощью меридианного круга.

Микрометр при сильном рефракторе до первых десятилетий XX в. был одним из важнейших астрономических инструментов. Он служил для определения координат планет и комет, для измерения их видимых диаметров, для определения положения точек на дисках Солнца, Луны и планет и т. д.

В последнее время область его применения суживается: во многих отделах микрометр уже вытеснен *фотографией*.

**§ 93. Небесная фотография (астрофотография).** Фотография имеет в астрономии обширное приложение, и область её применения растёт с каждым годом. Легче назвать те отделы, в которых фотография ещё не вытеснила старые наблюдения глазом (визуальные наблюдения), чем те, где она уже их с успехом заменила.

В особенности широко фотография применяется при изучении Солнца, спектров звёзд, определении координат большого количества слабых звёзд и изучении переменных звёзд.

Фотография не применяется в полевой, морской и авиационной астрономии, т. е. при определении широт и долгот. Фотография даёт пока худшие результаты, чем визуальные наблюдения: а) при детальном изучении поверхностей Луны и планет; б) при наблюдении двойных звёзд.

В тех же отделах астрономии, где фотография применяется, фотографическое наблюдение обнаружило следующие преимущества над визуальным:

а) Действие света на фотопластинку тем сильнее, чем длиннее экспозиция. При экспозиции в несколько секунд на пластинке выйдут лишь немногие, самые яркие звёзды, а по мере продолжения фотографирования постепенно появляются всё более слабые. Между тем глаз после нескольких часов непрерывного наблюдения увидит в телескоп не больше звёзд, чем в первые минуты, а скорее меньше — вследствие утомления. Иначе говоря, фотопластинка обладает способностью *суммировать* световые впечатления. Поэтому экспозиция при астрофотографировании иногда продолжается несколько часов и даже десятков часов (несколько ночей подряд на одной и той же пластинке). В результате таких длинных экспозиций получаются фотоснимки таких слабых звёзд и туманностей, которые ещё не видны глазом ни в один телескоп.

б) Один фотографический снимок запечатлевает на пластинке сразу множество звёзд, которые при визуальном наблюдении должны были бы наблюдаться каждая отдельно. Вместо этого астроном подвигает исследованию полученный негатив и спокойно, в лаборатории,

измеряет с помощью особых приборов положения всех сфотографированных звёзд с гораздо большей точностью и уверенностью, чем это можно сделать у телескопа. В случае сомнений измерения эти можно повторить сколько угодно раз.

в) Фотографические негативы являются беспристрастными *документами*, не зависящими от личных ошибок наблюдателя. Они тщательно сохраняются в особых архивах («стеклянных библиотеках»). В таком архиве всегда можно навести точную справку о том, какой вид имела любая область неба в определённый вечер, иногда много лет назад.

Эти три драгоценных свойства фотографических наблюдений профессор В. К. Цераский выражал тремя словами: 1) интегральность, 2) моментальность, 3) документальность.

В последние годы в астрономии начинает применяться также киносъёмка, в особенности при исследованиях Солнца и наблюдениях солнечных затмений.

**§ 94. Астрофотографические инструменты.** Для астрономических фотографий употребляются инструменты трёх родов:

а) *Астрограф* — фотографический рефрактор, который отличается от обыкновенного рефрактора формой стёкол объектива. Именно, его объектив делают «ахроматическим для химических лучей», т. е. дают ему при шлифовке такую форму, что он хорошо собирает в фокусе фиолетовые и ультрафиолетовые лучи спектра, сильно действующие на фотографическую пластинку. Лучи же, видимые глазом, он собирает плохо и потому не годится для визуальных наблюдений. Вместо окуляра у астрографа приделана кассета для фотографической пластинки. Обыкновенно эти трубы делаются *двойными* (рис. 36); рядом с фотографическим объективом помещается обыкновенный визуальный объектив, а рядом с кассетой — окуляр. При фотографировании аппарат движется за звёздами часовым механизмом, а наблюдатель, не полагаясь всецело на механизм, всё время следит в окуляр, чтобы звёзды не сдвинулись со своих мест в поле зрения этой *контрольной*, или *ведущей*, трубы.

Астрограф есть важнейший инструмент астрофотографии. Фокусное расстояние его велико, раз в 10 больше диаметра объектива, он даёт изображения небольших участков неба — около  $2^\circ$  в диаметре, но зато в сравнительно крупном масштабе.

б) Для снимков больших площадей неба служат короткофокусные *астрографические камеры* с сильными объективами. Они снабжаются экваторальной установкой с часовым механизмом и ведущей трубой, как астрографы. Такими камерами можно снимать сразу, но в мелком масштабе, участки неба иногда более  $30^\circ$  в диаметре, т. е. целые созвездия.

в) Наконец, всякий *рефлектор*, построенный для наблюдений глазом, может употребляться и для фотографирования. Все большие рефлекторы последнего времени предназначены почти исключительно



для фотографических целей. Они применяются для снимков самых слабых объектов, например, туманностей и звёздных скоплений, и в этой области они дали очень ценные результаты (см. гл. XV).

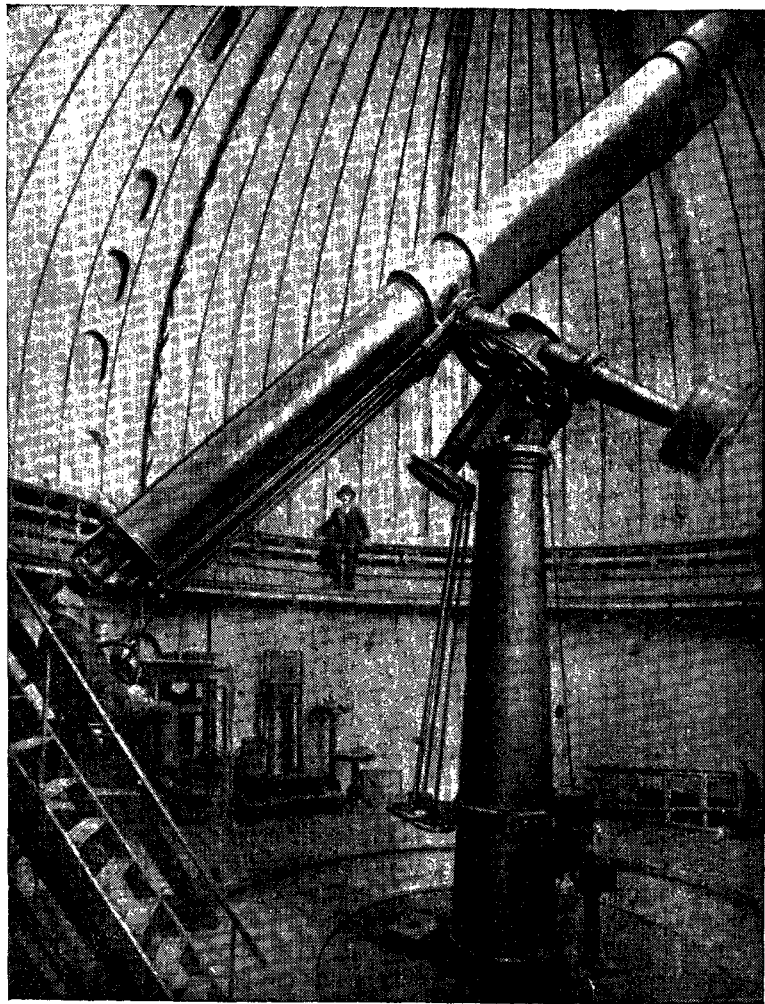


Рис. 36.

**§ 95. Обсерватории.** Учреждения, занимающиеся астрономической теорией и практикой, называются астрономическими обсерваториями. Обсерватории стали создаваться ещё до изобретения телескопов. Одной из замечательнейших обсерваторий средних веков была

обсерватория узбекского астронома Улугбека в Самарканде (первая половина XV в.), остатки которой сохранились до настоящего времени. Она была снабжена угломерными инструментами гигантских размеров.

На каждой большой современной обсерватории имеются описанные выше инструменты для определения положения светил, инструменты для изучения их физического строения (спектроскопы и спектрографы), часы, хронометры и вспомогательные приборы лабораторного типа, например для измерения фотографий.

Все инструменты с экваториальной установкой (рефракторы, рефлекторы, астрографы) помещаются в особых павильонах (*башнях*) с вращающимся куполом (рис. 37), имеющим форму цилиндра или полусферы. Инструмент устанавливается в центре полусферы. В куполе имеется широкий люк, идущий вертикально от самой верхней точки купола до нижней («от зенита до горизонта»); он открывается только во время наблюдений. Так как купол вращается, то люк можно направить в любую сторону и, таким образом, наблюдать светила в любой части неба. Меридианные инструменты устанавливаются в павильоне, в крыше и стенах которого сделан прорез по меридиану (рис. 37).

Важной принадлежностью обсерватории является *библиотека*. Она должна содержать различные астрономические таблицы, звёздные каталоги и карты, необходимые при *обработке* наблюдений. Это очень сложная работа. На всякой обсерватории дневные занятия — вычисления — отнимают гораздо больше времени, чем ночные — наблюдения. Большие обсерватории строят обыкновенно за городом.

В Советском Союзе имеется целый ряд крупных, первоклассных обсерваторий, оборудованных новейшими инструментами. Наиболее выдающимися обсерваториями являются перечисленные ниже.

1. Пулковская обсерватория (рис. 37), расположенная под Ленинградом, основанная по проекту академика В. Я. Струве в 1839 г. Она заняла первое место в мире по точности и результатам астрометрических наблюдений, завоевав себе славу астрономической столицы мира. В 1941 г. она была до основания разрушена фашистскими варварами. Ныне она успешно восстанавливается, и в 1951 г. полностью вступит в строй. Будучи самой крупной обсерваторией в Советском Союзе, она является Главной Астрономической Обсерваторией Академии наук СССР.

2. Восстановленная после разрушения (в 1942 г.) Симеизская обсерватория ныне преобразована в Крымскую астрофизическую обсерваторию Академии наук СССР, основные здания которой строятся на горах в центральной части Крыма.

3. Обсерватория Государственного Астрономического института им. П. К. Штернберга (ГАИШ) в Москве славится своими выдающимися исследованиями в области звёздной астрономии и переменных звёзд и прекрасно организованной службой времени.

4. Бюраканская обсерватория (около Еревана) Академии наук Армянской ССР внесла много нового в изучение структуры нашей звёздной системы Галактики.

5. Вновь выстроенная и начавшая свою работу в 1950 г. Киевская обсерватория Академии наук Украинской ССР успешно развёртывает работы по исследованию Солнца, переменных звёзд и малых планет.

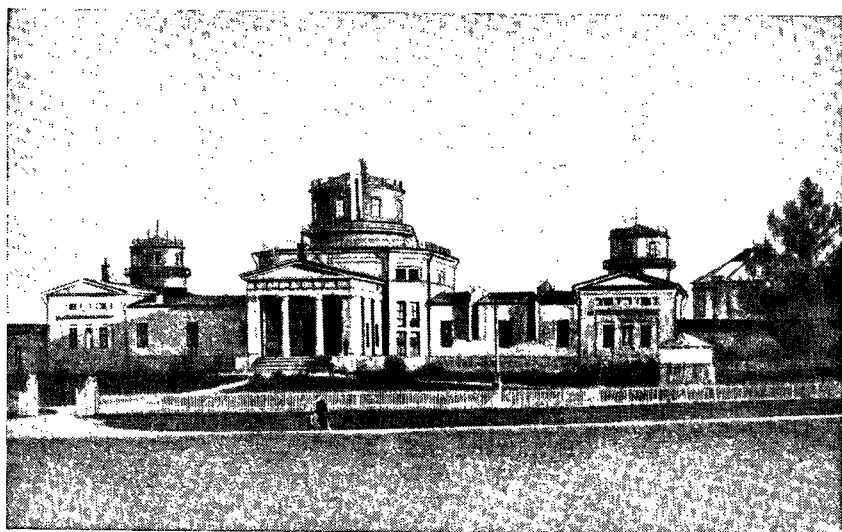


Рис. 37.

6. Энгельгардтовская обсерватория под Казанью, одна из старейших обсерваторий Советского Союза, ведёт огромную работу по изучению переменных звёзд, а также регулярно публикует все новости астрономии в *Астрономическом циркуляре*, который рассылается ею всем астрономическим учреждениям СССР.

Необходимо отметить замечательные работы Абастуманской обсерватории в области изучения межзвёздной материи и Алма-Атинской обсерватории в изучении планеты Марс.

#### *Упражнения к главе IV*

1. Если окуляр при фокусном расстоянии объектива  $F = 160$  см даёт увеличение в 200 раз, то какое увеличение он даст при трубе в 12 м фокусного расстояния.

2. Угловой диаметр Луны равен  $1/2^\circ$ . Каков будет линейный диаметр её изображения в фокусе объектива с фокусным расстоянием в 2 м?

3. Планета Марс при наибольшем приближении к Земле имеет угловой диаметр  $24''$ . Каков диаметр её фотографического изображения, полученного с помощью пулковского рефрактора, у которого  $F = 13,9$  м? *Ответ: 2 мм.*

4. Какое фокусное расстояние должен иметь окуляр, чтобы с рефлектором с фокусным расстоянием 2 м получить увеличение до 6000 раз?

5. Чему равно расстояние между двумя смежными штрихами меридианного круга диаметром в 1 м, разделённого через 2'? Чему равна линейная величина 1" на таком же круге?

6. На Московской обсерватории (широта  $\varphi = 55^\circ 45' 20''$ ) зенитное расстояние звезды в верхней кульминации получилось  $47^\circ 59' 48''$ . Чему равно склонение звезды с учётом средней рефракции? *Ответ:*  $+7^\circ 44' 27''$ .

7. Вычислите точные моменты восхода и захода верхнего края Солнца по местному времени в самый длинный и в самый короткий день для Ленинграда, Москвы и Самарканда. Сравнив результаты с упражнением 6 гл. III, найдите, на сколько удлиняется день действием рефракции. *Ответ:* В Ленинграде 22 декабря восход  $9^h 2^m$ , заход  $14^h 55^m$ .

8. Если часы уходят вперёд, то какой знак имеет ход?

9. Некоторое астронавтическое явление было зарегистрировано 5 января в  $19^h 18^m 13^s,4$  по часам, идущим по всемирному времени. В полдень 1 января поправка часов была  $-2^m 6^s,5$ , суточный ход  $+2^s,9$ . Найти точное время явления.

10. Астрограф имеет фотографическое поле зрения  $2^\circ \times 2^\circ$ . Сколько приблизительно снимков надо сделать инструментом такого типа, чтобы заснять всё звёздное небо, северное и южное?

## ГЛАВА ПЯТАЯ

### ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ АСТРОМЕТРИИ

Измерение координат светил, рассмотренное в предыдущей главе, даёт решение ряда задач не только астрономических, но геодезических и географических.

#### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

**§ 96. Способ равных высот Цингера.** Помимо способов определения поправок часов, описанных в §§ 82 и 85, весьма распространён ещё один способ, известный под названием способа равных высот. Наблюдаем в универсальный инструмент момент  $T_1$  (по звёздному времени) прохождения через горизонтальную нить некоторой звезды на востоке до кульминации. Затем повторяем наблюдение *той же* звезды на той же высоте на западе после верхней кульминации в момент  $T_2$  по нашим часам. Момент, средний между  $T_1$  и  $T_2$ , будет моментом прохождения звезды через меридиан. Сравнивая его с прямым восхождением звезды, получаем поправку часов.

В таком виде этот способ требует слишком много времени, и второе наблюдение может не удасться из-за облаков. Поэтому русский геодезист Н. Я. Цингер предложил наблюдать *две звезды* с приблизительно одинаковым склонением на равных высотах: одну на востоке от меридиана, другую — через несколько минут на западе (или наоборот). Вычисления при этом усложняются, но преимущество способа равных высот остаётся: измерять зенитных расстояний не нужно. Кроме того, влияние рефракции на обе звезды одинаково и поэтому в конечном результате исключается.

#### II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ШИРОТЫ

**§ 97. Способ меридианных наблюдений.** Самый простой способ определения широты места состоит в измерении *зенитного расстояния* Солнца или звёзд в *меридиане*. Измерив в момент верхней кульминации зенитное расстояние  $z$  светила, склонение которого известно, и исправив его за рефракцию (§ 87), получим для широты  $\varphi$  (§ 26):  $\varphi = \delta + z$  или  $\varphi = \delta - z$ , смотря по тому, к югу или к северу от зенита кульминирует звезда. Для нижней кульминации получается формула:  $\varphi = 180^\circ - (\delta + z)$ .

На суше широта определяется посредством универсального инструмента, а на море, где качка корабля мешает установить инструмент,— с помощью особого отражательного инструмента, *секстана*, который при наблюдении можно держать в руках. Так как уловить точный момент кульминации почти невозможно, то в действительности измеряется несколько зенитных расстояний светила близ меридиана, до и после кульминации, и все они «приводятся к меридиану» простыми вычислениями.

**§ 98. Наблюдение околополярных звёзд.** Широта места равна высоте полюса мира над горизонтом (§ 17). Но так как в полюсе нет никакой звезды, то измеряют высоты близкой к нему звезды (например, Полярной) во время *верхней кульминации* и через 12 часов во время *нижней*.

Измеренные высоты исправляют за рефракцию; полусумма их даёт широту. При этом способе можно не знать склонения звезды; неудобство в том, что он требует много времени и поэтому непригоден для путешественников.

**§ 99. Способ Талькотта.** Подберём заранее *две звезды*, которые проходили бы верхнюю кульминацию через несколько минут одна после другой и, по возможности, на одинаковых зенитных расстояниях, но одна *к северу* от зенита, а другая — *к югу*. Наблюдаем в универсальный инструмент кульминацию первой звезды; положим, что звезда пройдёт в точности через середину поля зрения, т. е. по горизонтальной нити сетки. Не отсчитывая круга и не меняя наклона трубы, поворачиваем инструмент около вертикальной оси на  $180^\circ$ , так что труба окажется отклонённой от вертикальной оси к югу на такой же угол, на какой она при первом наблюдении была отклонена к северу. Теперь через поле зрения пройдёт вторая звезда в момент своей кульминации, но уже не в точности по горизонтальной нити, а на некотором расстоянии от неё. Это расстояние мы измерим *микрометром* (§ 92). Отсюда сейчас же получится широта, если склонения обеих звёзд  $\delta_1$  и  $\delta_2$  известны.

Действительно, для звезды к югу от зенита имеем

$$\varphi = \delta_1 + z_1,$$

а для звезды к северу от зенита

$$\varphi = \delta_2 - z_2.$$

Взяв полусумму этих равенств, получим

$$\varphi = \frac{1}{2} (\delta_1 + \delta_2) + \frac{1}{2} (z_1 - z_2).$$

Склонения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  известны, а разность зенитных расстояний  $z_1 - z_2$  измерена микрометром.

Способ этот один из самых удобных. При нём не нужен разделённый круг, и влияние рефракции незначительно: поправки за ре-

фракцию для  $z_1$  и  $z_2$  почти одинаковы и при вычитании  $z_1 - z_2$  почти уничтожаются.

Точность определения широты ещё увеличится, если наблюдать кульминацию звёздных пар как можно ближе к зениту, где влияние рефракции совсем ничтожно (§ 87). Для таких наблюдений построен даже специальный инструмент — *зенит-телескоп*; в нём нет разделённого круга, но зато приняты все меры к тому, чтобы наклон трубы при поворачивании на  $180^\circ$  не изменялся. Созданная в Советском Союзе обширная сеть широтных станций ведёт большую работу по точному определению широт основных пунктов СССР.

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ

**§ 100. Общий план решения задачи.** Разность долгот двух точек, выраженная во времени, равна разности их местных времён. Поэтому задача определения долготы какого-нибудь места распадается на две отдельные задачи: 1) определить из наблюдений местное время, или поправку часов (§§ 85, 96); 2) узнать, который час в этот же момент на некотором начальном меридиане; разность этих времён даст разность долгот.

Главную трудность в этой задаче прежде представляло определение времени на начальном меридиане. Для этого применялись следующие способы (§§ 101 и 102).

**§ 101. Перевозка хронометров.** Путешественник берёт с собой хронометр, показывающий точное время начального меридиана (например, гриничское), и в течение всего путешествия не переставляет его стрелок. Для определения долготы надо найти местное время и сравнить его с показанием хронометра. Разность этих времён и даст долготу, если хронометр идёт верно. Обыкновенно берут несколько хронометров и тщательно сверяют их между собой.

**§ 102. Наблюдение естественных (небесных) сигналов.** Существуют небесные явления, время наступления которых можно предсказывать заранее с большой точностью и которые видны в один и тот же момент, где бы ни находился наблюдатель. К таким явлениям относятся *затмения Луны* и *затмения спутников Юпитера*. Когда случается затмение Луны, то наблюдатель, желающий определить свою долготу, отмечает местное время начала или конца затмения и сравнивает его с гриничским временем этих явлений, которое заблаговременно печатается в астрономических календарях. Полученная разница времён будет равна разности долгот.

Лунные затмения бывают редко, даже не каждый год. Затмения спутников Юпитера можно наблюдать гораздо чаще, почти каждую ночь, если только Юпитер виден над горизонтом. Наблюдаются они с помощью зрительной трубы. Недостаток этого метода в том, что точное наблюдение моментов начала и конца затмений весьма затруднительно.

Определение долготы в первой половине XIX в. было облегчено изобретением электромагнитного телеграфа. Но настоящую новую эру открыло в этой области гениальное изобретение выдающегося русского ученого А. С. Попова — радио. Применение радио почти вытеснило все старые методы: вместо редких и неточных естественных сигналов теперь наблюдаются точные искусственные сигналы (см. ниже).

**§ 103. Приём радиосигналов.** В настоящее время ряд мощных радиостанций несколько раз в сутки посылает сигналы в заранее определённые моменты по мировому времени.

Таким образом всякий океанский пароход или экспедиция, располагающие радиоприёмником, постоянно получают мировое время и могут определять свою долготу самым точным и удобным способом. Для этого наблюдатель должен только определить из астрономических наблюдений местное время (поправку своих часов), а затем принять сигнал по этим часам, т. е. заметить их показание  $T$  в момент получения сигнала. Так как момент сигнала по мировому времени  $T_0$  известен, то разность  $T - T_0$  даст долготу.

Если, наоборот, долгота наблюдателя известна, то по приёму сигналов он может определить *поправку своих часов* без всяких астрономических наблюдений с высокой точностью.

#### IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ЗЕМЛИ

Так как определение размеров и формы Земли производится при помощи астрономических наблюдений, то этот вопрос близко связан с задачами практической астрономии. Более полно эта задача рассматривается в *геодезии*.

**§ 104. Шарообразность Земли (первое приближение).** Самое простое доказательство приближённой шарообразности Земли даётся *лунными затмениями*. Земля, как и всякое тёмное непрозрачное тело, отбрасывает тень в сторону, противоположную Солнцу. Во время лунных затмений тень Земли падает на Луну, и тогда на лунном диске наблюдается очертание земной тени. Это очертание имеет *всегда* форму дуги круга. Так как только шар отбрасывает при всех положениях круглую тень, то этим и доказывается шарообразность Земли.

Шарообразная форма Земли позволяет определить её размеры очень простым способом, который был применён впервые Эратосфеном в Александрии (Египет) во II в. до н. э. В этом способе окружность Земли вычисляется на основании так называемого *градусного измерения*, или измерения *дуги меридиана*.

На одном и том же земном меридиане выбираются две точки:  $A$  и  $A'$ , и расстояние между ними измеряется по дуге меридиана  $AA'$ : 1) в угловых мерах  $n^\circ$  (градусах) и 2) в линейных мерах  $S$  (например в километрах). Разделив длину дуги  $S$  на число градусов в ней  $n^\circ$ , получаем длину дуги в  $1^\circ$ , а умножив на  $360^\circ$ , находим длину



окружности земного шара, а затем и радиус его  $R$ . Угловое расстояние  $n^\circ$  между точками  $A$  и  $A'$ , очевидно, равно разности широт этих точек:  $n^\circ = \varphi' - \varphi$ .

Длина дуги в  $1^\circ$  будет равна

$$l = \frac{S}{n^\circ},$$

а длина меридиана Земли

$$2\pi R = \frac{360^\circ}{n^\circ} \cdot S.$$

Отсюда для радиуса Земли получим:

$$R = \frac{360^\circ S}{2\pi n} = \frac{180^\circ S}{\pi n} \text{ км.}$$

Как известно, метр должен был составлять одну сорок миллионную часть окружности земного меридиана, но это осуществить не удалось вследствие неизбежных погрешностей в геодезических измерениях. Поэтому окружность Земли близка к 40 000 км, а диаметр Земли приблизительно равен

$$2R = \frac{40\,000}{\pi} = \frac{40\,000}{3,14} = 12740 \text{ км.}$$

Дуга в  $1^\circ$  равна  $l = \frac{40\,000}{360} = 111,1 \text{ км}$ . Число это легко запомнить.

Градусные измерения производились на разных меридианах и в разных широтах, и всегда для дуги меридиана в  $1^\circ$  получалось приблизительно одно и то же значение. Этот факт и является доказательством того, что земные меридианы по форме *близки* к окружности, а сама Земля — к шару.

**§ 105. Триангуляция.** Измерение дуги меридиана, с помощью которого определяются размеры Земли, состоит из двух частей — астрономической и геодезической. Астрономическая часть заключается в определении *широт* конечных точек  $A$  и  $A'$  измеряемой дуги, что представляет сравнительно простую задачу. Значительно сложнее вторая, геодезическая часть работы, состоящая в измерении расстояния между конечными точками в линейных мерах. Непосредственное измерение расстояния по кратчайшей линии между точками, отстоящими одна от другой на сотни километров, совершенно невыполнимо вследствие естественных препятствий — гор, лесов, рек и т. д. Поэтому в настоящее время градусные измерения производятся при помощи триангуляции (т. е. построения треугольников). В этом способе длина дуги меридиана определяется вычислением по правилам тригонометрии, а измеряются непосредственно только сравнительно небольшая линия — *базис* — и ряд углов.

Триангуляция состоит в следующем. По обе стороны дуги  $AA'$  (рис. 38), длину которой надо определить, выбирается несколько точек  $B, C, D, \dots$  на расстояниях до 30—40 км одна от другой.

Точки выбирают так, чтобы из каждой были видны по меньшей мере две другие точки, и отмечают так называемыми *сигналами* — вышками в форме пирамид. Они бывают вышиной в десятки метров и часто имеют на значительной высоте площадку для наблюдателя и инструмента. Расстояние между какими-нибудь двумя точками, например  $AB$ , выбранное на совершенно ровной местности, принимается за базис, т. е. за основу всего измерения. Длину базиса измеряют с помощью специальных *базисных приборов* (см. ниже). Затем устанавливают угломерный инструмент последовательно в точках  $A, B, C, \dots$ , направляют его на все точки, какие только видны, и измеряют все углы треугольников  $ABC, CDB, \dots$ . Зная в этой цепи треугольников только одну сторону — базис — и все углы, можно точно вычислить длину дуги меридиана  $AA'$ . Базис должен быть измерен с величайшей точностью, так как всякая сделанная при этом ошибка даст во много раз большую ошибку в длине меридианной дуги.

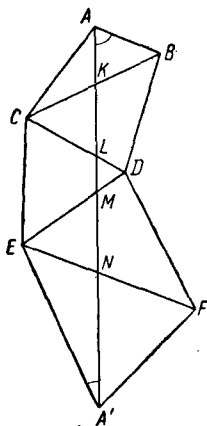


Рис. 38.

Для измерения базиса большей частью употребляются лёгкие длинные *мерные ленты* из инвара, т. е. из сплава стали с никелем, обладающего весьма малым коэффициентом теплового расширения. Базисный прибор состоит из двух таких лент, обычно в 25 м длиной, протягиваемых поочередно вдоль базиса на трёх треногах. При измерении необходимо учитывать провис ленты от тяжести.

В настоящее время погрешность при измерении базиса в 10 км обыкновенно не превышает нескольких миллиметров.

**§ 106. Земной сфероид (второе приближение).** В течение XIX в. было измерено много меридианных дуг в разных широтах. Одной из самых больших и выдающихся по точности является дуга В. Я. Струве, которая измерялась под его руководством в 1816—1855 г. Эта дуга тянется от устья Дуная до Северного Ледовитого океана, и длина её составляет свыше  $25^\circ$ , т. е. около 2800 км. Её измерение является замечательным достижением русской науки. Измерения такого рода показали, что длина градуса меридиана лишь в среднем равна 111,1 км, а в действительности она правильно увеличивается от экватора к полюсам. На экваторе длина  $1^\circ$  меридиана 110,5 км, а близ полярного круга она на 1 км больше. Таким образом вблизи полюсов дуга меридиана составляет часть круга большего радиуса ( $PO$ , рис. 39), чем у экватора ( $O'Q'$ ). Другими словами, каждый из земных меридианов  $QPQ'$  представляет собой не круг, а другую линию, обладающую тем свойством, что у экватора она искривлена сильнее, чем у полюсов. Простейшей из таких кривых является *эллипс*. Поэтому *принимают*, что все меридианы имеют форму совершенно одинаковых

эллипсов, большие оси которых лежат в плоскости земного экватора и равны экваториальному диаметру Земли, а малая ось совпадает с полярным диаметром. Разница между осями составляет около сорока километров. Таким образом Земля по форме близка к *сфероиду*, или эллипсоиду вращения, полученному от вращения эллипса около малой оси. Приводим размеры земного эллипсоида по новейшему определению крупного советского геодезиста Ф. Н. Красовского.

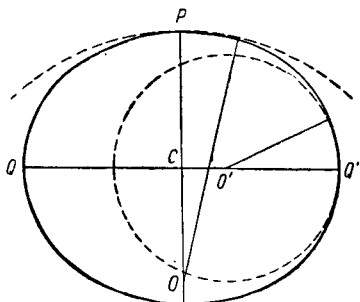


Рис. 39.

Большая полуось (экваториальный радиус)

$$a = 6378,24 \text{ км.}$$

Малая полуось (полярный радиус)

$$b = 6356,86 \text{ км.}$$

Разность между ними равна

$$a - b = 21,38 \text{ км.}$$

Отношение этой разности к большой полуоси называется сжатием Земли; оно равно

$$\alpha = \frac{a - b}{a} = \frac{21,38}{6378,24} = \frac{1}{298,3}.$$

До начала XX в. в общем употреблении были размеры земного эллипсоида, вычисленные Бесселем на основании триангуляций первой половины XIX в. Элементы Бесселя теперь устарели, но с ними приходится встречаться, так как они положены в основу при составлении русских геодезических карт. Согласно Бесселю

$$a = 6377,4 \text{ км,}$$

$$b = 6356,1 \text{ км, } \alpha = \frac{1}{299}.$$

Когда в геодезии говорят о фигуре Земли, то подразумевают не твёрдую поверхность земной коры, которая имеет неправильную

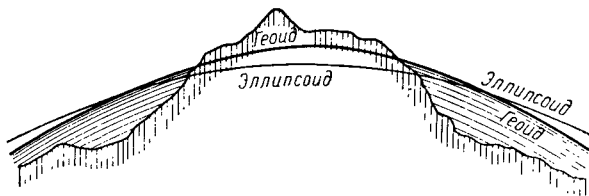


Рис. 40.

форму, а поверхность так называемого *геоида* (рис. 40). Геоид — это та поверхность, которая получится, если продолжить сквозь материи поверхность *уровня океана*, покрывающего почти  $\frac{3}{4}$  земной поверхности. Геоид также не представляет собой математически правильной поверхности. Сфероид является лишь «вторым приближением»,

от которого истинная фигура геоида отличается меньше, чем от шара, служащего «первым приближением». Впрочем, даже отклонения от шаровой формы незначительны в сравнении с размерами Земли.

Работы, главным образом, советских геодезистов Ф. Н. Красовского и А. А. Изотова показали, что «третьим приближением» к геоиду является *трехосный* эллипсоид: земной экватор, а с ним и все параллели, имеют форму не кругов, а эллипсов. Наиболее вероятная величина этого *экваториального сжатия* около  $1/32000$ , т. е. в сто с лишком раз меньше полярного сжатия.

Следствием полярного сжатия Земли является изменение силы тяжести в разных точках её поверхности<sup>1)</sup>.

**§ 107. Понятие о геодезических и гравиметрических работах.** Геодезические измерения в СССР получили особенно широкое развитие. За 31 год существования советской геодезии (с 1919 г.) в этой области сделано во много раз больше, чем за 200 предшествовавших лет. Целью каждой конкретной геодезической работы является не общая задача определения размеров и формы Земли, а тщательная *съёмка* данной области, составление её подробных и точных карт и планов. Эта съёмка составляется из чисто *геодезических* работ — *триангуляции* и *нивелирования* — и из *гравиметрических* работ, т. е. определения силы тяжести.

а) При *триангуляции* данная область покрывается сетью так называемых «первоклассных» пунктов, составляющих непрерывную *цепь* «первоклассных» треугольников со сторонами от 20 до 100 км. Углы и некоторые стороны этих треугольников (базисы) измеряются с величайшей точностью, как при градусных измерениях. В некоторых пунктах определяются, кроме того, широты и долготы; это — так называемые *астрономические* пункты. Пространство между первоклассными пунктами заполняется сетью более мелких второклассных и третьеклассных треугольников, в которых углы измеряются уже с меньшей точностью, а базисами служат стороны первоклассной сети. Все пункты отмечаются сигналами. В сети известны, таким образом, некоторые стороны (базисы), все углы, широты и долготы астрономических пунктов. При вычислении надо учесть, что треугольники построены не на плоскости, а на поверхности некоторого эллипсоида. Определённые таким путём тригонометрические пункты разных классов служат основой как для изготовления карт целой области, так и для съёмки планов её отдельных участков.

б) Так как точки земной поверхности лежат не на поверхности геоида (§ 106), т. е. не на уровне моря, то необходимым дополнением к триангуляции является *нивелирование* — определение высот геодезических пунктов над уровнем моря.

в) *Гравиметрией* называется наука об измерении силы тяжести. Эти измерения показали, что в разных точках земной поверхности

<sup>1)</sup> Изменение силы тяжести вызывается также вращением Земли.

величина силы тяжести различна. Изучая законы изменения силы тяжести при переходе от одной точки к другой, можно определить математически *фигуру* геоида (но не его размеры) с большой точностью. А всякого рода местные отклонения от законов распределения силы тяжести (так называемые *аномалии силы тяжести*) могут дать сведения о *внутреннем* строении земной коры. Например, если сравнительно неглубоко залегает слой *тяжёлых* рудоносных пород, то над этим местом сила тяжести будет больше нормальной — *положительная* аномалия (пример — известная курская аномалия). Наоборот, более *лёгкие* породы, например нефтеносные, дают *отрицательную* аномалию. Таким образом гравиметрическая съёмка имеет не только большое научное значение для геодезии, геофизики и геологии, но и практическое, как способ разведки полезных ископаемых.

Для определения силы тяжести употребляются главным образом *маятниковые приборы*, дающие величину силы тяжести по периоду качания маятника известной длины. Существуют приборы, основанные и на других принципах, например на принципе крутильных весов (вариометры и т. п.). Постройка этих приборов успешно освоена нашей промышленностью.

Практическая гравиметрия, почти не существовавшая в царской России, после Октябрьской революции стала развиваться гигантскими темпами. Начало советской гравиметрии было положено работами первого астронома-большевика П. К. Штернберга (умер в 1920 г.), установившего в 1917 г. существование так называемой «московской-аномалии». В настоящее время на территории нашего Союза определено больше гравиметрических пунктов, чем во всех остальных странах, вместе взятых.

## V. ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ И РАЗМЕРОВ СВЕТИЛ

### § 108. Измерение расстояний по параллактическому смещению.

Измерение расстояний до небесных тел основано на том же принципе, что и измерение расстояний до недоступных земных предметов: именно, на определении направлений, по которым виден предмет из двух различных точек. Если предмет очень далёк и его наблюдают из двух точек, сравнительно близких одна к другой, то может случиться, что из обеих точек он будет виден почти по одному и тому же направлению; другими словами, оба луча зрения окажутся почти параллельными (угол между ними неизмеримо мал). В этом случае определить расстояния не удастся. Но если наблюдательные пункты взять на большом расстоянии один от другого (выбрать большой *базис*), то направления к предмету будут уже явно непараллельными. Угол между направлениями на один и тот же предмет, наблюдаемый из двух разных точек, называется *параллактическим смещением* предмета. Измерив это смещение в градусах и зная длину базиса,

можно по правилам тригонометрии вычислить расстояния предмета от концов базиса.

Чем дальше предмет, тем больший базис надо брать. Для измерения расстояний даже ближайших к нам светил приходится часто брать величину базиса, близкую к диаметру Земли (12740 км).

Замечание. Часто разность направлений называют просто *параллаксом*, но мы будем употреблять последнее слово в том смысле, который выяснен в § 109.

**§ 109. Параллакс.** Из множества направлений, по которым видно светило из разных точек Земли, основным считается направление из центра Земли. Оно даёт так называемое *геоцентрическое* положение светила. Угол между направлением на светило из какой-нибудь точки земной поверхности и направлением из центра Земли называется па-

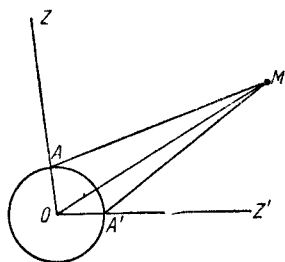


Рис. 41.

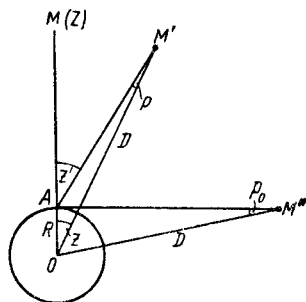


Рис. 42.

раллаксом светила. Иначе говоря, параллакс есть угол, на который сместится светило, если наблюдатель будет перенесён в центр Земли. На рис. 41 параллакс для наблюдателя A изобразится углом  $AMO$ , для наблюдателя  $A'$  — углом  $A'MO$ .

Параллакс изменяется с изменением высоты светила над горизонтом (рис. 42). Когда светило находится в *зените* ( $M$ ), параллакс равен нулю; наибольшей величины он достигает, когда светило в *горизонте* ( $\angle AM'O = p_0$ ). Тогда он называется *горизонтальным параллаксом* ( $p_0$ ).

Из рис. 42 получается следующее определение горизонтального параллакса: это *угол, под которым со светила виден радиус Земли*. Когда говорят, например, что горизонтальный параллакс Луны равен  $57'$ , то это значит, что радиус Земли, если его наблюдать с Луны, виден под углом  $57'$ ; следовательно, угловой диаметр Земли, видимый с Луны, составляет  $57' \cdot 2$ , т. е.  $1^\circ 54'$  (почти  $2^\circ$ ).

Параллакс Луны — самый большой из параллаксов небесных тел. Даже у самых близких планет параллакс лишь в исключительных случаях превышает  $1'$ .

**З а м е ч а н и е.** Строго говоря, вследствие сжатия Земли горизонтальный параллакс данного светила для разных точек земной поверхности не вполне одинаков. Наибольшее значение он имеет на экваторе. Поэтому под горизонтальным параллаксом обыкновенно подразумевают *экваториальный горизонтальный параллакс*, т. е. угол, под которым со светила виден экваториальный радиус Земли.

**§ 110. Зависимость между параллаксом и расстоянием.** Если обозначить радиус Земли через  $R$ , расстояние светила через  $D$  и горизонтальный параллакс через  $p_0$ , то из прямоугольного треугольника  $OAM''$  (рис. 42) получим:

$$D = \frac{R}{\sin p_0}. \quad (1)$$

По формуле (1), зная  $R$  и  $p_0$ , легко вычислить расстояние  $D$ . Например, для Луны, приняв  $R \approx 6400$  км, а  $p_0 = 0^\circ 57'$ , получим  $D = 385\,000$  км, т. е. 30 земных диаметров.

Так как при известном параллаксе расстояние сразу определяется, то принято говорить «измерение параллаксов» вместо «измерение расстояний». Когда параллакс найден, задача определения расстояния считается решённой.

Для всех светил, кроме Луны, параллаксы так малы, что формулу (1) можно упростить, считая, что синусы малых дуг равны самим дугам. Пусть параллакс содержит  $p_0$  секунд дуги ( $p_0''$ ); тогда можно принять, что

$$\sin p_0'' = \text{дуге } p_0'' = (\text{дуга } 1'') \cdot p_0'' = p_0'' \cdot \sin 1'' = p_0'' / 206\,265, \quad (2)$$

так как дуга, соответствующая углу  $1''$ , или  $\sin 1''$ , составляет  $1/206\,265$  часть радиуса. Это число постоянно встречается в астрономии. Формула (1) примет вид:

$$D = 206\,265 \frac{R}{p_0''}. \quad (3)$$

Вычисление по этой формуле не требует тригонометрических таблиц.

**§ 111. Влияние параллакса на координаты светила.** В астрономических календарях даются координаты светил  $\alpha$  и  $\delta$  для воображаемого наблюдателя, находящегося в центре Земли. Такие координаты называются *геоцентрическими*. Для наблюдателя где-нибудь на земной поверхности координаты будут несколько иными. Особенно заметная разница будет для Луны. Поэтому, вычисляя зенитное расстояние по формулам § 65, получим её «геоцентрическое» зенитное расстояние  $M'OZ$ . Наблюдаемое зенитное расстояние  $M'AZ$  будет больше геоцентрического на угол  $AM'O$  (рис. 42). Этот угол и есть параллакс ( $p$ ). Параллакс всегда *понижает* светила, не изменяя их азимута.

Обозначим геоцентрическое зенитное расстояние через  $z$ , наблюдаемое — через  $z'$ . Из треугольника  $AOM'$  получим:

$$p = z' - z, \quad \frac{\sin p}{\sin z'} = \frac{R}{D},$$

откуда по формуле (1)

$$\sin p = \sin p_0 \sin z';$$

заменяем синусы дуг  $p$  и  $p_0$ , по их малости, самими дугами:

$$p = z' - z = p_0 \sin z'. \quad (4)$$

Итак, параллакс по зенитному расстоянию (или по высоте) пропорционален синусу зенитного расстояния.

Пример. *Влияние параллакса на восход Луны.* Эта задача аналогична задаче на восход Солнца с учётом рефракции (§ 88); разница будет в том, что момент восхода будем считать момент восхода центра Луны, а не верхнего края, и придётся к зенитному расстоянию ( $90^\circ$ ) придать горизонтальный параллакс Луны (§ 109) со знаком, противоположным рефракции:

$$z' = 90^\circ + 35' - 57' = 89^\circ 38', \quad \cos z' = 0,0064.$$

Формула § 88 примет вид

$$\cos t = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta - 0,0064 \sec \varphi \sec \delta. \quad (5)$$

**§ 112. Определение параллакса и расстояния светила из наблюдений.** Самый простой способ состоит в том, что светило наблюдается одновременно с двух обсерваторий  $A$  и  $A'$  (рис. 42), лежащих на одном меридиане; наблюдение производится во время кульминации — измеряется видимое *склонение* светила. Назовём истинные (геоцентрические) склонения светила  $\delta$  и зенитное расстояние  $z$ , широту первой обсерватории  $\varphi_1$ , наблюденные на ней зенитное расстояние  $z_1$  и склонение светила  $\delta_1$ . По формуле § 26 получим:

$$z_1 = \varphi_1 - \delta_1, \quad z = \varphi_1 - \delta,$$

откуда находим

$$z_1 - z = \delta - \delta_1.$$

Вставим в полученную формулу значение  $z_1 - z$  из формулы (4) § 111 [значение  $z_1$ , соответствует  $z'$  в формуле (4)]

$$\delta - \delta_1 = p_0 \sin (\varphi_1 - \delta_1). \quad (6)$$

Подобным же образом для второй обсерватории имеем

$$\delta - \delta_2 = p_0 \sin (\varphi_2 - \delta_2). \quad (7)$$

Вычитаем из уравнения (7) уравнение (6) и из полученного равенства находим  $p_0$ :

$$p_0 = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\sin (\varphi_2 - \delta_2) - \sin (\varphi_1 - \delta_1)}. \quad (8)$$

**§ 113. Определение размеров светил.** Если известны угловой диаметр светила, т. е. угол, под которым виден его диск, и его расстояние, то легко вычислить его истинный диаметр в линейных мерах, например в километрах.



Обозначим *угловой* радиус светила через  $\rho$ , радиус Земли  $R$ , расстояние между центрами светила и Земли  $D$  и искомый линейный радиус светила  $r$ . Из рис. 43 получаем:

$$r = D \sin \rho. \quad (9)$$

Или, заменив синус малого угла  $\rho$  его дугой [§ 110, формула (2)], получим:

$$\rho'' = 206\,265 \frac{r}{D}. \quad (10)$$

Здесь угловой радиус дан в секундах дуги ( $\rho''$ ). Иногда его выражают в градусах ( $\rho^\circ$ ). Так как дуга в  $1^\circ$  укладывается в радиусе 57,3 раза, то для этого случая имеем

$$\rho^\circ = 57,3 \frac{r}{D}. \quad (11)$$

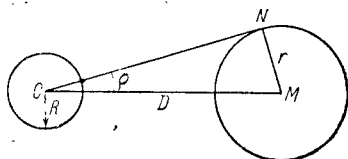


Рис. 43.

По этим формулам можно определять и расстояние  $D$ . Например, если какой-нибудь предмет, линейные размеры которого известны,

виден под углом в  $1^\circ$ , то его расстояние в 57,3 раза больше его диаметра (это полезно запомнить).

Формулу (9) можно преобразовать. Вставим в неё  $D$  из формулы (1) § 110; тогда  $r = \frac{R \sin \rho}{\sin p_0}$ . Но  $\rho$  и  $p_0$  вообще малые углы; поэтому отношение их синусов можно принять равным отношению самих углов. Получаем

$$r = R \cdot \frac{\rho}{p_0}. \quad (12)$$

Например, для Луны  $p_0 = 57'$ ,  $\rho = 31':2 = 15',5$ . По формуле (12), получим  $r = \frac{15,5}{57} R = 0,27 R$ . Таким образом, диаметр Луны лишь немногим больше четверти земного диаметра.

**§ 114. Суточный и годичный параллаксы.** Во многих случаях можно измерить параллакс, наблюдая небесное тело несколько раз только из одного пункта. Действительно, каждый наблюдатель всё время перемещается. Например, обсерватория, расположенная близ экватора, через 12 часов переносится *суточным* движением на расстояние, приблизительно равное диаметру Земли; это даёт базис в 12 000 км. Годичное движение Земли вокруг Солнца перемещает через полгода каждую обсерваторию на длину диаметра земной орбиты, и мы получаем базис в 300 млн. км.

Эти перемещения наблюдателя должны вызывать кажущиеся смещения видимых положений светил, направленные в сторону, противоположную истинному перемещению наблюдателя. Такие смещения действительно наблюдаются; они называются *суточным параллактическим*

смещением (или просто *суточным параллаксом*) и годичным параллактическим смещением (*годовым параллаксом*).

Строгое определение названия «суточный параллакс» совпадает с определением горизонтального параллакса (§ 109). Годичный же параллакс определяется как угол, под которым со светила видна *большая полуось земной орбиты*, в том случае, когда плоскость, проходящая через Землю и светило, перпендикулярна этой оси. Суточные параллаксы вообще невелики, и определение расстояний светил по наблюдению суточных смещений производится не особенно часто. Наоборот, годовые параллаксы имеют громадное значение при измерении расстояний как в нашей планетной системе, так и в звёздном мире.

**§ 115. Измерение расстояний планет.** Годичное параллактическое движение планет выражается в том, что каждая планета описывает в течение года петлю с диаметром в несколько градусов (см. § 141). Величина петли у каждой планеты остаётся постоянной, но одни планеты описывают петли большего, другие меньшего размера.

Петлеобразное движение не принадлежит самим планетам, а является параллактическим смещением, происходящим от годичного движения Земли вокруг Солнца. Разница в размерах петель у разных планет указывает на различие их расстояний; у более близких планет параллактическое смещение больше, чем у более далёких. По величине параллактического смещения можно определить расстояния планет. Базисом здесь является среднее *расстояние Земли от Солнца*, которое называют *астрономической единицей*: все расстояния в планетной системе выражают в этих единицах. Такие измерения впервые были сделаны Коперником.

Но все полученные при этом числа будут лишь относительными. Чтобы определить их величину в километрах, надо измерить в километрах самый базис, т. е. расстояние Земли от Солнца.

## VI. ПАРАЛЛАКС СОЛНЦА

**§ 116. Важность и трудность задачи.** Так как расстояния между светилами (кроме расстояния Луны) выражаются в долях среднего расстояния от Земли до Солнца, то определение этого расстояния составляет одну из важнейших задач практической астрономии.

Эта задача — одна из самых трудных. Действительно, расстояние вычисляется (§ 110) по параллаксу, т. е. по очень малому углу, который для Солнца составляет меньше  $9''$ . Точное измерение его таким способом, как это делается для Луны, т. е. наблюдение параллактического смещения из двух отдалённых точек земной поверхности, невозможно, так как солнечное тепло расстраивает установку инструмента. Ввиду этого для измерения солнечного параллакса употребляются различные косвенные способы. Большинство их основано на следующем принципе, открытие которого составляет одну из величайших

заслуг Коперника: по видимым положениям и движениям планет в данный момент можно вычислить относительные расстояния всех планет от Солнца и друг от друга для этого момента (§ 115); поэтому достаточно измерить в линейных единицах какое-нибудь одно расстояние, и мы будем знать все остальные, в том числе и расстояние Земли от Солнца.

**§ 117. Определение солнечного параллакса по наблюдениям Марса.** Планета Марс, находящаяся от Солнца дальше Земли, каждые два года подходит к Земле на расстояние, в среднем вдвое меньшее, чем расстояние от Солнца. Это случается во время так называемых *противостояний* с Солнцем, когда Солнце  $S$ , Земля  $T$  и Марс  $M$  находятся приблизительно на одной прямой (рис. 44). В это время

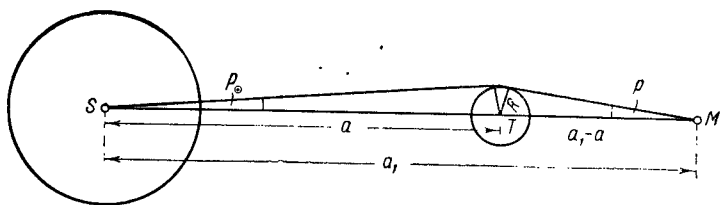


Рис. 44.

параллакс Марса можно измерить со значительной точностью. Наблюдение состоит в том, что астрономы, находящиеся в различных точках Земли, измеряют положение планеты относительно окружающих звёзд. Сравнение одновременных измерений разных наблюдателей покажет, что, например, южному наблюдателю планета представлялась сдвинутой несколько к северу. Определив величину этого параллактического смещения, можно вычислить горизонтальный параллакс Марса по способу, объяснённом в § 112. Переход от параллакса Марса к параллаксу Солнца делается следующим образом (рис. 44).

Пусть  $a$  и  $p_{\odot}$  обозначают среднее расстояние и параллакс Солнца,  $p$  — параллакс Марса,  $a_1$  — его среднее расстояние от Солнца,  $R$  — радиус Земли. Из рис. 44 получим, приняв для простоты, что все три тела находятся на одной прямой и на своих средних расстояниях от Солнца:

$$R = a \sin p_{\odot} \quad \text{и} \quad R = (a_1 - a) \sin p.$$

Приравнивая правые части и заменяя синусы малых дуг самими дугами  $p$  и  $p_{\odot}$ , получаем  $ap_{\odot} = (a_1 - a)p$ ; отсюда находим

$$p_{\odot} = \left( \frac{a_1}{a} - 1 \right) p. \quad (\text{I})$$

Отношение  $a_1/a$  проще всего определить из теории движения планет по третьему закону Кеплера (см. дальше гл. VII § 156):

$$\frac{a_1^3}{a^3} = \frac{T_1^2}{T^2}, \quad (\text{II})$$

где  $T$  и  $T_1$  — времена обращения Земли и Марса вокруг Солнца. Определив отношение расстояний планет из (II) и вставив в (I), по-

лучим  $\frac{a_1}{a} = 1,52$  и

$$\rho_{\odot} = 0,52 p.$$

Отсюда видно, что ошибка, сделанная при определении параллакса Марса, даёт в параллаксе Солнца ошибку, вдвое меньшую. Этот расчёт сделан при средних расстояниях Земли и Марса от Солнца; при очень благоприятных противостояниях ошибка уменьшается почти втрое.

**§ 118. Наблюдения малых планет.** Недостаток предыдущего способа состоит в том, что приходится определять положение планеты, которая в телескоп имеет форму диска, относительно звёзд, представляющихся точками: нельзя навести нить микрометра на край диска (по касательной) с той же точностью, как на звезду. Поэтому было предложено вместо Марса наблюдать одну из малых планет, обращающихся около Солнца между Марсом и Юпитером. Все они представляются такими же точками, как звёзды, а измерение углового расстояния между двумя точками можно произвести с большей точностью, чем расстояния между точкой и диском.

Правда, большинство этих планет находится значительно дальше Марса, параллаксы их лишь немногим больше солнечного. Но в 1898 г. была открыта малая планета, получившая название Эрот, которая иногда подходит к Земле в  $2\frac{1}{2}$  раза ближе, чем Марс. Наблюдение этой планеты представляет самый лучший способ определения солнечного параллакса, какой только известен в настоящее время. Вследствие сильной эллиптичности орбиты Эрота далеко не все сближения этой планеты с Землёй (противостояния) одинаково благоприятны. Наиболее тесные сближения, называемые «великими противостояниями», повторяются раз в 37 лет. Первое такое противостояние со времени открытия планеты произошло в феврале 1931 г., когда Эрот приблизился к Земле на расстояние, составлявшее всего  $\frac{1}{7}$  расстояния Солнца, и параллакс его достиг  $60''$ . В это время над ним были произведены тщательнейшие наблюдения на 24 обсерваториях разных стран по заранее разработанному плану (см. § 117).

**§ 119. Величина параллакса Солнца.** Только в 1942 г. была закончена обработка почти 3000 точных фотографических наблюдений Эрота во время противостояния 1931 г. Из них Спенсер Джонс вывел для параллакса Солнца значение  $8'',790$ , что соответствует среднему расстоянию 149,7 млн. км. Между тем, все лучшие определения начала XX в. давали для этой величины значение несколько большее, именно  $8'',80$  (расстояние 149,5 млн. км). Причина такого расхождения пока не выяснена, но из него следует вывод, который полезно

помнить: так как от параллакса Солнца зависят значения всех расстояний, измеряемых человеком во вселенной (кроме расстояния Луны), то во всех расстояниях, которые выражаются не менее чем восьмизначными числами километров, уже 4-й знак может быть ошибочен на единицу, а все дальнейшие совершенно неизвестны.

## VII. ГОДИЧНЫЙ ПАРАЛЛАКС ЗВЕЗД

**§ 120. Связь между параллаксом и расстоянием звезды.** Звёзды несравненно дальше планет. Поэтому они не обнаруживают ни малейшего параллактического смещения при передвижении наблюдателя по земной поверхности. Даже *годовое* движение Земли не вызывает в положении громадного большинства звёзд никакой заметной перемены. У тех же звёзд, у которых параллактическое смещение удалось обнаружить, оно выражается десятками, сотнями и тысячами *долями секунды*, т. е. в тысячи раз меньше параллактического смещения планет.

Представим себе наблюдателя, который находится на звезде, расположенной близ полюса эклиптики, т. е. по направлению перпендикуляра к плоскости земной орбиты (широта равна  $90^\circ$ ). Такой наблюдатель видел бы, как Земля в течение года описывает около Солнца маленький круг, диаметр которого зависит от расстояния звезды (эллиптичностью земной орбиты можно пренебречь). Если звезда находится где-нибудь между эклиптической и её полюсом, то для такого наблюдателя годичный путь Земли будет иметь вид эллипса. Наконец, со звезды, лежащей в плоскости эклиптики, должно казаться, что Земля колеблется около Солнца по прямой линии, отклоняясь каждые полгода то вправо, то влево на одинаковую величину.

Для земного же наблюдателя все эти звёзды будут казаться движущимися. Они будут описывать в течение года маленькие эллипсы (в частных случаях — круг или прямую), имеющие те же размеры, что и орбита Земли, рассматриваемая с данной звезды. Большая полуось этого эллипса равна *годовому параллаксу* звезды (см. § 114).

Если удастся измерить параллакс звезды  $\pi$ , то расстояние звезды  $D$  получится по формуле

$$D = \frac{r}{\sin \pi}, \quad (13)$$

где  $r$  обозначает среднее расстояние Земли от Солнца (астрономическую единицу). Так как угол  $\pi$  очень мал, то можно принять (по § 110)

$$\sin \pi = \pi'' \sin 1'' = \frac{\pi''}{206265}.$$

Вставив это значение в формулу (13) и приняв, что  $r=1$  (астрономическая единица), получим:

$$D = \frac{206265}{\pi''} (\text{астр. единиц}). \quad (14)$$

Следовательно, если бы годичный параллакс звезды был равен  $1''$ , то эта звезда находилась бы от нас в 206 265 раз дальше, чем Солнце. Но такой «близкой» звезды, повидимому, не существует.

**§ 121. История определения звёздных параллаксов.** Когда Коперник в 1543 г. опубликовал свою теорию движения Земли вокруг Солнца, то долгое время с ней не могли согласиться многие учёные. Их возражения основывались на том, что у звёзд нет параллактического смещения. Это могло означать, что звёзды просто чрезвычайно далеки от нас, по меньшей мере в сотни раз дальше, чем Солнце и планеты, но такая мысль о громадном пустом пространстве между планетной системой и звёздным миром противоречила общепринятой теории того времени, что природа «не терпит пустоты». В течение слишком двух столетий самые искусные наблюдатели постоянно пытались обнаружить параллакс звёзд, но все эти попытки или кончались неудачей или приводили к открытию новых, неожиданных явлений. Так, Брайлей в начале XVIII в. вместо параллакса открыл замечательное явление абберации света, а В. Гершель в конце того же века — орбитальное движение в системах двойных звёзд.

Только в 1838 — 1839 гг. В. Я. Струве в России и Бессель в Германии независимо друг от друга произвели первые достоверные измерения параллаксов звёзд. Измерения эти очень трудны, так как приходится измерять углы, которые всегда меньше секунды. Теперь эти измерения производятся по фотографическим снимкам (§ 93). Несмотря на то, что в поисках параллаксов промерены положения многих тысяч звёзд, обнаружить и измерить до настоящего времени удалось лишь не более 4000 параллаксов самых близких звёзд. Эти параллаксы имеют величину в несколько десятых ц, ещё чаще, в несколько сотых долей секунды. Очень малые параллаксы известны крайне неточно, так как возможная погрешность измерения параллакса (так называемая вероятная ошибка) составляет в настоящее время около  $0'',01$  даже при самых точных фотографических методах.

**§ 122. Расстояния звёзд.** Если расстояния звёзд выражать в километрах, то получатся числа не менее чем из 14 цифр. Даже астрономическая единица оказывается слишком маленькой мерой для измерения этих расстояний. Всего нагляднее они выражаются в *световых годах*. Так называется путь, который свет проходит в один год. Он составляет приблизительно  $9,5 \cdot 10^{12}$  км (вспомним, что свет проходит в 1 секунду почти 300 000 км и идёт от Солнца до Земли только 8 мин. 18 сек.) Самая близкая звезда ( $\alpha$  Центавра, у нас невидимая) имеет параллакс  $0'',75$  и расстояние 4,3 светового года, т. е. свет от неё идёт до нас 4,3 года. От более далёких звёзд свет идёт к нам гораздо дольше, так что многие звёзды мы видим не в их теперешнем состоянии, а такими, какими они были много тысяч лет назад. Из звёзд, видимых у нас простым глазом, ближе других находится Сириус, самая яркая звезда всего неба; он имеет параллакс  $0'',37$ , что соответствует расстоянию в 8,7 светового года,

В науке вместо светового года чаще употребляется другая единица, именно *парсек* (сокращение слов параллакс — секунда). Это — расстояние звезды, имеющей параллакс в 1"; оно составляет 206 265 астрономических единиц или приблизительно  $3,1 \cdot 10^{13}$  км. Чтобы выразить расстояние звезды в парсеках, надо разделить единицу на параллакс, выраженный в секундах, и формула (14) ещё упростится:

$$D = \frac{1}{\pi''} \text{ парсеков.} \quad (14a)$$

Так как свет проходит один парсек в 3,26 года, то в световых годах расстояние звезды выразится так:

$$D = \frac{3,26}{\pi''} \text{ свет. лет.} \quad (14б)$$

Таким образом  $\alpha$  Центавра удалена от нас на 1,3 парсека, Сирнус — на 2,7 парсека, звезда с параллаксом в 0",01 — на 100 парсеков и т. д.

Другие методы определения звёздных параллаксов будут описаны в гл. XV.

### VIII. АБЕРРАЦИЯ СВЕТА

**§ 123. Открытие Брайля.** В начале XVIII в. английский астроном Брайль предпринял ряд точных измерений склонения звезды  $\gamma$  Дракона. Целью его работы было отыскание годичного параллакса, но вместо этого он неожиданно открыл другое явление. Он скоро заметил, что в положении звезды происходят изменения, имеющие годичный период. Связь их с движением Земли несомненна, но направление отклонений не соответствовало ожидавшемуся параллактическому смещению.

Представим себе, что наблюдатель находится на Солнце и отсюда наблюдает положение звезды, расположенной близ полюса эклиптики (как  $\gamma$  Дракона). Если затем наблюдатель будет перенесён с Солнца  $O$  на Землю в точку  $A$  (рис. 45а), то для него звезда  $S$  вследствие влияния параллакса передвинется в направлении, противоположном его перемещению, т. е. по направлению к Солнцу, в точку  $a$ . В течение годичного обращения Земли звезда всё время остаётся сдвинутой в сторону Солнца на одну и ту же величину, но так как Солнце для земного наблюдателя за год описывает полный оборот по эклиптике, то направление смещения звезды постоянно изменяется, и в течение года она опишет полный круг. Радиус этого круга равен годичному параллаксу звезды; у разных звёзд он имеет различную величину: чем дальше звезда, тем радиус меньше. Мы знаем теперь, что даже у самых близких звёзд он меньше 1". Такой величины Брайль не мог бы заметить,

Смещение же, открытое Брадлеем, состоит в следующем:

1. Все звёзды близ полюса эклиптики описывают в течение года кружки *одинакового* радиуса, именно  $20'',5$ ; следовательно, величина смещения не зависит от расстояния звезды.

2. Во всякий данный момент смещение звезды от центра кружка направлено не к Солнцу, а к точке, лежащей на эклиптике на  $90^\circ$  позади (западнее) Солнца. Таким образом звезда как бы отстаёт в сравнении с параллактическим смещением на  $1/4$  оборота. Это явление и было названо *абберацией* звёзд.

Различие между параллактическим и абберационным смещениями схематически представлено на рис. 45а и 45б. Одинаковыми буквами обозначены положения Земли и соответствующие видимые положения звезды. В то время как Земля описывает круговую орбиту

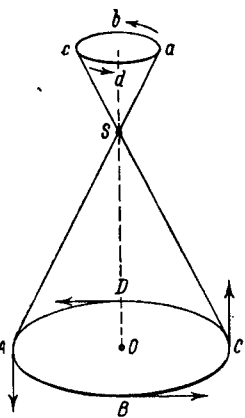


Рис. 45а.

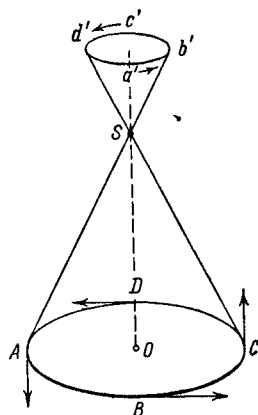


Рис. 45б.

ту  $ABCD$ , звезда близ полюса эклиптики описывает на небесной сфере: 1) маленький кружок  $abcd$ , параллельный эклиптике, благодаря параллаксу и 2) концентрический ему значительно больший кружок  $a'b'c'd'$  — благодаря абберации. Если бы Земля находилась неподвижно в точке  $O$ , то звезда была бы видна в общем центре обоих кружков. Движение по обоим кружкам складывается, но так как радиус параллактического кружка  $abcd$  (если он вообще заметен) по меньшей мере в 25 раз меньше абберационного  $a'b'c'd'$ , то параллактическое смещение лишь незначительно деформирует абберационный кружок.

**§ 124. Объяснение аберрации.** Абберация вызывается сочетанием движения *света*, идущего от звезды, с движением Земли по её орбите.

а) Звезда в полюсе эклиптики. Для объяснения аберрации рассмотрим сначала простейший случай. Предположим, что астроном, движущийся вместе с Землёй по направлению  $BA$  (рис. 46), наблюдает в телескоп звезду  $S$ , находящуюся в *полюсе эклиптики*, так что скорость Земли образует прямой угол с направлением лучей, идущих от звезды. Так как расстояние звезды чрезвычайно велико, то эти лучи можно считать параллельными. Примем для простоты, что телескоп имеет такое малое поле зрения, что в нём как раз помещается только одно изображение нашей звезды. Пусть наблюдатель установит свой телескоп по направлению  $CO$ , перпендикулярному к  $BA$ . Так как скорость света хотя и очень велика, но не



бесконечна, то свет от звезды, пройдя объектив  $O$ , достигнет окуляра  $C$  через некоторый промежуток времени  $t$ . Но за это время вследствие движения Земли окуляр уйдет из точки  $C$ , и наблюдатель

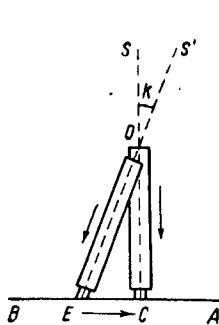


Рис. 46.

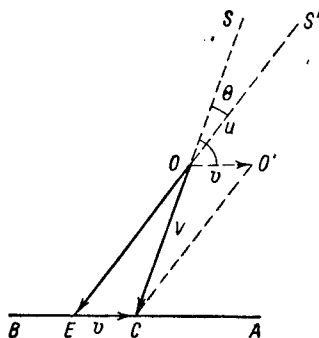


Рис. 47.

поэтому звезды не увидит. Чтобы свет от неё попал в глаз наблюдателя, надо, очевидно, отодвинуть окулярный конец трубы назад на отрезок  $EC$ , равный тому пути, который Земля проходит во время  $t$ . Тогда свет дойдёт до точки  $C$  как раз в тот момент, когда в неё придёт и окуляр.

Вследствие этого мы увидим звезду не по направлению  $CS$ , а по направлению  $ES'$ ; она окажется несколько сдвинутой по направлению к точке  $A$ , т. е. к той точке небесной сферы, к которой движется Земля в данный момент. Точка эта называется *апексом* (арех — по-латыни верхушка).

Найдём теперь положение апекса годичного движения Земли. Очевидно, что эта точка находится на эклиптике на  $90^\circ$  позади Солнца (к западу), так как скорость Земли совпадает с касательной к её орбите, которая приблизительно перпендикулярна к прямой Земля — Солнце и направлена (для наблюдателя в северном полушарии) против часовой стрелки. Как мы видели, наблюдаемое смещение звезды совершается именно по этому направлению.

Определим величину смещения. Пусть  $V$  обозначает скорость света,  $v$  — скорость Земли. Свет проходит путь  $OC$  за время  $t$ , а Земля в то же время проходит путь  $EC$  (рис. 46). Следовательно,

$$\frac{EC}{OC} = \frac{vt}{Vt}.$$

Тогда угол  $k$ , на который смещается вследствие абберации звезда  $S$ , определяется из треугольника  $OEC$ :

$$\operatorname{tg} k = \frac{EC}{OC} = \frac{v}{V}. \quad (15)$$

Так как скорость Земли  $v$  равна  $29,75 \text{ км/сек}$  (почти  $30 \text{ км/сек}$ ), а скорость света  $299\,800 \text{ км/сек}$  (почти  $300\,000 \text{ км/сек}$ ), то приблизительно

$$\operatorname{tg} k = 0,0001.$$

Определим угол  $k$ , приняв, ввиду его малости, тангенс равным дуге. По соотношению (15) получим:  $k \sin 1'' = \frac{v}{V}$ , откуда

$$k = \frac{1}{\sin 1''} \frac{v}{V} = \frac{206\,265 \cdot 29,75}{299\,800} = 20'',47. \quad (16)$$

Это — как раз та самая величина, которую дают наблюдения (см. § 123); она называется *постоянной аберрации*.

б) Общий случай. Пусть звезда  $S$  находится в произвольной точке небесной сферы на угловом расстоянии  $u$  от апекса  $A$  (рис. 47). Свет от звезды распространяется со скоростью  $V$ , изображённый вектором  $OS$ , а Земля движется по своей орбите со скоростью  $v$  (вектор  $EC$ ), составляющей с направлением к звезде угол  $u$ . Тогда направление движения света относительно Земли определится стороной  $OE$ . Таким образом, для движущегося наблюдателя звезда будет видна не по истинному направлению  $COS$ , а по направлению  $EOS'$ . Это *видимое* направление смещено относительно истинного на угол  $\theta$  в сторону апекса  $A$  и лежит, очевидно, в одной плоскости с  $CS$  и  $CA$ .

Величина угла  $\theta$  определяется из треугольника  $OEC$ :

$$\frac{\sin \theta}{\sin(u - \theta)} = \frac{v}{V}.$$

Так как  $\theta$  — очень малая величина, то в знаменателе его пренебрегаем, а в числителе синус заменяем дугой. Получаем:

$$\theta'' \sin 1'' = \frac{v}{V} \sin u,$$

или по формуле (16)

$$\theta = k \sin u. \quad (17)$$

На такой угол смещена звезда к апексу в каждый данный момент.

**§ 125. Влияние аберрации на положение звёзд.** Апекс годичного движения Земли совершает в течение года полное обращение по эклиптике. Вместе с ним обращается и звезда  $S'$  вокруг своего теоретического «истинного» положения  $S$ . Расстояние  $SS'$  определяется формулой (17). Если бы оно было постоянно, то звезда описывала бы круг радиусом  $k = 20'',5$ . Так в действительности и смещаются звёзды, расположенные близ полюсов эклиптики. Все же остальные звёзды описывают в течение года небольшие эллипсы, подобные параллактическим эллипсам (§ 123). Большая ось (наибольший диаметр)  $2k$  всех эллипсов параллельна эклиптике и для всех звёзд одна и та же, именно  $20'',5 \cdot 2 = 41''$ ; малая ось  $2b$  зависит от *широты* звезды; она

тем меньше, чем звезда ближе к эклиптике; величина её определяется формулой:  $b = k \sin \beta$ . Звезда, лежащая на эклиптике, колеблется по прямой линии, отходя от среднего положения на  $20''$ , 5 то в одну, то в другую сторону.

### Упражнения к главе V

1. Наблюдённое зенитное расстояние верхнего края Солнца составляет  $64^{\circ}55'33''$ , видимый радиус Солнца  $15'51''$ . Исправив за рефракцию и параллакс, найти геоцентрическое зенитное расстояние центра Солнца. *Ответ:*  $65^{\circ}13'20''$ .

2. Предыдущее наблюдение сделано в Москве ( $\varphi = 55^{\circ}45'20''$ ) 15 мая; в этот момент средний хронометр показал  $16^h51^m7^s$ ; склонение центра Солнца  $+18^{\circ}50'33''$ . Определить поправку хронометра относительно среднего местного времени. Уравнение времени было  $-3^m47^s,5$ . *Ответ:*  $-1^m18^s$ .

3. Наблюдённое зенитное расстояние звезды  $\beta$  Малой Медведицы в верхней кульминации было  $23^{\circ}2'7''$ , в нижней кульминации  $53^{\circ}51'51''$ . Найти широту места наблюдения и склонение звезды, приравняв во внимание рефракцию. *Ответ:*  $\varphi = 51^{\circ}52'8''$ ,  $\delta = +74^{\circ}34'40''$ .

4. Наблюдённое зенитное расстояние нижнего края Солнца в верхней кульминации было  $55^{\circ}42'19''$ , угловой радиус Солнца  $16'10''$ , склонение центра Солнца  $-14^{\circ}34'56''$ . Найти широту места. *Ответ:*  $+40^{\circ}52'31''$ .

5. Разность долгот двух мест равна разности каких времён — солнечных или звёздных?

6. Нормальный диаметр сферического аэростата 13 м. На каком расстоянии он находится, если кажется вдвое меньше Луны?

7. Чему равен угловой диаметр Земли, наблюдаемый с Солнца? С Марса (во время среднего противостояния, § 117)?

8. Планета Нептун находится от Солнца на расстоянии 30 астрономических единиц. Чему равен её горизонтальный параллакс на среднем расстоянии от Земли? Чему равен её годичный параллакс?

9. Иногда говорят, что доказательство шарообразности Земли по лунным затмениям (см. § 104) неправильно, так как тень Земли падает не на плоскость, а на сферическую поверхность Луны, и поэтому граница земной тени не является дугой круга. Опровергните это возражение.

10. На сколько горизонтальный *полярный* параллакс Луны меньше горизонтального экваториального параллакса? то же для Солнца?

11. Центр Земли, центр Луны и весьма далёкая звезда, лежащая на экваторе, находятся на одной прямой. Начиная с какой широты, считая по меридиану, для которого Луна находится в кульминации, звезда будет видна для земного наблюдателя?  $p_0 = 57'$ ,  $2\varphi = 31'$ . *Ответ:*  $\varphi > 15^{\circ},5$ .

12. На какой угол может отходить от Земли Луна для наблюдателя на Марсе во время среднего противостояния? (Задача 7 и § 110).

13. Определить для наблюдателя, находящегося на Марсе, горизонтальный параллакс его спутника Фобоса, у которого  $D = 2,8$  r.

14. Кроме описанной в § 123 — 124 *годовой* aberrации существует ещё *суточная* aberrация, вызванная движением наблюдателя по параллели вследствие вращения Земли. Где лежит её апекс? Во сколько раз её постоянная  $k'$  меньше постоянной годичной aberrации  $k$  для наблюдателя на земном экваторе?

15. Как влияет мгновенное распространение света (§ 124) на момент восхода Солнца? Почему в формуле § 88 оно не учтено?

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ. ЗАТМЕНИЯ

#### 1. ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ

**§ 126. Видимое движение Луны.** Кроме суточного движения вместе со всей небесной сферой Луна имеет и собственное движение, которое легко заметить. Если следить за положением Луны относительно какой-нибудь яркой звезды в течение нескольких часов, то окажется, что Луна перемещается к *востоку* приблизительно на величину своего диаметра в час, т. е. несколько больше, чем на  $1/2^\circ$ . Через сутки она передвигается на  $13^\circ$  и будет проходить через меридиан приблизительно на 50 мин. позже, чем накануне. На такую же величину каждые сутки запаздывают в среднем её восход и заход.

Луна движется около Земли в направлении с запада на восток.

Через 27,32 суток Луна закончит один оборот и будет находиться опять в том же положении относительно звёзд. Промежуток времени, по истечении которого Луна опять возвращается к той же звезде (или, что то же, время одного оборота Луны около Земли), называется *звёздным* или *сидерическим* месяцем.

**§ 127. Звёздный месяц и синодический месяц.** Момент, когда Луна имеет одинаковую долготу с Солнцем (§ 30), называется *новолунием*. Предположим (рис. 48), что от какого-нибудь новолуния (1) прошло  $27\frac{1}{3}$  суток (т. е. один звёздный месяц) и Луна (Л) вер-



Солнце

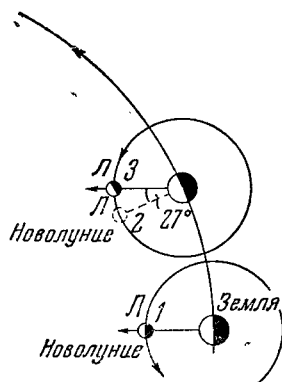


Рис. 48.

нулась в то же положение относительно звёзд (3). Но новолуния в этот момент ещё не будет: за 27 дней Солнце ушло к востоку приблизительно на  $27^\circ$  (см. § 27), и Луне надо его догнать. Так как в сутки Луна догоняет Солнце на  $13^\circ - 1^\circ = 12^\circ$ , то для этого ей понадобится  $27\frac{1}{12}$  суток  $= 29\frac{1}{4}$  суткам приблизительно.

Итак, истинное время обращения Луны около Земли, или звёздный месяц, составляет  $27\frac{1}{3}$  суток, а промежуток времени между двумя последовательными *новолуниями* (1 и 2) на  $2\frac{1}{4}$  суток длиннее и составляет, следовательно, несколько более  $29\frac{1}{2}$  суток. Этот период называется *синодическим* месяцем. Его можно определять ещё как время, по истечении которого Луна возвращается в прежнее положение относительно Солнца.

**Замечание.** Так как синодическое обращение встречается и в движении планет, то полезно знать общее правило для его вычисления.

Пусть  $S$  будет неизвестная продолжительность синодического месяца (в сутках),  $T$  — звёздный месяц и  $E$  — *звёздный год*, т. е. промежуток времени, по истечении которого Солнце возвращается к той же звезде. Как будет объяснено дальше (см. § 180), звёздный год несколько длиннее тропического года (§ 29); он содержит 365,256 суток.

Тогда суточное перемещение Луны составит  $\frac{1}{T}$ , а Солнца  $\frac{1}{E}$  часть окружности; разность этих дробей даст суточное движение Луны относительно Солнца, т. е.  $\frac{1}{S}$ . Таким образом

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{E}. \quad (1)$$

Это — так называемое *уравнение синодического движения*. Подставив точные числа, определим из него неизвестное  $S$ :

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{27,322} - \frac{1}{365,256},$$

отсюда  $S = 29,531$  суток.

Обратно, зная  $S$  из наблюдений, можно из уравнения (1) найти  $T$ . В действительности чаще приходится решать именно эту задачу.

**§ 128. Путь Луны между звёздами.** Определяя ежедневно положения центра Луны относительно звёзд и нанося их на карту, мы сможем начертить путь Луны на небе. Он является большим кругом, который не совпадает с эклиптикой, а пересекается с ней в двух диаметрально противоположных точках (§ 14). Эти точки называются лунными *узлами*; тот узел, в котором Луна переходит из южного полушария в северное, называется восходящим узлом ( $\Omega$ ), противоположный — нисходящим ( $\varpi$ ). Посредние между восходящим и нисходящим узлами Луна отдаляется от эклиптики на наибольшее расстояние, именно на  $5^{\circ}9'$  к северу, а на полпути от нисходящего узла к восходящему — на столько же к югу. Таким образом *наклонение* лунной орбиты к эклиптике составляет  $5^{\circ}9'$ . Более длительные наблюдения

показывают, что положение лунного пути всё время изменяется благодаря движению узлов.

**§ 129. Движение лунных узлов и его следствия.** Лунные узлы непрерывно перемещаются по эклиптике *к западу*, т. е. навстречу движению самой Луны. На каждый оборот Луны перемещение узлов составляет около  $1^{\circ},5$ , а в год — почти  $20^{\circ}$ . Таким образом по истечении месяца Луна никогда не возвращается в точности к тому же положению, и каждое следующее обращение она совершает, строго говоря, по новому пути. Последовательные обороты, описываемые Луной, ложатся рядом друг с другом, пересекаясь под очень малыми углами, как обороты бечёвки на хорошо свёрнутом мотке. В 18 лет 7 месяцев узлы делают полный оборот, и лунный путь занимает опять прежнее положение.

Движение узлов заметно влияет на условия видимости Луны. Когда восходящий узел совпадает с точкой весеннего равноденствия, то лунная орбита расположена вне угла между небесным экватором и эклиптической, наклонение орбиты ( $5^{\circ}9'$ ) складывается с наклонением эклиптики ( $23^{\circ}27'$ ), и поэтому наклонение лунной орбиты *к небесному экватору* может составлять  $28^{\circ}36'$ . Так было в 1932 г. и будет в 1951 г. Когда же в точке весеннего равноденствия находится нисходящий узел, то лунная орбита располагается между небесным экватором и эклиптической, наклонение орбиты вычитается из наклонения эклиптики и составляет тогда всего  $23^{\circ}27' - 5^{\circ}9' = 18^{\circ}18'$  (1941 г.). В первом случае наибольшее удаление Луны от экватора составляет  $28^{\circ}36'$  к северу и столько же к югу, и склонение её в течение месяца будет изменяться от  $+28^{\circ}36'$  до  $-28^{\circ}36'$ , т. е. в пределах  $57^{\circ}12'$ . Во втором же случае разница составит только  $36^{\circ}36'$  и будет, следовательно, гораздо менее резкой. Другое важное следствие движения узлов — это ежегодное изменение эпох видимости затмений (см. дальше § 138).

Причина движения лунных узлов будет объяснена в гл. VIII. Она заключается в действии на Луну силы притяжения Солнца.

**§ 130. Фазы Луны.** Различный вид Луны (полный круг, серп и т. д.) называется фазой. Фазы Луны объясняются тем, что Луна подобно Земле есть тёмный непрозрачный шар, освещённый Солнцем. Солнце так далеко (почти в 400 раз дальше Луны), что лучи его можно считать параллельными, и поэтому оно освещает ровно половину Луны; другая половина её остаётся тёмной. Но так как к Земле обыкновенно бывают обращены и часть видимого, светлого полушария и часть тёмного, то Луна большей частью кажется нам неполной, представляя ту или иную *фазу*.

Во время *новолуния*, когда Луна проходит между Солнцем и Землёй, (рис. 49а и 49б, положение 1), к нам обращена её тёмная сторона. Луна тогда совершенно не видна. Дня через два, когда Луна отойдёт от Солнца на  $25 - 30^{\circ}$  к востоку, нам будет видна небольшая часть освещённого полушария. В это время Луна представляется узким

серпом, обращённым выпуклостью *вправо* (к Солнцу; положение 2 на рис. 49а и 49б).

Через неделю после новолуния, когда Луна сделает уже  $\frac{1}{4}$  оборота, к нам обращена ровно  $\frac{1}{2}$  светлого полушария и  $\frac{1}{2}$  тёмного. Мы видим тогда освещённой правую половину лунного диска. Эта фаза называется *первой четвертью* (положение 3). Затем с Земли становится видной уже большая часть светлого полушария, а ещё через неделю, в *полнолуние*, мы видим освещённым весь диск Луны. После полнолуния Луна начинает убывать; с каждым днём с Земли видна всё

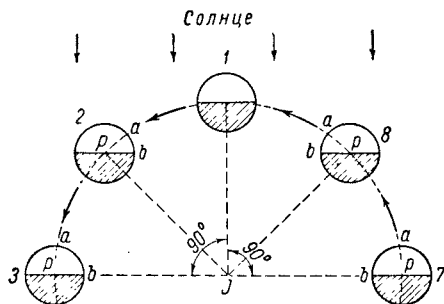


Рис. 49а.

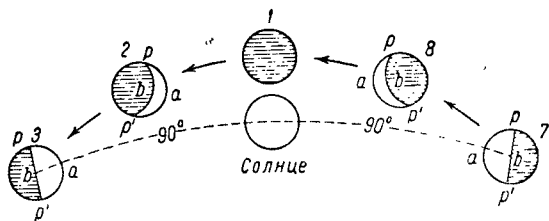


Рис. 49б.

меньшая часть светлого полушария; с правой стороны диска появляется всё больший «ущерб».

Через неделю после полнолуния наступает *последняя четверть*; мы видим освещённой *левую* половину диска. Наконец, Луна принимает форму серпа, обращённого выпуклостью влево, и вскоре совсем исчезает: наступает опять новолуние (положения 7 и 8).

До полнолуния Луна видна с вечера; её можно найти на дневном небе задолго до захода Солнца. Чем она старше, тем дальше отходит от Солнца и тем позже заходит. Полная

Луна видна на небе как раз против Солнца (долгота её на  $180^\circ$  отличается от долготы Солнца), поэтому она восходит приблизительно во время захода Солнца, а заходит около момента восхода. Она видна, таким образом, всю ночь.

Убывающая Луна с вечера не видна; она восходит после солнечного захода, а заходит уже днём; поэтому её часто можно видеть утром при полном солнечном сиянии.

Геометрически положение лунного серпа определяется следующим образом: прямая, соединяющая концы рогов серпа, всегда перпендикулярна к линии, направленной к Солнцу, причём рога направлены от Солнца. Поэтому точное положение рогов Луны для любого момента можно предвычислить заранее. Линия, отделяющая тёмную часть диска

от светлой, называется *терминатором* и всегда является половинной *эллипса*.

**§ 131. Пепельный свет.** Около новолуния, когда Луна имеет форму узкого серпа, можно видеть весь лунный диск, причём та часть его, которая не освещена Солнцем, светится слабым сероватым, как говорят, «пепельным» светом.

Этот «пепельный» свет есть свет, отражённый нашей Землёй. Действительно, Земля подобно Луне отражает солнечные лучи; поэтому для воображаемого лунного наблюдателя она так же меняет фазы, как для нас Луна, причём фаза Земли всегда противоположна фазе Луны в данный момент. Так, около новолуния Земля с Луны видна почти полной; так как диск её по диаметру почти в четыре раза больше видимого нами диска Луны (§ 109), то свет, который Земля отбрасывает на Луну, должен быть почти в 16 раз ярче лунного света. Но поверхность Земли отражает гораздо больше света, чем лунная поверхность. По новейшим определениям свет «полной Земли» ярче света Луны в полнолуние раз в 80. Он так сильно освещает тёмное полушарие Луны, что его поверхность становится видимой.

Наблюдения пепельного света представляют большой интерес, так как только по ним можно получить представление о том, какой цвет и какую яркость имеет наша Земля, наблюдаемая из мирового пространства. Из этих наблюдений и было получено приведённое только что число 80.

**§ 132. Орбита Луны.** В первом приближении можно считать, что Луна обращается около Земли по *эллипсу*. Точка лунной орбиты, в которой Луна находится ближе всего к нам, называется *перигеем*, а диаметрально противоположная точка, в которой Луна всего дальше, — *апогеем*. Линию, соединяющую эти две точки, т. е. большую ось эллипса, называют *линией апсид*.

*Эллипс*, по которому движется Луна, довольно значительно отличается от круга, гораздо значительней, чем, например, эллипс земной орбиты. Среднее расстояние Луны от Земли составляет 385 000 км, или 30 земных диаметров; в перигее Луна бывает на  $\frac{1}{18}$  этой величины ближе к нам, а в апогее — на столько же дальше.

Скорость, с которой движется Луна вокруг Земли, подчинена тому же закону, что и скорость движения планет (второй закон Кеплера, § 156); чем ближе Луна к Земле, тем скорость больше. В среднем она составляет около 1 км/сек. Для небесных движений — это очень малая величина. Вспомним, например, что сама Земля (в сопровождении Луны) движется по своей орбите почти в 30 раз скорее (§ 124).

Орбита Луны постоянно *изменяется* вследствие солнечного притяжения (см. гл. VIII). Так, эллипс, который она описывает, бывает по временам больше вытянутым, по временам меньше. Изменяется и длина месяцев: например, синодический месяц, имеющий среднюю продолжительность 29 суток 12 ч. 44 м., в действительности может быть на 6 час. длиннее и на столько же короче. Особенно значительны не-



правильности, или так называемые «неравенства», в скорости Луны: кроме изменения скорости по второму закону Кеплера, в разных точках орбиты она испытывает ещё ускорения и замедления различной величины, зависящие от влияния Солнца.

Особенно важное значение имеет движение лунных узлов к западу (см. § 129) с периподом в 6793 суток, т. е. в 18 лет. 7 мес. Изменяется также направление большой оси лунной орбиты и притом очень быстро: перигей движется всё время *к востоку* и полный оборот совершает всего в 9 лет (точнее, в 3232 суток). Таким образом движение Луны в действительности необыкновенно сложно и точное вычисление его составляет одну из самых трудных задач астрономии.

## II. СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ.

**§ 133. Покрытие светил Луной.** Луна при своём движении около Земли постоянно проходит перед более далёкими светилами и, таким образом, заслоняет их. Чаще всего закрываются звёзды; так называемые *покрытия звёзд Луной* представляют собой самое обыкновенное явление.

Как бы звезда ни была ярка, при покрытии Луной она исчезает за её краем абсолютно мгновенно (начало покрытия) и так же мгновенно появляется из-за Луны в полном своём блеске (конец покрытия). Это значит, что 1) угловой диаметр звезды ничтожно мал и 2) Луна практически не имеет атмосферы. Определение точных моментов начала и конца покрытий имеет большое значение для изучения движения Луны, а также для определения долгот точек земной поверхности.

Покрытия планет случаются реже. При них планета, имеющая заметный диск, скрывается за Луной постепенно.

Покрытия Солнца Луной называются *солнечными затмениями*.

**§ 134. Солнечные затмения (полное и частное).** Солнечные затмения бывают только во время *новолуний*. Они случались бы каждое новолуние, если бы плоскость орбиты Луны совпадала с плоскостью эклиптики. Но вследствие наклона лунной орбиты к эклиптике Луна в новолунии большею частью проходит севернее или южнее Солнца, не производя затмения. Затмение возможно только тогда, когда новолуние случается недалеко от эклиптики, т. е. вблизи одного из *узлов* лунной орбиты.

Солнечное затмение имеет различный вид для разных точек земной поверхности. Пусть на рис. 50 *S* обозначает Солнце, *T* — Землю, *M* — Луну. Очевидно, Солнце будет совершенно закрыто Луной только для наблюдателя, находящегося в густо заштрихованном пространстве между точками *PP*, или, иначе говоря, внутри *конуса лунной тени*, максимальный диаметр которой на расстоянии Земли равен 268 км. Только в этой сравнительно узкой области земной поверхности, куда падает тень Луны, видно *полное* затмение.

В областях  $OP$  и  $PO'$ , внутри так называемого конуса лунной *полутени* наблюдается частное затмение; для северного наблюдателя закрыта Луной южная (нижняя) часть солнечного диска, для южного наблюдателя — северная. Чем ближе наблюдатель к центру тени, тем большая часть Солнца закрыта, тем больше фаза затмения. Наконец, вне конуса полутени виден весь диск Солнца, и никакого затмения не наблюдается.

В разных точках Земли затмение не только видно по-разному, но оно и наступает в разное время. Действительно, благодаря движению Луны около Земли, область, например, полного затмения (*тень Луны*)

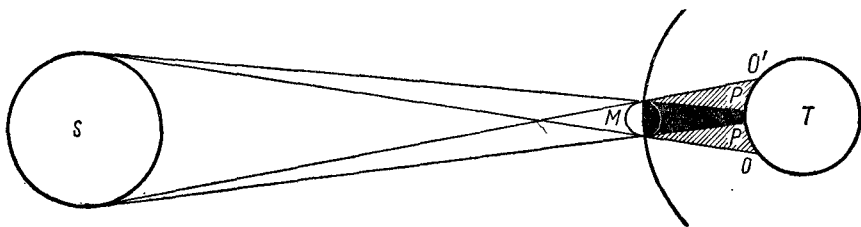


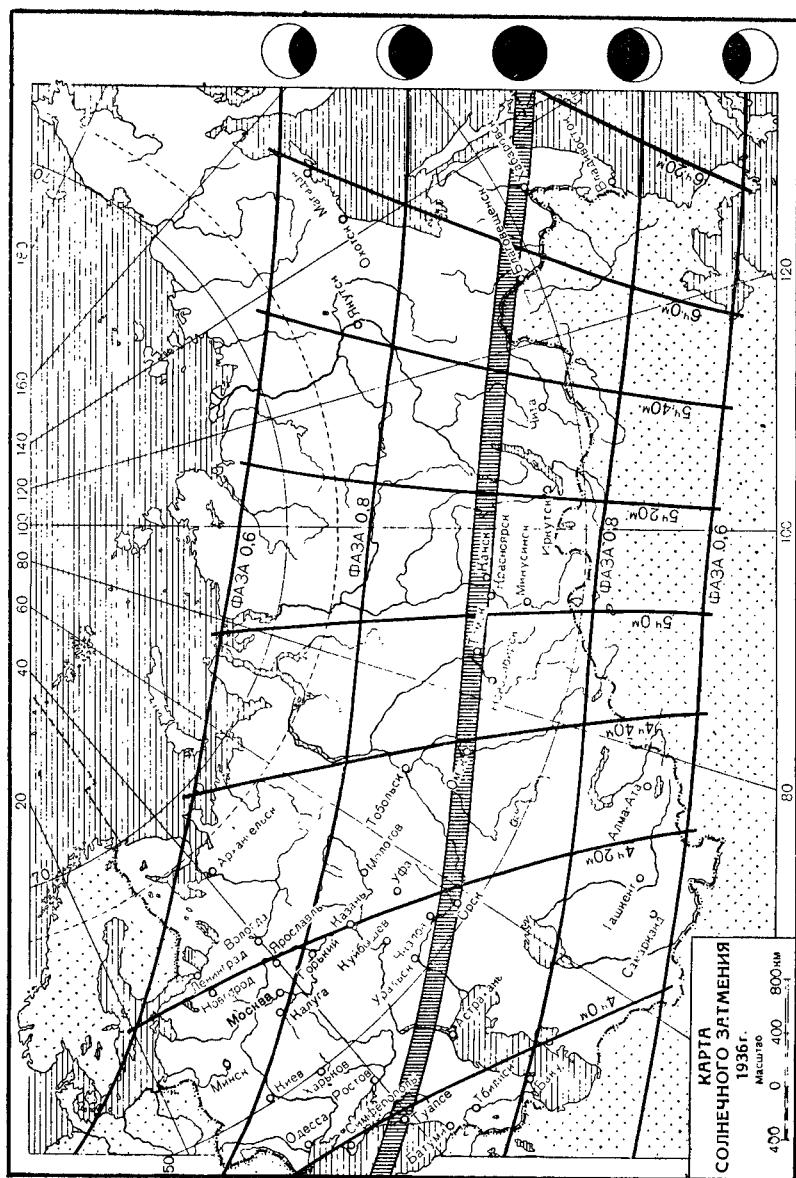
Рис. 50.

пробегает по земной поверхности приблизительно с запада на восток. В тех точках, где лунная тень вступает на Землю (на западе), Солнце в это время восходит. Через несколько часов она покидает земную поверхность в восточных странах, где в это время уже вечер, и затмение там наблюдается при заходе Солнца.

Таким образом, каждое полное затмение можно наблюдать внутри полосы в несколько тысяч километров длиной и в среднем около 200 км шириной (рис. 51). На остальной поверхности Земли это же затмение видно как частное или же вовсе не видно. Предвычисление солнечного затмения представляет довольно сложную задачу, так как для каждой точки земной поверхности надо производить особое вычисление.

Наиболее точной и удобной для практических вычислений солнечных и лунных затмений является теория, созданная коллективом советских учёных под руководством проф. А. А. Михайлова.

**§ 135. Кольцеобразное солнечное затмение.** Расстояние Луны от Земли изменяется в довольно широких пределах (§ 132); поэтому видимый диск Луны бывает то больше, то меньше солнечного диска. Если в момент затмения диск Луны больше солнечного, то наблюдатель, находящийся близ центральной линии (*оси*) тени, увидит полное затмение. Если же в это время угловой диаметр Луны меньше, чем угловой диаметр Солнца, то даже в тот момент, когда видимый центр Луны совпадает с центром Солнца, края Солнца останутся незакрытыми. Они будут видны кругом тёмного диска Луны как тонкое блестящее кольцо. Такое затмение называется *кольцеобразным*.



Чтобы выяснить условия кольцеобразного затмения по рис. 50 надо представить себе, что вершина конуса лунной тени в этом случае не доходит до земной поверхности. Близ оси тени видно кольцеобразное затмение, в остальных точках лунной полутени — обыкновенное частное.

§ 136. Описание солнечного затмения. Так как Луна движется с запада на восток, то затмение начинается на *западном* (правом

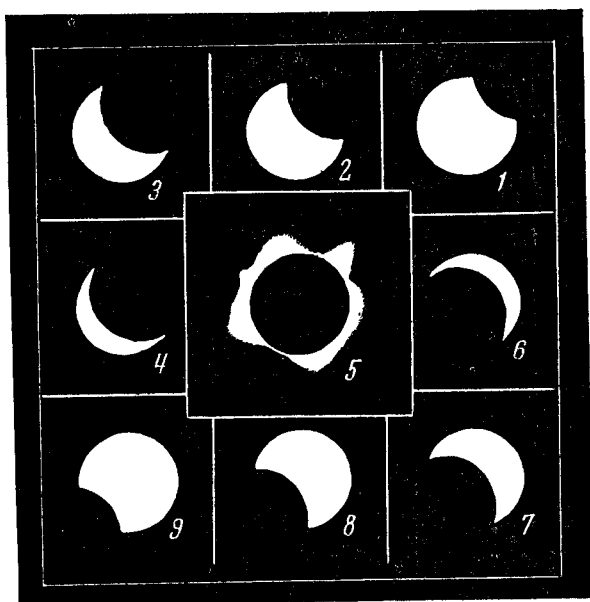


Рис. 52.

краю солнечного диска; на нём появляется ущерб, вырезанный по дуге круга того же радиуса. Ущерб постепенно растёт, и Солнце принимает форму всё более узкого серпа (рис. 52). Пока хоть небольшая часть Солнца остаётся непокрытой, особенного потемнения не наблюдается, и население может даже и не заметить затмения почти до начала полной фазы. Но в момент начала полного затмения, когда исчезает последняя точка солнечного диска, всем бросается в глаза вокруг чёрного диска Луны красивое, довольно яркое сияние; это — так называемая *солнечная корона* (§ 218), при обычных условиях невидимая. Небо резко темнеет, быстро наступает полумрак, а кругом вдоль горизонта видно красноватое сияние вроде зарю («заревое кольцо»), вызываемое отражением света от тех частей атмосферы, которые лежат за пределами области полного затмения. Всё это создаёт настолько необыкновенные условия освещения, что всякий земной пейзаж

во время затмения принимает совершенно фантастический характер. Всё затмение может продолжаться свыше двух часов, но полная фаза длится всего несколько минут (не более 7; чаще всего 2—3 мин.), так как лунный диск лишь немногим больше солнечного и поэтому очень скоро с него сдвигается.

**§ 137. Лунное затмение.** Земля, как всякое тёмное, непрозрачное тело, освещённое Солнцем, отбрасывает от себя тень в сторону, про-

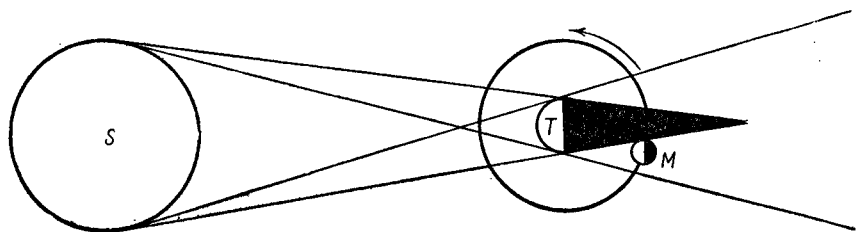


Рис. 53.

тивоположную Солнцу. Так как диаметр Солнца гораздо больше диаметра Земли, то земная тень подобно лунной имеет форму постепенно суживающегося конуса. Этот конус длиннее конуса лунной тени во столько же раз, во сколько раз земной диаметр больше лунного, и на расстоянии Луны диаметр конуса превышает диаметр Луны почти втрое. Когда в область земной тени попадает Луна, то она лишается солнечного света, и наступает лунное затмение. Наблюдатель же, находящийся на Луне, видел бы в это время полное затмение Солнца Землей (рис. 53).

Лунное затмение происходит только во время *полнолуний*, когда Луна находится в противостоянии с Солнцем. Большею частью Луна проходит вне земной тени, и затмения наступают только в том случае, если Луна во время полнолуния находится достаточно близко к одному из узлов лунной орбиты.

Так как Луна движется с запада на восток, то первым вступает в земную тень *восточный* (левый) край Луны. На нём появляется ущерб, который постепенно увеличивается; Луна принимает форму серпа, отличающегося от серпа обычных лунных фаз: при затмении линия, отделяющая светлую часть Луны от затемнённой (терминатор), представляет собой дугу круга с радиусом вдвое большим, чем радиус лунного диска; это — край земной тени. Между тем при лунных фазах световая граница есть полуэллипс (§ 130), в первой и последней четвертях переходящий в прямую линию.

Если вся Луна войдёт в земную тень, то произойдёт *полное* затмение; если же Луна пройдёт в тени близ её края, то затмение будет *частным*. Так как диаметр земной тени приблизительно в 2,5 раза больше диаметра лунного диска, то полное лунное затмение, в про-

типоволожность полным затмениям Солнца, может продолжаться сравнительно долго, почти до 2 часов.

Во время полного затмения Луна никогда не исчезает совсем, она только светит гораздо слабее, чем обыкновенно, и имеет медно-красный цвет. Это освещение происходит от преломления лучей Солнца в земной атмосфере, благодаря чему красные лучи изгибаются внутрь конуса тени и попадают на Луну. Для наблюдателя, находящегося на Луне, в момент лунного затмения происходило бы затмение, или покрытие Солнца Землёю. Вокруг громадного чёрного диска Земли он видел бы кольцо освещённой земной атмосферы, окрашенной в красный цвет благодаря преломлению красных солнечных лучей (голубые и синие лучи рассеиваются земной атмосферой).

Так как во время затмения Луна действительно темнеет, то она будет казаться тёмной, откуда бы на неё ни смотреть. Поэтому лунное затмение видно совершенно одинаково на всём земном полушарии, обращённом к Луне, и для всех точек Земли начнётся (и кончится) в один и тот же физический момент. По местным часам каждой точки Земли этот момент будет приходиться в разное время в зависимости от долготы места. Наблюдение затмения даёт таким образом простой, но мало точный, способ для определения разности долгот (см. § 102).

**§ 138. Условия наступления затмений.** Для наступления затмения необходимо, чтобы новолуние (или полнолуние) произошло близ узла лунной орбиты. Так как восходящий и нисходящий узлы отстоят один от другого по эклиптике на  $180^\circ$ , то Солнце проходит каждые полгода через какой-нибудь из узлов. Поэтому в году бывает два «сезона», когда возможны затмения, продолжительностью приблизительно по месяцу каждый. Солнечное затмение может наступить даже в том случае, если новолуние придётся в расстоянии  $18^\circ$  от узла в ту или другую сторону, а на расстоянии, меньшем  $15^\circ$ , оно случится непременно. Для наступления лунного затмения необходимо меньшее расстояние, около  $11^\circ$ . Так как Солнце перемещается в сутки приблизительно на  $1^\circ$ , то сезон солнечных затмений составляет 36 дней (18 дней до узла и 18 после), а лунных затмений — только 22 дня.

Сезон солнечных затмений длиннее синодического месяца (§ 127); поэтому в его пределах непременно придётся хоть одно новолуние, а, следовательно, хоть одно солнечное затмение. Таким образом, каждый год случается по меньшей мере *два затмения Солнца*, — одно через полгода после другого; лунных же затмений в некоторые годы может не быть вовсе, так как сезон этих затмений короче синодического месяца, и внутри его может не прийти ни одного полнолуния.

**§ 139. Число затмений в году.** Вследствие обратного движения узлов сезоны затмений каждый год наступают приблизительно на 20 дней раньше. Поэтому, если два сезона падают на январь и июль, то начало третьего придётся на декабрь того же года. А так как в каждый сезон может быть, самое большее, три затмения (лунное

между двумя солнечными), то наибольшее число затмений в календарном году будет семь: 6 затмений в двух полных сезонах и одно (непреренно солнечное) из третьего неполного сезона, захватывающего данный год лишь частью. Возможна и такая комбинация: в начале и в конце года по 2 затмения (одно солнечное и одно лунное) из двух неполных сезонов, а в июне—июле полный сезон из трёх затмений. В первом случае в году будет 5 солнечных затмений и 2 лунных, во втором—4 солнечных и 3 лунных.

Наименьшее голичное число затмений—это два затмения, оба солнечные. Возможны и различные другие комбинации; чаще всего бывает 2 солнечных и 2 лунных затмения.

**§ 140. Цикл затмений.** Предсказание затмений облегчается тем, что каждое затмение повторяется через 18 лет 11 дней (или 18 лет 10 дней, если за это время високосный год был 5 раз). Происходит это оттого, что по истечении такого промежутка времени Солнце, Луна и узлы лунной орбиты возвращаются приблизительно к первоначальному относительному положению. Так как лунные узлы движутся навстречу движению Луны, то Луна возвращается в узел до завершения полного обращения относительно звёзд не через 27,32 суток (звёздный месяц), а через 27,21 суток (драконический месяц). По той же причине Солнце возвращается в узел скорее, чем через год, именно, через 343,62 суток (драконический год). Оказывается, что 242 драконических месяца почти в точности равны 19 драконическим годам. Следовательно, если в какой-нибудь момент новолуние, т. е. соединение Луны с Солнцем, произошло в узле, то через 18 лет 11 дней они опять сойдутся очень близко к узлу. За это время пройдёт 223 синодических месяца (§ 127). Именно:

- I. 223 синод. месяца = 6585,32 суток = 18 лет 11 дней 7 часов 42 мин.;
- II. 242 дракон. месяца = 6585,36 суток;
- III. 19 солн. драконич. лет = 6585,78 суток.

Если начальное новолуние и затмение произошли в точности в узле, то новое новолуние случится не в узле, а приблизительно на  $1\frac{1}{2}^\circ$  к западу от него, т. е. раньше вступления Солнца в узел, так как 1-й период почти на  $1\frac{1}{2}$  суток короче 3-го. Поэтому новое затмение по величине будет несколько отличаться от первого. Кроме того, оно будет наблюдаться не в тот же час, а в среднем на 7 ч. 42 м. позже, чем прошлое, и может оказаться невидимым в тех местах, где наблюдалось первое затмение.

Период в 18 лет 11 дней был известен уже древним вавилонянам и назывался *саросом*. В течение каждого сароса происходит 70 затмений, из них 41 солнечное и 29 лунных. Таким образом для Земли вообще солнечные затмения случаются чаще лунных, но для какой-нибудь точки земной поверхности лунные затмения происходят гораздо чаще. Происходит это потому, что каждое лунное затмение видно на целом земном полушарии, солнечные же затмения видны на сравнительно неширокой полосе. Особенно редко удаётся видеть

полные затмения Солнца; хотя в течение каждого 18-летнего периода бывает до 10 полных затмений, но в данной точке они бывают видны в среднем 1 раз в 200—300 лет.

Ближайшие полные солнечные затмения, видимые в СССР, произойдут: 25 февраля 1952 г. в Сибири, 30 июня 1954 г. в Европейской части СССР, 15 февраля 1961 г. в Европейской части СССР. Полные лунные затмения будут наблюдаться в СССР 30 января 1953 г., 19 января 1954 г., 14 мая 1957 г., 19 декабря 1964 г.

### Упражнения к главе VI

1. Как происходит движение Луны для наблюдателя на Северном полюсе?
  2. Для жителей каких широт Луна может быть незаходящим светилом?
  3. В какое время года полная Луна поднимается всего выше над горизонтом?
  4. Почему серп «молодого месяца» особенно высоко стоит на небе весной?
  5. Почему Луна «на ущербе» (после полнолуния) весной видна плохо, а осенью, наоборот, рано восходит и высоко поднимается?
  6. Какую фазу Земли видел бы воображаемый житель Луны во время полнолуния? во время полнолуния? Какова вообще зависимость между фазами Луны и фазами Земли?
  7. Почему не может быть кольцеобразного затмения Луны?
  8. Почему в течение календарного года не может быть 8 затмений?
  9. Что видит воображаемый наблюдатель, находящийся на Луне, во время солнечного затмения? во время лунного?
  10. Когда воображаемый наблюдатель на Луне видит частное затмение Солнца Землей, что видит в это время земной наблюдатель?
  11. Бывают случаи, когда Луна, находясь в полном затмении, восходит раньше захода Солнца, так что оба светила видны одновременно, и, следовательно, Солнце должно быть видно с Луны, а между тем Луна в затмении. Как это объяснить? *Указание:* См. гл. IV.
  12. На какой угол перемещается Луна по своей орбите в 1 секунду?
  13. Почему лунный терминатор имеет форму эллипса?
  14. Во сколько раз ослабляется свет Солнца при самом ярком кольцеобразном затмении? (Угловые диаметры Солнца и Луны для этого случая можно принять в  $32',6$  и  $29',4$ ; поверхность Солнца считать равномерно яркой.)
-



## ГЛАВА СЕДЬМАЯ

### ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

**§ 141. Общее понятие о движении планет.** Видимое движение всех планет (§ 2) относительно звёзд имеет следующие особенности.

1. Планеты не отходят далеко от эклиптики и всегда остаются в области зодиака (§ 31).

2. Движение планет имеет, в общем, направление с *запада на восток* (прямое движение); полное обращение кругом всей эклиптики продолжается для разных планет от года до многих лет.

3. В движении всех планет время от времени наступают «стояния», или остановки, после которых планета начинает двигаться в обратном

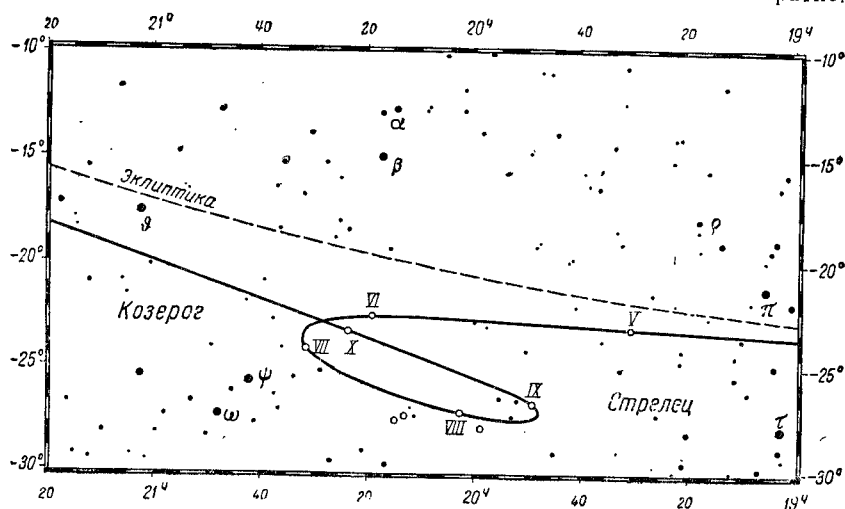


Рис. 54.

направлении, т. е. к западу. Такое *обратное (попятное)* движение продолжается несколько недель или месяцев, затем следует новое стояние, и планета продолжает свой обычный путь к востоку (см. рис. 54, на котором изображён видимый путь планеты Марс в 1939 г.). Если нанести видимый путь планеты на звёздную карту, то получится сложная кривая линия с петлями и зигзагами.

**§ 142. Движение нижних планет.** Самая яркая из всех планет — Венера — бывает видна только как вечерняя или утренняя звезда: или по вечерам на западе, или перед рассветом на востоке. Появившись после периода невидимости на западе в лучах *вечерней* зари, она с каждым днём отходит всё дальше от Солнца *к востоку*. Достигнув через несколько месяцев углового расстояния в  $45\text{--}48^\circ$  (так называемой *наибольшей восточной элонгации*), она начинает приближаться к Солнцу и скрывается в его лучах. Момент, когда долгота планеты равна долготе Солнца, называется *нижним соединением* планеты с Солнцем. В это время иногда можно наблюдать, как планета проходит перед солнечным диском в виде чёрного кружка (§ 242).

Затем Венера отходит от Солнца *к западу* и становится, таким образом, *утренней* звездой. После наибольшей западной элонгации начинается опять приближение планеты к Солнцу, но уже с запада, и кончается новым исчезновением в его лучах, так называемым *верхним соединением*, после которого планета опять появляется в виде вечерней звезды.

Точно так же движется и Меркурий. Только его наибольшая элонгация не превышает  $28^\circ$ , так что планета почти постоянно скрывается в лучах утренней или вечерней зари.

Обе эти планеты, которые в своём движении как бы колеблются около Солнца, названы *нижними* (т. е. близкими) планетами, так как в древности думали, что они всегда находятся ближе Солнца.

**§ 143. Движение верхних планет.** Все остальные планеты называются *верхними*, т. е. далёкими. Их положение на небе не связано так явно с положением Солнца, как у нижних планет, и они могут удаляться от Солнца на какое угодно угловое расстояние.

В движении верхних планет также бывает период, когда они скрыты в лучах Солнца, т. е. *соединение* с Солнцем. После периода невидимости планета появляется всегда *к западу* от Солнца в лучах утренней зари. В это время она движется *прямым* движением к востоку, в ту же сторону, что и Солнце, но медленнее его, так что расстояние её от Солнца увеличивается, и она восходит всё раньше и раньше. Движение её к востоку всё замедляется, наконец, после *стояния* (§ 141) переходит в *попятное*, направленное к западу. В это время угловое расстояние планеты от Солнца достигает  $180^\circ$ ; это положение называется *противостоянием* с Солнцем. Вскоре после противостояния попятное движение опять сменяется прямым, и планета начинает сближаться с Солнцем.

Во время противостояния планета восходит приблизительно в момент захода Солнца и видна всю ночь. После противостояния заход Солнца заставит планету уже над горизонтом, с каждым днём всё ближе к Солнцу, пока она не исчезнет в его лучах в виде вечерней звезды. Это обозначает, что наступило соединение с Солнцем. Заметим, что во время противостояний блеск планеты достигает макси-

мум; очевидно, в это время она подходит к Земле на самое близкое расстояние.

**§ 144. Геоцентрическая система Птолемея.** Остановки и попятные движения планет долгое время представлялись загадочными, и только после нескольких столетий тщательных наблюдений греческие астрономы придумали для них объяснение, известное под названием *системы Птолемея* (александрийский астроном II в. нашей эры). Основываясь на общепризнанном в те времена учении Аристотеля о неподвижности Земли, Птолемей объяснил движение небесных тел предположением (гипотезой), что все они прикреплены к вращающимся твёрдым, прозрачным и невидимым сферам. Например, для объяснения движения Солнца он вводил две сферы: первая — это сфера суточного движения, на поверхности которой прикреплены все звёзды и которая за сутки совершает один оборот около Земли; вторая же (сфера годовичного движения) участвует в суточном вращении первой сферы, но, кроме того, и сама вращается с периодом в один год вокруг другой оси, наклонённой к первой на угол, равный наклону эклиптики. К поверхности этой второй сферы и прикреплено Солнце.

Так как каждая точка вращающейся сферы описывает круг, то Птолемей, вместо построения сферы на сфере, стал строить круг на круге. Но всё же на вопрос о том, на чём держатся планеты, долгое время отвечали: планета находится на невидимой хрустальной сфере № 1, ось которой укреплена на сфере № 2, и т. д. В те времена легче было поверить в существование невидимых хрустальных сфер, чем представить себе, что планета может, ни на чём не держась, двигаться в пространстве.

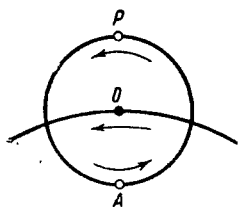
Система Птолемея не только объясняла движения планет, но позволяла вычислять положения планет на будущее время с точностью, удовлетворявшей несовершенным наблюдениям невооружённым глазом. Поэтому, хотя система Птолемея в основе своей неверна, она не вызвала у большинства учёных серьёзных сомнений до XVI в.

По этой системе мир конечен, имеет форму сферы и равномерно вращается в течение суток вокруг шарообразной Земли, неподвижно висящей в центре. Этим вращением охвачены и висящая сфера неподвижных звёзд, и семь внутренних тел, именно, Луна, Солнце и пять планет. Но каждое из этих семи тел имеет, кроме суточного обращения, ещё и другое обращение вокруг Земли, и притом очень сложное. Именно, каждая планета обращается не непосредственно вокруг Земли, а описывает сравнительно небольшой круг (по тому же направлению) около некоторой воображаемой точки  $O$ , а уже эта точка движется вокруг Земли  $T$  по кругу большого радиуса (рис. 55). Малый круг называется *эпициклом*, большой — *деферентом*. В результате сложения движения по эпициклу с движением самого эпицикла по деференту выйдет, что около точки  $P$  планета будет иметь, если смотреть с Земли, самое быстрое прямое движение, близ точки  $A$ , наоборот, попятное (противостояние верхней планеты). Между этими

точками будет положение (не отмеченное на рисунке), в котором скорость планеты, сложенная со скоростью эпицикла, направлена прямо к Земле и, следовательно, планета некоторое время кажется неподвижной. Это — одна из точек *стояния*. Другая такая же точка будет там, где планета движется прямо от Земли.

Если при этом допустить, что плоскость эпицикла наклонена к плоскости деферента, то планета для земного наблюдателя не просто будет двигаться вперёд, назад и опять вперёд по одной линии (например, по эклиптике), а опишет некоторую петлю. Всё это хорошо согласовалось с наблюдениями.

Во времена обращения по эпициклам есть различие для планет верхних и нижних. Все верхние планеты описывают полный оборот



о  
7

Рис. 55.

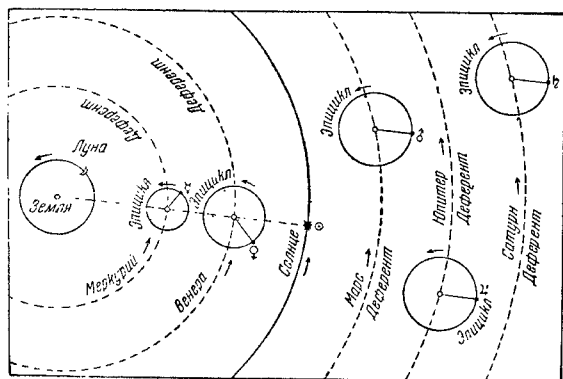


Рис. 56.

по эпициклу в 1 год, время же обращения центра эпицикла по деференту (так называемое *звёздное обращение* планеты) для верхних планет различно: для Марса около 2 лет, для Юпитера 12 лет, для Сатурна почти 30 лет. У двух нижних планет, наоборот, время обращения по эпициклу различно, а обращение по деференту одинаково и опять-таки равно 1 году (рис. 56).

**§ 145. Усложнение системы Птолемея.** Уже древнегреческие астрономы заметили, что главное движение планеты, именно движение центра эпицикла к востоку, — неравномерно; то же относится, как мы уже видели, к Солнцу и Луне. Для объяснения этой неравномерности сделали допущение, что в действительности центр эпицикла каждой планеты движется по кругу и вполне равномерно, но центр круга не совпадает с Землёй (*эксцентрический* круг). Поэтому, когда планета проходит через ближайшую к Земле точку орбиты (*перигей*), то с Земли её движение кажется быстрее среднего; наоборот, в *апогее* движение кажется самым медленным.

Позднейшие наблюдения в средние века открыли в движениях планет ряд других неправильностей, которые нельзя было объяснить движением по эпициклам Птолемея. Поэтому пришлось допустить, что около центра первого эпицикла обращается не планета, а вторая математическая точка — центр второго эпицикла, по окружности которого движется планета. Когда такое построение оказывалось недостаточным, вводили 3-ю математическую точку, обращающуюся вокруг центра второго эпицикла, затем 4-ю и т. д., пока на окружности какого-то  $n$ -го эпицикла не удавалось, наконец, получить положение планеты, сносно согласующееся с наблюдениями. Товарищ Сталин метко охарактеризовал это состояние астрономии к концу средневековья словами: «*обветшавшая система Птолемея*» (И. Сталин, Вопросы ленинизма, стр. 502, изд. 11-е). Действительно, средневековые учёные тщетно пытались поддержать изжившую себя систему Птолемея, клая заплатку на заплатку. Сломать эту систему и построить новое здание никто не решался, опасаясь гнева всемогущей в те времена католической церкви — оплота реакции и мракобесия. На это решился великий славянский учёный Николай Коперник и то только к концу своей жизни.

**§ 146. Мысли о движении Земли.** О движении Земли догадывались ещё в древности. Например, греческий астроном Аристарх в III в. до н. э. уже имел о движении Земли правильное представление. Его идеи были известны древним учёным, но не получили сочувствия, так как противоречили «законам» механики того времени. Даже Птолемей, живший четырьмястами лет спустя, опровергал учение Аристарха таким возражением: «если бы Земля двигалась, то воздух и тела, летающие в воздухе, оставались бы позади». Кроме того, система Птолемея в те времена ещё не успела обнаружить своей несостоятельности. Поэтому в течение столетий идея о движении Земли не получила дальнейшего развития. Лишь отдельные учёные Востока высказывали мысли о движении Земли. Так, один из крупнейших астрономов XI в., разносторонне образованный таджикский учёный Бируни доказывал, что «Земля движется и нам только кажется, что она неподвижна».

В средневековой феодальной Европе не могло быть и речи о движении Земли: под гнётом католической церкви там было забыто даже учение о шарообразности Земли и пышно расцвела ложная наука астрологии, пытавшаяся предсказывать будущее по расположению планет. Достаточно отметить, что в университетах XIII — XV вв. кафедра астрологии (не астрономии) считалась одной из важнейших, и что у всех правителей западноевропейских стран имелись придворные астрологи, оказывавшие несомненное влияние на политическую жизнь.

**§ 147. Книга «Об обращениях небесных тел».** В 1543 г. польский астроном Николай Коперник (умерший в том же 1543 году) опубликовал большое сочинение «Об обращениях небесных тел», в котором идея о движении Земли была разработана математически.

Книга эта была делом всей жизни Коперника. Предположения древних мыслителей о движении Земли ему были известны, но это не умаляет его заслуги, ибо Коперник создал целую астрономическую систему, чрезвычайно полную и строгую и всецело основанную на движении Земли вокруг Солнца. Таким образом, учение о Земле-планете стало стройной научной теорией, подкреплённой массой фактов.

Учение о движении Земли произвело настоящую революцию в человеческом мировоззрении. До этого Земля считалась единственным неподвижным телом вселенной, центральной и важнейшей частью мироздания; все религии сходились на том, что «небесные светила» созданы лишь для согревания и освещения Земли; судьбы человечества считались целью существования вселенной. Теперь же Земля оказалась рядовой планетой, движущейся вместе с другими, ей подобными, в беспредельном пространстве, и перед человечеством открылся новый, истинный грандиозный мир.

Вместе с тем открытие движения Земли чрезвычайно подняло авторитет науки в её борьбе с религиозными и схоластическими традициями и заставило пересмотреть другие отрасли естествознания, в частности, физику. Имя Коперника стало лозунгом всех борцов за научное мировоззрение.

**§ 148. Гелиоцентрическая система Коперника.** Основы системы Коперника заключаются в следующем:

1. Планеты обращаются *по круговым* орбитам и равномерно вокруг Солнца, а не вокруг Земли.

2. Земля есть одна из планет и обращается в течение года около Солнца по кругу; плоскость этого круга есть плоскость эклиптики (первое движение Земли).

3. Земля вращается в течение суток вокруг оси, наклонной к эклиптике (второе движение Земли).

Таким образом, по теории Коперника планеты движутся около Солнца всё время в одну сторону без всяких остановок и непятых движений. Описываемые ими петли происходят от того, что мы смотрим на планеты с движущейся Земли. Вследствие этого в положении планет происходят *параллактические* смещения (§ 115): планета смещается в сторону, противоположную движению Земли.

Главное доказательство правильности своей теории Коперник основал на том, что движение планет связано с годичным движением Солнца, и поэтому в обращениях всех планет есть годичный период (§ 144). Древние астрономы на это обстоятельство не обратили внимания или считали его случайным совпадением. Коперник же показал, что и годичное движение Солнца и годичные периоды в движениях планет, — все являются просто отражением одного годичного движения, именно движения Земли вокруг Солнца. Этим он сразу разрубил запутанный узел теории эпициклов. Впервые в истории науки Коперник *измерил* мир планет. Действительно, если петля, описываемая

планетой, есть явление параллактическое, то угловой полудиаметр петли (исправленный за собственное движение планеты вокруг Солнца) равен годовому параллаксу планеты  $\pi$ . Зная  $\pi$ , можно по формуле (13) § 120 вычислить расстояние планеты от Солнца в астрономических единицах. Чем петля меньше, тем планета дальше. Коперник произвёл это вычисление и получил для расстояний планет величины, хорошо согласующиеся с современными определениями.

Вполне строгие доказательства движения Земли были, впрочем, найдены много позже. Коперник мог только показать, что его система значительно проще и естественнее объясняет небесные движения, чем система Птолемея, и, следовательно, она гораздо вероятнее.

### § 149. Объяснение движений нижних планет теорией Коперника.

По Копернику различие между движением нижних и верхних планет (§ 142—143) объясняется тем, что нижние планеты находятся ближе

к Солнцу, чем Земля, — их орбиты расположены внутри земной орбиты, а верхние планеты, наоборот, отстоят от Солнца дальше Земли и их орбиты расположены вне земной орбиты. Поэтому нижние планеты теперь обычно называют *внутренними* планетами, а верхние — *внешними*.

На рис. 57  $P_1, P_2, \dots$  обозначают положения внутренней планеты, а  $T_1, T_2, \dots$  — соответствующие положения Земли. Оба тела движутся в одну сторону, с запада на восток; планета движется быстрее Земли.

В положении  $P_1$  планета с Земли  $T_1$  не видна, так как находится за Солнцем  $S$ ; это — так называемое *верхнее соединение* планеты с Солнцем. После соединения планета появляется из-за Солнца с левой стороны (для наблюдателя в северном полушарии) и всё дальше отходит

к востоку. В это время она видна по вечерам. В положении  $P_2$  она достигает наибольшей восточной элонгации (угол  $ST_2P_2$  — прямой); в этот момент угол  $SP_2T_2$  — прямой. Затем планета начинает приближаться к Солнцу, проходит между Солнцем и Землёй ( $P_3$ , так называемое *нижнее соединение*) и появляется по другую сторону Солнца, к западу от него, в виде утренней звезды. После наибольшей западной элонгации ( $P_4$ ) она опять приближается к Солнцу и, наконец, скрывается за ним ( $P_5$ ); наступает новое верхнее соединение, после которого явления повторяются в прежнем порядке.

§ 150. Объяснение движения верхних планет. Пусть  $T_1, T_2, \dots$ , на рис. 58 обозначают положения Земли на её орбите, а  $P_1, P_2, \dots$  — положения планеты в те же моменты. Земля и планета движутся в одну сторону, к востоку; Земля движется быстрее планеты.

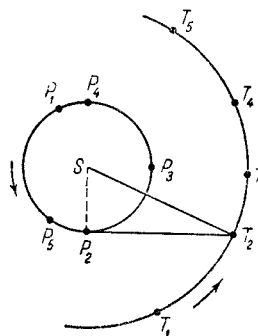


Рис. 57.

В первый момент, когда Земля находится в  $T_1$ , планета будет видна на бесконечно далёкой небесной сфере в точке  $P'_1$ ; в положении  $T_2$  мы увидим планету уже по направлению  $T_2P_2P'_2$ , т. е. в точке  $P'_2$ . Следовательно, за время движения Земли из  $T_1$  в  $T_2$  наблюдатель увидит, что планета передвинется среди звёзд обратным или *попятным* движением, т. е. к западу. Когда Земля перейдёт (через полгода) на другую сторону относительно Солнца, то её движение от  $T_3$  к  $T_4$  теперь противоположно движению планеты из  $P_3$  в  $P_4$  и по небесной сфере планета переместится из  $P'_3$  в  $P'_4$ , т. е. её видимое движение

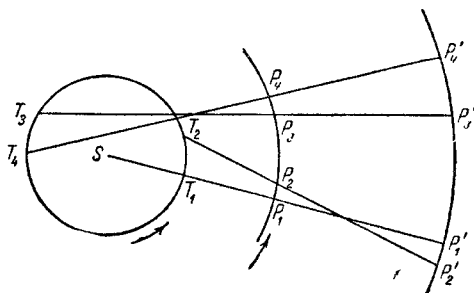


Рис. 58.

будет *прямым* к востоку. Между этими двумя движениями, обратным и прямым, будет точка, в которой планета кажется неподвижной; это — *стояние* планеты.

Точка  $P_1$  соответствует противостоянию планеты с Солнцем. В этот момент Солнце, Земля и планета находятся на одной прямой, причём планета приближается к Земле на наименьшее возможное расстояние. Следовательно, движение *внешней*, или верхней, планеты с запада на восток есть истинное движение планеты вокруг Солнца, а петлеобразное движение, имеющее годичный период (§ 144), — кажущееся параллактическое смещение, происходящее от годичного движения Земли.

Наоборот, для *нижних*, или внутренних, планет (Меркурий и Венера), орбиты которых расположены внутри земной орбиты, движение к востоку вместе с Солнцем, близ которого они всегда находятся, есть параллактическое, вызываемое движением Земли; петлеобразное же смещение этих планет то в ту, то в другую сторону от Солнца соответствует их истинному движению вокруг Солнца.

**§ 151. Звёздное и синодическое обращение планет.** У планет, так же как и у Луны, различают звёздное и синодическое время обращения. Звёздным, или сидерическим периодом (временем) обращения называется время истинного обращения планеты вокруг Солнца. Синодическим обращением называют промежуток времени между двумя последовательными верхними соединениями или двумя последовательными противостояниями планеты.



Так как наступление соединений (или противостояний) планет зависит не только от движения самих планет, но и от движения нашей планеты Земли, то чем планета ближе к Земле, тем больше их синодический период обращения. Например, у Марса синодический период составляет свыше двух лет.

Как и для Луны, между синодическим и звёздным обращением планеты существует связь, выражаемая *уравнением синодического движения*:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{E}. \quad (1)$$

Здесь  $S$  — синодическое, а  $T$  — звёздное обращение планеты;  $E$  — звёздное обращение Земли (звёздный год). Уравнение (1) имеет место для *нижней* планеты, движущейся вокруг Солнца быстрее Земли; для *верхней* планеты будет:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{E} - \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Из наблюдения определяют величину  $S$ , а  $T$  вычисляется из уравнений (1) и (2). Ниже приводятся звёздные и синодические обращения всех планет с указанием, на сколько градусов простирается дуга попятного движения каждой планеты и сколько дней планета по ней движется.

| Название планет | Звёздное обращение   | Синодич. обращение | Дуга попятного движения | Продолжительность попятного движения |
|-----------------|----------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Меркурий . . .  | 88 суток             | 116 суток          | 12°                     | 17 дней                              |
| Венера . . . .  | 225 »                | 1 год 217 »        | 16°                     | 41 »                                 |
| Земля . . . . . | 1 год = 365,26 суток | —                  | —                       | —                                    |
| Марс . . . . .  | 1 год 322 »          | 2 года 50 »        | 16°                     | 70 »                                 |
| Юпитер . . . .  | 11 лет 315 »         | 1 год 34 »         | 11°                     | 120 »                                |
| Сатурн . . . .  | 29 лет 167 »         | 1 год 13 »         | 6°                      | 137 »                                |
| Уран . . . . .  | 84 года 5 »          | 1 » 4 »            | 4°                      | 151 »                                |
| Нептун . . . .  | 164 года 287 »       | 1 » 2 »            | 3°                      | 160 »                                |
| Плутон . . . .  | 248 лет 155 »        | 1 » 1 »            | 2°,5                    | 165 »                                |

**§ 152. Объяснение времён года системой Коперника** основано на том, что ось вращения Земли остаётся во время обращения около Солнца «параллельной самой себе» и сохраняет с плоскостью земной орбиты постоянный наклон, равный  $90^\circ - 23^\circ 27' = 66^\circ 33'$ . На рис. 59 положение 1 соответствует весеннему равноденствию, положение 2 — летнему солнцестоянию в северном полушарии и т. д. Надо заметить,

что орбита Земли на верхнем рисунке — *круг*, не лежащий в плоскости чертежа; поэтому он изображён в виде сильно вытянутого эллипса. Солнце находится не в центре круга, а несколько ближе к 4 положению Земли, которое соответствует декабрю (см. § 33).

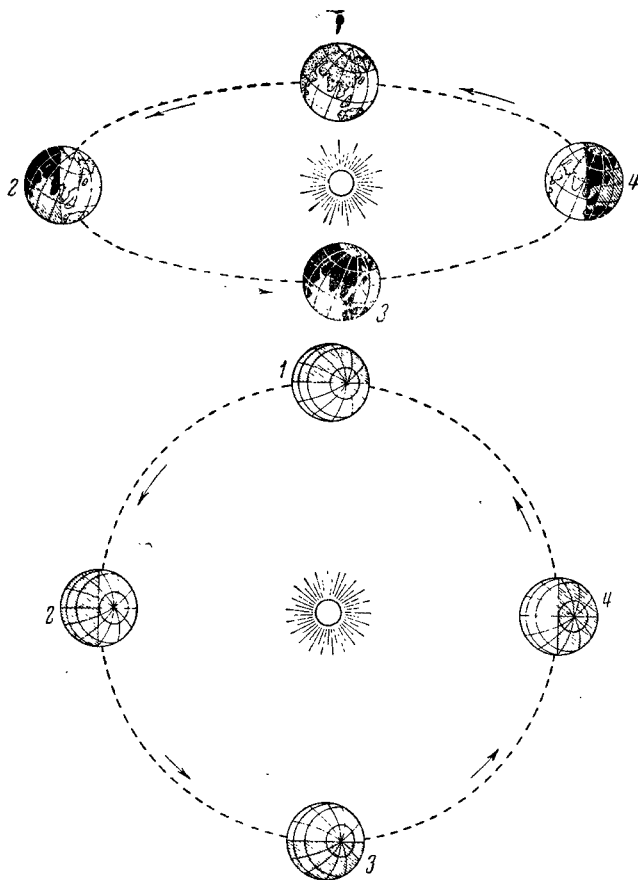


Рис. 59.

**§ 153. Значение Коперника в астрономии.** В истории мировоззрения учение Коперника сыграло революционную роль и произвело на мыслящих современников необычайно сильное впечатление. В астрономии же главное значение имеет уничтожение Коперником «аксомы» неподвижности Земли, тормозившей развитие науки. Надо также отметить впервые произведённое измерение относительных расстояний планет, которое Коперник выполнил по размерам петель попятных движений. Но многовековый груз старых представлений о вселенной ещё довлел над Коперником, который не мог отрешиться от целого

ряда устаревших положений. Так, например, он считал небесные движения круговыми и равномерными. Поэтому, хотя он уничтожил главные энциклы Птолемея, но ряд энциклов ему пришлось сохранить для объяснения более мелких неправильностей в движении планет. Подобно Птолемею Коперник должен был признать, что ни у одной планетной орбиты центр не совпадает с центральным телом системы — Солнцем. Методика создания системы у Коперника была похожей на методику Птолемея — построение эксцентрических кругов (§ 144), только главный круг описывался не около Земли, а около Солнца.

Но несмотря на отдельные недостатки системы Коперника, автор которой, естественно, не мог сразу и до конца освободиться от многовековых представлений и предрассудков, огромная роль Коперника в развитии современной астрономии и революционное значение его учения неоспоримы.

Один из основоположников марксистско-ленинской философии Фридрих Энгельс так характеризует революционное значение теории Коперника:

«Современное естествознание... начинается с той грандиозной эпохи, когда бюргерство сломило мощь феодализма, когда на заднем плане борьбы между горожанами и феодальным дворянством показалось мятежное крестьянство, а за ним революционные предшественники современного пролетариата, уже с красным знаменем в руках и с коммунизмом на устах, — с той эпохи, которая создала в Европе крупные монархии, сломала духовную диктатуру папы, воскресила греческую древность и вместе с ней вызвала к жизни высочайшее развитие искусства в новое время, которая разбила границы старого мира и впервые, собственно говоря, открыла землю.

Это была величайшая из революций, какие до тех пор пережила земля. И естествознание, развивавшееся в атмосфере этой революции, было насквозь революционным, шло рука об руку с пробуждающейся новой философией великих итальянцев, посылая своих мучеников на костры и в темницы. Характерно, что протестанты соперничали с католиками в преследовании их. Первые сожгли Сервета, вторые сожгли Джордано Бруно. Это было время, нуждавшееся в гигантах и породившее гигантов, гигантов учёности, духа и характера. Это было время, которое французы правильно называли Ренессансом, протестантская же Европа односторонне и ограниченно — Реформацией.

И у естествознания тоже была тогда своя декларация независимости, появившаяся, правда, не с самого начала, подобно тому как и Лютер не был первым протестантом. Чем в религиозной области было сожжение Лютером папской буллы, тем в естествознании было великое творение Коперника, в котором он, — хотя и робко, после 36-летних колебаний и, так сказать, на смертном одре, — бросил вызов церковному суеверию. С этого времени исследование природы по существу освободилось от религии...» (Диалектика природы, 1948 г., стр. 154—155).

**§ 154. Борьба за гелиоцентрическое мировоззрение.** Пока учение о движении Земли было гипотезой немногих полузабытых греческих мыслителей, оно не вызвало опасений у правящих церковных кругов. Но когда, после появления книги Коперника, это учение стало распространяться всё шире и шире, обе церкви, и католическая и новая протестантская, начали его преследовать, как несогласие со «священным писанием». Инквизиция прокляла книгу Коперника и занесла её в список («индекс») запрещённых книг «впредь до исправления», а проповедники коперниканской системы преследовались, как еретики. Особенно сильно было это преследование в стране папства, Италии, где оно обрушилось на двух величайших итальянских мыслителей XVI—XVII вв. — Джордано Бруно и Галилея.

Джордано Бруно был философом, в учении которого есть и мистические и материалистические черты: он утверждал, что природа и бог одно и то же, и что материя есть истинная сущность вещей. В своих сочинениях он не только проповедывал теорию Коперника, но шёл гораздо дальше: он первым высказал мысль, что число миров, подобных нашей солнечной системе, бесконечно, что звёзды — это далёкие солнца, около которых обращаются планеты, населённые существами, может быть, более совершенными, чем мы. Бруно попал в руки инквизиции и после многолетнего заключения был сожжён в 1600 году как еретик.

Такая же участь едва не постигла Галилея (1564—1642) — великого основателя механики. Этот разносторонний учёный был первым, применившим к изучению светил зрительную трубу. В течение немногих месяцев 1608—1610 г. он сделал с помощью своего несовершенного инструмента ряд замечательных открытий и быстро расшифровал их значение. Каждое из этих открытий наносило удар схоластическо-религиозному мировоззрению и доказывало правильность теории Коперника. Так, на Луне Галилей открыл горы и даже определил их высоты. Таким образом оказалось, что Луна имеет не какую-то особенную «небесную» природу, которую схоластики приписывали светилам, а вполне похожа на Землю. С помощью своего несовершенного телескопа Галилей открыл фазы Венеры (рис. 60), подобные фазам Луны, и тем самым доказал, что планеты — такие же остывшие шары, как Земля (§§ 238—256), и обращаются вокруг *Солнца*, так как при обращении вокруг Земли смена фаз протекала бы иначе. Наконец, у Юпитера Галилей открыл четырёх спутников, обращающихся вокруг этой планеты, как Луна вокруг Земли, и сейчас же указал практическую важность этого открытия для определения долгот (§ 102). Так как спутники Юпитера обращаются вокруг планеты, которая и сама движется, то и это открытие было ударом для приверженцев Аристотеля: оно опровергало их утверждение, что центром движения может быть только неподвижное тело.

Основываясь на своих открытиях, Галилей с успехом распространял учение Коперника и с кафедры, и в ряде популярно написанных сочи-

нений, энергично изобличая невежество учёных-схоластов. За одно такое сочинение он, уже 70-летним стариком, был привлечён к суду инквизиции и был принуждён публично отречься от своих «заблуждений», т. е. от учения о движении Земли (1633 г.).

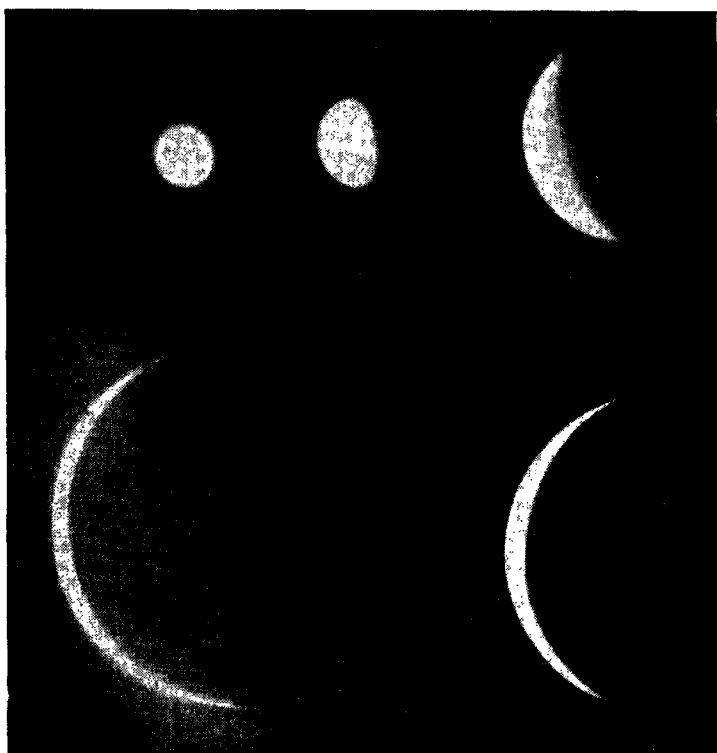


Рис. 60.

Но никакие преследования со стороны реакции не могли остановить распространения учения Коперника. Оно окончательно восторжествовало после открытий Кеплера, который совершенно правильно назвал своё главное сочинение «Новой астрономией» (см. §§ 155—156).

**§ 155. Тихо Браге и Кеплер.** В 1580—1600 гг. датский астроном Тихо Браге систематически наблюдал светила на специально выстроенной и хорошо оборудованной государственной обсерватории. Его определения положений планет отличались исключительной точностью, несмотря на то, что все наблюдения производились невооружённым глазом (зрительная труба тогда ещё не была изобретена). Ознакомившись с системой Коперника, Браге согласился с тем, что все видимые нами планеты обращаются вокруг Солнца. Но признать

движение Земли он не решился и создал свою систему: Солнце со всеми обращающимися вокруг него планетами движется вокруг Земли. Несмотря на такую уступку церкви, Тихо Браге навлёк на себя ряд обвинений, в том числе в сношениях с нечистой силой; отпуск средств на содержание обсерватории был прекращён, и ему пришлось покинуть Данию. Он стал организовывать новую обсерваторию в Праге, но вскоре умер (1601 г.) Записи его наблюдений поступили в распоряжение его помощника Иоганна Кеплера (1571—1630).

Кеплер был сторонником теории Коперника и решил её усовершенствовать по наблюдениям Тихо Браге. Для этого он избрал планету Марс и тщательно исследовал её движение. Работа Кеплера протекала в исключительно тяжёлых условиях. Обстоятельства военного времени, материальная несобеспеченность, преследования со стороны церкви, вечные скитания — вот обстановка, в которой создавались знаменитые законы Кеплера.

**§ 156. Законы Кеплера.** Кеплер вначале разделял общее убеждение, что небесные тела могут двигаться только по кругам и поэтому он потратил много времени на то, чтобы подобрать для Марса круговую орбиту, с Солнцем в стороне от центра. Когда же ему всё-таки не удалось подобрать такого круга, который удовлетворял бы всем наблюденным положениям планеты, он решился отбросить предвзвешенный круговых движений и признать, что орбита Марса — не круг, а какая-то другая кривая. Вскоре он определил эту кривую. Так был найден первый закон планетных движений.

**I закон:** *Орбита планеты есть эллипс, причём Солнце находится в одном из его фокусов.*

Оказалось, что эллипсы планетных орбит мало отличаются от кругов. Наибольший эксцентриситет (вытянутость) имеет орбита открытой в 1930 г. планеты Плутон, именно 0,25.

Принцип равномерности небесных движений был тоже опровергнут Кеплером. Вместо него появился следующий закон, называемый *законом площадей*.

**II закон:** *Радиус-вектор планеты описывает в равные времена равные площади.*

Предположим, что, когда планета находится около перигелия  $P$ , радиус-вектор (т. е. прямая, соединяющая Солнце  $S$  с планетой) за какой-нибудь промежуток времени, например за месяц, опишет площадь  $PKS$  (рис. 61). Планета, следовательно, за это время пройдёт дугу  $PK$ . Когда же планета отойдёт дальше от Солнца, то её радиус-вектор за месяц опишет площадь  $DES$ , равную  $PKS$ . Следовательно, дуга, которую пройдёт планета за то же время, будет меньше дуги  $PK$ .

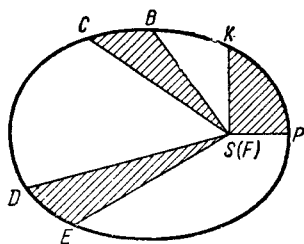


Рис. 61.

Таким образом второй закон определяет *скорость планеты* в любой точке орбиты. Она тем больше, чем планета ближе к Солнцу. Так как площадь эллипса легко определить математически, то это позволяет вычислить положение планеты на эллипсе для любого момента времени.

Этим двумя законами задача о движении каждой планеты в отдельности была решена (1609 г.). Но Кеплер продолжал свои исследования, так как был убеждён, что существует закон, связывающий в одно целое всю планетную систему. Этот замечательный закон он нашёл только в 1618 г.

III закон: *Квадраты времён обращения планет относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.*

Если времена звёздных обращений двух планет обозначить через  $T_1$  и  $T_2$ , а их средние расстояния от Солнца (большие полуоси эллипсов) — через  $a_1$  и  $a_2$ , то третий закон выразится формулой

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (3)$$

Правильность этого закона видна из следующей таблицы, в которой приведены средние расстояния ( $a$ ) всех планет, и времена их звёздных обращений ( $T$ ), причём за единицу расстояний принято среднее расстояние Земли от Солнца, а за единицу времени — её время обращения (год). Из таблицы видно, что для каждой планеты куб первого числа равен квадрату второго.

| Планеты          | $a$<br>в астр. ед. | $T$<br>в годах | $a^3$   | $T^2$   |
|------------------|--------------------|----------------|---------|---------|
| Меркурий . . .   | 0,387              | 0,241          | 0,058   | 0,058   |
| Венера . . . .   | 0,723              | 0,615          | 0,378   | 0,378   |
| Земля . . . . .  | 1                  | 1              | 1       | 1       |
| Марс . . . . .   | 1,524              | 1,881          | 3,540   | 3,538   |
| Юпитер . . . .   | 5,203              | 11,862         | 140,8   | 140,7   |
| Сатурн . . . . . | 9,539              | 29,458         | 863,0   | 867,9   |
| Уран . . . . .   | 19,191             | 84,015         | 7069,9  | 7063,5  |
| Нептун . . . . . | 30,071             | 164,788        | 27192,1 | 27156,1 |
| Плутон . . . . . | 39,513             | 248,430        | 61715,3 | 61717,5 |

Из этого закона следует, между прочим, что для определения средних расстояний планет от Солнца достаточно знать расстояние какой-нибудь одной планеты, например Земли. Расстояния всех остальных определяются по их временам обращения из простой формулы (3).

§ 157. **Постоянная величина III закона.** Пропорцию (3) можно, переставив члены, написать следующим образом:

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = \text{постоянное число} = C. \quad (4)$$

Эта формула показывает, что частное от деления куба большой полуоси на квадрат времени обращения планеты есть *постоянная величина*, одинаковая для всех планет нашей системы; поэтому её достаточно вычислить для одной какой-нибудь планеты. Числовая величина этой постоянной зависит от того, в каких единицах мы выражаем расстояния и времена обращения планет. Если за единицу взять *звёздный год и астрономическую единицу*, то  $C=1$ , и, следовательно (опуская индексы),

$$a^3 = T^2,$$

или

$$T = a^{3/2}. \quad (5)$$

Чаше за единицу времени берут средние *сутки*. Тогда для Земли

$$a=1, \quad T=365,26 \text{ суток},$$

и формула (4) даст для постоянной  $C$

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{1}{(365,26)^2}, \quad (6)$$

откуда

$$T = 365,26 a^{3/2}. \quad (7)$$

Эта формула даёт время обращения планеты в сутках.

Третий закон (как и остальные два) справедлив не только для планет, но и для других небесных тел, например для *спутников* планет. Для всех спутников одной какой-нибудь планеты отношение  $a^3/T^2$  одинаково, но для каждой планеты оно имеет различное значение, другое, чем для планетной системы.

Уже сам Кеплер подметил это для Юпитера, спутники которого к тому времени были открыты Галилеем. Величина этого отношения очень важна: она определяет *массу* планеты, как увидим дальше.

Например, для III и IV спутников Юпитера имеем:

$$a_3 = 1\,067\,000 \text{ км} = 0,007137 \text{ астр. ед.},$$

$$a_4 = 1\,877\,000 \text{ км} = 0,01256 \text{ астр. ед.},$$

$$T_3 = 7,1546 \text{ суток} = 0,01959 \text{ года},$$

$$T_4 = 19,6890 \text{ суток} = 0,04569 \text{ года}.$$

Оказывается, действительно,

$$\frac{0,007137^3}{0,01959^2} = \frac{0,01256^3}{0,04569^2} = \frac{1}{1050},$$

т. е. постоянная величина, но гораздо меньшая, чем для Солнца.

**§ 158. Значение законов Кеплера.** а) Законы Кеплера замечательны по смелости научной мысли. В неподвижности Земли многие сомневались задолго до Коперника, но в том, что светила должны двигаться только по кругам и равномерно, не сомневался, насколько мы знаем, никто, даже сам Коперник.



б) Применение законов Кеплера в астрономической практике совершенно преобразовало методичку теоретической астрономии. *Построение кругов (эпициклов) исчезло и было заменено более простым и более точным вычислением по правилам эллиптического движения.* Для облегчения этих вычислений Кеплер издал таблицы планетных движений, придав им форму, которая сохранилась почти без изменений до настоящего времени.

в) Законы Кеплера доказывают, что мир планет есть стройная («гармоническая», по выражению Кеплера) система, управляемая какой-то *единой силой*, источником которой является *Солнце*. Это ясно из того, что Солнце находится в фокусе орбиты каждой планеты и что скорость планеты и время обращения зависят только от её расстояния от Солнца. Что эта сила есть одна и та же для всех планет, это следует из третьего закона. В системе Коперника Солнце такой роли не играло, так как ни у одной планеты центр орбиты не совпадает с Солнцем.

Кеплер был уже близок к правильному представлению об этой силе. Он сравнивал Солнце с магнитом и утверждал, что все тела взаимно притягиваются, причём сила притяжения убывает с расстоянием. Но открыть закон действия этой силы он не мог, так как в его время ещё не были известны основные законы механики.

**§ 159. Элементы планетных орбит.** Чтобы движение планеты было известно полностью, необходимо определить значения *шести* величин, которые называются элементами орбиты. Величины эти следующие:

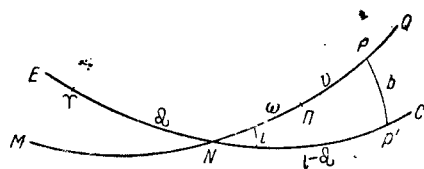


Рис. 62.

1. Представим себе, что мы наблюдаем с Солнца видимое движение планеты по звёздному небу. Большой круг *MQ* небесной сферы, который она описывает в течение одного оборота вокруг Солнца, не будет совпа-

дать с эклиптической *EC*, а составит с ней некоторый угол. Этот угол называется *наклоном* плоскости орбиты к плоскости эклиптики, или просто *наклоном орбиты* (обозначается буквой *i*, рис. 62).

2. Две точки, в которых орбита *MQ* пересекается с плоскостью эклиптики *EC*, называются *узлами* орбиты (рис. 62 и 63). Вторым элементом и будет *долгота восходящего узла*, в котором планета переходит из южного полушария неба в северное; она обозначается знаком  $\Omega$ . Элементы 1-й и 2-й определяют положение *плоскости* орбиты.

3. Положение, которое занимает планетный эллипс в этой плоскости, определяется долготой перигелия  $\pi$  (ломаная дуга  $\gamma NP$ ); она даёт направление, по которому расположена большая ось эллипса. Часто вместо  $\pi$  берут расстояние перигелия от узла ( $\omega$ ); очевидно,  $\pi = \Omega + \omega$ .

4. Форма эллипса определяется его *эксцентриситетом* ( $e$ ), который равен  $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ , где  $a$  и  $b$  — большая и малая полуоси эллипса.

5. Большая полуось ( $a$ ) определяет *размеры эллипса и время обращения* по третьему закону Кеплера [формула (3) § 156].

6. Чтобы указать на орбите планету в любой момент времени, надо знать положение планеты  $P$  в какой-нибудь определённый момент («долгота в эпоху»  $l_0$ ) или же знать время прохождения планеты через перигелий ( $t_0$ ).

По формулам, данным Кеплером, зная эти шесть элементов ( $i, \Omega, \pi, e, a, t_0$ ), можно вычислить положение планеты для какого угодно момента. Такое вычисление называется вычислением эфемерид, т. е. таблиц, в которых положение планеты даётся на каждый день на много лет вперёд.

Гораздо труднее обратная задача, так называемое определение орбиты: по видимому движению планеты вычислить все шесть элементов её орбиты. Кеплер решил и эту задачу, но только для тех планет, которые наблюдаются уже давно и для которых, следовательно, мы располагаем большим числом наблюдений. Определение же орбиты по нескольким наблюдениям, что особенно важно при открытии новых планет, было разработано лишь в начале XIX века.

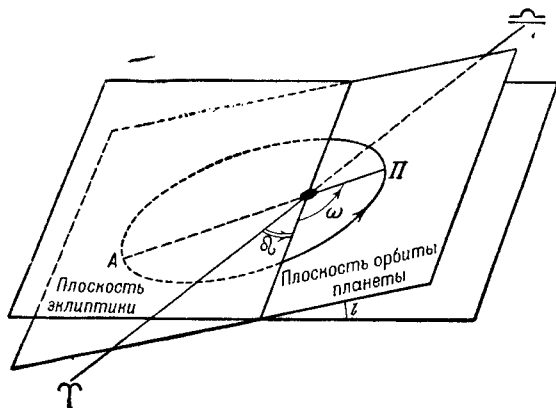


Рис. 63.

### § 160. Определение координат планеты по элементам ее орбиты

Определение координат планеты состоит из трёх этапов:

- Вычисление положения планеты в плоскости её орбиты.
- Вычисление координат планеты в пространстве относительно центра Земли (вычисление геоцентрических прямоугольных координат).
- Вычисление видимого положения планеты на небесной сфере (определение  $\alpha$  и  $\delta$  планеты).

Рассмотрим все три этапа в их последовательности.

- Вычисление положения планеты в плоскости её орбиты

1. Среднее движение планеты за 1 сутки

$$n = \frac{2\pi}{T}, \quad (8)$$

где  $T$  — период обращения планеты вокруг Солнца.

2. По  $n$  вычисляется средняя аномалия  $M$ , т. е. дуга круга, которую описала бы планета за период  $t - t_0$ , если бы она двигалась равномерно со скоростью своего среднего движения (аналогия со средним Солнцем, § 39); здесь  $t$  — данный момент времени, для которого вычисляется положение планеты, а  $t_0$  — момент прохождения планеты через перигелий  $\Pi$  (рис. 64);  $t_0$  — 6-й элемент орбиты:

$$M = n(t - t_0) = \frac{2\pi}{T}(t - t_0). \quad (9)$$

Отсюда

$$\frac{t - t_0}{T} = \frac{M}{2\pi}. \quad (10)$$

3. Пусть планета в данный момент  $t$  находится в точке  $P$  своей орбиты (эллипса), описав за время  $t - t_0$  дугу  $\Pi P$  (рис. 64). Солнце находится в фокусе  $F$  планетной орбиты (первый закон Кеплера).

Прямая  $FP = r$  — радиус-вектор планеты.

Так как по второму закону Кеплера площадь  $\Pi FP$  пропорциональна времени  $t - t_0$ , то

$$\frac{\text{пл. } \Pi FP}{\pi ab} = \frac{t - t_0}{T},$$

или, принимая во внимание (10),

$$\frac{\text{пл. } \Pi FP}{\pi ab} = \frac{M}{2\pi},$$

где  $\pi ab$  — площадь эллипса.

Отсюда

$$\text{пл. } \Pi FP = \frac{1}{2} M ab. \quad (11)$$

Площадь эллиптического сектора  $\Pi FP$  может быть найдена из следующих соображений. Опишем около центра эллипса круг радиуса  $a$  (большая полуось эллипса, 5-й элемент орбиты), опустим из точки  $P$  перпендикуляр  $PK$  на большую ось эллипса и продолжим его до пересечения с кругом в точке  $N$ .

Угол  $NO\Pi$  называется эксцентрической аномалией планеты. Эллипс с полуосями  $a$  и  $b$  можно рассматривать как проекцию круга на плоскость, наклонённую к плоскости круга под углом  $\gamma$ , причём  $\cos \gamma = \frac{b}{a}$ ; тогда

$$\text{пл. } \Pi FP = \text{пл. } PK\Pi + \text{пл. } PKF; \quad (12)$$

$$\text{пл. } PK\Pi = \text{пл. } NK\Pi \cdot \cos \gamma =$$

$$= (\text{пл. } ON\Pi - \text{пл. } ONK) \frac{b}{a} = \left( \frac{a}{2} aE - \frac{OK}{2} a \sin E \right) \frac{b}{a};$$

или

$$\text{пл. } PK\Pi = \frac{b}{2} (aE - OK \sin E). \quad (13)$$

Далее,

$$\text{пл. } PKF = \frac{FK}{2} NK \frac{b}{a} = \frac{FK}{2} \cdot a \sin E \cdot \frac{b}{a},$$

откуда

$$\text{пл. } PKF = \frac{b}{2} FK \sin E. \quad (14)$$

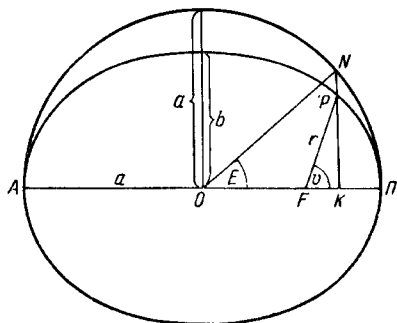


Рис. 64.

Подставляя (13) и (14) в (12), получим

$$\text{пл. } PFP = \frac{b}{2} (aE - ae \sin E), \quad (15)$$

где  $e$  — эксцентриситет планетной орбиты (4-й элемент орбиты).

Приравнявая (11) и (15) и сокращая на  $ab$ , получим уравнение Кеплера:

$$E - e \sin E = M. \quad (16)$$

Из (16) определяется  $E$  способом последовательных приближений:

- 1)  $E_1 = M + e \sin M$ ; отсюда находим  $E_1$ ;
- 2)  $E_2 = M + e \sin E_1$ ; отсюда находим  $E_2$ ;
- 3)  $E_3 = M + e \sin E_2$ ; находим  $E_3$  и т. д., пока не получим  $E_n = E_{n-1}$ ; это значение  $E_n = E$  в уравнении (16).
4. Радиус-вектор  $r$  (рис. 64) определяется по  $a$ ,  $e$  и  $E$ .

Так как  $r^2 = PK^2 + KF^2 = \left( NK \cdot \frac{b}{a} \right)^2 + (a \cos E - ae)^2$ , а  $b^2 = a^2 (1 - e^2)$ , то  $r^2 = a^2 (1 - 2e \cos E + e^2 \cos^2 E)$ , откуда

$$r = a (1 - e \cos E). \quad (17)$$

5. Угол  $PPF$  между направлением «Солнце — перигелий» и радиусом-вектором планеты называется истинной аномалией ( $v$ ) планеты.

Уравнение эллипса в полярных координатах относительно фокуса будет:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v}. \quad (18)$$

Приравнявая (17) и (18), получим

$$1 - e \cos E = \frac{1 - e^2}{1 + e \cos v},$$

откуда

$$\cos v = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}. \quad (19)$$

Будучи приведённым к виду, удобному для логарифмирования, формула (19) примет вид:

$$\operatorname{tg} \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \operatorname{tg} \frac{E}{2}, \quad (20)$$

по которой обычно вычисляется истинная аномалия планеты.

Первый этап вычислений закончен; формулы (17) и (20) дают координаты планеты в плоскости её орбиты относительно Солнца.

Существуют формулы для определения  $r$  и  $v$  без решения уравнения Кеплера. Приводим их без вывода:

$$r = a(1 - e \cos M + e^2 \sin^2 M + \dots),$$

$$v = M + 2e \sin M + \frac{5}{4} e^2 \sin 2M + \dots$$

б) Вычисление геоцентрических координат планеты

1. Определение широты  $b$  и долготы  $l$  планеты относительно Солнца (определение гелиоцентрических координат).

На рис. 62  $EC$  — дуга эклиптики,  $MNQ$  — дуга орбиты планеты, видимые с Солнца;  $N$  — восходящий узел,  $P$  — перигелий,  $P$  — планета,  $\gamma N = \Omega$  — долгота восходящего узла (2-й элемент орбиты),  $NP = \alpha$  — расстояние перигелия от

узла ( $\omega + \Omega = \pi$  даёт 3-й элемент орбиты),  $PP' = v$  — истинная аномалия планеты,  $PP' = b$  — гелиоцентрическая широта планеты,  $\gamma P' = l$  — гелиоцентрическая долгота планеты (см. ниже);  $i$  — наклонение орбиты (1-й элемент орбиты).

Из прямоугольного сферического треугольника  $NPP'$  получим

$$\left. \begin{aligned} \cos(l - \Omega) \cos b &= \cos(v + \omega), \\ \sin(l - \Omega) \cos b &= \sin(v + \omega) \cdot \cos i, \\ \sin b &= \sin(v + \omega) \sin i. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Из уравнений (21) находим гелиоцентрические сферические координаты планеты  $l$  и  $b$ , а по ним — прямоугольные гелиоцентрические координаты планеты  $x, y$  и  $z$ .

2. Началом этой системы координат (рис. 65) является центр Солнца, ось  $x$  направлена в точку весеннего равноденствия ( $\gamma$ ), ось  $y$  повернута в плоскости эклиптики на  $90^\circ$  против часовой стрелки от  $x$  (т. е.  $l_y = 90^\circ$ ), а ось  $z$  направлена в полюс эклиптики.

Тогда (рис. 65)

$$\begin{aligned} x &= r \cos b \cos l, & y &= r \cos b \sin l, \\ z &= r \sin b. \end{aligned} \quad (22)$$

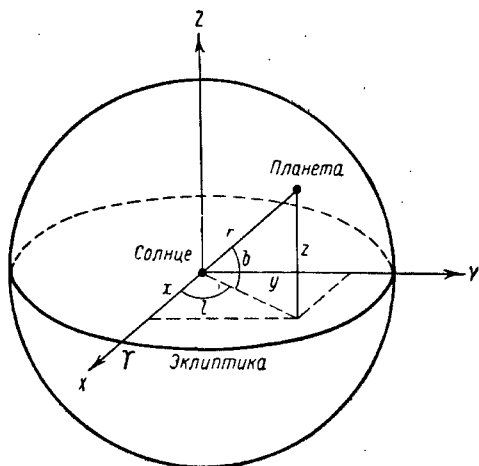


Рис. 65.

3. Не меняя направления осей  $x, y, z$ , перенесём начало координат (в плоскости эклиптики) в центр Земли; начало координат переместится по двум направлениям на величины  $X$  и  $Y$ , которые являются эклиптическими координатами Солнца относительно Земли ( $X^2 + Y^2 = R^2$ , где  $R$  — расстояние Земли от Солнца в данный момент времени).

$X$  и  $Y$  даются на каждый день в астрономических ежегодниках. Тогда прямоугольные геоцентрические координаты планеты определяются:

$$\xi = x + X; \quad \eta = y + Y \text{ и } \zeta = z. \quad (23)$$

в) Вычисление видимого положения планеты

Аналогично формулам (22) можно написать:

$$\rho \cos \beta \cos \lambda = \xi; \quad \rho \cos \beta \sin \lambda = \eta; \quad \rho \sin \beta = \zeta. \quad (24)$$

Здесь  $\rho$  — радиус-вектор планеты относительно Земли;  $\lambda$  и  $\beta$  — эклиптические координаты планеты относительно Земли (см. § 30).

Вычислив по (24)  $\lambda$  и  $\beta$ , можно, решая сферический треугольник  $PRM$  (рис. 13, стр. 45), определить прямое восхождение  $\alpha$  и склонение  $\delta$  планеты для данного момента времени  $t$ .

### Упражнения к главе VII

1. Условия видимости Венеры повторяются через 8 лет почти в те же числа месяцев. Выясните причину этого по таблице § 151.

2. Чему равнялось бы синодическое время обращения планеты, звёздное обращение которой было бы равно 2 годам?

3. Через сколько времени повторялись бы противостояния планеты, время обращения которой вокруг Солнца составляло бы 370 дней? На какое расстояние она приближалась бы к Земле? (Звёздное обращение Земли принять равно в 365 дней, орбиты считать круговыми.) *Ответ:* Через 74 года, расстояние 0,009 астроном. единиц по третьему закону Кеплера.

4. Эксцентриситет орбиты Меркурия равен 0,2, большая полуось — 0,39 астроном. единиц. Чему равно наибольшее и наименьшее расстояние планеты от Солнца?

5. То же для Земли (в километрах; эксцентриситет равен  $1/60$ )?

6. Во сколько времени обращалась бы вокруг Солнца планета, находящаяся на расстоянии 100 астроном. единиц?

7. Третий спутник Юпитера обращается вокруг планеты на расстоянии 15 её радиусов в 7,2 суток. Во сколько времени обращается 5-й спутник, расстояние которого равно 2,54 радиуса планеты? 8-й спутник, для которого  $a = 330$ ?

8. У планеты Марс  $e = 0,09333$ ,  $a = 1,5237$ . Вычислить  $E$ ,  $v$  и  $r$ , соответствующие средней аномалии  $M = 60^{\circ}0'00''$ . *Ответ:*  $E = 64^{\circ}50'24'$ ,  $v = 69^{\circ}47'10'$ ,  $r = 1,4633$ . *Указание:* При вычислении  $E$  все члены кеплерова уравнения выражать в секундах; для этого  $e$  надо умножить на 206 265,  $\lg 206\,265 = 5,31443$ .

---

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ

### ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

§ 161. От Кеплера до Ньютона. Законы Кеплера дают *геометрическое* представление планетных движений, но не дают для них *физического* объяснения. Естественно возникает вопрос: какая причина, или *сила*, вызывает движение планет по эллипсам и заставляет радиусы-векторы описывать площади, пропорциональные временам? Кеплеру было ясно, что такая сила должна существовать и что его законы являются следствием какого-то более общего закона (§ 158). Но подобно всем своим современникам он думал, что движение продолжается до тех пор, пока действует сила, вызывающая это движение, и что нужно, очевидно, искать силу, которая всё время подталкивала бы планеты. Кеплер предположил, что Солнце вращается вокруг оси в том же направлении, в каком движутся планеты (эта часть гипотезы вскоре была подтверждена наблюдениями); из вращающегося Солнца в плоскости его экватора выбрасываются «нематериальные истечения», которые захватывают планету и заставляют её участвовать в круговом движении. Действие этих истечений Кеплер считал обратно пропорциональным первой степени *расстояния*. Наряду с этой гипотезой Кеплер высказывает правильные взгляды на силу *тяготения*. Он утверждает, что «два отдельных тела стремятся друг к другу, как два магнита» и что, «если бы Земля и Луна не удерживались в пространстве какой-то силой, они упали бы одна на другую», а если бы «Земля перестала притягивать воду океана, то вся вода устремилась бы к Луне». В эпоху Кеплера эти глубокие мысли не могли получить дальнейшего развития; это было выполнено почти через полвека Ньютоном.

За эти полвека были изучены опытным путём простейшие движения земных тел и выяснены основные законы механики. Это было сделано, главным образом, Галилеем, которого товарищ Сталин называет, наравне с Дарвином, одним из тех «мужественных людей, которые умели ломать старое и создавать новое, несмотря ни на какие препятствия, вопреки всему». (Речь на приёме в Кремле работников Высшей школы 17 мая 1938 г.). Галилей изучал законы движения с помощью самых простых опытов: наблюдал качание маятников, бросал с башни шарики разного веса и плотности, заставлял их ска-

тиваться по наклонным желобкам и т. п. Этими опытами он опроверг державшееся два тысячелетия учение Аристотеля, что «всякое движение продолжается только до тех пор, пока действует движущая сила». Галилей доказал, что для поддержания равномерного движения вовсе не нужно непрерывного действия силы. Он установил закон *инерции*, по которому тело, приведённое в движение, должно двигаться прямолинейно и равномерно до тех пор, пока не встретит сопротивления. Следовательно, в движении планет теперь нужно было искать не силу, производящую движение, а силу, изменяющую их прямолинейный путь в криволинейный, иначе говоря, силу, *удерживающую* планету на её орбите. Вскоре Гюйгенс исследовал круговое движение и ввёл понятие о центростремительной силе. Во второй половине XVII в. уже несколько учёных высказывало мысль, что законы Кеплера должны вытекать из действия силы, притягивающей обратно пропорционально *квадрату* расстояния (Галилей, Гук и др.).

Но доказать этого они не могли. Задача осложнилась ещё тем, что в движении Луны и планет были обнаружены небольшие отклонения от кеплеровых законов.

**§ 162. Положение точных наук к концу XVII в.** Во второй половине XVII в. положение точных наук изменилось. Правящим кругам к тому времени стало ясно, что эти науки нужны для торговли и промышленности, и правительства стали уделять им внимание. Это выразилось в основании учёных обществ и академий и в появлении научных журналов. До того времени работники науки были одиночками, и роль научных изданий играла переписка между учёными. Теперь же наука стала организовываться. В 1662 г. возникла академия наук в Англии (так называемое «Королевское Общество»), в 1666 г. — во Франции, в 1725 г. — в России.

Почти одновременно с этим стали создаваться правительственные обсерватории (в 1667 г. — в Париже, в 1675 г. — в Гриниче, — в 1725 — в Петербурге и другие).

К этой эпохе организации науки и относится завершение «новой астрономии», создавать которую начали Коперник и Кеплер: в 1687 г. Исаак Ньютон (1643—1727) дал математическое объяснение планетных движений в книге: «Математические начала натуральной философии».

**§ 163. Аксиомы движения.** В основу своих исследований Ньютон положил следующие сформулированные им аксиомы движения: в них он называет «телом» то, что теперь называется «материальной точкой».

1) Закон инерции. *Если на тело не действуют силы, то оно сохраняет своё состояние.* Например, если тело не двигалось, то оно без действия силы должно всё время оставаться в покое; если же оно было приведено в движение, то будет в течение неограниченного времени двигаться прямолинейно и равномерно (по инерции).



2) Закон независимости действия сил. *Если на неподвижное или движущееся тело действует сила, то оно получает ускорение, направленное в сторону этой силы; величина ускорения прямо пропорциональна силе и обратно пропорциональна массе тела.*

Пусть  $F$ ,  $m$  и  $g$  обозначают силу, массу тела и полученное им ускорение; тогда этот закон можно написать в виде следующей формулы:

$$g = F/m,$$

или

$$F = mg. \quad (1)$$

Следовательно, сила равна массе тела, умноженной на ускорение.

3) Закон равенства действия и противодействия. *Если одно тело действует на другое с некоторой силой, то и второе тело действует на первое с такой же силой, но прямо противоположно направленной.*

Основываясь на этих аксиомах, с одной стороны, и на законах Кеплера,— с другой, Ньютон математически вывел свойства силы, управляющей движением небесных тел. В настоящее время этот вывод делается с помощью дифференциального исчисления.

**§ 164. Динамический смысл законов Кеплера.** Ньютон доказал, что каждый из законов Кеплера выражает особое свойство силы, управляющей движением планет.

а) II закон Кеплера (закон площадей) доказывает, что на планету всё время действует сила, направленная к центру Солнца, т. е. сила солнечного притяжения.

б) I закон доказывает, что сила солнечного притяжения, действующая на данную планету, обратно пропорциональна квадрату расстояния планеты от центра Солнца.

в) III закон доказывает, что сила солнечного притяжения, действующая на разные планеты, обратно пропорциональна квадратам расстояний планет от центра Солнца.

**§ 165. Сила притяжения и сила тяжести.** После того, как Ньютон, основываясь на законах Кеплера, нашёл закон действия силы, управляющей движением планет, оставалось выяснить природу этой силы.

Так как движения, подобные движениям планет, на Земле не наблюдаются, то с древнейших времён создалось убеждение, что «на небе», т. е. в межпланетном пространстве, действуют какие-то особенные силы, которые для человека, может быть, навсегда останутся непостижимыми. Величайшая заслуга Ньютона и состоит в доказательстве того, что сила, управляющая движением планет, есть та самая сила тяжести, под действием которой все тела на Земле падают на её поверхность. Ньютон задал себе вопрос: как далеко распространяется действие силы тяжести? Не простирается ли оно до

Луны? Быть может, та самая сила, под действием которой все предметы стремятся к центру Земли, удерживает и Луну на её орбите?

Чтобы проверить эту гипотезу, произведём следующие вычисления:

а) Определим, насколько должна быть ослаблена сила тяжести на расстоянии Луны. Мы знаем из опытов над падением тел, что на земной поверхности ускорение силы тяжести  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ ; допустим, что его величина изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли (§ 164, б).

Обозначим радиус Земли через  $R$ , расстояние Луны через  $r$  и величину ускорения на расстоянии Луны через  $g_1$ . Закон изменения ускорения с расстоянием выразится пропорцией

$$\frac{g_1}{g} = \frac{R^2}{r^2}.$$

Если радиус Земли  $R$  примем за единицу, то расстояние Луны  $r$  будет приблизительно 60 (§ 110). Вставив числа, получим

$$\frac{g_1}{9,81} = \frac{1^2}{60^2}, \quad g_1 = \frac{9,81}{3600} = 0,273 \text{ см/сек}^2.$$

Таково должно быть ускорение силы земной тяжести на расстоянии Луны.

б) Найдём теперь величину ускорения, которое действительно наблюдается в движении Луны, по формуле центростремительного ускорения равномерного кругового движения:

$$g_1 = \frac{4\pi^2 r}{T^2}.$$

В формулу надо подставить числа  $r = 385\,000 \text{ км}$ ,  $T = 27,3$  суток.

Обратив  $r$  в сантиметры, а  $T$  в секунды и произведя вычисление, получим  $g_1 = 0,273 \text{ см/сек}^2$ , т. е. то же число, которое было найдено раньше. Это и доказывает гипотезу Ньютона, что сила, управляющая движением Луны, есть сила тяжести, или *тяготения*, только менее интенсивная, чем на земной поверхности; с удалением она ослабевает пропорционально *квадрату расстояния* от центра Земли.

**§ 166. Закон всемирного тяготения.** Планеты обращаются вокруг Солнца по тем же законам, что и Луна вокруг Земли. Отсюда заключаем, что и сила, управляющая движением планет, есть сила тяготения, именно сила тяготения Солнца, притягивающего планеты по тому же закону, по какому Земля притягивает Луну. Математически эта сила выражается так:

$$F = \mu \frac{m}{r^2}, \quad (\text{А})$$

где  $m$  — масса планеты, а  $r$  — её расстояние от центра Солнца.

Но если Солнце притягивает планету, то и планета должна по закону равенства действия и противодействия притягивать Солнце с такой же силой:

$$F = \mu' \frac{M}{r^2}, \quad (B)$$

где  $M$  — масса Солнца. Приравняв правые части (A) и (B), получаем:

$$\frac{\mu}{M} = \frac{\mu'}{m} = k^2,$$

где  $k^2$  — постоянная. Исключая  $\mu$  из (A), получаем формулу (2) или закон всемирного тяготения Ньютона, обобщённый им на все тела: *каждая материальная частица притягивает каждую другую частицу с силой, пропорциональной массам обеих частиц и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:*

$$F = k^2 \frac{Mm}{r^2}. \quad (2)$$

Здесь  $M$  и  $m$  обозначают массы двух частиц,  $r$  — их расстояние; постоянный множитель  $k^2$  есть сила притяжения двух масс, равных единице, удалённых одна от другой на единицу расстояния.

Таким образом, сила тяготения действует между всеми телами, а не только между небесными светилами. Все окружающие нас предметы взаимно притягиваются, притягивают нас, и мы в свою очередь их притягиваем. Эти силы взаимного притяжения крайне ничтожны в сравнении с притяжением всех предметов Землёй и в обычных условиях совершенно незаметны. Тем не менее с помощью очень тонких опытов их удалось обнаружить и даже измерить.

Следствия из закона тяготения. а) Если притягивающиеся тела имеют неправильную форму, то их взаимодействие оказывается очень сложным. Проще всего происходит притяжение между шарами. Ньютон доказал, что *два concentрически однородных шара притягиваются так, как будто их массы сосредоточены в их центрах*. Другими словами, сила притяжения двух шаров обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами. Это сильно облегчает вычисление движений мировых тел.

Следующие два свойства вытекают из аксиом движения (§ 163) и из формулы (2).

б) Два шара с массами  $m_1$  и  $m_2$  притягивают друг друга с *одинаковой силой*  $F$  [формула (1) § 163], но получают при этом ускорения, обратно пропорциональные их массам:

$$g_1 : g_2 = m_2 : m_1. \quad (3)$$

Например, ускорение, получаемое Землёй от притяжения Луны, меньше ускорения Луны (§ 165) во столько же раз, во сколько раз масса Луны меньше земной массы.

в) Два шара с массами  $m_1$  и  $m_2$ , находящихся на одном и том же расстоянии от третьего тела массы  $M$ , притягиваются этим телом с *разными силами*, но ускорения получают одинаковые (по величине).

Например, тяжёлая планета и её лёгкий спутник получают от притяжения Солнца почти одинаковые ускорения, разница между которыми целиком обусловливается различием *положений* планеты и спутника, но не различием их масс.

**§ 167. Исключительные свойства тяготения.** а) Закон всемирного тяготения является важнейшим законом природы. Из него выводится множество разнообразнейших следствий; другими словами, множество очень сложных явлений (почти все небесные движения) вполне объясняется этим простым законом. Закон тяготения является одним из самых совершенных примеров *научного обобщения*, охватывающего сразу колоссальную область фактов одной простой математической формулой.

б) Тяготение обладает рядом замечательных свойств, которые отличают его от других сил природы (например, от электрических и электромагнитных): 1) тяготение действует между всеми без исключения телами природы; 2) для него не существует никаких преград: сквозь тело планеты или Солнца оно действует без малейшего ослабления, как сквозь пустое пространство; 3) его действие не зависит от химического состава, физического состояния и свойств тел, а зависит только от их массы.

В 1916 г. Эйнштейн развил теорию, названную общей теорией относительности, по которой тяготение не является одной из сил, действующих между телами, а представляет первичное свойство материи, лежащее в основе всех движений и по существу своей тождественное с *инерцией*. Эта теория пока ещё не признана всеми физиками и астрономами, хотя целый ряд выводов из неё подтвердился астрономическими наблюдениями (§§ 188, 198, 218).

**§ 168. Задача двух тел.** После вывода закона тяготения из законов Кеплера Ньютон решил обратную задачу: математически вывел из закона тяготения законы движения планет относительно Солнца. При этом пришлось применить метод, который теперь называется *интегрированием*.

В результате этого вычисления второй закон (закон площадей) получился у Ньютона в той же форме, в какой Кеплер его вывел из наблюдений. Первый закон Ньютон получил в более общей форме, чем Кеплер: оказалось, что под действием тяготения небесное тело может описывать не только эллипс, но также параболу и гиперболу. Наблюдения это сейчас же подтвердили: яркая комета 1680 г., по вычислениям Ньютона и других астрономов, двигалась по орбите, чрезвычайно близкой к параболе, а впоследствии были открыты случаи движения комет и по гиперболам, правда, мало отличающимся от параболы. Ньютон внёс уточнение и в третий закон. Кеплер для всех планет писал его в виде:

$$\frac{a^3}{T^2} = C.$$

Ньютон же доказал, что точное выражение этого закона будет:

$$\frac{a^3}{T^2(M+m)} = C, \quad (4)$$

где  $M$  — масса Солнца, а  $m$  — масса данной планеты. Для постоянного  $C$  получилось значение, совершенно одинаковое для любых тяготеющих масс:

$$C = \frac{k^2}{4\pi^2}, \quad (4a)$$

где  $k^2$  есть постоянная тяготения.

Для другой планеты с массой  $m_1$ , большой полуосью  $a_1$  и временем обращения  $T_1$  получим такое же равенство; разделив его на уравнение (4), находим:

$$\frac{T^2(M+m)}{T_1^2(M+m_1)} = \frac{a^3}{a_1^3}. \quad (5)$$

Это — точное выражение третьего закона, и оно соответствует наблюдениям. Если пренебречь массами планет в сравнении с Солнцем, т. е. принять  $m = m_1 = 0$ , то получим приближённую формулу, выведенную Кеплером из наблюдений:  $T^2 : T_1^2 = a^3 : a_1^3$ . Так как массы планет в сравнении с массой Солнца незначительны, то приближённая формула Кеплера довольно хорошо согласуется с действительностью.

Формула (5) имеет большую важность: она даёт возможность определять массы небесных тел.

**§ 169. Постоянная тяготения.** Числовое значение постоянной тяготения  $k$  выходит различным, смотря по тому, в каких единицах его выражать. Из формул (4) и (4a) имеем:

$$k = \frac{2\pi}{T} \frac{a^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{M+m}}. \quad (6)$$

В астрономии  $a$  выражают в астрономических единицах,  $T$  — в солнечных сутках,  $m$  — в массах Солнца ( $M=1$ ). Вычисленная в этих единицах  $k$  имеет величину

$$k = 0,017202 \left( \text{приблизительно } \frac{1}{58} \right). \quad (A)$$

Так как для Земли  $a=1$ , а масса  $m$  меньше  $1/300\,000$  массы Солнца  $M$ , то, приняв массу Солнца  $M$  за единицу, видим, что  $k$  почти в точности равно величине  $n=2\pi/T$ , т. е. среднему суточному движению Земли.

Поэтому  $k$  часто выражают в секундах дуги. Для этого надо (A) умножить на 206 265, т. е. на число секунд в радиане. Получим:

$$k'' = 3548'',19. \quad (B)$$

Это число до сотых долей секунды совпадает со средним движением Земли в секундах дуги. Число  $k$ , выраженное в виде (А) или (В), называется *гауссовой постоянной*.

В физике  $a$  выражают в сантиметрах,  $T$  в секундах,  $m$  в граммах. В этой системе получается:

$$f = k^2 = 6,67 \cdot 10^{-8} = \frac{1}{15000000}. \quad (C)$$

Это значит, что две массы, каждая в 1 г, находящиеся на расстоянии в 1 см, притягивают одна другую с силой в одну пятнадцатимиллионную дин — величина необыкновенно малая.

**§ 170. Уравнение живых сил в задачах двух тел и его применения.** При выводе из закона тяготения орбиты планеты относительно Солнца получается следующая формула для скорости тела  $v$  на расстоянии  $r$  от центра Солнца, называемая уравнением живых сил:

$$v^2 = k^2 \left( M + m \right) \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) = \mu \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right), \quad (7)$$

где  $a$  есть большая полуось орбиты. Из этого важного уравнения вытекает ряд следствий.

а) Род орбиты зависит от величины скорости. Второй, постоянный, член  $\frac{1}{a}$  правой части уравнения (7) в разных случаях может иметь различную величину. Если он равен нулю, то скорость тела определяется формулой

$$v_0^2 = \frac{2\mu}{r}, \quad (8)$$

где

$$\mu = k^2 (M + m).$$

В этом случае большая полуось  $a = \infty$ , следовательно, орбита небесного тела есть *парабола*, разомкнутая бесконечная кривая; тело, движущееся по такой орбите, больше к Солнцу не вернется. Скорость, определяемая уравнением (8), называется *параболической* скоростью.

Если  $v^2 < \frac{2\mu}{r}$ , то по уравнению (7)  $a > 0$ ,  $e < 1$ ; орбита есть *эллипс*, тело будет обращаться около Солнца по замкнутой орбите.

Если  $v^2 > \frac{2\mu}{r}$ , то орбита — *гипербола*; тело, как и в первом случае, никогда больше к Солнцу не вернется.

Таким образом, род орбиты *не зависит от направления скорости*, а зависит только от её величины.

б) Большая полуось эллиптической орбиты и время обращения  $T$  (период) также зависят только от величины скорости  $v$  на данном расстоянии  $r$ , но не от её направления.

Действительно, из уравнения (7) определяется  $a$  по данным  $v$  и  $r$ . Зная  $a$ , можно определить время обращения  $T$  по формуле третьего закона Кеплера [уравнения (4) и (4a)].

Отсюда вытекает такой интересный пример: если бы из какой-нибудь точки разлетелись по всевозможным направлениям частицы со скоростями, одинаковыми по величине и притом меньшими параболической, то все эллипсы, описываемые ими, имели бы одинаковую большую ось и одно и то же время обращения; другими словами, по истечении времени  $T$  они опять сошлись бы в той же точке  $A$  (рис. 65).

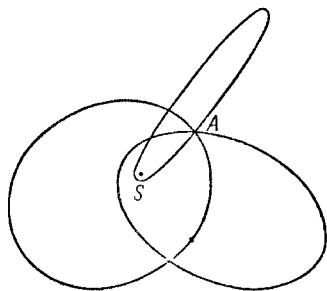


Рис. 66.

в) Круговая скорость. Положив в уравнении (7)  $r = a$ , получим

$$v_1 = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{a}}}{\sqrt{a}}. \quad (9)$$

Таким образом, скорости планет, движущихся по кругам, обратно пропорциональны корню квадратному из расстояний от центрального тела.

Сравнив уравнения (8) и (9), получим

$$v_0 = v_1 \sqrt{2}. \quad (10)$$

Таково отношение между параболической и круговой скоростями в одной и той же точке. Например, для Земли, считая её орбиту кругом, получим  $v_1 = 29,8 \text{ км/сек}$ , а для параболической скорости на том же расстоянии от Солнца  $v_0 = 42,0 \text{ км/сек}$ . Числа эти полезно запомнить.

г) Вычисление скорости на данном расстоянии. В общем случае при вычислении по формуле (7) следует выражать расстояние в см, а массы в г; тогда для  $k^2$  надо взять величину

$$k^2 = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ [уравнение (C), § 169],}$$

и скорость получится в см/сек.

**Упражнение.** Вычислить параболическую скорость на поверхности Земли ( $M + m = 6 \cdot 10^{27} \text{ г}$ ,  $r = 6,4 \cdot 10^8 \text{ см}$ ).

**Ответ:**  $11,3 \text{ км/сек}$ . Тело, брошенное с такой скоростью, улетит навсегда с земной поверхности (если пренебречь сопротивлением воздуха).

Во многих случаях удобнее за единицу масс брать массу Солнца, за единицу расстояний — астрономическую единицу, а скорости выражать в км/сек; массой  $m$  можно пренебречь. Тогда для скорости Земли, в предположении, что она движется по кругу, формула (10) даст, при  $a = 1$ ,  $M = 1$ ,  $m = 0$ ,

$$v_1 = k;$$

таким образом, постоянное  $k$  можно принять численно равным круговой скорости Земли:  $k = 29,8 \text{ км/сек}$ .

Для вычисления скоростей получим формулу

$$v = 29,8 \sqrt{M \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}. \quad (11)$$

Здесь  $M$  даётся в массах Солнца,  $r$  и  $a$  — в астрономических единицах;  $v$  получается в км/сек.

**§ 171. Возмущения.** Кеплер вывел законы планетных движений из наблюдений, производившихся невооружённым глазом. Когда же с развитием техники повысилась точность астрометрических инструментов, то оказалось, что законы Кеплера верны лишь приблизительно. Но Ньютон показал, что наблюдаемые отклонения от кеплеровых законов являются таким же естественным следствием действия силы тяготения, как и сами законы.

Если бы на планету действовало только притяжение Солнца, то она двигалась бы в точности по законам Кеплера (так называемая *задача двух тел*). В действительности же её притягивают не только Солнце, но и другие планеты. Под их влиянием движение планеты расстраивается, и появляются отклонения от правильного эллиптического движения; они называются *возмущениями*, или *неравенствами*.

Определение движения планеты под действием Солнца и только одной «возмущающей» планеты составляет так называемую *задачу трёх тел*. Эта задача до сих пор ещё не решена в форме, пригодной для практических вычислений. Если же на движение планеты действует не одно возмущающее тело, а два или больше, то трудности задачи ещё увеличиваются.

К счастью, планетная система обладает особенностями, облегчающими приближённое решение задачи: 1) орбиты планет мало отличаются от *кругов*; 2) движение планет происходит почти в *одной плоскости*; 3) *массы планет незначительны* в сравнении с массой Солнца; 4) *расстояния* между планетами очень *велики* в сравнении с их размерами. В силу всех этих причин действие планет друг на друга составляет незначительную долю силы солнечного притяжения. Поэтому обыкновенно считают, что планета движется по эллипсу, и движение её вычисляют по законам Кеплера, но только элементы эллипса (§ 159) не являются постоянными величинами, а всё время изменяются. Эти изменения элементов и называют *возмущениями элементов*.

Несмотря на такие особенности планетной системы, вычисление возмущений всё-таки оказывается очень сложным делом. Ньютон дал *геометрические*, качественные методы определения наиболее значительных возмущений, но точный количественный учёт возмущений сделан был возможным лишь с развитием аналитической механики и интегрального исчисления. В первой половине XVIII в. петербургский академик *Эйлер* создал для вычисления возмущений элементов математический метод «вариаии произвольных постоянных». Так возникла новая наука — *небесная механика*. Французский математик Лаплас



произвёл (в 1825 г.) вычисления всех известных в то время неравенств планетной системы. Оказалось, что все возмущения, определённые теоретически, в точности совпадали с действительно наблюдающимися отклонениями в движении тел солнечной системы. Это явилось лучшим подтверждением правильности закона всемирного тяготения.

**§ 172. Возмущающая сила.** Рассмотрим, как действуют на планету  $P$ , имеющую массу  $m$ , притяжения Солнца  $S$  и планеты  $P'$ . Пусть массы Солнца и возмущающей планеты будут  $M$  и  $m'$ , их расстояния от данной планеты  $r$  и  $\rho$ , расстояние  $SP'$  равно  $r'$  (рис. 67). Все три

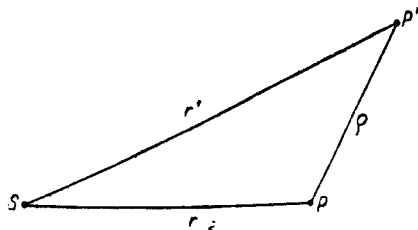


Рис. 67.

тела действуют друг на друга и сообщают ускорения по закону Ньютона.

В частности, Солнце получает ускорения:

$$g_1 = k^2 \frac{m}{r^2} \text{ по направлению } SP,$$

$$g_2 = k^2 \frac{m'}{r'^2} \text{ по направлению } SP'.$$

Будем Солнце считать неподвижным и исследуем *относительное* движение планеты  $P$ . Для этого приложим ко всем точкам системы ускорения, равные и противоположные по направлению ускорениям  $g_1$  и  $g_2$ . Тогда на планету  $P$  будут действовать следующие ускорения (или силы, после умножения на  $m$ ):

- 1)  $k^2 \frac{M+m}{r^2}$  по направлению  $PS$ ,
- 2)  $k^2 \frac{m'}{\rho^2}$  по направлению  $PP'$ ,
- 3)  $k^2 \frac{m'}{r'^2}$  по направлению, параллельному  $P'S$ .

Первый член представляет ускорение относительного движения, вызываемого притяжением Солнца; он даёт движение вокруг Солнца по кеплеровым законам, или задачу двух тел. Второй и третий члены составляют *возмущающую силу*. Она состоит, таким образом, из двух сил: действия возмущающей планеты  $P'$  на планету  $P$  и действия планеты  $P'$  на Солнце. Так как последняя сила складывается в направлении, противоположном своему истинному направлению, то можно сказать, что возмущающая сила есть *геометрическая разность* действий возмущающего тела на планету и на Солнце.

Отсюда следует, что возмущающая сила направлена точно к возмущающему телу  $P'$  только в том случае, когда планеты находятся на одной прямой с Солнцем, притом обе по одну сторону от него (в порядке  $SPP'$  или  $SP'P$ ). Если же планеты находятся по разные

стороны от Солнца (на прямой  $PSP'$ ), то возмущающая сила направлена от возмущающего тела и является как бы отталкивательной силой.

Величина и направление возмущающей силы всё время меняются. Определение этой силы и её влияния на движение (т. е. возмущений) представляет громадные трудности: для точного вычисления возмущений надо знать точные положения планет, а эти положения, в свою очередь, могут быть определены только после того, как возмущения уже известны. Но для большинства тел солнечной системы возмущающие силы имеют незначительную величину в сравнении с силой солнечного притяжения, и вычисление возмущений этим облегчается. Большие возмущения наблюдаются в движении Луны.

**§ 173. Возмущающая сила движения Луны.** Для Луны центральным телом является Земля, а возмущающим — Солнце. Масса Солнца  $M$  в 330 000 раз больше массы Земли  $m$ , а расстояние  $R$  от Земли до Солнца в 390 раз больше расстояния  $r$  от Земли до Луны. Из этих данных выходит, что сила притяжения Луны Солнцем приблизительно вдвое больше силы притяжения Луны Землёй (см. ниже, упражнение 17).

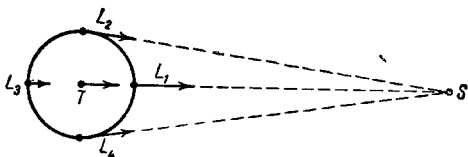


Рис. 68.

Но на движение Луны относительно Земли влияет не сила притяжения Солнца, а *разность притяжений* Солнцем Луны и Земли, т. е. *возмущающая* сила. Наибольшее значение эта сила имеет в новолуние, когда Луна находится между Солнцем и Землёй (положение  $L_1$  на рис. 68). В этом положении возмущающее ускорение  $g_1$ , равное разности действий Солнца на Луну и на Землю, выразится формулой

$$g_1 = \frac{k^2 M}{(R-r)^2} - \frac{k^2 M}{R^2} = k^2 M \frac{2Rr - r^2}{(R-r)^2 R^2}.$$

Так как  $r$  мало в сравнении с  $R$ , то  $R-r$  мало отличается от  $R$ , и скобки в знаменателе можно заменить через  $R^2$ ; точно так же  $r^2$  в числителе можно отбросить. После сокращения получим:

$$g_1 = k^2 \frac{2rM}{R^3}. \quad (12)$$

Ускорение силы земного притяжения равно

$$G = k^2 \frac{m}{r^2},$$

а для отношения этих двух ускорений (или сил) получим:

$$\frac{g_1}{G} = \frac{2r^3 M}{R^3 m}.$$

Подставив числа  $r=1$ ,  $m=1$ ,  $M=330\,000$ ,  $R=390$ , получаем:

$$\frac{g_1}{G} = \frac{1}{90}.$$

Таким образом сила, возмущающая движение Луны, может достигать  $\frac{1}{90}$  силы притяжения центрального тела. Только открытые в XX столетии далёкие спутники Юпитера подвержены действию ещё большей возмущающей силы.

Заметим особенность формулы (12): возмущающая сила обратно пропорциональна не квадрату, а *кубу* расстояния возмущающего тела.

В момент новолуния  $L_1$  (рис. 68) притяжение Солнца отдаляет Луну от Земли. Почти в точности так же действует оно в полнолунии  $L_3$  (здесь Солнце оттягивает Землю от Луны); действительно,

$$g_2 = \frac{k^2 M}{R^2} - \frac{k^2 M}{(R+r)^2} = k^2 \frac{2rM}{R^3} \quad (\text{приблизительно}).$$

В первой и последней четвертях  $L_2$  и  $L_4$  возмущающая сила несколько сближает Луну и Землю, так как силы, с которыми Солнце притягивает эти тела, равны только по величине, но их направления не параллельны, а *сходятся* под острым углом (рис. 68).

**§ 174. Возмущения движения Луны.** Движение Луны является одним из самых трудных для исследования по двум причинам: 1) возмущающая сила движения Луны очень велика; 2) Луна очень близка к Земле, и поэтому в её движении заметны такие отклонения, которые ускользнут от нас при наблюдении более далёких светил.

Вследствие притяжения Солнца все элементы лунной орбиты непрерывно изменяются. Эти изменения элементов, иначе называемые возмущениями или неравенствами, разделяются на *вековые* и *периодические*. Вековыми возмущениями называются такие возмущения, которые в течение долгого времени растут в одном и том же направлении и поэтому могут достигнуть весьма большой величины. Вековым возмущениям подвержены: 1) долгота *узла* и 2) долгота *перигея* лунной орбиты (§§ 129, 132).

Периодическим неравенствам подвержены все элементы лунной орбиты. Так называются возмущения, которые действуют то в одном направлении, то в противоположном, так что по истечении некоторого, сравнительно короткого промежутка времени, называемого периодом неравенства, данный элемент принимает опять своё среднее значение. Например, наклонение лунной орбиты, равное в среднем  $5^\circ 9'$ , колеблется в пределах от  $4^\circ 58'$  до  $5^\circ 20'$  в течение периода, несколько меньшего полугодия.

Каждый элемент лунной орбиты имеет не одно периодическое неравенство, а несколько (иногда очень много), с разными периодами и амплитудами. Современная небесная механика представляет возмущения лунной *долготы* в виде суммы нескольких сот таких неравенств. Три из них были открыты прямыми наблюдениями ещё до изобретения телескопа; они имеют амплитуду от  $11'$  до  $1^\circ 17'$ . Найденные потом неравенства гораздо меньше.

Притяжение планет также влияет на движение Луны, но вызываемые ими планетные возмущения сравнительно незначительны. О самом важном из них, вековом *ускорении* Луны, будет сказано дальше (§ 188).

**§ 175. Возмущения планет.** Возмущения планет также разделяются на *периодические* и *вековые*.

Периодические возмущения зависят от взаимного положения *планет* на их орбитах. Но так как одинаковые относительные положения планет (например, соединения) повторяются через определённые промежутки времени, то по истечении этого промежутка (периода) величина возмущения опять принимает начальное значение. Математически эти возмущения изображаются членами, например, такого вида:  $A \sin(Bt - C)$ , где время  $t$  входит под знаком периодической функции.

Периодические возмущения сравнительно невелики, например, возмущения долготы Земли (Солнца) не превосходят  $1'$ . Самое большое периодическое возмущение в нашей системе — это так называемое великое неравенство Юпитера и Сатурна. Взаимное притяжение этих громадных планет приводит к тому, что Сатурн может постепенно уйти вперёд на  $50'$  по долготе, а через несколько сот лет на столько же отстать, в то время как более тяжёлый Юпитер отклоняется притяжением Сатурна в ту и другую сторону только на  $20'$ . Период возмущения — более 900 лет. Объяснение этого очень заметного неравенства есть одно из важнейших открытий Лапласа.

Вековые возмущения зависят от относительного положения планетных *орбит*, а не от положений планет на их орбитах. Математически они выражаются членами вида  $Mt$  или  $Nt^2$  и, следовательно, при больших значениях времени  $t$  могут возрастать безгранично.

**§ 176. Устойчивость солнечной системы.** Из вычислений Лапласа и Лагранжа выяснился следующий важный результат. Несмотря на то, что под действием возмущений орбиты планет медленно изменяют свою форму и положение, эти «неравенства» большей частью оказываются не вековыми, а *периодическими*, только с очень длинными периодами; поэтому они не могут достигнуть значительных размеров. Если, например, эллипс орбиты становится с течением времени всё более и более вытянутым, то через несколько десятков тысяч лет это увеличение эксцентриситета перейдёт в уменьшение, и орбита опять примет прежнюю форму. Например, эксцентриситет земной орбиты никогда не будет превосходить 0,05, поэтому разница температур при наибольшем и наименьшем расстояниях от Солнца всегда останется незначительной (теперь она совершенно незаметна). Также наклон плоскости земной орбиты (эклиптики), теперь равный  $23^\circ 27'$ , уменьшится через 30 000 лет на  $2''$ , а затем опять начнёт возвращаться к теперешнему значению.

Из всех элементов планетных орбит только долгота *узла* ( $\Omega$ ) и долгота *перигелия* ( $\pi$ ) подвержены *вековым* возмущениям (как у Луны). Узлы всех планет «отстают», т. е. движутся по эклиптике всё время с востока на запад, перигелии же имеют у большинства планет «прямое» движение. Движения эти очень медленные: одно пол-

ное обращение совершается в десятки тысяч или даже в сотни тысяч лет.

Особенно большое значение имеет следующая теорема Лапласа: *Большие полуоси планетных орбит не подвержены ни вековому, ни долгопериодическому возмущению*. Следовательно, времена обращения планет, связанные с полуосями третьим законом Кеплера, остаются неизменными, и уменьшение планетных орбит (которое могло бы кончиться падением планеты на Солнце), так же как увеличение их (которое привело бы к удалению планеты в межзвёздное пространство), а равно и сближение орбит (опасность столкновения планет) — невозможны.

**§ 177. Открытие Нептуна.** Самым блестящим торжеством небесной механики явилось открытие планеты Нептун посредством вычислений.

В 1781 г. музыкант Гершель, впоследствии ставший известным астрономом, совершенно случайно открыл новую большую планету. Вскоре было доказано, что она находится вдвое дальше от Солнца, чем Сатурн, который считался границей планетной системы. Новой планете дали имя Уран. Оказалось, что положение Урана определялось из наблюдений много раз до его открытия, в течение почти целого столетия, но при этом всегда его принимали за звезду. Таким образом явилась возможность точно определить его орбиту. Этим занялся петербургский академик А. И. Лексель. Во время своих вычислений он обнаружил неправильности в движении Урана и для их объяснения предположил, что за Ураном должна находиться ещё гораздо более далёкая планета. Таким образом он указал совершенно правильный путь для открытия далёких планет, но его работа была прервана преждевременной смертью в 1784 г.

В начале XIX в. было окончательно подтверждено, что отклонения от теории в движении Урана нельзя объяснить притяжением всех известных в то время планет. Вскоре была высказана мысль, что отклонения вызываются действием неизвестной планеты, ещё более далёкой, и перед астрономами встала задача: по неправильностям в движении Урана определить положение возмущающей планеты и указать, в каком месте неба надо её искать.

Эта трудная математическая задача была решена почти одновременно и независимо друг от друга Леверрье и Адамсом. Так как планета не могла быть видима простым глазом, то Леверрье обратился в Берлинскую обсерваторию, на которой имелись подробные карты телескопических звёзд, с просьбой поискать новое светило. Астроном Галле в первый же вечер после получения письма, 23 сентября 1846 г., нашёл планету на расстоянии всего  $1^{\circ}$  от той точки неба, которую указал Леверрье своим вычислением. Планете этой дали название Нептун. Её стали тщательно наблюдать, и уже в 1855 г. русский учёный М. А. Ковальский дал математическую теорию движения новой планеты с учётом возмущений от других планет и составил таблицы для точного вычисления её положений.

Открытие Нептуна, сделанное таким необыкновенным способом, произвело громадное впечатление и ярко продемонстрировало широким массам могущество методов точной науки.

**§ 178. Определение масс небесных тел.** Одним из самых замечательных применений закона тяготения является «взвешивание» светил, определение их масс. Первые определения такого рода были сделаны самим Ньютоном.

а) Определение массы Земли производится с помощью различных опытов. Самый известный из них — это опыт Кавендиша (1798 г.). Кавендиш измерил силу, с которой массивный свинцовый шар притягивал небольшой шарик, подвешенный вблизи него. Сравнив величину этой силы с силой притяжения шарика Землёй (т. е. с его весом), он вычислил, во сколько раз масса Земли больше массы свинцового шара, а по массе и объёму Земли определил её среднюю плотность. Она получилась около 5,5; это значит, что земной шар в  $5\frac{1}{2}$  раза тяжелее водяного шара таких же размеров.

Так как средняя плотность доступных нам слоёв земной коры составляет 2,7, т. е. меньше половины средней плотности всей Земли, то отсюда был сделан вывод, что центральное ядро Земли имеет большую плотность, около 8—9 г/см<sup>3</sup>.

б) Определение массы Солнца. Массу Солнца можно определить благодаря тому, что у Земли есть спутник (Луна). Для этого применяется третий закон Кеплера в его точном виде [§ 168, (5)]:

$$\frac{A^3}{T^2(M+m)} = \frac{a^3}{t^2(m+m')} \quad (A)$$

Здесь  $A$  и  $a$  — большие полуоси орбит Земли и Луны,  $M$ ,  $m$  и  $m'$  — массы Солнца, Земли и Луны,  $T$  — звёздный год,  $t$  — звёздный месяц. Уравнение (A) можно переписать так:

$$\frac{M+m}{m+m'} = \left(\frac{A^3}{T^2}\right) : \left(\frac{a^3}{t^2}\right) = \frac{390^3}{13,4^2} = 330\,000 \text{ (приблизительно)}. \quad (B)$$

Из этого уравнения определяется собственно отношение сумм масс (Солнце + Земля) и (Земля + Луна), но вторые члены каждой суммы малы сравнительно с первыми.

в) Определение масс планет. Это же уравнение позволяет определить отношение массы любой планеты, имеющей спутников, к массе Солнца; в этом случае  $m$ ,  $t$ ,  $a$  относятся к соответствующей планете.

Заметим, что величина, заключённая в первой скобке уравнения (B), есть постоянная всей планетной системы, полученная из третьего закона Кеплера [формула (3) § 157]; величина же во второй скобке — такая же постоянная для системы спутников планеты. Таким образом эти постоянные имеют глубокий динамический смысл: они определяют *отношение масс* обоих тел.

Если же у планеты нет спутников, то определить её массу гораздо труднее. Её тогда вычисляют по возмущениям, которые планета производит в движении других планет.

г) Точное определение массы Луны представляет сравнительно трудную задачу. Её впервые решил Эйлер по действию Луны на Землю. Он основывался на том, что под влиянием лунного притяжения Земля подобно Луне должна описывать в течение месяца эллипс около общего центра тяжести системы Земля — Луна.

Точные определения положения Солнца действительно обнаружили в его долготе изменение с месячным периодом; это «лунное уравнение» указывает, что центр Земли в течение месяца описывает маленький эллипс, большая полуось которого меньше земного радиуса. Отсюда можно было вывести, что масса Луны составляет  $\frac{1}{81}$  массы Земли.

О другом способе определения лунной массы будет сказано дальше (§ 186).

**§ 179. Движение земной оси.** Суточное вращение неба и смена времён года свидетельствуют о том, что ось земного шара сохраняет постоянно одно и то же направление, или, иначе говоря, перемещается «параллельно самой себе». Но это верно только для сравнительно небольших промежутков времени; по истечении же нескольких столетий обнаруживается настолько заметное изменение направления земной оси, что греческий астроном Гиппарх открыл его уже в II в. до нашей эры.

Движение, которым обладает земная ось, легко наблюдать на обыкновенном волчке. Именно, если слегка толкнуть вертящийся волчок,

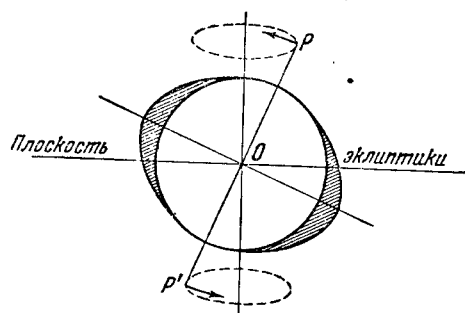


Рис. 69.

осью которого была вертикальной, то конец оси (полюс) начнёт медленно поворачиваться, описывая круги, а вся ось станет описывать поверхность круглого конуса вокруг вертикальной прямой.

Если считать центр Земли  $O$  неподвижным (рис. 69), то получается, что земная ось  $PP'$  описывает коническую поверхность вокруг перпендикуляра к плоскости земной орбиты, а полюс мира (полюс экватора) описывает круг около полюса эклиптики. Это движение земной оси называется *прецессионным*. Оно совершается чрезвычайно медленно: один оборот продолжается около 26 000 лет.

Заметим, что прецессионное движение не изменяет наклона земной оси к плоскости орбиты; в настоящее время этот наклон составляет около  $66^{\circ}33'$ , а с перпендикуляром к плоскости ось образует угол  $90^{\circ} - 66^{\circ}33' = 23^{\circ}27'$  (наклонение эклиптики к экватору). Несб-

ходимо помнить также, что оно не оказывает никакого влияния на широту точек *земной поверхности*.

§ 180. Следствия прецессионного движения земной оси. 1) Благодаря прецессионному движению *полюс мира изменяет своё положение* относительно звёзд. В период около 26 000 лет он описывает на небе круг с центром в полюсе эклиптики и радиусом приблизительно в  $23\frac{1}{2}^\circ$ . В настоящее время полюс находится близ звезды  $\alpha$  Малой Медведицы, и эта звезда теперь называется Полярной. Но так было не всегда; 4000 лет назад ближе всех звёзд к полюсу была  $\alpha$  Дракона; через 12 000 лет полярной звездой сделается Вега ( $\alpha$  Лирь) — самая яркая звезда северного полушария (рис. 70).

2) Так как направление оси мира изменяется, то изменяется и положение *небесного экватора*, плоскость которого перпендикулярна к этой оси и параллельна плоскости земного экватора. Поэтому точки пересечения экватора с эклиптикой (точки равноденствий) медленно перемещаются среди звёзд к западу. Это движение равноденственных точек

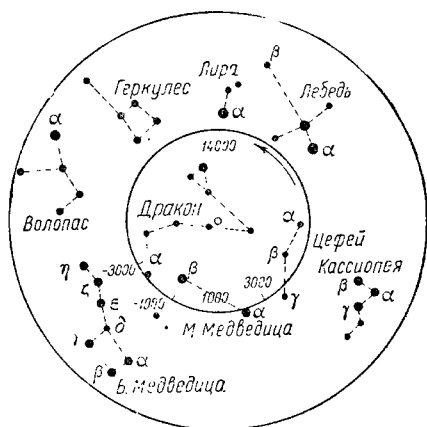


Рис. 70.

называется *прецессией*. В начале нашей эры точка весеннего равноденствия находилась в созвездии «Овна» и обозначалась знаком этого созвездия  $\gamma$ . С тех пор точка весны передвинулась в созвездие Рыб, но её обозначение осталось неизменным. Скорость перемещения этой точки составляет  $\frac{360^\circ}{26\,000} = 50'',2$  в год. Эта величина называется *общей годовой прецессией*.

3) Так как движение равноденственных точек направлено навстречу годичному движению Солнца, то Солнце вступает в эти точки всякий раз немного *раньше*, чем если бы они были неподвижными. Отсюда это явление и получило своё название: слово «прецессия» значит «предварение» (равноденствий), т. е. более раннее наступление равноденствий (не смешивать с переходом равноденствий на другие числа из-за неточности календаря). По этой причине *тропический год*, т. е. промежуток времени между двумя последовательными прохождением Солнца через точку весеннего равноденствия, получается *короче звёздного года*, по истечении которого Солнце возвращается к той же звезде. Разница составляет около 20 мин.; столько времени нужно Солнцу, передвигающемуся к востоку приблизительно на  $1^\circ$  в сутки, чтобы пройти  $50'',2$ .



Точная величина того и другого года следующая (для 1950 г.):  
 Звёздный год = 365 дн. 6 ч. 9 м. 9 с. = 365,25636 средн. суток.  
 Тропический год = 365 дн. 5 ч. 48 м. 46 с. = 365,24219 средн. суток.

Для гражданской жизни имеет значение только тропический год, так как с ним связана смена времён года.

4) Точка весеннего равноденствия, как мы видели, служит началом счёта в экваториальной и эклиптической системах координат. Поэтому вследствие её движения к западу *долготы* всех звёзд ежегодно *увеличиваются* на  $50'',2$ , широты же не изменяются. Это показывает, что прецессия не влияет на положение плоскости эклиптики.

Что касается экваториальной системы, то *обе её координаты*, прямое восхождение и склонение, постоянно *изменяются*. Происходит медленное изменение вида звёздного неба для данного места. Так, через несколько тысяч лет Орион и Сириус не будут восходить над нашим горизонтом, зато появятся теперь невидимый в Европе Южный Крест и другие созвездия южного полушария.

**§ 181. Объяснение прецессии.** Земля, вследствие своего сравнительно быстрого вращения, имеет форму сфероида, или, другими словами, имеет избыток массы у экватора. Действие притяжения Солнца и Луны на этот избыток массы и вызывает прецессию.

Пусть на рис. 71  $L$  будет Луна,  $O$  — центр Земли,  $pp'$  — её ось. Если бы Земля была правильным шаром, то присутствие Луны (и Солн-

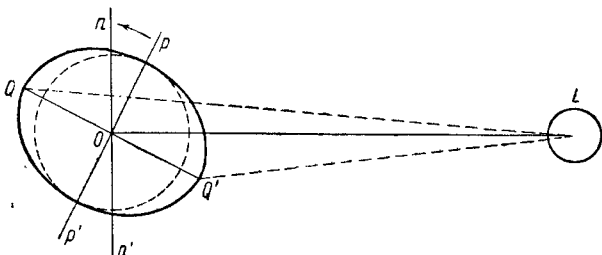


Рис. 71.

ца) не изменяло бы её вращения, так как шары притягиваются, как будто их массы сосредоточены в их центрах (§ 166). Но земной сфероид можно рассматривать как шар (отмеченный на рисунке пунктиром), к которому прибавлена добавочная масса вокруг экватора в виде массивного кольца. Очевидно, точку  $Q'$ , более близкую часть экваториального кольца, Луна, вообще не находящаяся в плоскости экватора, притягивает сильнее, чем более далёкую часть  $Q$ .

Представим себе, что Земля не вращается, а Луна *обращается* вокруг Земли (как это и есть в действительности) в плоскости, наклонной к плоскости экваториального кольца. В этом случае действие Луны заставило бы экваториальное кольцо, а с ним и всю Землю, колебаться около оси, проходящей через центр  $O$  перпендикулярно к плоскости чертежа, подобно физическому маятнику.

Если бы Луна была неподвижна, то эти колебания продолжались бы «по инерции» неограниченное время. Но вследствие обращения Луны вокруг Земли её действие на экваториальное кольцо постоянно меняется. Благодаря этому колебания Земли должны были бы постепенно затухнуть, и в конце концов плоскость земного экватора пришла бы в совпадение с плоскостью лунной орбиты.

Но кроме этого вращения около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа, Земля имеет ещё другое вращение — суточное около оси  $pp'$ , перпендикулярной к оси первого вращения. Если сложить оба вращения по правилу механики, то окажется, что северный конец оси  $p$  повернется не в сторону точки  $n$  в плоскости чертежа, а выйдет из этой плоскости «вверх» по направлению к читателю; расстояние же его от линии  $On$  не изменится. В результате земная ось будет описывать конус около оси  $On$ ; для наблюдателя, находящегося в северном полушарии, движение оси будет совершаться по часовой стрелке.

Вследствие близости Луны к Земле роль Луны в прецессии значительно больше роли Солнца. Из общей суммы  $50''$  в год  $16''$  приходится на действие Солнца и  $34''$  — на Луну.

**§ 182. Прецессия лунно-солнечная и планетная.** Прецессия, вызываемая действием Солнца и Луны, называется лунно-солнечной

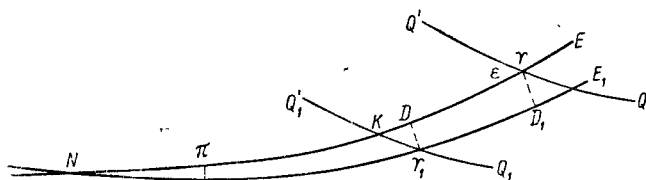


Рис. 72.

прецессией. Кроме неё существует ещё прецессия *от планет*. Притяжение планет слишком слабо, чтобы вызвать изменение в положении земной оси, но оно действует на движение Земли вокруг Солнца и производит изменение положения плоскости земной орбиты, т. е. *эклиптики*. Лунно-солнечная прецессия, поворачивающая плоскость *экватора*, перемещает точку пересечения экватора с эклиптикой ( $\Upsilon$ ) на  $50'',37$  в год к западу; планетная же прецессия, поворачивающая плоскость *эклиптики*, перемещает ту же точку ежегодно на  $0'',13$  в обратном направлении. В результате сложения обоих перемещений получается общая годовая прецессия, равная  $50'',24$ .

Сочетание лунно-солнечной и планетной прецессий показано на рис. 72. Если бы эклиптика  $NE$  была неподвижна, то точка весеннего равноденствия  $\Upsilon$ , перемещаясь к западу вместе с экватором  $Q'Q$ , через год перешла бы в положение  $K$  (новое положение экватора —  $Q'Q_1$ ). Дуга  $\Upsilon K$  есть лунно-солнечная прецессия  $\psi' = 50'',368$ .

Но за год сама эклиптика, вследствие притяжения планет, повернётся около некоторой точки  $N$  на малый угол  $\pi = 0'',47$  и займёт положение  $NE_1$ . Поэтому точка пересечения нового положения экватора  $Q'_1Q_1$  с новым положением эклиптики будет  $\Upsilon_1$ . Дуга  $K\Upsilon_1$  называется планетной прецессией  $\theta$ . Она равна  $0'',134$ . Её проекция  $KD$  на начальную («неподвижную») эклиптику будет

$$KD = \theta \cos \varepsilon = 0'',134 \cos 23^\circ 27' = 0'',123.$$

Если спроектировать точку  $\Upsilon$  на «подвижную» эклиптику в точке  $D_1$ , то ввиду малости угла  $\pi$  можно считать  $D\Upsilon = D_1\Upsilon_1$ ; следовательно,  $D_1\Upsilon_1 = \phi' - \theta \cos \varepsilon = 50'',245 = \phi$ . Величина  $\phi$  и называется общей годовой прецессией. На такую величину ежегодно перемещается к западу точка весеннего равноденствия по «подвижной» эклиптике.

Вследствие изменения положения эклиптики изменяется и *наклонение* эклиптики к экватору, но медленно и в небольших пределах. В настоящее время наклонение уменьшается каждый год приблизительно на  $0'',47$ . Через несколько тысяч лет уменьшение сменится увеличением, так как это возмущение — *периодическое*.

**§ 183. Нутация.** Прецессионные силы Солнца и Луны постоянно меняют свою величину; они превращаются в нуль, когда оба светила находятся в плоскости экватора, и достигают максимума при их наибольшем склонении. Поэтому явление прецессии усложняется: к движению равноденственных точек на  $50'',2$  в год присоединяются более мелкие колебания коротких периодов. Все они носят общее название *нутации*. Самое главное из них имеет период в 18,6 года, равный периоду обращения лунных узлов (§ 129), и достигает  $9''$  в ту или другую сторону.

**§ 184. Луна и прилив.** Уровень земных океанов испытывает постоянные колебания. В течение приблизительно 6 часов он повышается, вода надвигается на берег: это — *прилив*. Затем наступает *отлив*: вода в течение 6 часов спадает, пока не достигнет самого низкого уровня. После этого начинается новый прилив. Таким образом в течение суток бывают два прилива и два отлива, причём каждые сутки явления повторяются с запозданием в среднем на 50 мин. Но как раз на столько же запаздывает кульминация Луны (§ 126). Это указывает на какую-то зависимость между Луной и приливами.

Объяснение приливов основано на том, что под влиянием лунного притяжения центр Земли (а с ним и всё твёрдое тело Земли) получает некоторое ускорение в сторону Луны (§ 166, б), следовательно, каждое мгновение несколько смещается по направлению к Луне на одну и ту же величину; но частицы земного океана смещаются несколько иначе.

Примем для простоты, что вся Земля покрыта океаном. Пусть  $T$  — центр Земли,  $L$  — Луна (рис. 73). Очевидно, частица воды  $A$ , наиболее близкая к Луне, сместится в её сторону сильнее, чем центр Земли  $T$ , а  $T$ , в свою очередь, — сильнее, чем  $B$ . Поэтому в общем движении

к Луне частицы воды близ точки  $A$  уйдут вперёд по сравнению с твёрдой Землёй, и на этой стороне вода поднимется — здесь будет прилив. Но такой же прилив будет в этот самый момент и на *противоположной* стороне Земли, так как точка  $B$  отстанет от центра почти на столько же, на сколько  $A$  ушла вперёд.

Можно доказать, что под действием лунного притяжения водяная оболочка Земли принимает форму *эллипсоида*, вытянутого по направлению к Луне. Близ точек  $A$  и  $B$  будет прилив, самая «высокая вода»,

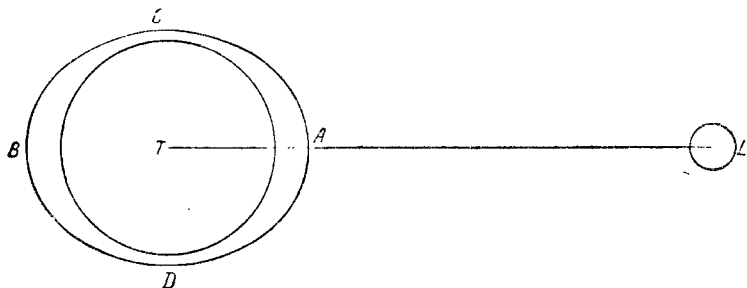


Рис. 73.

а на границе между правым и левым полушариями (например, у точек  $C$  и  $D$ ) — отлив, «низкая вода». Вследствие вращения Земли приливные выступы образуются в каждый следующий момент уже в новых местах земной поверхности. Поэтому в течение одного суточного оборота Луны (24 ч. 50 м.) они обойдут кругом всего земного шара; за это время в каждом месте наступают два прилива и два отлива.

Изложенное рассуждение справедливо не только для водяной, но и для воздушной оболочки Земли, т. е. для земной атмосферы и даже для твёрдого тела Земли: в них также происходят приливы. Атмосферные приливы близ земной поверхности почти незаметны (подобно тому как незаметны морские приливы на дне океанов). Их удаётся обнаружить, лишь изучая изменения атмосферного давления в течение долгих промежутков времени.

Приливы в твёрдом теле Земли наблюдаются с помощью приборов, подобных тем, которые служат для регистрации землетрясений. «Твёрдые» приливы раза в три меньше океанских, но всё же благодаря им точки земной поверхности два раза в сутки поднимаются и опускаются в среднем на несколько дециметров.

Величина приливной силы. Сила, вызывающая прилив, гораздо меньше лунного притяжения. Она, как вообще всякая возмущающая сила, обратно пропорциональна не квадрату, а (приблизительно) *кубу* расстояния (§ 173).

Например, приливные ускорения для  $A$  и  $B$ , т. е. для самой близкой и для самой далёкой от Луны точек Земли, выражаются формулой (12),

выведенной в § 173:

$$g_1 = g_2 = k^2 \frac{2am}{r^3},$$

где  $a$  — радиус Земли, а  $r$  — расстояние Луны от центра Земли.

**§ 185. Приливная волна.** Не следует думать, что образование приливных выступов связано с возникновением морских течений. Движение прилива есть не течение, а *волна*, подобная тем волнам, которые образуются от ветра или брошенного камня. При распространении такой волны плавающий предмет не уносится, а лишь колеблется — то вперёд, то назад, то вверх, то вниз; через определённые промежутки времени (*период* волны) он возвращается к прежнему положению. То же происходит и при приливах.

Самая высокая вода наблюдается, когда через данное место проходит выступ (гребень) приливной волны; когда проходит впадина волны, наступает самая низкая вода. При этом каждая частица воды колеблется по вертикальному и горизонтальному направлениям лишь на незначительную величину, обыкновенно на один-два метра (в открытом океане). Период *приливной волны* гораздо длиннее периода других океанских волн; он равен половине «лунных суток», т. е. 12 ч. 25 м.

**§ 186. Солнечные приливы.** Солнце производит приливы так же, как Луна, но вследствие большого расстояния солнечные приливы в  $2\frac{1}{4}$  раза меньше лунных. Действительно, обозначив массы Солнца и Луны через  $M$  и  $m$ , а расстояния от Земли через  $R$  и  $r$  и опустив постоянный множитель, получим по формуле § 184 для приливных сил выражения:

$$\text{приливная сила Солнца } \frac{M}{R^3}, \text{ приливная сила Луны } \frac{m}{r^3}.$$

Подставим числа:  $M = 330\,000$  масс Земли,  $m = \frac{1}{81}$  массы Земли,  $R = 390\,r$ . Отношение второй силы к первой будет

$$\frac{mR^3}{Mr^3} = \frac{1 \cdot 390^3}{81 \cdot 330\,000} = 2,2 \text{ (приблизительно).}$$

Солнечный прилив отдельно не наблюдается, он только влияет на величину лунных приливов. Во время новолуния и полнолуния (так называемых «сизигий») солнечный и лунный приливы наступают одновременно; действия Луны и Солнца таким образом складываются, и наблюдается самый большой прилив. Напротив, когда Луна в первой или последней четверти (в «квадратурах»), — во время лунного прилива бывает солнечный отлив; действие Солнца вычитается из действия Луны, и прилив выходит наименьшим.

Заметим, что сравнение высот лунного и солнечного приливов даёт простой (но не очень точный) способ определения *массы Луны*.

**§ 187. Сложность приливных явлений.** Из теории § 184 следует, что наибольший прилив должен быть в точках, для которых в дан-

ный момент Луна находится в верхней или нижней кульминации. В действительности же моменты самой высокой воды наступают на несколько часов позже лунных кульминаций. Запаздывание это, называемое *прикладным часом*, достигает иногда 12 часов. Оно объясняется трением частиц воды и различными местными условиями, например, формой морского дна и очертанием берегов, поэтому величина его для разных мест крайне различна.

По тем же причинам и высота прилива в разных местах неодинакова. Во внутренних морях, например, в Чёрном и Балтийском, приливы ничтожны; наоборот, в океанах они очень значительны. Особенно большие приливы бывают в узких бухтах. Один из самых высоких приливов наблюдается в Гижигинской губе (Охотское море), именно 11 м. В одном из заливов Канады прилив достигает 16 м.

Высота прилива изменяется также с изменением склонения и расстояний Солнца и Луны. Таким образом явления приливов в действительности оказываются очень сложными. Тем не менее теория этих явлений доведена до высокого совершенства и позволяет предсказывать с большой точностью время наступления и величину прилива в данной гавани для любого дня на много лет вперёд.

### § 188. Небесные движения, не объясняемые законом тяготения.

Среди множества небесных движений, которые *полностью* соответствуют формулам небесной механики, найдены лишь следующие случаи неполного совпадения между наблюждёнными и вычисленными движениями светил.

а) Отклонения в движении Луны. Сравнение древних наблюдений над затмениями с новыми наблюдениями показало, что теперь Луна движется скорее, чем прежде, и средняя продолжительность звёздного обращения её уменьшается. Это *вековое ускорение* Луны само по себе ничтожно: в сто лет Луна уходит вперёд против вычисленного положения на 10". Но так как влияние ускорения на долготу Луны растёт пропорционально квадрату времени, то в 2000 лет Луна уйдёт вперёд больше чем на градус, т. е. на два своих поперечника. Только часть этого ускорения, приблизительно 6", объясняется теорией тяготения, именно возмущениями планет; остальная доля вызывается, повидимому, какой-то другой причиной.

Предполагают, что разница между вычисленным и действительным ускорениями вызывается *замедлением вращения Земли*, благодаря чему удлиняется наша единица времени — сутки. Нам кажется, что Луна уходит вперёд, между тем как в действительности отстаёт наш счёт времени. Достаточно допустить, что этот счёт времени отстал на 9 сек. в сто лет, чтобы объяснить наблюдаемую разницу. Это замедление земного вращения так ничтожно, что его обнаружили лишь в самое последнее время с помощью кварцевых часов. Причиной удлинения суток является *приливное трение* земных океанов — сила, играющая, вероятно, важную роль в истории нашей планетной системы (гл. XVI).

Кроме векового ускорения, в движении Луны наблюдается ещё одно или два отклонения, не объяснимые законом тяготения. В настоящее время с помощью кварцевых часов доказано, что Земля вращается не строго равномерно. Вследствие изменения (деформации) земного сфероида Земля периодически то ускоряет, то замедляет своё вращение. Следствием неравномерности вращения Земли является колебание в продолжительности единиц времени, и поэтому вычисленное положение Луны может отличаться от действительного на несколько секунд. На ближайшие годы величины этих поправок известны достаточно хорошо, и поэтому определение положения Луны можно предвычислять с удовлетворительной точностью.

б) Движение перигелия Меркурия. Вследствие возмущений направление большой оси орбиты каждой планеты медленно изменяется, и весь эллипс поворачивается вокруг Солнца. В середине XIX в. Леверрье нашёл, что большая ось орбиты Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты, поворачивается приблизительно на  $40''$  в столетие скорее, чем это должно было быть под действием притяжения всех известных планет (§ 175). Леверрье предполагал, что это ускорение вызывается притяжением *неизвестной планеты*, ещё более близкой к Солнцу, чем Меркурий, но такую планету, несмотря на тщательные поиски, не удалось найти.

Потом для объяснения этого неравенства выдвигались другие гипотезы. Все они потеряли значение с появлением общей теории относительности. По новой теории тяготения (§ 167) орбита каждой планеты есть эллипс, но направление его большой оси (долгота перигелия) не остаётся неизменным, а поворачивается, и скорость этого вращения тем больше, чем ближе планета к Солнцу и чем быстрее она движется. Это «эйнштейновское» движение перигелия совершенно не зависит от «ньютоновского», т. е. от возмущений, и наблюдалось бы и в том случае, если бы существовала одна единственная планета. Для Меркурия, самой близкой к Солнцу и самой быстрой планеты, получилось смещение перигелия на  $40''$  в столетие, т. е. как раз та величина, которая даётся наблюдениями; для остальных планет — гораздо меньшие числа, которые пока из наблюдений нельзя определить. Таким образом движение перигелия Меркурия может считаться одним из подтверждений теории относительности.

Ещё один случай отклонения истинного движения от теоретического пайден в движении комет.

### Упражнения к главе VIII

1. По точной формуле третьего закона Кеплера определить приближённую массу Юпитера, приняв массу Солнца за 1, массу Земли за 0,  $T_1 = 4332,6$  суток,  $a_1 = 5,2028$ ,  $T = 365,26$  суток. *Ответ:*  $m_1 = 0,0009$ , т. е.  $1/1100$  (точное значение  $1/1047$ ).

2. Вычислить параболическую скорость на поверхности Солнца, если радиус Солнца  $R = 1/215$  астроном. единиц  $= 696\,000$  км. *Ответ:*  $617$  км/сек.

3. Вычислить параболическую скорость на поверхности Луны ( $R=0,27$  радиуса Земли,  $M=1/81$  массы Земли). *Ответ:* 2,4 км/сек.

4. Доказать, что для тела, описывающего эллиптическую орбиту, наибольшая скорость (в перигелии) относится к наименьшей (в афелии), как наибольшее расстояние от Солнца — к наименьшему.

5. Доказать, что тело, описывающее эллиптическую орбиту с большой полуосью  $a$ , проходит через конец малой оси со скоростью, по величине равной круговой скорости в той же точке. *Указание:* Чему равно расстояние конца малой оси от фокуса?

6. а) Доказать, что среднее геометрическое между наибольшей скоростью движения по эллипсу с большой полуосью  $a$  и наименьшей равно скорости движения по кругу радиуса  $a$ . б) В какой точке орбиты тело имеет такую скорость?

7. Комета 1882 II имеет время обращения  $T=770$  лет и перигельное расстояние 0,0078 астр. ед. Найти: 1) большую полуось, 2) эксцентриситет, 3) скорость в перигелии, 4) скорость в афелии. *Ответ:* В перигелии скорость 476 км/сек, в афелии 22 м/сек.

8. Определить большую полуось, время обращения, эксцентриситет и перигельное расстояние воображаемой кометы, которая на расстоянии 1 астроном. ед. от Солнца имела скорость, по направлению совпадающую с круговой, но по величине в 10 раз меньшую. *Ответ:*  $e=0,99$ ,  $a=0,5025$ ,  $T=0,36$  года,  $q=0,005025$ .

9. Линейные скорости  $v$  планет, обращающихся по кругам, обратно пропорциональны  $\sqrt{r}$  (§ 170, в). Как зависят от  $r$  их секторные скорости?

10. На сколько изменилось бы время обращения Юпитера, если бы масса его сделалась равной нулю (см. упражн. 1)?

11. Во сколько времени обращалась бы Земля вокруг Солнца, если бы масса Солнца была в  $n$  раз больше её современного значения? на одну тысячную долю больше?

12. Третий спутник Юпитера находится от планеты на расстоянии 1 070 000 км и обращается вокруг неё в 7,15 суток. Найти массу Юпитера.

13. Вычислить массу Марса в сравнении с массой Земли по движению его спутника Фобоса, для которого  $a=9300$  км,  $T=0,32$  суток. Соответствующие величины для Луны равны 385 000 км и 27,3 суток. *Ответ:* 0,103 массы Земли.

14. Созвездие Южной Короны имеет приблизительные координаты  $\alpha=18^h$ ;  $\delta=-40^\circ$ ; созвездие Ориона:  $\alpha=6^h$ ;  $\delta=0^\circ$ . Каковы условия видимости этих созвездий в Москве в настоящее время? как изменятся их координаты и условия видимости через 13 000 лет?

15. Луна в апогее на  $1/9$  дальше, чем в перигее. На сколько процентов больше в перигее приливная сила? *Ответ:* На  $370/9$ .

16. Во сколько раз прилив во время сизигий теоретически должен быть больше прилива во время квадратур? *Ответ:* В  $2^{2/3}$  раза.

17. Доказать, что Солнце притягивает Луну приблизительно вдвое сильнее, чем Земля.

18. Как происходили бы явления прилива и отлива, если бы центр тяжести Земли не мог смещаться?



## ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

### СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ФОТОМЕТРИЯ

**§ 189. Спектральный анализ и его значение.** Для изучения движений небесных тел достаточно тех методов и инструментов, которые были описаны в гл. IV. Но они бессильны раскрыть нам природу светил, их химический состав и физические свойства. Долгое время казалось, что эти свойства останутся для нас навсегда неизвестными.

Ещё в 1842 г. французский философ Конт писал: «*Никогда* и ни в каком случае нам не удастся изучить химического состава небесных светил». Но не прошло и двадцати лет, и эта задача была решена благодаря открытию *спектрального анализа*. Этим был нанесён сокрушительный удар идеалистическим «теориям», ставящим границы достижениям человеческого разума и проповедующим «непознаваемость мира».

Новый научный метод быстро сделал громадные успехи и дал такие результаты, о которых не могли и мечтать лет сто назад. Он не только производит химический анализ светил, но определяет также их температуру, измеряет их скорости и расстояния, проникает в глубь не только Солнца, но и далёких солнц-звёзд, исследует движения внутри их огненных масс,— и его завоеваниям почти нет предела.

**§ 190. Свет простой и сложный.** Свет, воспринимаемый нашим глазом, бывает не только разной силы, но и разного *цвета*. Различные цвета происходят от различия *в длине световых волн*, посылаемых источником света, или, что то же самое, от различия *в частоте* световых колебаний. Например, фиолетовый цвет вызывается более быстрыми колебаниями, чем красный, и волны его короче.

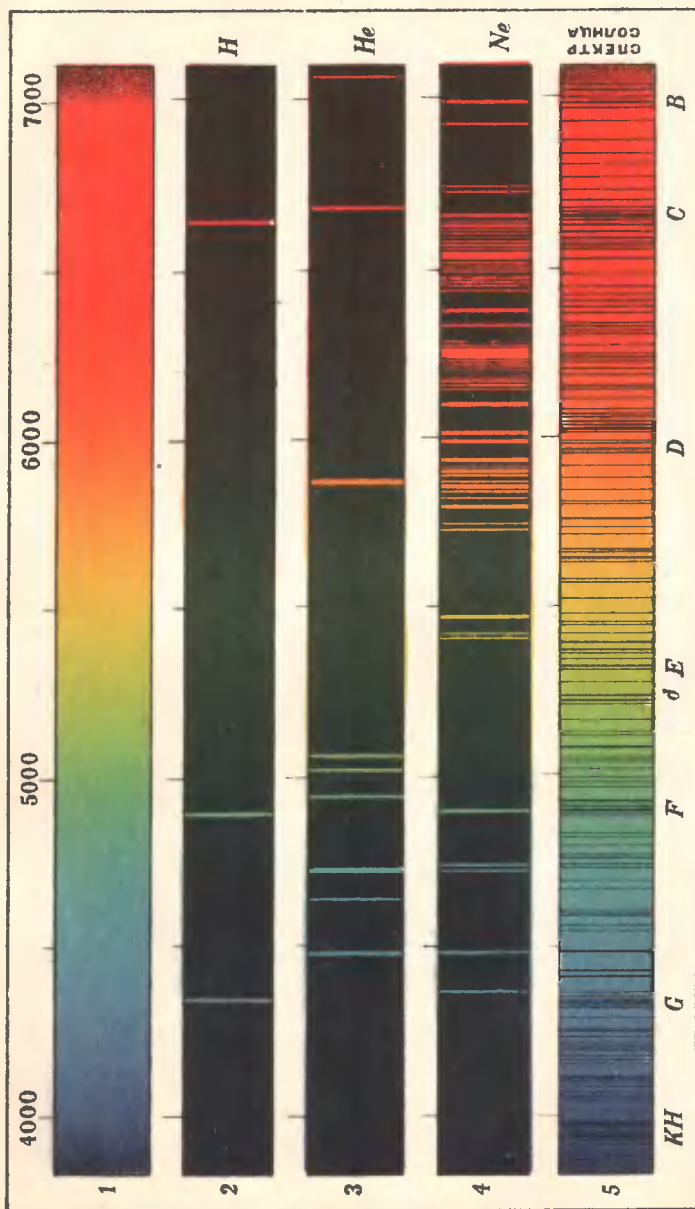
Если источник света посылает  $n$  колебаний в 1 сек., то *период* одного колебания будет, очевидно,

$$T = \frac{1}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  есть *частота* колебаний.

Колебание распространяется со скоростью света  $c$  и в течение одного периода проходит расстояние

$$cT = \lambda. \quad (2)$$



Расстояние  $\lambda$ , пройденное в течение одного периода, называется *длиной волны*. Исключив  $T$ , получаем:

$$n = \frac{c}{\lambda}. \quad (3)$$

Входящая в эту формулу скорость света есть одна из важнейших физических постоянных. Её величина равна

$$c = 299\,776 \text{ км/сек} \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек.}$$

Частота световых колебаний выражается очень большими числами, длина волны, наоборот, — чрезвычайно малыми. Например, для зелёного света  $n$  приблизительно равно  $6 \cdot 10^{14}$  колебаний в 1 сек., откуда получается  $\lambda = 0,00005 \text{ см.}$

Длину волны выражают чаще всего в *ангстремах* ( $\text{\AA}$ ), т. е. в десятиллионных долях миллиметра. Длина волны записывается одним из следующих способов:  $\lambda = 500 \text{ м\mu} = 5000 \text{ \AA}$  или  $\lambda 5000$ . Свет, видимый глазом, имеет длину волны от  $\lambda 8000$  (красный) до  $\lambda 4000$  (фиолетовый).

Если светящееся тело испускает свет только одной определённой длины волн, то такой свет называется простым или *монохроматическим*, и цвет его мы называем *чистым*. Чистые цвета в природе встречаются очень редко. Обычно оказывается, что источник света одновременно посылает световые волны различной длины и частоты. Именно таков *белый свет* Солнца, состоящий из лучей всевозможных оттенков.

**§ 191. Получение спектра.** Простейшим прибором для анализа светового луча является стеклянная *призма*, проходя через которую луч *преломляется*, т. е. отклоняется к основанию треугольника, лежащего в сечении призмы.

Лучи различных цветов преломляются по-разному. Красные лучи отклоняются меньше всего, фиолетовые — сильнее всего. Поэтому, если бросить на призму пучок *белого* света, состоящий из лучей всевозможных цветов, и, следовательно, всевозможной преломляемости, то каждый луч отклонится на свой угол, лучи разойдутся, и белый свет *разложится*. Поставив на пути этого расходящегося пучка лучей белый экран, мы получим на нём *спектр*, т. е. радужную полосу (рис. 74, I), в которой цвета расположены в таком порядке: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый. Для получения чёткого спектра и удобства его изучения применяют ряд приспособлений, главные из которых следующие:

1) Световой луч пропускают через узкую прямоугольную щель, параллельную преломляющему ребру призмы. Спектр в этом случае принимает вид широкой полосы, состоящей из непрерывного ряда изображений щели во всевозможных цветах; чем уже щель, тем цвета чище.

2) Между щелью и призмой помещают ахроматический собирательный объектив так, чтобы щель находилась в его фокусе. Благодаря

этому свет от щели, пройдя сквозь объектив, падает на призму не расходящимся, а параллельным пучком, ширина которого равна длине щели. Экран со щелью и объектив соединяют в одно целое, вставляя их в концы трубы, называемой *коллиматором* (С на рис. 75). К источнику света направлен не объективный конец трубы, а противоположный (со щелью S).

3) Вместо отбрасывания спектра на экран его рассматривают в зрительную трубу или фотографируют. Так как каждый монохро-

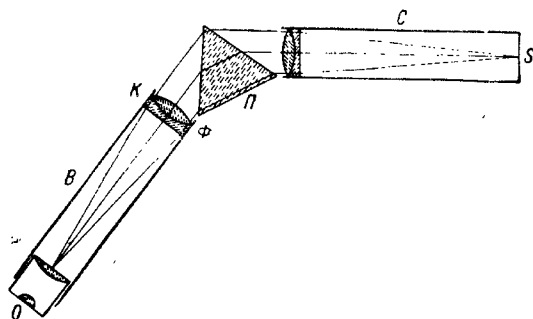


Рис. 75.

матический луч отклоняется призмой на угол, зависящий от длины его волны, то, обратно, по отклонению луча, т. е. по его положению в спектре, можно определить *длину волны*, соответствующей любой точке спектра. Это обстоятельство имеет большую важность.

**§ 192. Спектр плотных тел (непрерывный).** Всякое твёрдое тело, нагретое до белого каления или расплавленное до огненно-жидкого состояния, а также толстый слой сильно нагретого раскалённого газа, испускают световые волны всевозможной длины и дают поэтому *сплошной*, или *непрерывный* спектр (рис. 74, 1). Эта полоса имеет ширину, равную длине щели; она состоит, в сущности, из *бесконечного множества* изображений щели во всевозможных цветах, расположенных одно возле другого. Вид такого спектра остаётся совершенно одинаковым, какой бы металл или минерал мы ни взяли. Следовательно, *определить состав* раскалённого твёрдого или жидкого тела, а также сильно сжатого газа по виду его спектра *невозможно*.

**§ 193. Спектр излучения разрежённых паров и газов (линейчатый и полосчатый спектры).** Раскалённые разрежённые газы, а также пары, получаемые из твёрдых и жидких веществ при сильном нагревании, излучают не все лучи сплошного спектра, а лишь немногие. Пройдя через призму, эти лучи различно преломляются и дают на экране несколько отдельных изображений щели в разных цветах. Спектр будет состоять из нескольких *ярких линий* на тёмном фоне. Чем уже щель, тем линии будут тоньше (рис. 74, 2, 3, 4).

Каждый элемент в газообразном состоянии имеет свой особый линейчатый спектр, так что по виду спектра можно определить *химический состав* источника света. Например, пары натрия дают спектр, состоящий из яркой двойной жёлтой линии, имеющей всегда одну и ту же длину волны ( $\lambda 5890$  и  $\lambda 5896$ ); гелий даёт 12 линий, водород — 7 линий, из которых 3 чётко выделяются. Другие элементы имеют более сложные спектры. Так, спектр паров железа состоит из нескольких тысяч линий всех цветов. Если вещество *сложное*, т. е. представляет собой химическое соединение нескольких элементов, то при высокой температуре соединение обыкновенно *разлагается*, и в спектре видны попеременно линии всех элементов данного вещества. Если же соединение *не разлагается*, то оно даёт свой особый спектр, так называемый *полосчатый*, ряд широких цветных полос на тёмном фоне. Каждая полоса состоит из множества светлых линий, стоящих очень близко друг к другу. Таковы, например, спектры углеводородов; они не похожи ни на спектр углерода, ни на спектр водорода.

Если точные положения спектральных линий всех элементов известны, то можно, измерив длины волн линий спектра какого-нибудь вещества, определить все элементы, из которых составлено данное вещество, — другими словами, произвести его *анализ*. Этот метод *спектрального анализа* играет в химии громадную роль и отличается необычайной чувствительностью. Он привёл к открытию целого ряда новых химических элементов.

Важность этого метода состоит в том, что успех анализа не зависит от расстояния исследуемого вещества: находится ли оно в лаборатории или на звезде — это безразлично, лишь бы только свет его был достаточно силен для спектрального исследования.

**§ 194. Спектр поглощения.** Спектры Солнца и звёзд не принадлежат ни к тому, ни к другому классу спектров, а составляют третий, особый тип: на фоне яркого спектра видны многочисленные тёмные линии (рис. 74, 5). Эти линии называются *фраунгоферовыми* в честь физика Фраунгера, который впервые их исследовал (1815 г.). Особенно резкие линии солнечного спектра называли латинскими буквами (рис. 74, 5).

Было замечено, что многие тёмные линии солнечного спектра стоят на тех же местах, что и светлые линии в линейчатых спектрах. Например, в жёлтой части солнечного спектра имеется очень заметная двойная тёмная линия *D*, совпадающая по положению с яркой жёлтой линией натрия, т. е. соответствующая длине волны  $\lambda 5890$  и  $\lambda 5896$  (§ 193).

**§ 195. Открытие Кирхгофа.** Объяснение солнечного спектра удалось найти физiku Кирхгофу в 1858 г. Перед спектроскопом он поместил спиртовую горелку, в слабо светящееся пламя которой подбрасывалась поваренная соль (хлористый натрий), так что в спектроскопе появилась *яркая* жёлтая линия натрия. Позади натриевого

пламени он поставил более яркий и более горячий источник света, который сам по себе давал совершенно *сплошной спектр*, именно, так называемый друммондов свет (кусоч извести, накали́нный добела в струе гремучего газа). Таким образом, свет раскалённой извести попадал в спектроскоп, пройдя сквозь натриевое пламя, тоже светящееся, но более слабо. Пока это пламя горело одно, в спектроскопе была видна только яркая жёлтая линия; когда же позади был зажжён ещё друммондов свет, то в спектроскопе появился яркий сплошной спектр, а на том месте, где только что была видна блестящая жёлтая линия, оказалась *тёмная линия*, совершенно такая же, как фраунгоферова линия *D*.

Повторив этот опыт с парами железа, дающими очень сложный спектр, и получив опять такое же превращение светлых линий в тёмные, Кирхгоф объяснил открытое им явление как следствие нового физического закона, названного его именем:

*Если свет от источника, дающего сплошной спектр, проходит сквозь слой более холодного газа (или пара), то газ поглощает из всех лучей спектра только те лучи, которые он сам испускает в раскалённом состоянии.* Так, например, натрий, посылающий только жёлтые лучи определённой длины волны, из всех лучей сплошного спектра задерживает именно жёлтые и пропускает все остальные. По этому в жёлтой части спектра получается тёмный промежуток в виде узкой двойной линии. Такое поглощение света называется *избирательным* поглощением.

Спектр поглощения, таким образом, есть спектр раскалённого *твёрдого* или *жидкого* тела или *сильно сжатого газа*, лучи от которого проходят *сквозь разрежённый газ*, имеющий более низкую температуру. Так как газ поглощает все лучи, которые он сам испускает, то на фоне сплошного спектра появится полный спектр газа; но это не будет уже спектр из ярких линий (спектр *излучения*), а спектр *поглощения*, состоящий из тёмных линий, по положению и интенсивности совершенно тождественных с линиями первого спектра.

**§ 196. Химический анализ светил.** Так как спектры Солнца и звёзд являются спектрами поглощения, то очевидно, что раскалённое тело светила окутано газовой оболочкой, атмосферой, в которой и образуются фраунгоферовы линии. Измеряя положение тёмных линий и сравнивая их с известными линиями земных элементов, можно определить *химический состав атмосфер* этих светил.

**§ 197. Смещение линий и лучевые скорости.** Большим успехом спектроскопии явилось её применение к измерению скорости *движений* светил и притом таких движений, которые совершенно невозможно заметить никакими другими методами. Именно спектральные наблюдения позволяют определить *скорость по лучу зрения*, т. е. скорость, с которой звезда или приближается к нам или удаляется. Измерение этой скорости основано на так называемом принципе Доплера. Этот принцип был сформулирован в 1847 г., но вызывал возражения у западно-

европейских теоретиков и был окончательно доказан лабораторными опытами А. А. Белопольского в Пулковке в 1900 г.

Представим себе, что мы наблюдаем спектр двух светил  $A$  и  $B$ , из которых первое неподвижно относительно Земли, а другое *приближается* к нам с очень большой скоростью. Примем для простоты, что спектр каждого светила состоит всего только из одной яркой линии, например, жёлтой линии натрия. Вследствие приближения светила  $B$  к нам, в наш глаз в каждую секунду попадает больше световых волн от  $B$ , чем от неподвижного светила  $A$ , промежутки между следующими одна за другой волнами выходят меньше, и, следовательно, частота волн больше, чем у  $A$ . Но свет с большей частотой колебаний, чем у натревой линии, должен иметь другой цвет, чем эта жёлтая линия, более зеленоватый, и единственная линия его спектра будет, таким образом, несколько сдвинута в сторону более коротких волн, т. е. к *фиолетовому концу*. Смещение будет тем больше, чем быстрее скорость звезды по «лучу зрения», т. е. по прямой, проведённой к светилу от наблюдателя. Измерив это смещение и зная скорость света, легко вычислить «лучевую скорость» звезды.

Если светило *удаляется* от нас, то спектральная линия будет казаться сдвинутой *к красному концу* спектра по сравнению с её нормальным положением, определённым по измерению спектров в земных лабораториях.

Рассуждение это не изменится, если в спектре будет сколько угодно линий и если это будут линии не излучения, а поглощения, т. е. тёмные на сплошном спектре; все они сдвинуты в ту или другую сторону, смотря по направлению лучевой скорости.

Помня, что частота колебаний  $n$  связана с длиной волны  $\lambda$  простым соотношением  $n = \frac{c}{\lambda}$  (§ 190), можем выразить величину смещения формулой:

$$\lambda' - \lambda = \frac{v}{c} \lambda, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — длина волны от неподвижного источника света,  $\lambda'$  — длина волны, изменённая вследствие движения светила по лучу зрения,  $v$  — скорость светила,  $c$  — скорость света.

#### Вывод формулы Доплера-Белопольского

Пусть источник света движется от нас со скоростью  $v$  и посылает  $n$  волн в течение 1 сек. Первая из этих волн доходит до нас с расстояния  $d$ , последняя — с расстояния  $d + v$ ; следовательно, первая доходит до нас в течение  $d/c$  сек., а вторая в  $(d + v)/c$  сек., т. е. опаздывает на  $v/c$  сек. Таким образом наблюдатель получит  $n$  колебаний не в течение 1 сек., а в течение  $1 + v/c$  сек. Частота колебаний (т. е. число их в 1 сек.) будет

$$n' = \frac{n}{1 + v/c};$$

соответствующая новая длина волны будет

$$\lambda' = \frac{c}{n'} = \frac{c(1 + v/c)}{n} = \frac{c}{n} + \frac{v}{n}.$$

Заменяя  $n$  через  $\frac{c}{\lambda}$  [по формуле (3) § 190], получим формулу (4). Для случая приближения светила скорость  $v$  берётся отрицательной.

Смещение спектральных линий, вызываемое движением по лучу зрения, крайне незначительно, так как скорости небесных тел  $v$  невелики в сравнении со скоростью света ( $c \approx 300\,000$  км/сек). Поэтому точное измерение лучевых скоростей стало возможным только после того, как звёздные спектры стали фотографировать.

**§ 198. Гравитационное смещение.** Одним из следствий общей теории относительности является вывод, что свойства света, излучаемого каким-нибудь источником, зависят от силы *тяжести*. Вообразим себе, что источник монохроматического света, посылающий на Земле определённое число колебаний в 1 сек., перенесён на другое небесное тело, где ускорение силы тяжести больше. Тогда световые колебания, по теории относительности, несколько замедлятся, и длина волны соответственно этому увеличится. Это вызовет смещение спектральных линий к *красному* концу спектра; величину смещения легко вычислить, если известно ускорение силы тяжести на поверхности светила.

Даже на Солнце это смещение ничтожно и обнаружено наблюдениями лишь с большим трудом. Но существуют звёзды, гораздо более плотные, чем Солнце, и на них сила тяжести должна быть чрезвычайно велика. Когда удалось сфотографировать спектр такой звезды (спутника Спирюса, § 298), то линии её спектра оказались заметно смещёнными к красному концу и притом как раз на ту величину, которая была заранее предсказана теорией относительности.

**§ 199. Спектр и физические свойства светила.** По виду спектра светила можно сделать заключение не только о его химическом составе, но и о некоторых физических свойствах.

а) Лабораторные опыты показывают, что с увеличением давления линии газа делаются шире, и в спектре, кроме того, появляются новые линии. Таким образом спектр может дать нам представление о *давлении* в атмосфере звезды и о *толщине* этой атмосферы.

б) Ещё сильнее изменяется линейчатый спектр газа при изменении *температуры*. При температурах в несколько тысяч градусов атомы подвергаются *ионизации*, т. е. теряют часть своих электронов. Поэтому ионизованный атом излучает световые волны иначе, чем нормальный, или, как обыкновенно говорят, «нейтральный» атом того же элемента, и спектр его меняется: в нём появляются очень тонкие линии, которые называются *искровыми*. Нейтральный же элемент даёт спектр из *дуговых* линий, т. е. из линий спектра электрической дуги имеющей более низкую температуру. Ионизация раскалённого газа тем сильнее (т. е. тем больший процент его атомов ионизован), чем выше температура и чем *меньше давление*. Разные элементы ионизируются неодинаково, труднее всего — при самых высоких температурах — гелий и водород. Таким образом теория ионизации объясняет многие особенности звёздных спектров.



в) По виду спектра можно заключить о *магнитных*, а также и об *электрических силах*, действующих на небесных телах. Из физики известно, что спектральные линии «расщепляются», если поместить источник света в сильное магнитное поле («явление Зеемана»). Притом, если луч идёт *параллельно* силовым линиям магнитного поля, то спектральные линии раздвигаются, получаются «дублеты»; если же направление луча *перпендикулярно* силовым линиям, то линии превращаются в «*триплеты*». Всё это и обнаружено, как увидим дальше, в спектрах Солнца и звёзд.

**§ 200. Спектральные приборы.** а) Объективная призма. Перед объективом рефрактора устанавливается призма. Если бы её не было, то каждая звезда дала бы в фокусе объектива изображение в виде точки, в которой сошлись бы лучи различной преломляемости. Но благодаря действию призмы лучи эти отклоняются к основанию призмы под различными углами, в зависимости от длины волны. Объектив, собирая лучи в фокусе, для лучей каждого цвета даёт изображение в другом месте, и изображение звезды получится в виде радужной тонкой чёрточки. С помощью простого приспособления чёрточку можно расширить, не изменяя её длины, и она превратится в широкую полосу — спектр. Спектр этот прежде рассматривали в лупу (окуляр); теперь же его обычно фотографируют, помещая пластинку в фокусе объектива.

Этот прибор удобен тем, что даёт сразу спектры всех звёзд в поле зрения трубы. Но для детального изучения спектра отдельных светил он недостаточен.

б) Сложный спектроскоп (см. рис. 75) устроен в общем так же, как спектроскопы физических лабораторий. Он состоит из коллиматора *С*, призмы *П* (или нескольких призм, или так называемой дифракционной решётки) и наблюдательной трубы *В* с объективом и окуляром *О*. Весь аппарат приставляется к телескопу так, чтобы щель коллиматора *С* приходилась в фокусе объектива трубы. На щели получается изображение звезды. Так как щель помещается и в фокусе объектива коллиматора, то пройдя этот объектив, лучи от щели падают на призму параллельным пучком, как бы с бесконечно далёкого расстояния. Дальше действие трубы *В* такое же, как в предыдущем случае (объективной призмы): в фокусе её объектива получается изображение спектра, которое для светила, имеющего диск, например Солнца, имеет вид более или менее широкой ленты; для звёзд же спектр получается в виде тонкой линии. Этот спектр можно или рассматривать в окуляр, или же фотографировать. В настоящее время применяется почти исключительно фотографирование, так что все спектральные аппараты современной астрономии в сущности не спектроскопы, а *спектрографы*.

Современные спектрографы доведены до высокого совершенства. Придуманы особые приспособления, чтобы в течение нескольких часов фотографирования изображение звезды всё время оставалось на

щели, ширина которой меньше 0,1 мм. Затем принимают меры к тому, чтобы в течение всей съёмки температура прибора не изменялась даже на  $0^{\circ},1$ , иначе линии спектра на пластинке «смажутся». Ценой этих ухищрений добыты поразительные результаты, о которых речь будет дальше.

**§ 201. Фотометрия светил.** Мы можем не только анализировать свет, посылаемый к нам светилом, *но и измерять* его силу, т. е. яркость света. Отдел астрономии, изучающий яркость светил, называется фотометрией небесных тел, или *астрофотометрией*, а приборы, служащие для этой цели, — *фотометрами*. Мы коснёмся только главнейших методов и приборов этого важного и быстро развивающегося отдела науки.

а) Фотометры с ослаблением света. Все приборы этого рода устроены так, что наблюдатель видит в поле зрения трубы рядом со звездой, яркость которой он желает определить, ещё и «звезду сравнения», обыкновенно *искусственную*, получаемую, например, от света электрической лампочки. Наблюдение состоит в том, что свет искусственной звезды ослабляют до тех пор, пока яркость её не станет одинакова с яркостью настоящей звезды; величина этого ослабления точно измеряется, для чего существует несколько способов. По величине ослабления искусственной звезды и вычисляется яркость наблюдаемой звезды. Во всех инструментах этого рода измерителем света является в сущности наш глаз: он решает вопрос, одинакова ли яркость обеих сравниваемых звёзд. Поэтому очень точные измерения этим способом невозможны.

Строго говоря, при сравнении двух точечных источников света мы определяем не их яркость. В физике под термином «яркость» подразумевается количество световой энергии, излучаемой светящимся объектом с единицы его поверхности в одну секунду. С помощью же фотометров (или без них, при наблюдениях простым глазом) мы оцениваем освещённость, создаваемую светилом и искусственной звездой на сетчатке нашего глаза. Во избежание путаницы в терминологии эту освещённость теперь принято называть *блеском* светила (а не видимой яркостью, — термин, который можно встретить во многих книгах). В дальнейшем изложении мы будем пользоваться термином «блеск».

б) Фотометры с «искусственным глазом». В XX столетии были построены приборы, более чувствительные к колебаниям яркости падающего на них света, чем человеческий глаз. Оказалось, что при освещении некоторых металлов (селена, калия и др.) возникают различные электрические явления, интенсивность которых находится в правильной зависимости от количества падающего света. Эти свойства и пользуются в фотометрии. Раньше всего были построены *селеновые* фотометры, основанные на том, что металл селен, включённый в электрическую цепь, в темноте почти не проводит тока, а при освещении его *сопротивление* резко падает, и ток появляется.

В настоящее время более распространены *фотоэлектрические* фотометры. Они основаны на следующем явлении фотоэлектрического тока (фототока), открытого русским физиком А. Г. Столетовым (1890 г.): пластинка из калия (или из другого «щелочного» металла), заряженная отрицательным электричеством, быстро теряет свой заряд, если её осветить. Если же её соединить проводом с другой металлической пластинкой, то по проводу при освещении пойдёт ток. Наблюдение с фотометрами обоих типов состоит в том, что небольшую пластинку одного из металлов («селеновый элемент» в одном способе и «фотоэлектрический элемент» — в другом) помещают в фокусе большого рефрактора так, чтобы на неё падало изображение звезды; появляющиеся при этом электрические явления измеряют лабораторными приборами.

С помощью подобного же фотоэлемента производится описанная выше автоматическая регистрация моментов прохождений звёзд через меридиан (§ 82, метод Н. Н. Павлова).

в) Фотографическая фотометрия. В фотометрии, как и в других отделах астрономии, фотографические методы с каждым годом получают всё большее распространение. На фотографическом негативе звёзды выходят кружками разного размера и разной черноты: чем ярче звезда, тем больше диаметр её изображения и тем оно темнее. Поэтому блеск звезды можно вычислить как по измерению диаметра кружка, так и по определению степени его почернения. В настоящее время применяется большей частью второй способ; для измерения степени почернения пластинки употребляются приборы, называемые *микрофотометрами*.

Заметим, что результаты фотографической фотометрии часто расходятся с величинами, определёнными глазом (так называемыми «визуальными»), так как красные звёзды на фотографической пластинке выходят гораздо слабее, чем белые звёзды такого же визуального блеска.

Сейчас в астрономии широко применяются специальные фотопластинки, чувствительные к лучам различной длины волны, вплоть до инфракрасных лучей, расположенных за красной частью спектра и невидимых глазом. Такие чувствительные пластинки называются *сенситизированными*.

---

## ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

### СОЛНЦЕ

**§ 202.** Солнце есть центральное тело планетной системы. Так как размеры и масса его огромны в сравнении даже с самыми большими из планет, то его могучее притяжение является главной силой, управляющей движениями мировых тел нашей системы. Ещё важнее то, что Солнце представляет собой колоссальный источник энергии, непрерывно посылающий по всем направлениям громадные количества тепла и света. Та ничтожная часть излучаемой Солнцем энергии, которая попадает на Землю, создаёт и поддерживает всю жизнь на её поверхности.

По своей же роли во вселенной Солнце есть просто звезда, такая же, как миллионы других. Мы знаем теперь много звёзд, которые гораздо больше и ярче Солнца.

**§ 203. Расстояние, размеры и масса Солнца.** Среднее расстояние Солнца от Земли, или так называемая астрономическая единица (§ 119), составляет 149,5 миллиона км (если принять параллакс Солнца в  $8''.80$ ). Вследствие эллиптичности земной орбиты в перигелии (в январе) это расстояние бывает на  $2\frac{1}{2}$  млн. км меньше, в афелии (в июле) — на столько же больше. В сравнении с земными расстояниями расстояние Солнца громадно. Оно почти в 400 раз больше расстояния Луны. Свет проходит его в 8 м. 18 с. (почти в 500 секунд).

Зная расстояние или параллакс Солнца, легко вычислить его истинный диаметр по видимому угловому диаметру, который составляет несколько более  $\frac{1}{2}^\circ$ , или, точнее,  $31'59''.3$ . Отсюда средний угловой радиус будет  $\rho = 15'59''.6 = 959''.6$ .

Подставив эту величину и значение солнечного параллакса  $8''.80$  в формулу (4) § 113, получим для линейного радиуса Солнца ( $R_\odot$ ):

$$R_\odot = \frac{959''.6}{8''.80} R = 109,1R,$$

где  $R$  — радиус Земли.

Следовательно, в круглых числах диаметр Солнца в 109 раз больше диаметра Земли и составляет почти 1 400 000 км. Если вообразить, что Земля находится в центре пустого шара величиной с Солнце, то Луна пришлась бы внутри этого шара, на расстоянии от центра лишь немногим больше половины его радиуса. Объём Солнца больше объёма Земли в  $(109)^3$  раз, т. е. приблизительно в 1 306 000 раз.

Если бы Солнце имело такую же плотность, как Земля, то его масса превышала бы массу Земли в 1 306 000 раз. Но масса Солнца больше массы Земли в 330 000 раз (§ 178). Следовательно, плотность его равна  $330\,000:1\,306\,000 = 0,256$ , т. е. лишь немногим больше  $\frac{1}{4}$  плотности Земли. По отношению к воде плотность Солнца составит 1,4. Такая малая плотность свидетельствует о том, что Солнце — *не твёрдое тело*.

*Сила тяжести* (т. е. сила притяжения Солнца) на его *поверхности* в сравнении с силой тяжести на Земле составляет  $330\,000:(109,1)^2 = 27,9$ .

**§ 204. Общий вид и яркость Солнца.** Солнце является самым сильным источником света из всех, какими только пользуется человек.

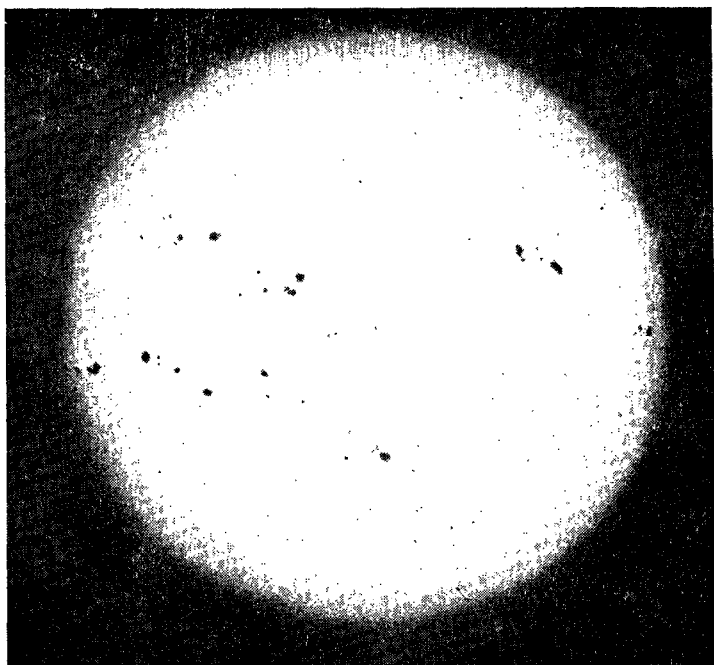


Рис. 76.

Блеск его поверхности в 10 раз ярче самого яркого места в электрической дуге (другими словами, если бы вся поверхность Солнца имела такую же яркость, как эта точка электрической дуги, то Солнце посылало бы нам в 10 раз меньше света, чем посылает на самом деле).

В сравнении с полной Луной Солнце ярче приблизительно в *пятьсот тысяч* раз. Этот результат получен несколькими, вполне надёжными фотометрическими способами (§ 281), одним из которых

является оригинальный способ проф. Московского университета В. К. Цераского, применённый им в 1881 г.

Не весь солнечный диск имеет одинаковую яркость. Самые простые наблюдения показывают, что он ярче всего в центре и что яркость равномерно убывает к краям (рис. 76). Это *потемнение краёв* солнечного диска является первым указанием на то, что видимый нами яркий шар Солнца окружён *атмосферой*, производящей заметное поглощение света. Хотя толщина этой атмосферы встуду одинакова, но лучи, идущие к нам от краёв Солнца, пронизывают атмосферу под очень малым углом к поверхности, проходят внутри атмосферы более длинный путь, чем лучи от центра диска, и претерпевают поэтому более сильное поглощение.

Громадное количество тепла и света, излучаемое Солнцем, затрудняет его наблюдения. Прямо смотреть на него в телескоп нельзя ни в коем случае: можно мгновенно погубить зрение. При слабых инструментах навинчивают на окуляр густое тёмное стекло, при более сильных — этого недостаточно, и для ослабления света употребляют более сложные приспособления (геллиоскопические окуляры).

**§ 205. Вращение Солнца.** Наблюдения над пятнами, которые постоянно появляются на солнечном диске, показали, что Солнце вращается около оси с востока на запад (если смотреть с Земли), т. е. в том же направлении, что и Земля (с запада на восток). Ось вращения не перпендикулярна к плоскости эклиптики, а образует с перпендикуляром к этой плоскости угол около  $7^\circ$ . Время одного оборота составляет 25,2 суток. Это — *звёздное* вращение Солнца, как оно представлялось бы для неподвижного наблюдателя. Но так как Земля сама движется по своей орбите в ту же сторону, то за время одного звёздного оборота она уйдёт вперёд, и Солнце должно повернуться ещё на некоторый угол, чтобы прежнее пятно опять было обращено к Земле. Поэтому *синодическое*, наблюдаемое с Земли, время вращения Солнца несколько длиннее и составляет 27 суток с небольшим. Звёздное вращение Солнца вычисляется по наблюдаемому синодическому с помощью уравнения синодического движения (§ 127).

Вращение Солнца резко отличается от вращения Земли. Все точки земной поверхности описывают полный оборот в одно и то же время; понятно, что *твёрдый* шар иначе вращаться не может. Между тем различные точки солнечной поверхности вращаются около оси в разное время. Быстрее всего обращаются экваториальные точки, делающие полный оборот в 25 суток; все остальные точки отстают от них.

Чем дальше от экватора, тем больше время обращения, и под широтой  $40^\circ$  оно составляет уже 27,2 суток. Так как пятна выше этих широт не появляются, то телескопическими наблюдениями определить вращение близких к полюсу областей невозможно. Но, наблюдая спектральные линии восточного и западного краёв диска, можно по принципу Доплера-Белопольского (§ 197) измерить скорость, с кото-

рой точки солнечного края приближаются или удаляются от нас. Такие наблюдения, проведённые главным образом в Пулковской обсерватории академиком А. А. Белопольским и его сотрудниками, показали, что замедление вращения продолжается и дальше. Под широтой  $80^\circ$  время обращения доходит до 34 суток. Тело, вращающееся таким образом, не может быть твёрдым, а его высокая температура (§ 220) не позволяет признать его жидким.

**§ 206. Солнце — газовый шар.** Исследованиями установлено, что Солнце — шар из раскалённых газов. Некоторые свойства этого шара можно сопоставить со свойствами нашей атмосферы, хотя последняя имеет низкую температуру.

1) Солнце, подобно нашей атмосфере, не имеет резко ограниченной поверхности.

2) В раскалённой газовой массе Солнца различают несколько концентрических оболочек с разными физическими свойствами (фотосфера, хромосфера, корона). Подобную же *слоистость* имеет и земная атмосфера (тропосфера, стратосфера и др.).

3) Газовые оболочки Солнца в значительной степени *прозрачны*, благодаря чему можно наблюдать явления, происходящие в различных слоях Солнца. Самая глубокая оболочка, дальше которой наши инструменты пока ещё не могут проникнуть в раскалённую массу Солнца, получила название *фотосферы*.

**§ 207. Фотосфера.** Ослепительно блестящая поверхность Солнца называется *фотосферой*, т. е. сферой света. При рассматривании в сильный телескоп, или на фотографии, она оказывается неоднородной, обнаруживает зернистое строение, иначе называемое *грануляцией* (рис. 77). На сравнительно тёмном фоне расположены в беспорядке светлые пятнышки, «гранулы», неправильной, большей частью продолговатой формы, которые сравнивают с «рисовыми зёрнами». Их истинные размеры от 200 до 1000 км.

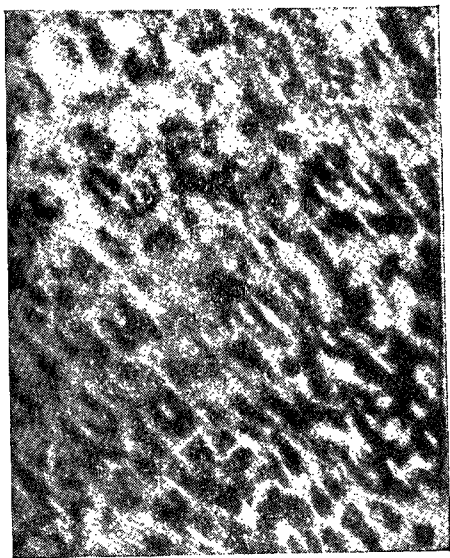


Рис. 77.

Частые моментальные снимки фотосферы показали, что гранулы беспорядочно передвигаются со скоростями в несколько километров в секунду и изменяют свою форму так быстро, что на снимках,

сделанных больше чем через 2 минуты, их уже нельзя отождествить.

У краёв солнечного диска фотосферы кажется более тёмной; поэтому здесь легко бросаются в глаза так называемые *факелы* — неправильные полосы *большей* яркости, чем окружающая поверхность фотосферы. Факелы значительно выше фотосферы. Этим объясняется их видимость у краёв диска: солнечная атмосфера у краёв диска поглощает больше света, чем в центре, по той же причине, по которой земная атмосфера поглощает больше у горизонта, чем в зените; факелы же поднимаются, как горы, над более плотными слоями атмосферы и сохраняют поэтому почти весь свой блеск.

Природа фотосферы. Фотосфера сама по себе излучает чистый сплошной спектр. Однако она не может быть ни твёрдой, ни жидкой. Вследствие высокой температуры (около  $6000^{\circ}$ ) она находится целиком в газообразном состоянии и состоит из раскалённых паров всевозможных химических элементов. Эти пары поднимаются из недр Солнца приблизительно по радиальным потокам, вершины которых видны нам как гранулы.

Блеск, непрозрачность и сплошной спектр фотосферы в настоящее время объясняются тем, что газы, составляющие её, *ионизованы* (см. § 220).

Так как спектр фотосферы сплошной, то спектральный анализ не в состоянии определить её химического состава (§ 192), и последний определяется косвенным путём.

#### § 208. Солнечные пятна.

Тёмные пятна являются самыми заметными образованиями на фотосфере. Их видели китайские и русские наблюдатели ещё до изобретения зрительной трубы, о чём имеются соответствующие записи в летописях.

Вполне развившееся пятно (рис. 78) состоит из тёмного центрального *ядра*, или *тени*, приблизительно круглой формы и более светлой каймы кругом него, так называемой *полутени*. При сильных увеличениях полутень подобно остальной фотосфере обнаруживает

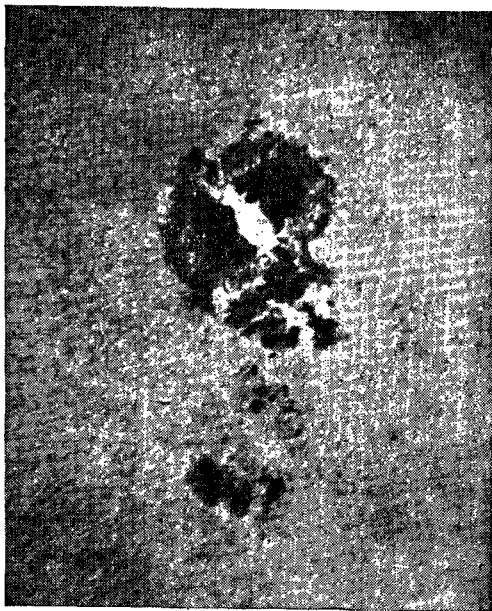


Рис. 78.



зернистое строение, но «зёрна», полутени имеют вид продолговатых «волокон», то направленных в виде лучей в разные стороны от ядра, то искривлённых различным образом. Ядро кажется обыкновенно совершенно чёрным, но это происходит только вследствие контраста с яркой фотосферой. В действительности ядра пятен तुго-склее остальной поверхности фотосферы самое большее в три раза. Если бы всё Солнце, находясь близ зенита, сплошь покрылось пятнами, то его общая яркость ослабела бы лишь на столько, на сколько она слабеет (от поглощения земной атмосферой) на высоте  $8-10^\circ$  над горизонтом.

Образование пятен. Пятна не постоянны; они то появляются, то исчезают. Большею частью они появляются группами. Образование такой группы начинается с появления в фотосфере маленьких тёмных точек («поры»), часто окружённых факелами. Из этих «пор» развиваются затем обычно *два* больших пятна, промежутки между которыми заполнены множеством более мелких пятен. Замечательно, что «переднее» (западное) пятно группы имеет более быстрое движение, так что группа с течением времени растягивается. Большей частью «заднее» пятно (восточное) скоро начинает делиться на части (рис. 78) и исчезает, а переднее может оставаться ещё в течение нескольких месяцев.

Время существования пятна составляет в среднем 2—3 месяца. У разных пятен оно крайне различно: от 1 дня до года и больше.

Размеры пятен также чрезвычайно разнообразны. Иногда наблюдаются пятна свыше 100 000 км в поперечнике, т. е. в 8—10 раз больше земного диаметра. Если иметь в виду, что такие пятна появляются и исчезают в немногие дни и даже часов, то можно получить представление о грандиозности переворотов, разыгрывающихся на Солнце. Пятна таких размеров легко видны простым глазом (например, при восходе или заходе Солнца).

Распределение пятен по солнечной поверхности весьма неравномерно. Они появляются только в экваториальной полосе Солнца, приблизительно до  $30^\circ$  северной и южной широт, изредка наблюдаются также между  $30$  и  $45^\circ$ , а за  $45$ -й параллелью не появляются совершенно. Пятна перемещаются по солнечной поверхности, но эти существенные перемещения пятен незначительны и хаотичны.

**§ 209. Природа солнечных пятен.** Солнечные пятна представляются собой углубления в фотосфере, имеющие большею частью форму воронки. Тень пятна — дно воронки, полутень — её бока. Это называется так называемым явлением Вильсона (рис. 79). Именно, когда пятно приблизительно круглой формы находится близ середины диска, ядро занимает внутри полутени центральное положение; когда же пятно приближается к краю диска и вследствие перспективы принимает эллиптическую форму, то та часть полутени, которая ближе к центру Солнца, делается всё уже и в конце концов совершенно исчезает,

Это и указывает, что пятно — углубление, имеющее примерно форму воронки.

Спектральные наблюдения обнаружили в ядрах пятен восходящие токи газов со скоростями  $1-2 \text{ км/сек}$ , а в полутени — движение газов преимущественно от центра

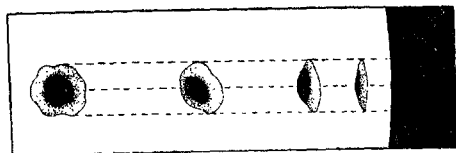


Рис. 79.

к периферии. Поэтому в настоящее время полагают, что из недр Солнца всё время поднимаются массы раскалённых газов, расширяются, охлаждаются и, растекаясь по фотосфере, образуют тень

(ядро) пятна. Следовательно, пятна вызываются громадными вихревыми движениями, напоминающими циклоны земной атмосферы. Это подтверждается наблюдениями. Фотографии, полученные с помощью спектрогелиографа (спектрогелиограммы, § 217), ясно показывают движение масс раскалённого водорода над пятнами и во многих случаях — вихревые движения газов, причём в центре вихря находится пятно (рис. 80).

**§ 210. Магнетизм пятен; рабочая гипотеза Хэла.** В 1908 г. было доказано, что вокруг солнечных пятен существует магнитное поле, присутствие которого обнаруживается расщеплением линий в спектрах пятен (§ 199, в). Расщепление оказалось различным, смотря по тому, находится ли пятно в центре диска или у края Солнца.

Это означает, что силовые линии магнитного поля (по крайней мере в центральной части пятна) направлены в общем перпендикулярно к солнечной поверхности. Таким образом, если пятно находится близ центра диска, то линии его магнитного поля идут по лучу зрения, и в спектре мы видим раздвоение линий. Наоборот, у края Солнца магнитное поле перпендикулярно к лучу зрения, и спектральные линии делятся по этому на три составляющих.

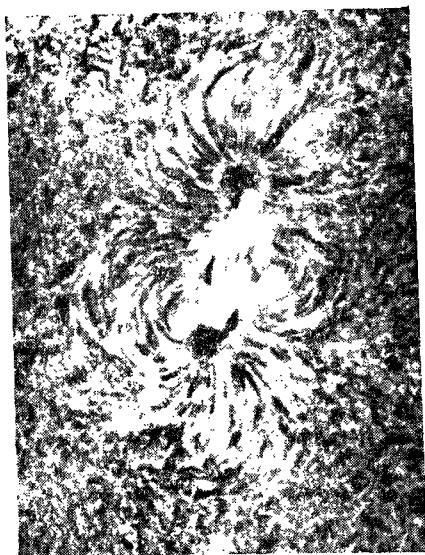


Рис. 80.

Замечательно, что в двойных пятнах, которые встречаются гораздо чаще, чем одиночные, оба пятна, составляющие пару, имеют проти-

воположную магнитную полярность. Двойное пятно представляет собой как бы магнит с двумя полюсами — «северным» и «южным». При этом все «магниты» в северном полушарии расположены одинаково (переднее, т. е. западное, пятно во всех парах имеет, например, северный магнетизм), в южном полушарии — то же, но магнетизм там обратный (переднее пятно имеет в нашем случае южный магнетизм).

По рабочей гипотезе Хэла внутри Солнца образуются длинные вихри вроде смерчей в нашей атмосфере. Все частицы внутри такой вихревой «трубки» кружатся в *одном* направлении. Трубка изогнута в форме подковы, и на поверхности фотосферы видны только её концы: два «отверстия», или две вихревые «воронки», вроде тех, которые часто образуются на поверхности воды. Понятно, что для земного наблюдателя вращение в этих воронках должно происходить в *противоположных* направлениях. Так как частицы вихрей наэлектризованы, то вокруг их траекторий образуется магнитное поле (как вокруг электрического тока), — вокруг одного вихря «северное», вокруг другого «южное». В каждой воронке газовые массы движутся по раскручивающимся спиральям изнутри наружу и, следовательно, расширяются. Но расширение газов всегда сопровождается их охлаждением; если это охлаждение будет значительным, то вытекающие газовые массы заметно потемнеют, и мы увидим двойное пятно.

**§ 211. Периодические изменения числа пятен и их магнетизма.** Замечательное свойство солнечных пятен представляет их *периодичность*. Бывают годы, когда пятна на солнечном диске видны в большом количестве каждый день. Это *максимум* пятен. Затем число их в течение приблизительно 7 лет убывает, пока не наступит *минимум*: тогда часто в течение нескольких месяцев не появляется ни одного пятна. После минимума пятен появляется опять всё больше и больше, и через 4 года наступает новый максимум. Полный период изменения количества пятен составляет в среднем 11 лет, точнее —  $11\frac{1}{8}$  года. Приводим эпохи максимумов за последние 130 лет, с точностью

| Минимумы | Период | Максимумы | Период |
|----------|--------|-----------|--------|
| 1810,6   | 12,7   | 1816,4    |        |
| 1823,3   | 10,6   | 1829,9    | 13,5   |
| 1833,9   | 9,6    | 1837,2    | 7,3    |
| 1843,5   | 12,5   | 1848,1    | 10,9   |
| 1856,0   | 11,2   | 1860,1    | 12,0   |
| 1867,2   | 11,7   | 1870,6    | 10,5   |
| 1878,9   | 10,7   | 1883,9    | 13,3   |
| 1889,6   | 12,1   | 1894,1    | 10,2   |
| 1901,7   | 11,9   | 1906,4    | 12,3   |
| 1913,6   | 10,0   | 1917,6    | 11,2   |
| 1923,6   | 10,3   | 1928,2    | 10,6   |
| 1933,9   | 10,4   | 1937,3    | 9,1    |
| 1944,3   |        | 1947,5    | 10,2   |

до десятой доли года. Из таблицы видно, что приведённая выше продолжительность периода есть лишь средняя величина и истинный период может быть на 4 года с лишком короче или длиннее (см. таблицу на стр. 201). Поэтому даже год ближайшего максимума или минимума пятен нельзя предсказать с уверенностью.

Наблюдения показали, что во время максимума пятен усиливаются также и другие явления на поверхности Солнца, например появление факелов и протуберанцев. Поэтому время максимума пятен теперь называют максимумом *солнечной активности*.

Когда минимум проходит и начинается новый период, или новый «цикл», солнечной активности, то в это время наблюдаются следующие явления.

1) Первые пятна нового цикла появляются всегда далеко от солнечного экватора (в более высоких широтах); с течением времени области, где образуются пятна, постепенно приближаются к экватору.

Поэтому во время минимума можно видеть иногда сразу пятна двух циклов: а) близ экватора — последние пятна замирающего цикла и б) вдали от него — первые пятна нового цикла.

2) *Магнетизм* пятен нового цикла солнечной активности *противоположен* магнетизму предыдущего периода. Другими словами, после каждого минимума пятна северного полушария обнаруживают такое распределение магнитных полюсов, какое до минимума было в южном полушарии, и обратно.

Именно, распределение магнетизма изменило знак во время минимума 1913 г., затем в течение 10 лет оставалось неизменным и вновь переменяло знак в 1923 г. Пятна, появлявшиеся на Солнце в 1923—1933 гг., были намагничены по тому же закону, как во время цикла 1902—1913 гг., а в 1933 г. произошло новое изменение знака.

Таким образом, средний полный период солнечной активности составляет, в сущности, не 11 лет, а 22 года. Ни сама периодичность пятен, ни смена их магнетизма пока ещё не получили удовлетворительного объяснения.

**§ 212. Связь солнечных пятен с земными явлениями.** Солнечная активность оказывает большое влияние на состояние земной атмосферы и магнитного поля Земли. В годы минимума солнечной активности магнитное поле Земли не возмущается; в годы же максимума на Земле часто наблюдаются магнитные бури, которые регистрируются быстрыми и неправильными колебаниями магнитной стрелки. В эти же годы усиливаются её обычные (суточные) колебания. Установлено также, что прохождение особенно большого пятна или группы пятен через центр солнечного диска сопровождается магнитной бурей на Земле.

Несомненна также связь между числом пятен и числом *полярных сияний*, которые, как известно, всегда сопровождаются магнитными

бурями. Годы максимума и минимума полярных сияний в точности совпадают с годами максимума и минимума пятен.

Полярные сияния происходят от «бомбардировки» верхних разреженных слоёв земной атмосферы различного рода частицами (корпусулами), летящими с Солнца.

Основная масса частиц, как показали исследования пулковских учёных В. А. Крата и М. Н. Гисвышева, является ядрами гелия, которые, как известно, несут на себе два положительных элементарных электрических заряда. Другие частицы представляют собою электроны.

Очевидно, в годы максимума пятен извержение таких частиц идёт особенно энергично. Усиливается в эти годы также и *ультрафиолетовая* радиация Солнца. Эта радиация до земной поверхности не доходит, а полностью поглощается верхними слоями нашей атмосферы.

Под её действием на высоте около 80 км над земной поверхностью создаётся слой ионизованных газов, называемый ионосферой, играющий важную роль в радиосвязи. Поэтому всякого рода изменения в солнечной активности влияют на состояние этого слоя и, таким образом, отражаются и на условиях радиослужбы.

На другие явления земной жизни, например на погоду, изменения числа пятен также оказывает некоторое влияние (см. § 224).

**§ 213. Солнечная атмосфера.** Явления, происходящие на фотосфере, мы рассматриваем сквозь солнечную атмосферу очень сложного строения. Ни малейших признаков этой атмосферы незаметно даже в самые сильные телескопы, и она становится видимой только во время полных солнечных затмений.

Тем не менее, благодаря спектральному анализу мы теперь гораздо лучше знаем природу этой невидимой глазом солнечной оболочки, чем природу блестящей фотосферы. В ней различают три слоя, получившие разные названия, именно: *обращающий слой*, *хромосфера* и *корона*.

**§ 214. Обращающий слой и его химический состав.** Обращающим слоем называется самый *нижний*, сравнительно тонкий слой солнечной атмосферы, непосредственно прилегающий к фотосфере. Он состоит из различных раскалённых газов и паров. Поэтому спектр его сам по себе должен состоять из множества (десятков тысяч) тонких *светлых* линий; но так как сквозь этот слой проходят лучи от гораздо более яркой фотосферы, то его светлые линии обращаются в тёмные вследствие избирательного поглощения (§ 195). Так возникают фраунгоферовы линии солнечного спектра.

Во время полных солнечных затмений можно в течение очень короткого времени наблюдать спектр обращающего слоя в его естественном виде, т. е. как линейчатый спектр. Если направить спектроскоп в ту точку солнечного края, которая последней скроется за диском Луны, то в момент её исчезновения сплошной фон солнечного спектра

сразу погаснет, а все тёмные спектральные линии *обратятся* в светлые (отсюда и название «обращающий слой»). По всей длине спектра, на тех местах, где находились *тёмные* линии, вспыхнут тысячи *ярких* разноцветных линий («спектр вспышки», рис. 81), но всего на 2—3 сек.; слой этот очень тонок, и Луна быстро его закрывает. Сравнивая линии солнечного спектра с линиями земных веществ, удалось найти в обращающем слое Солнца до 50 элементов, известных на Земле.

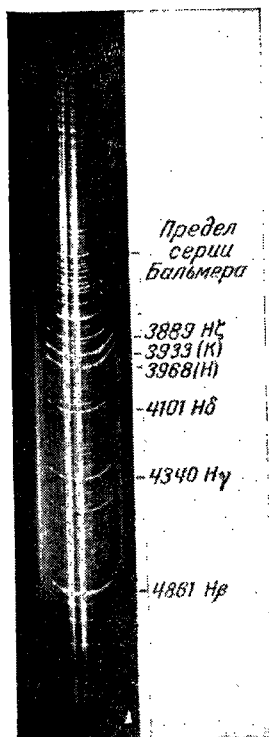


Рис. 81.

Наиболее заметны следующие элементы: железо, кальций, водород, гелий, натрий, никель, титан. В спектре пятен найдены линии (очень слабые) немногих химических соединений, например окиси титана и ядовитого газа циана.

**§ 215. Незвестные и отсутствующие линии солнечного спектра.** Некоторые линии солнечного спектра остаются пока не объяснёнными; они не совпадают с линиями земных веществ, изученными в лабораториях; с другой стороны, линии некоторых химических элементов (например, хлора, брома) на Солнце ещё не обнаружены. Это может происходить от нескольких причин:

1) Температура на Солнце гораздо выше той, которую мы можем получить в наших лабораториях; поэтому спектры некоторых элементов в солнечной атмосфере так изменены, что их нельзя признать (§ 199, б).

2) В спектрах некоторых элементов, главным образом металлоидов, самые заметные

линии лежат в ультрафиолетовой части спектра, а эта часть солнечного спектра мало доступна для наблюдений, так как сильно поглощается земной атмосферой.

Вначале думали, что необъяснимые линии солнечного спектра принадлежат элементам, которые на Земле ещё не найдены. Потом это объяснение было признано ошибочным. Тем не менее в истории науки оно сыграло важную роль, так как привело к открытию элемента *гелия*. Именно, в 1869 г. Локайр указал, что в спектре так называемой хромосферы (см. § 216) Солнца есть группа линий, которые должны принадлежать какому-то одному элементу, неизвестному на Земле. Он назвал этот элемент гелием (что по-гречески значит «солнечный»). Только в 1895 г. гелий был выделен из земных минералов в виде очень лёгкого газа, обладающего замечательными физическими свойствами.

Кроме линий чисто солнечного происхождения, в спектре Солнца имеется множество линий земных (так называемых теллурических), которые вызываются поглощением света газами и парами земной атмосферы, главным образом кислородом и водяным паром.

**§ 216. Хромосфера и протуберанцы.** Над обращающим слоем, не отделяясь от него какой-нибудь резкой границей, лежит *хромо-*



Рис. 82.

*сфера*, т. е. «окрашенная атмосфера». Она видна во время полных затмений вокруг чёрного диска Луны как узкая кайма алого цвета. В телескоп заметно, что кайма эта сильно зазубрена: она состоит из бесчисленных языков красного пламени, находящихся в постоянном движении.

Спектроскоп показал, что хромосфера состоит главным образом из *водорода*; кроме него хорошо заметны *кальций* и *гелий*. В нижних частях хромосферы, составляющих переход к обращающему слою, имеются и другие элементы.

В разных местах хромосферы массы раскалённого водорода и кальция поднимаются значительно выше её среднего уровня. Это — так называемые выступы, или *протуберанцы* (рис. 82). Во время полных солнечных затмений эти «огненные языки» часто бывают видны простым глазом.

Протуберанцы разделяются на два класса: *облакообразные* и *изверженные* (эруптивные) (рис. 83). Первые сравнительно спокойны и мало изменчивы, вторые, наоборот, являются настоящими огненными фонтанами, быстро меняющими свой вид (рис. 84). Они несомненно связаны с пятнами и подобно им наблюдаются преимущественно близ солнечного экватора и обнаруживают одиннадцатилетнюю периодичность. В спектрах эруптивных протуберанцев постоянно встречаются, кроме водородных, также линии металлов, очевидно, выброшенных извержением из более низких слоёв хромосферы. Средняя высота протуберанцев составляет 2—3 земных диаметра, но наблюдались эруптивные выступы высотой более 60 земных диаметров.

Скорость движения вещества протуберанцев составляет сотни километров в секунду. Причина, вызывающая эти огромные скорости и выброс протуберанцев, пока ещё не совсем ясна. Достоверно известно, что одной отталкивательной силы лучей Солнца или светового давле-

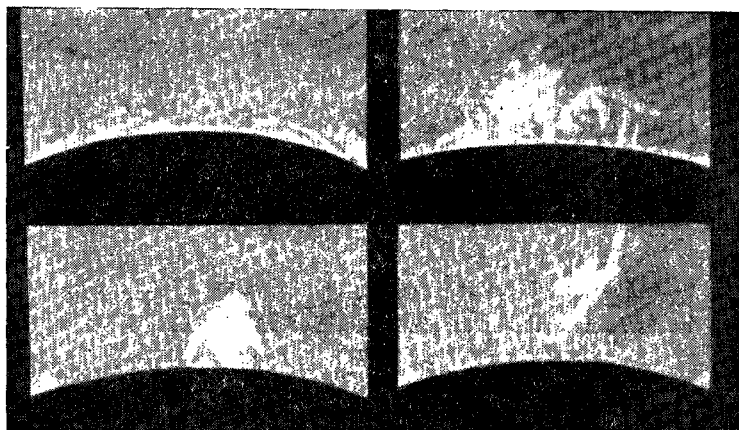


Рис. 83.

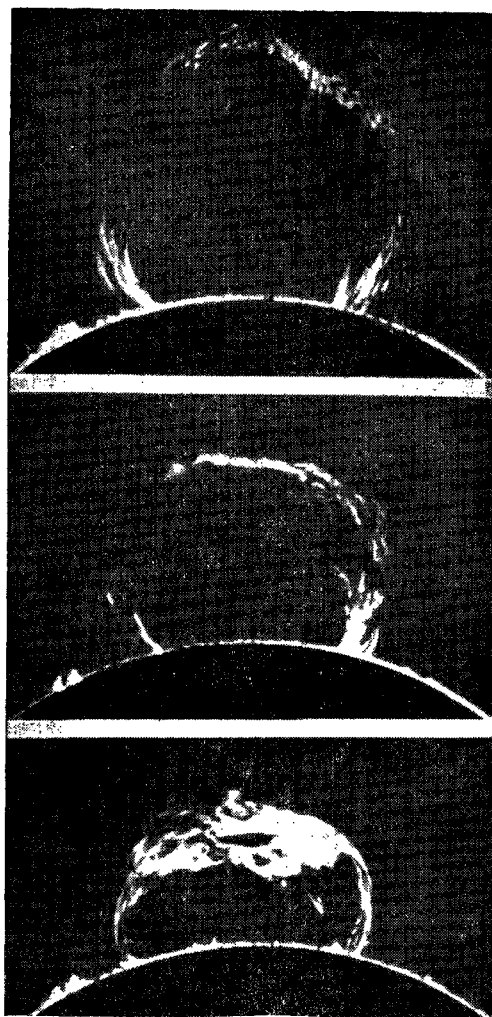
ния явно недостаточно. Видимо, тут большую роль играют электромагнитные силы, обнаруженные лишь сравнительно недавно.

С помощью спектроскопа протуберанцы можно увидеть и вне затмения. Дело в том, что видеть протуберанцы нам мешает светлый фон неба у солнечного края, т. е. освещённая Солнцем земная атмосфера. Если бы удалось ослабить этот светлый фон, не ослабляя блеска самих протуберанцев, то мы могли бы их увидеть. Это и делает спектроскоп. Действительно, свет земной атмосферы есть отражённый солнечный свет, и спектр его сплошной, с тёмными линиями.

Чем больше светорассеивающая сила спектроскопа, тем длиннее получаемый спектр и тем больше площадь, на которой рассеивается его свет. Поэтому в сильном спектроскопе сплошной спектр дневного неба будет очень слаб. Спектр же протуберанца, состоящий из ярких линий, при увеличении светорассеяния не ослабевает, так как линии «не имеют ширины», и увеличиваются только расстояния между ними: на потемневшем фоне сплошного спектра яркие линии выступают, как выступают звёзды на дневном небе при наблюдении в телескоп.

Если теперь расширить щель  $S$  спектроскопа (рис. 85), то в получившееся «окошечко» будут видны очертания  $P_1$  «монохроматического» изображения выступа  $P$ , т. е. только той его части, в которой





3  
447M19C

2  
345M56C

1  
348M2C

Рис. 84.

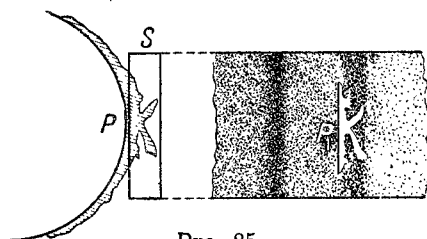


Рис. 85.

имеется элемент, образующий данную линию, например, водород; в свете кальция вид выступа может быть другим.

Ныне для наблюдения протуберанцев вне затмения применяются особые кварцевые фильтры, которые пропускают только световые лучи с длиной волны, равной длине волны яркой водородной линии. Широко применяется для изучения Солнца и киносъёмка, запечатлевающая разные стадии развития протуберанцев.

**§ 217. Наблюдения хромосферы по всему диску Солнца.** В 1892 г. удалось открыть способ изучения хромосферы на самом солнечном диске.

Для этого был построен сложный прибор, называемый *спектрогелиографом*. Его действие основано на том, что тёмные фраунгоферовы линии не абсолютно темны, а кажутся такими только благодаря контрасту с ярким фоном сплошного спектра.



Рис. 86.

например, кальция. Тогда весь свет будет задержан экраном, а пройдёт сквозь вторую щель только слабый свет от «тёмной» кальциевой линии. Расположив за экраном фотографическую пластинку, мы получим изображение линии, но только в том случае, если в данном месте Солнца есть *кальций*. Двигая прибор так, чтобы на пластинку падали изображения последовательно от разных вертикальных сечений солнечного диска, мы получим изображение всего обращённого к нам солнечного полушария в свете только одного кальция (рис. 86) и будем видеть, в каких местах этого элемента больше, в каких — меньше. Такие же снимки можно делать в лучах *водорода* (рис. 87), *железа* и т. д.

Применение этого способа привело к важным открытиям:

а) Оказалось, что хромосфера, подобно фотосфере, имеет *зернистое* строение. Отдельные зёрна, соответствующие «рисовым зёрнам»

фотосферы, названы *флоккулами* (хлопьями). Наблюдения над движением водородных флоккул привели, между прочим, к открытию } *вихревых* движений вокруг солнечных пятен (§ 209, рис. 80). }

б) Выяснилось, что разные линии спектра образуются на *различных уровнях* солнечной атмосферы.

Делая спектрогеллографические снимки в свете той или другой линии, мы получаем, так сказать, *разрез* атмосферы Солнца на определенном уровне и можем исследовать движение газовых масс на различных «глубинах».

в) Снимки самых верхних частей хромосферы дают среди светлых флоккул длинные кривые *тёмные* полосы, так называемые *волокна*; это протуберанцы, рассматриваемые на фоне более светлой и более горячей хромосферы. Таким образом протуберанцы можно наблюдать теперь и на самом диске Солнца.



Рис. 87.

## § 218. Астрономические явления во время полного солнечного затмения.

а) Солнечная корона. Над хромосферой расположена наиболее разреженная оболочка Солнца, солнечная корона, видимая только во время полных солнечных затмений. В момент начала полной фазы затмения вокруг чёрного диска Луны появляется сплошное сияние серебристо-жемчужного оттенка, простирающееся на расстояние нескольких солнечных диаметров. На его фоне видны изогнутые лучи или потоки, исходящие из Солнца в разные стороны (рис. 88).

Общий блеск короны составляет около половины блеска полной Луны; её части, более близкие к фотосфере («внутренняя» корона), гораздо ярче далёких, так называемой внешней короны. Поэтому внутреннюю корону в последнее время удалось наблюдать и вне затмения, конечно, с высоких гор и в телескоп, в котором были по возможности устранены источники рассеянного дневного света (пылинки, царапины на объективе и пр.). Но внешнюю корону, имеющую очень сложное лучистое строение, попрежнему можно наблюдать только во время полных затмений.

Русский астроном А. П. Ганский обнаружил, что форма внешней короны при максимуме и минимуме пятен бывает различна: в максимуме общая форма её близка к кругу, в эпоху минимума корональные лучи вытянуты вдоль экватора Солнца и укорочены у полюсов.

Спектр внешней короны — сплошной с фраунгоферовыми линиями; следовательно, она состоит из пылинок и свободных электронов, от-

ражающих солнечный свет. У внутренней короны на фоне сплошного спектра видны *светлые* линии водорода, гелия и ещё какого-то газа, линии которого не совпадают с линиями изученных до сих пор элементов. Одно время думали, что это элемент, ещё не открытый на Земле, и даже дали ему название «короний». Но для него не оказа-

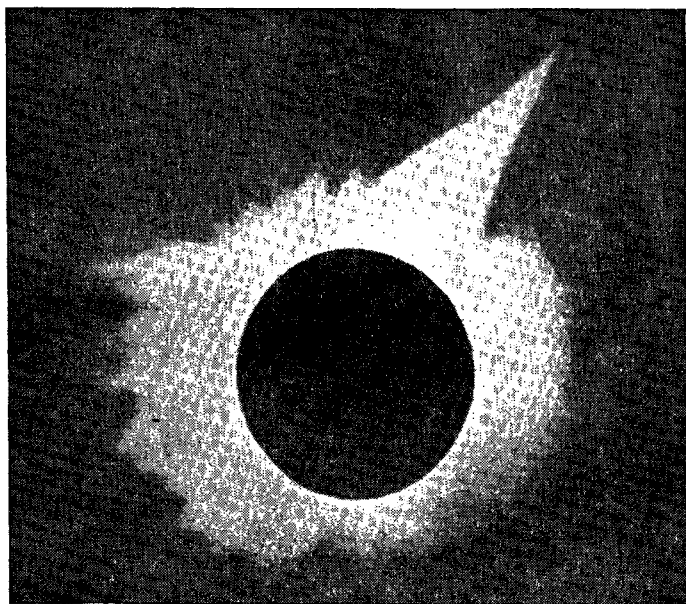


Рис. 88.

лось места в системе Менделеева. В 1941 г. было доказано, что эти линии принадлежат многократно ионизованному железу, атомы которого потеряли по 10 и 14 электронов (из 26-ти), а также многократно ионизованным атомам никеля и кальция.

Отдельные лучи и «струйки» короны движутся, и форма короны изменяется; но обнаружить эти изменения очень трудно, так как каждый отдельный наблюдатель может во время затмения изучать корону лишь несколько минут. Тем не менее, советские учёные успешно решили задачу изучения солнечной короны. На помощь им пришли не только отличные инструменты, но и плановость, организация и коллективность в работе. Солнечное затмение для данного места Земли длится несколько минут, но лунная тень проходит по Земле гораздо дольше (§ 134). Так, во время затмения 19 июня 1936 г. тень Луны проходила по территории СССР, от Чёрного моря до Тихого океана,

в течение примерно 2 часов. К этому затмению наши оптические заводы изготовили под руководством Д. Д. МаксUTOва и Н. Г. Пономарева ряд точных оптических приборов, в том числе шесть однотипных инструментов для фотографирования короны (стандартные советские коронографы).

28 советских экспедиций, шесть из которых имели в своём распоряжении коронографы, разместились вдоль всей полосы солнечного затмения, и последовательно, по мере перемещения лунной тени от Чёрного моря к Тихому океану, фотографировали солнечную корону. Благодаря такой организации затмения, в общей сложности, наблюдалось около 2-х часов, что дало возможность обнаружить развитие и движение солнечной короны. Скорость движения отдельных струек в короне доходила до 50 км/сек.

В 1947 г. советская экспедиция в Бразилии обнаружила радиоизлучение солнечной короны, с основной длиной волны около 1,5 м.

Исследования показали, что плотность короны необычайно мала — в миллионы раз меньше плотности верхних слоёв земной атмосферы. Это подтверждается также движением комет вблизи Солнца: комета влетает в самые глубокие слои солнечной короны со скоростью нескольких сот км/сек, в течение нескольких часов обигает Солнце почти у самой фотосферы и вылетает из короны в точности по той же орбите, по какой вступила в корону. Следовательно, вещество короны не оказывает движущимся в ней телам никакого заметного сопротивления.

Если искать на земле вещество, находящееся в состоянии сколь угодно напоминающем состояние солнечной короны, то таким веществом является, пожалуй, воздух в самом совершенном вакууме, какой только достигим в наших лабораториях.

Движение корональных струек вызывается электрическими силами, а также силой светового давления.

б) Искривление светового луча. Полные затмения важны ещё в том отношении, что в это время можно проверить общую теорию относительности (§ 167). По этой теории тяготение влияет на геометрические свойства пространства: прямые линии в сильном гравитационном поле становятся кривыми, а так как луч света в пустоте и есть прямая линия, то луч от далёкой звезды за Солнцем, проходя мимо края Солнца, должен искривиться, как бы притянуться Солнцем, и звезда нам покажется смещённой. Эйнштейн вычислил, что у самого края солнечного диска это смещение должно составлять 1",7. Проверить этот вывод можно, конечно, только во время полного затмения. Фотографии звёзд, окружавших Солнце во время затмения 1919 г., показали, что такое смещение звёзд действительно наблюдается и имеет величину, предсказанную Эйнштейном; но более точные наблюдения при следующих затмениях дали для наблюдаемого отклонения величину больше теоретической. Окончательно это было

доказано А. А. Михайловым при затмении 1936 г. (см. выше). Для этого он через несколько месяцев после затмения, когда Солнце ушло в другую область неба, опять сфотографировал звёзды, окружавшие Солнце во время затмения, с того же места, тем же инструментом и на той же высоте над горизонтом, но уже ночью. Сравнение положений звёзд на дневных и ночных снимках показало, что действительный эффект Эйнштейна составляет  $2'',7$ , т. е. несколько больше, чем дают вычисления, но в самом факте искривления светового луча сомневаться не приходится.

Результаты, полученные советскими астрономами при затмении 1936 г., были блестящим смотром достижений не только нашей науки, но и нашей оптической промышленности, которая в царское время не выделяла даже очковых стёкол, а ныне изготавливает высококачественные сложные оптические инструменты.

**§ 219. Солнечная постоянная.** Все соображения о количестве солнечного тепла основаны на определении солнечной постоянной. Так называется количество тепла, которое получила бы от Солнца в 1 мин. площадка в  $1 \text{ см}^2$ , помещённая на Земле, перпендикулярно к солнечным лучам, если бы земная атмосфера не поглощала тепла. По последним определениям она составляет 1,94 калорий (калорией называется количество тепла, которое в состоянии повысить температуру 1 г воды на  $1^\circ$ ). Величина солнечной постоянной несколько меняется от максимума солнечной активности к её минимуму, причём в максимуме солнечная постоянная несколько больше, чем во время минимума. Это значит, что в максимуме своей активности, несмотря на обилие пятен, Солнце оказывается немного горячее, а не холоднее, как, казалось бы, нужно было ожидать. Хотя пятна и холоднее фотосферы, но зато во время их максимума пастушат и максимум числа факелов, и доставляемое ими тепло с избытком покрывает потерю от увеличения площади пятен. Возможно, что поэтому солнечная «постоянная» изо дня в день слегка изменяется.

**§ 220. Температура Солнца.** Вычисление температуры Солнца представляет большие трудности. Трудности состоят: 1) в том, что разные слои Солнца имеют различную температуру, так что нельзя вообще говорить об определённой температуре Солнца, как нельзя, например, говорить о температуре земной атмосферы; 2) чтобы определить температуру далёкого тела по получаемому от него теплу, надо знать физические свойства поверхности этого тела, именно её способность лучепускания; но эта величина для Солнца неизвестна. Поэтому возможно определить только так называемую *эффективную* температуру Солнца. Это — та температура, которую должно иметь «абсолютно чёрное» тело (т. е. тело, поглощающее все падающие на него лучи) таких же размеров, как Солнце, чтобы оно могло посылать то же количество энергии. При этом принимается, что общее количество энергии, излучаемой единицей поверхности такого тела, пропорционально четвёртой степени его абсолютной температуры (закон Стефана).

Абсолютная температура  $T$  даётся формулой

$$S = \sigma T^4, \quad (1)$$

где  $\sigma$  есть постоянная, определённая из опыта, а  $S$  — количество энергии, излучаемой в 1 сек. одним квадратным сантиметром солнечной поверхности. Эта величина легко вычисляется по солнечной постоянной, которая равна  $0,0324$  кал в секунду. Чтобы получить всё количество солнечной энергии, проходящей в 1 сек. через поверхность сферы, радиус которой равен среднему расстоянию  $R$  от Солнца до Земли, надо умножить это число на поверхность сферы, т. е. на  $4\pi R^2$  (в квадратных сантиметрах). Вся эта энергия излучается Солнцем, радиус которого обозначим через  $r$ . Разделив полученное число на поверхность Солнца  $4\pi r^2$ , мы и получим  $S = 0,0324 (R/r)^2 = 0,0324 \times 215^2 = 1500$  кал·см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup> (приблизительно). Постоянная  $\sigma$  в тех же единицах равна:  $\sigma = 1,374 \cdot 10^{-12}$ .

Подставляя в формулу (1), получим:

$$T^4 = \frac{1500 \cdot 10^{12}}{1,374}, \quad T = 5750^\circ \text{ (приблизительно).}$$

Другой способ определения эффективной температуры Солнца основан на законе смещения Вина: при повышении температуры абсолютно чёрного тела максимум энергии в спектре перемещается в сторону более коротких волн (рис. 89), причём длина волны, соответствующая максимуму излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{a}{T},$$

где  $a$  — некоторая постоянная.

Этот способ не требует определения солнечной постоянной, но для него нужно знать распределение энергии в солнечном спектре.

Интересный способ определения температуры Солнца предложил В. К. Цераский, который собирал солнечные лучи в фокусе большого зеркала. Помещая в фокус различные тугоплавкие вещества, он убедился, что их температура плавления ниже температуры солнечной поверхности.

Результаты современных способов хорошо согласуются между собой; они дают эффективную температуру Солнца около  $5700^\circ \text{C}$  (около  $6000^\circ$  абсолютной шкалы).

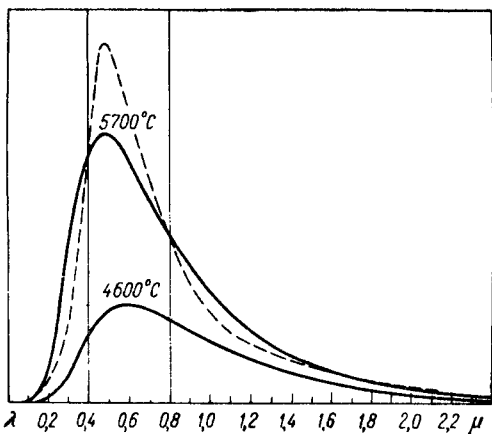


Рис. 89.

Истинная температура Солнца ни в каком случае не может быть ниже эффективной, а по всей вероятности она несколько выше. Точно так же температура внутренних слоёв Солнца гораздо выше эффективной и должна измеряться миллионами градусов. Наоборот, эффективная температура обрабатывающего слоя Солнца, по данным спектрального анализа, ниже температуры фотосферы и не должна превышать 5000°.

Солнечные пятна, образующиеся в сравнительно глубоких слоях Солнца, имеют температуру ниже окружающей фотосферы на 1000 — 2000°. Этот факт, доказанный сравнительно недавно, должен иметь важное значение для теории солнечных явлений.

Температура солнечной короны. Доказано, что внутренняя корона Солнца состоит из сильно ионизованных атомов железа, никеля, кальция и аргона. Но высокая степень ионизации требует и высокой температуры. Отсюда в 1941 г. был сделан вывод, что температура внутренней короны не ниже температуры обрабатывающего слоя и хромосферы, как думали до тех пор, а гораздо выше, и должна быть около 1 миллиона градусов. Таким образом, яркие протуберанцы, видимые на более слабом фоне короны, в действительности представляют «холодные включения в горячую корону» (И. С. Шкловский). Лучистый вид короны доказывает, что в ней непрерывно происходит истечение вещества из недр Солнца наружу. Причины этого истечения и высокой температуры короны ещё неясны. Возможно, что их надо искать в ядерных реакциях, которыми теперь объясняют и другие явления солнечной деятельности. Безусловно, тут играет роль и световое давление.

Солнечная корона нам кажется загадочной потому, что она представляет собой *вакуум*, несравненно более разрежённый, чем вакуумы наших лабораторий. В этой своего рода «рентгеновской трубке» гигантских размеров, сверхразрежённая материя подвергается действию различных сил, в том числе, например, действию мощных магнитных полей. Всем известно, какое большое значение имеет физика вакуума в современной науке. Поэтому расшифровка явлений, наблюдаемых в короне, имеет большую важность и для физиков.

**§ 221. Солнечная энергия и жизнь Земли.** Чтобы получить понятие о мощности солнечного излучения, вычислим величину  $S$  (§ 220) для 1 *квадратного метра*, превратим калории в килограммометры (1 *кал* = 0,425 *кгм*) и перейдём к лошадиным силам (1 *л. с.* = 75 *кгм* в 1 *сек*). Получим:

$$\frac{1500 \cdot 10^4 \cdot 0,425}{75} = 85\,000 \text{ л. с.}$$

Таким образом, можно представить себе, что на каждом квадратном метре солнечной поверхности непрерывно работает силовая установка мощностью в 85 000 *л. с.* Если бы покрыть поверхность Солнца ледяной оболочкой толщиной в 12 метров, то вся эта оболочка растаяла бы в 1 минуту.



Свою энергию Солнце непрерывно излучает по всем направлениям. Из всего громадного количества этой теплоты каждая планета перехватывает долю, которая во столько раз меньше всего расхода тепла, во сколько раз «площадь» диска планеты, видимого с Солнца, меньше всей поверхности небесного свода. Она вычисляется из отношения

$$\alpha = \frac{\pi \rho^2}{4\pi R^2} = \frac{1}{4} \left( \frac{\rho}{R} \right)^2. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  — угловой радиус планеты в секундах дуги, а  $R$  — радиан, т. е.  $57^\circ,3 = 206\,265''$ . Для Земли  $\rho = 8'',8$  (§ 119). Подставив эти числа в формулу (2), получаем приблизительно

$$\alpha = \frac{1}{2,2 \cdot 10^9},$$

т. е. для Земли меньше одной двухмиллиардной доли. Также ничтожны доли прочих планет. Вся же остальная энергия уходит мимо планет в мировое пространство.

Тепло, приносимое на Землю солнечными лучами, составляет почти *единственный источник энергии* для земных явлений. Действительно, только морские приливы, вулканические явления и падение метеоров не связаны с тепловой энергией Солнца. Все остальные движения на земной поверхности происходят за счёт энергии солнечных лучей. Это можно строго доказать на основании закона сохранения энергии не только для метеорологических и механических явлений, но и для явлений растительной и животной жизни. В частности, все запасы энергии, которыми располагает современная техника (кроме атомной энергии) представляют исключительно преобразованную и «законсервированную» энергию Солнца.

На всё это расходуется, впрочем, очень малая доля (примерно около 0,001) тепловой энергии, падающей на Землю. Вся остальная часть идёт на нагревание земной поверхности. Без этого нагревания температура Земли быстро упала бы до температуры межпланетного пространства, т. е. почти до абсолютного нуля ( $-273^\circ$ ); между тем так называемая «средняя температура» земной поверхности гораздо выше ( $+15^\circ$ ).

**§ 222. Внутреннее строение Солнца.** Теории Солнца начала XX в. разрабатывались на основе теории ионизации и светового давления. По этим теориям Солнце всё сплошь газообразно, и между фотосферой и атмосферой нет резкой границы. Под действием взаимного тяготения частиц вся газовая масса стремится притянуться (упасть) к центру Солнца. Но это падение не осуществляется, — Солнце, как мы знаем, заметно не сжимается, так как вес верхних слоёв уравновешивается не только силой упругости газа внутренних слоёв, но и силой *светового давления* Солнца, действующей также и во внешних оболочках,

Световое давление было теоретически предсказано выдающимся русским учёным профессором Московского университета П. Н. Лебедевым в 1891 г. и им же открыто на практике в ряде блестящих астрономных опытов в 1901 г.

Делая наиболее правдоподобные предположения относительно химического состава вещества внутри Солнца, теоретическая астрофизика рассчитала несколько «моделей» внутреннего строения газового шара, имеющего ту же эффективную температуру, размеры и массу, что и Солнце. Получилось, например, что в центре Солнца температура должна быть около 20 миллионов градусов, плотность в 28 раз больше плотности воды. Несмотря на такую большую плотность, вещество внутри Солнца сохраняет свойства газа (например, сжимаемость) вследствие ионизации: атомы, потеряв часть электронов, становятся меньше и могут быть сближены теснее, чем при земных температурах. Но все эти «модели» имели лишь формальное значение, так как основной вопрос о том, откуда берётся и чем пополняется солнечное излучение, оставался открытым.

**§ 223. Источники солнечной энергии.** а) Первые гипотезы. Геология говорит нам, что задолго до появления человека, сотни миллионов лет назад, Солнце освещало и согревало Землю приблизительно так же, как и теперь. Следовательно, температура Солнца в течение чрезвычайно долгого времени остаётся более или менее постоянной.

Между тем при том громадном расходе тепла, который непрерывно несёт Солнце, оно должно бы было *охлаждаться*, как показывает вычисление, на несколько градусов ежегодно. Но так как этого нет, то, очевидно, потеря тепла через лучеиспускание всё время пополняется из какого-то источника.

Вопрос об источниках солнечной теплоты — один из важнейших в науке. В поисках его решения физики XIX в. перепробовали все известные источники энергии, например, химические реакции (прежде всего горение), падение метеоритов и другие, все они оказались недостаточными, так как могут покрыть расход тепла в течение, самое большее, немногих десятков миллионов лет.

б) Теория сжатия (контракционная теория). Так как Солнце охлаждается с поверхности, то оно должно сжиматься; но при сжатии выделяется тепло, и этого тепла может быть достаточно, чтобы возместить потерю. При известных условиях температура сжимающегося газового шара может даже повышаться, несмотря на потерю тепла. Теория эта доступна математической разработке. Применение её к Солнцу дало следующие результаты. Достаточно, чтобы диаметр Солнца ежегодно сокращался всего лишь на 100 м, чтобы тепло, образующееся при таком сжатии, покрыло всю потерю через лучеиспускание. Это сжатие составляет 1" в 14 000 лет, так что прямыми наблюдениями проверить правильность контракционной теории в ближайшем будущем невозможно. Но подсчёты говорят, что если некогда диаметр газового солнечного шара был равен, например, диаметру орбиты

самой далёкой планеты и затем сжался до своих теперешних размеров, то количество тепла, доставленное таким сжатием, в состоянии покрыть расход тепла в течение самое большее 25 млн. лет. Между тем возраст Солнца значительно больше и измеряется миллиардами лет.

в) Совершенно недостаточным источником энергии оказалась и радиоактивность, т. е. *распад* атомов, превращение сложных элементов в более простые (например, превращение радия в свинец).

г) Превращение элементов. Развитие ядерной физики привело к открытию превращений химических элементов. Установлено, что ядра более тяжёлых химических элементов образуются из ядер более лёгких или, как их называют, более простых.

Процессы преобразования ядер называются *ядерными реакциями*. Ядерные реакции ведут не только к превращению ядер лёгких химических элементов в ядра более тяжёлых, но и к появлению изотопов основных элементов.

Так, если в ядро атома химического элемента влетит нейтрон (элементарная частица, равная по массе протону, но не имеющая электрического заряда), то возникнет изотоп этого элемента, поскольку атомный вес его увеличивается на единицу (атомный вес протона), а число электрических зарядов ядра остаётся прежним; следовательно, химические свойства атома не изменятся.

Так как нейтрон не имеет заряда, то он сравнительно свободно может проникать в ядра атомов, поскольку электрическое (положительное) поле ядра на него не действует. Этим объясняется частое распространение изотопов в природе.

Совсем по-иному будет протекать ядерный процесс, если в ядро атома влетит протон. Протон имеет положительный заряд, и электрическое поле ядра атома будет препятствовать проникновению протона в ядро. Чтобы проникнуть в ядро, протон должен обладать большой кинетической энергией, достаточной для преодоления отталкивательных сил электрического поля.

Проникнув в ядро, протон производит перестройку ядра, с выделением значительного количества энергии, называемой ядерной или атомной. В этом случае влетевший протон не только увеличивает атомный вес ядра, но и сообщает ему лишний электрический заряд, что ведёт к изменению химических свойств атома; возникает новый химический элемент.

При наличии множества ядер различных химических элементов, бомбардировке протонами и перестройке подвергаются, в первую очередь, ядра более лёгких элементов (литий, бериллий), так как по сравнению с ядрами тяжёлых элементов они имеют более слабое электрическое поле. Превращение ядер лёгких элементов происходит уже при температуре 2—3 миллиона градусов, т. е. как раз при такой, какая по некоторым предположениям имеется в недрах холодных, красных звёзд.

При температуре же в 20 миллионов градусов энергия протонов настолько возрастает, что протоны могут уже проникать в ядра более тяжёлых химических элементов, например, в ядра углерода, азота, кислорода, и производить их перестройку с выделением атомной энергии.

Академик В. Г. Фесенков считает, что в настоящее время ядерные процессы в недрах Солнца происходят именно за счёт протонов (а не нейтронов), ибо Солнце существует несколько миллиардов лет, и за этот долгий срок свободных нейтронов, легко проникающие в ядра атомов, должны были почти все войти в состав ядер. Свободных нейтронов в недрах Солнца должен остаться незначительный процент, протонов же на Солнце имеется достаточное количество, поскольку они — суть ядра водорода, а Солнце по своей массе содержит 38% этого химического элемента.

Температура в недрах Солнца достигает 20 миллионов градусов и обуславливает энергию протонов, достаточную для проникновения в ядра химических элементов.

При подобном вторжении протона в ядро перестройка последнего может идти в следующих трёх направлениях, зависящих от прочности связей в ядре:

1) Протон останется в ядре; ядро увеличит свой атомный вес на единицу и приобретёт новый положительный заряд; возникнет ядро нового химического элемента.

2) Протон останется в ядре, но ядро излучит один позитрон, т. е. элементарную частицу с положительным единичным зарядом  $e^+$  и массой, равной массе электрона ( $\frac{1}{1840}$  часть массы протона); в этом случае возникнет изотоп прежнего химического элемента, поскольку атомный вес ядра возрастёт на единицу, а заряд останется прежним.

3) Ядро в силу неустойчивости может распасться и дать начало ядрам новых элементов, причём одним из них обязательно будет ядро гелия.

Подобные ядерные реакции с выделением атомной энергии непрерывно происходят в недрах Солнца.

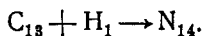
Согласно теории, разработанной астрофизиком Бете, на Солнце происходят ядерные процессы с участием обычного углерода ( $C_{12}$ ), играющего в этом случае роль своеобразного катализатора.

Ядерные реакции протекают следующим порядком:

1. Протон ( $H_1$ ) проникает в ядро углерода с атомным весом 12 ( $C_{12}$ ) и образует ядро нового, неустойчивого радиоактивного элемента, которое излучает позитрон ( $e^+$ ), и превращается в ядро изотопа углерода с атомным весом 13 ( $C_{13}$ ):



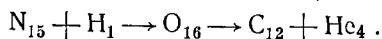
2. Когда следующий протон ( $H_1$ ) проникает в ядро изотопа  $C_{13}$ , образуется ядро азота с атомным весом 14 ( $N_{14}$ ):



3. При проникновении протона в ядро азота ( $N_{14}$ ) образуется ядро неустойчивого изотопа кислорода с атомным весом 15 ( $O_{15}$ ), которое излучает позитрон ( $e^+$ ) и превращается в ядро изотопа азота с атомным весом 15 ( $N_{15}$ ):

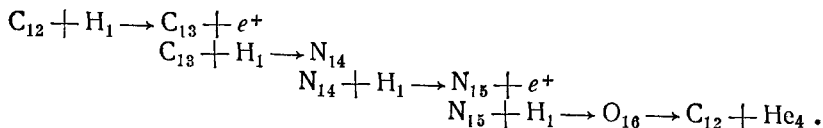


4. Новый протон ( $H_1$ ), влетающий в ядро  $N_{15}$ , даёт ядро кислорода  $O_{16}$ , которое при высоких температурах сразу же распадается на ядро углерода ( $C_{12}$ ) и ядро гелия ( $He_4$ ;  $\alpha$ -частица);



Таким образом, полный цикл Бете приводит, в конечном счёте, к образованию гелия (He) из водорода (H), причём количество углерода  $C_{12}$  не изменяется; другими словами, углерод играет роль катализатора, хотя в этом случае сам непосредственно участвует в ядерных реакциях.

Полный цикл Бете имеет вид:



На Солнце непрерывно происходит уменьшение количества водорода и увеличение процентного содержания гелия.

За счёт этих ядерных превращений выделяется огромное количество ядерной (атомной) энергии, которая обильно излучается Солнцем в мировое пространство.

Эту энергию излучения можно подсчитать, ибо, согласно теории относительности, между массой и энергией существует зависимость

$$E = mc^2,$$

где  $E$  — энергия,  $m$  — масса,  $c$  — скорость света в пустоте.

Если  $m$  выражена в граммах (г) и  $c$  в сантиметрах в секунду ( $3 \cdot 10^{10}$  см/сек), то  $E$  выражается в эргах (эрг).

В результате реакции Бете из 4-х протонов (ядер водорода) возникает одно ядро гелия ( $\alpha$ -частица).

Так как ядро водорода имеет массу 1,008 (в атомных весах), то четыре протона образуют массу  $4 \times 1,008 = 4,032$ .

В то же время масса образовавшегося ядра гелия составляет 4,004. Уменьшение массы водорода, участвующего в ядерной реакции, на величину  $\Delta m = 4,032 - 4,004 = 0,028$ , сопровождается выделением энергии, которая равняется  $E = \Delta m \cdot c^2$ , и для грамм-атомов рассматриваемых здесь элементов составит:

$$E = 0,028 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 252 \cdot 10^{17} \text{ эрг, или } 252 \cdot 10^{10} \text{ джоулей,}$$

что составит  $\sim 60 \cdot 10^7$  больших калорий тепла. Эта энергия способна нагреть 6000 тонн воды от 0 до  $100^\circ \text{C}$ .

Вследствие такого обильного излучения, масса Солнца ежесекундно уменьшается на  $4 \cdot 10^6$  тонн, и всё же масса Солнца настолько велика ( $\sim 2 \cdot 10^{27}$  тонн), что даже если оно и впредь будет так обильно расточать свою энергию, оно будет ярко светить в течение  $2 \cdot 10^{13}$  лет.

Итак, источником колоссальной энергии солнечного излучения являются ядерные процессы, протекающие в недрах Солнца.

**§ 224. Проблема Земля — Солнце.** На Солнце мы изучаем материю в таких условиях, которых, весьма вероятно, нам никогда не удастся осуществить на Земле. Поэтому изучение Солнца имеет громадное значение для физики и химии. Затем Солнце — это одна из звёзд, а звёзды — главные тела вселенной; исследуя строение Солнца, мы исследуем природу звёзд вообще. В этом важность изучения Солнца для астрономии. Кроме того, всё больше выясняется, что изучение Солнца имеет большое практическое значение. Уже доказана связь между явлениями на Солнце и явлениями, происходящими в верхних частях земной атмосферы (в стратосфере, § 212). Видимо, общее количество энергии солнечного излучения испытывает постоянные колебания (§ 219); эти колебания должны отражаться и на изменениях температуры Земли. Работами советских учёных, и в первую очередь работами Б. М. Рубашова, установлено бесспорное влияние солнечной активности на движение холодных арктических масс воздуха, что имеет прямое отношение к состоянию погоды в различных областях Земли. Далее, солнечная активность воздействует на слышимость радиосигналов, прерывая работу на одних длинах волн и обеспечивая устойчивость работы на волнах иной длины. Безусловно, все эти явления должны быть тщательно изучены советскими учёными для использования их в практике социалистического строительства.

Поэтому советская наука поставила во всей широте *проблему Земля — Солнце*, т. е. проблему связи солнечной активности со всевозможными земными явлениями. Для решения этой проблемы в последнее время на ряде советских обсерваторий организована так называемая служба Солнца под руководством Главной Астрономической обсерватории Академии наук СССР. Она непрерывно регистрирует все явления солнечной активности и затем обрабатывает их статистически, как делает это для метеорологических явлений служба погоды, с тем, чтобы на основе полученных наблюдений создать стройную теорию, по которой можно будет предвычислять наступление различных геофизических явлений, в заблаговременном знании и учёте которых заинтересованы многочисленные учреждения и организации нашего Союза.

---

## ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

### ЛУНА

**§ 225. Размеры Луны.** Вследствие сравнительной близости к Земле Луна кажется нам по своей величине равной Солнцу. В действительности же она гораздо меньше не только Солнца, но и Земли. Линейный диаметр её составляет почти 3500 км, т. е. 0,27 диаметра Земли (немного более четверти); поверхность — около  $\frac{1}{13}$  земной поверхности, а объём — около  $\frac{1}{49}$  объёма Земли.

*Масса* Луны (§ 178) равна приблизительно  $\frac{1}{81}$  массы Земли. Разделив это число на объём, получим *плотность* Луны в сравнении с плотностью Земли, именно 0,6. По отношению к воде плотность выразится числом 3,3 (для Земли 5,5); это означает, что внутри Луны нет такого плотного ядра, которое предполагается у нашей Земли.

*Силу тяжести* на поверхности Луны можно вычислить по той же формуле, что и для Солнца (§ 203). Получается около  $\frac{1}{6}$  тяжести на поверхности Земли. Следовательно, на Луне все предметы весили бы в 6 раз меньше, чем на Земле (при взвешивании на пружинных весах).

**§ 226. Вращение Луны.** Нам кажется, что Луна не вращается вокруг оси, так как на её диске постоянно видны одни и те же пятна на тех же самых местах. Луна, следовательно, всегда обращена к Земле одной стороной; мы можем наблюдать *только одно её полушарие*.

В действительности это значит, что Луна вращается вокруг оси, но как раз во столько же времени, как и вокруг Земли. Лунные сутки в точности равны лунному месяцу.

Представим себе (рис. 90), что Луна, пройдя четверть своей орбиты, переместилась из  $L_1$  в  $L_2$ . Если при этом она и вокруг своей оси повернётся тоже на четверть оборота, то точка  $a$  её поверхности, находившаяся в первый момент посредине лунного диска, опишет дугу в  $90^\circ$  и, следовательно, будет опять направлена к Земле. То же будет и дальше: она всё время остаётся в центре видимого с Земли диска. Наоборот, если бы Луна не вращалась, например, если бы точка  $a$  всегда сохраняла то же положение, что в первый момент, то нам бы казалось, что она вращается с периодом в один месяц.

*Положение лунной оси.* Ось вращения лунного шара не в точности перпендикулярна к плоскости лунной орбиты: плоскость лунного

экватора образует с плоскостью лунной орбиты угол в  $6^{\circ}39'$ . Замечательно, что линия пересечения этих двух плоскостей совпадает с линией узлов лунной орбиты и движется вместе с ней. Таким образом все три плоскости (лунного экватора, эклиптики и лунной орбиты) постоянно *пересекаются по одной прямой*. Угол между I и II плоскостями равен  $1^{\circ}30'$ , между II и III —  $5^{\circ}9'$ , что и даёт в сумме  $6^{\circ}39'$ . Это так называемый *закон Кассини*.

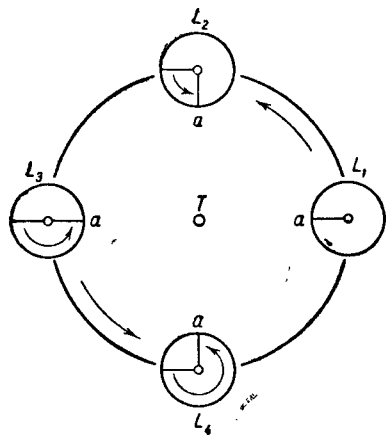


Рис. 90.

**§ 227. Почему Луна обращена к Земле одной стороной?** Совпадение времени обращения Луны со временем её вращения вокруг оси, конечно, не случайно. Оно вызвано действием земного притяжения и возникло ещё тогда, когда Луна была в жидком состоянии. Если в то время Луна быстро вращалась вокруг оси, то земное притяжение должно было производить на ней приливы, гораздо более сильные, чем Луна на Земле, так как масса Земли в 81 раз больше массы Луны. При этом приливные выступы были расположены вдоль

линии, не совпадающей с направлением к Земле: вследствие вязкости расплавленной массы выступы появлялись не мгновенно; в частности, выступ, обращённый к Земле, успевал подняться только к тому времени, когда соответствующая точка поверхности переносилась вращением Луны вперёд. Подобное же явление имеет место и в земных приливах; следствием его бывает «прикладной час» (§ 187).

Но Земля притягивала этот ближайший выступ сильнее, чем противоположный. В результате, как в явлении прецессии (§ 181, рис. 71), возникла сила, стремившая повернуть к Земле большую ось приливного эллипсоида и направленная, таким образом, против вращения Луны. Сила эта — приливное трение, — действуя непрерывно в течение громадного промежутка времени, постепенно замедляла вращение Луны, пока, наконец, один из приливных выступов (к тому времени застывших) не остался навеки обращённым к Земле. Отсюда следует, что Луна должна быть несколько *вытянута* по направлению к Земле; но это удлинение крайне ничтожно, не более 3 км, т. е. меньше 0,001 лунного диаметра.

**§ 228. Либрация Луны.** По временам нам удаётся видеть небольшую часть обращённого от нас лунного полушария. Это возможно благодаря так называемой *либрации* (т. е. «качанию») Луны.

а) Либрация по долготе вызывается тем, что вращение Луны вокруг оси совершенно равномерно, а движение её по орбите



неравномерно: по второму закону Кеплера (§ 156) она движется около перигея быстрее, чем у апогея. Поэтому за четверть месяца после прохождения через перигей  $P$  (рис. 91) Луна пройдёт путь  $PL$ , больше четверти всей орбиты; вокруг оси же она повернётся ровно на  $90^\circ$ . Следовательно, земному наблюдателю будет казаться, что точка  $a$ , которая в перигее была в центре диска, теперь слегка отклонится влево (к востоку), туда же сдвинется и точка, которая была на правом (западном) краю. Таким образом нам удастся заглянуть за *западный* край видимого полушария.

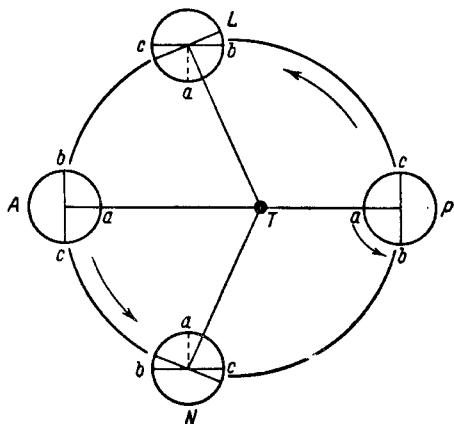


Рис. 91.

Наибольшая возможная величина этой либрации составляет  $7^\circ 54'$ . Период её равен так называемому *аномалистическому* месяцу, т. е. промежутку времени между двумя прохождениями Луны через перигей.

б) *Ли́брация по широте*. Ось вращения Луны не перпендикулярна к плоскости её орбиты (§ 226). Поэтому в течение месяца поочередно то южный, то северный конец оси наклонены к Земле подобно тому как вследствие наклона земной оси то северное, то

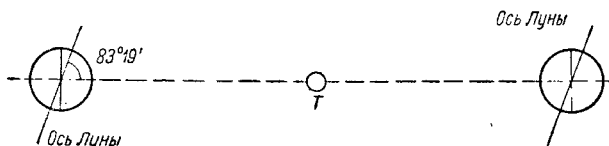


Рис. 92.

южное полушарие Земли бывает обращено к Солнцу). Это позволяет нам заглянуть то за северный полюс Луны, то за южный (рис. 92). Период этой либрации равен *драконическому* месяцу, т. е. промежутку времени между двумя возвращениями Луны в узел. Величина либрации по широте, с учётом возмущений, достигает  $6^\circ 51'$ .

в) *Суточная или параллактическая либрация*. Вследствие сравнительной близости Луны к Земле поверхность Луны из разных точек Земли видна неодинаково. Если на Луну одновременно

смотрят два наблюдателя, например с двух противоположных точек экватора, то оба эти наблюдателя будут видеть Луну не так, как третий наблюдатель, находящийся между ними: западный наблюдатель, для которого Луна только ещё восходит, может заглянуть за западный край Луны, а восточный (для которого Луна заходит) — за её восточный край. Отсюда происходит параллактическая либрация, состоящая в том, что при *восходе* Луны мы заглядываем за её *западный* край, а при *заходе* — за *восточный*, приблизительно на  $1^\circ$  по долготе.

г) **Физическая либрация.** Все описанные выше виды либрации называются *оптической*, или видимой, либрацией, так как в действительности никаких «колебаний» Луна при этом не совершает. Но существует и истинная, или *физическая*, либрация, происходящая от того, что большая полуось лунного эллипсоида (§ 227) по временам отклоняется от направления к Земле (на величину, равную либрации по долготе, см. п. а) настоящего параграфа), а притяжение Земли стремится её вернуть к этому положению. Величина этой либрации ничтожна и может быть обнаружена только особенно точными наблюдениями.

В результате совместного действия всех либраций мы можем в общей сложности наблюдать не половину лунной поверхности, а 0,59 (почти  $\frac{3}{5}$ ).

**§ 229. Ничтожность лунной атмосферы.** Из телескопических наблюдений давно уже был сделан вывод, что если вокруг Луны существует атмосфера, то её плотность должна быть меньше плотности земной атмосферы в тысячи раз.

Доказательств ничтожности лунной атмосферы можно привести очень много.

а) **Отсутствие рассеянного света на Луне.** На Земле •благодаря существованию атмосферы день и ночь наступают не сразу. Если бы мы могли взглянуть на Землю из мирового пространства, то увидели бы, что освещённая (дневная) часть Земли не отделена резко от тёмной (ночной); между ними был бы постепенный переход — полоса *сумерек*. Затем, на Земле видны и те предметы, которые не освещены прямо лучами Солнца, а находятся в тени. Они освещены рассеянным светом голубого неба и облаков. На Луне ничего подобного не наблюдается. Световая граница (терминатор) между светлой и тёмной частями там очень резка (рис. 95), сумерек не бывает. Все тени (от гор) на Луне совершенно черны из-за отсутствия рассеянного света (см. рис. 93).

б) **Явления покрытий звёзд.** Как уже указывалось в § 133, когда Луна закрывает от нас какую-нибудь звезду, то исчезновение звезды за лунным краем происходит всегда моментально, без постепенного ослабления. Между тем, если бы на звезду надвигалась сперва лунная атмосфера, то звезда изменила бы свой цвет и положение (вследствие рефракции в атмосфере Луны) и погасла бы постепенно.

в) Спектр Луны совершенно одинаков со спектром Солнца и является, следовательно, его простым отражением. Если бы свет Солнца при этом прошёл через атмосферу Луны, то это сказалось бы на его линиях поглощения. Но ничего подобного не наблюдается.

Работы В. Г. Фесенкова и Ю. Н. Линского по определению плотности лунной атмосферы. В 1943 г. советский академик В. Г. Фесенков предложил очень чувствительный фотометрический способ для обнаружения лунной атмосферы. Он основывается на определении степени поляризации фона неба, проектирующегося на неосвещённую площадку в центре лунного диска (во время первой или последней четверти). Этим способом Ю. Н. Линский в 1949 г. получил отношение массы вертикального столба лунной атмосферы к массе такого же столба земной атмосферы около  $\frac{1}{2000}$ , что даёт для числа молекул

в  $1 \text{ см}^3$  у поверхности Луны такое же число, какое в земной атмосфере имеет место на высоте 75—80 км. Для земных живых существ такая атмосфера практически не отличалась бы от безвоздушного пространства, но она должна производить значительное торможение налетающие в неё метеорные тела: ведь на Земле свечение метеоров наблюдается, начиная уже с высоты 120 км. Легко подсчитать, однако, что всыпки «лунных метеоров» с Земли не могут быть видны вследствие большого расстояния.

**§ 230. Судьба лунной атмосферы.** Так как Луна и Земля, по всей вероятности, образовались из одного клубка космической материи, то Луна должна быть сходна с Землёй и, подобно ей, когда-то могла иметь плотную атмосферу. Почти полное исчезновение её объясняется на основании *кинетической теории* газов, по которой газ состоит из молекул, безостановочно движущихся по всем направлениям; скорости молекул зависят от их массы и температуры; у водорода они наибольшие, у кислорода и водяного пара гораздо меньше. С другой стороны, для каждого небесного тела существует так называемая параболическая, или критическая, скорость (§ 170, г), зависящая от его массы. Это та предельная скорость, при которой тело ещё может удержать своим притяжением движущуюся вблизи него частицу; для земной поверхности эта скорость составляет 11,3 км/сек; частицы, движущиеся быстрее, улетают в мировое пространство. Газы при нормальных условиях обладают скоростями значительно меньше 11,3 км/сек, поэтому они удерживаются Землёй. Для Луны же, на поверхности которой критическая скорость составляет всего 2,4 км/сек, эти газы оказываются слишком летучими, ибо при нагревании солнечными лучами получают большую скорость, и слабое лунное притяжение не может их удержать.

Таким образом, если Луна когда-нибудь и была окружена значительной атмосферой, то эта атмосфера молекула за молекулой рассеялась в мировом пространстве. Это рассуждение приводит к важному общему выводу, который подтверждается и наблюдениями: небесные

тела, имеющие малую массу (например, спутники планет), не могут обладать значительной атмосферой.

**§ 231. Вода на Луне** не может существовать в жидком состоянии, так как без атмосферы она скоро испарилась бы и образовала бы атмосферу из водяного пара, которая в свою очередь рассеялась бы в пространстве. Действительно, водных бассейнов, например морей и озёр, на поверхности Луны в настоящее время нет. Нет там и водяного пара: на Луне никогда не бывает ни облаков, ни туманов. На Луне вода не может существовать и в виде льда или снега, так как снег и лёд под палящими лучами Солнца тоже должны испариться, ибо лунная поверхность, незащищённая атмосферой, нагревается до  $+120^{\circ}\text{C}$ .

Вследствие отсутствия воздуха и воды жизнь на Луне невозможна.

**§ 232. Свет и теплота Луны.** Полная Луна светит почти в 500 000 раз слабее Солнца. Следовательно, если бы всё небо было сплошь покрыто дисками полной Луны, то общий свет его был бы всё-таки в 5 раз слабее солнечного.

При других фазах Луны её блеск гораздо меньше; например, в четвертях он составляет не  $\frac{1}{2}$  блеска в полнолунии, а только от  $\frac{1}{8}$  до  $\frac{1}{10}$ . Главная причина этого заключается в том, что в первой и

последней четверти значительная часть Луны освещена косыми лучами Солнца, а так как поверхность Луны чрезвычайно неровна, то при косом освещении тени от лунных гор и мелких неровностей почвы занимают в сумме значительную часть всей площади лунного серпа.

*Теплоту* от Луны удалось обнаружить и измерить, собирая лунный свет в фокусе громадных зеркал. Из наблюдений выяснилось, что в течение лунного дня, продолжающегося почти 15 наших суток, поверхность Луны нагревается до  $+120^{\circ}\text{C}$ . Ночью температура благодаря почти полному отсутствию атмосферы очень быстро падает до  $160^{\circ}$  ниже нуля. Чрезвычайно быстрое падение температуры лунной поверхности происходит во время затмений Луны.

**§ 233. Строение лунной поверхности.** Благодаря близости Луны мы знаем обращённую к Земле часть её поверхности несравненно лучше, чем поверхность всех других светил. Для многих стран Земли до сих пор нет таких подробных и точных карт, какие давно уже составлены для всего видимого полушария Луны.

а) Моря. Тёмные пятна, видимые простым глазом, Галилей назвал морями. Это большие равнины, уровень которых ниже среднего уровня остальной поверхности. Меньшие тёмные пятна названы «озёрами» и «заливами». Морям, озёрам и заливам даны весьма странные названия: например, Море Дождей, Море Ясности, Озеро Смерти и т. п. (рис. 93).

б) Кратеры (цирки). Вся остальная поверхность, более светлая, чрезвычайно гориста и изрыта гораздо сильнее, чем поверхность земных материков. При этом лунные горы значительно отличаются от

земных. Главными горными образованиями на Луне являются не горные хребты, как на Земле, а неправильно и крайне часто разбросанные кратеры, или кольцевые горы. Они похожи на кратеры некоторых земных вулканов, но отличаются от них своими громадными размерами



Рис. 93.

и более плоским дном. Самые большие земные кратеры в поперечнике имеют обыкновенно несколько километров, между тем на Луне есть много «кратеров», диаметры которых достигают 100—200 км. Внутри самых больших кратеров могло бы поместиться целое государство вроде Бельгии. На рис. 94 изображены: а) земной кратер, б) нормальный лунный кратер и в) лунный кратер с центральной горкой (схематические разрезы).

Лунные кратеры обыкновенно имеют круглую форму; они окружены «валом» — высоким горным кольцом, отлогим наружу и круто

обрывающимся внутрь кратера. В центре кратера часто находится «центральная горка», иногда их бывает несколько; они всегда ниже вала. Кратеры названы именами астрономов и философов, например именами Коперника, Тихо, Аристарха. Число кратеров громадно (рис. 95; Луна в первой четверти); на подробных картах их нанесено свыше 30 000; большинство кратеров имеет, впрочем, сравнительно небольшой диаметр — от одного до нескольких километров (на Земле и такие кратеры считались бы большими).

в) Горные цепи, но не хребты, как на Земле, а просто скопления крутых пиков, встречаются на Луне значительно реже кратеров. Отдельные вершины этих цепей достигают такой же высоты, как и

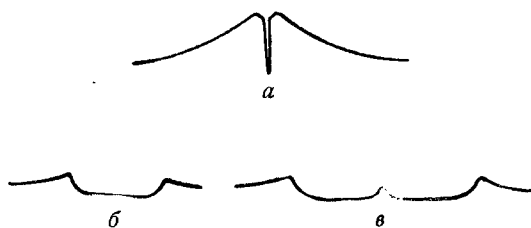


Рис. 94.

самые высокие земные горы, — до 8 км. Горные цепи получили земные названия; так, на лунных картах мы найдём Кавказ, Альпы, Апеннины.

Наконец, на Луне наблюдаются ещё такие образования, ко-

торых на земной поверхности совсем нет. Это — *бороздки* и *лучи*.

г) Бороздки (трещины) — тёмные узкие извилистые линии, шириной до нескольких километров. Повидимому, это глубокие трещины в лунной коре, тянущиеся на сотни километров.

д) Светлые лучи. Это не углубления и не возвышения, а светлые широкие полосы, расходящиеся в разные стороны от отдельных кратеров. Они идут через горы, долины и кратеры без всякого изменения ширины и направления. Самая красивая система лучей расходитя от кратера Тихо; некоторые его лучи тянутся больше чем на тысячу километров. Кратер Тихо со своими лучами во время полнолуния легко виден в бинокль (у южного, т. е. нижнего, края диска).

**§ 234. Происхождение лунных гор.** Для объяснения формы лунных кратеров в настоящее время существуют две гипотезы. Одна из них считает, что лунные кратеры являются кратерами потухших вулканов, некогда действовавших на Луне. Действительно, фотографии лунной поверхности с кратерами очень похожи на аэрофотоснимки районов потухших вулканов на Земле, например, в районе Неанолья, где имеется многочисленная группа «лунных» цирков, причём в некоторых из них возвышается центральная горка. Горные цепи на Луне образовались тем же путём сдвигов в коре, как это имело место (и имеет сейчас) на Земле. Моря — это обширные низменности, естественно возникшие при горообразовании в ту отдалённую эпоху, когда внутреннее ядро Луны ещё было в расплавленном состоянии. Другая гипотеза считает, что лунные кратеры образовались от ударов и взрывов громадных метеоритов, которые падали на Луну, подобно тому

как образуются воронки от взрыва артиллерийских снарядов. Основание для этой гипотезы заключается в том, что Луна не окружена такой плотной атмосферой, как Земля, и, следовательно, метеориты падают на её поверхность с очень большой скоростью и могут производить большие разрушения. Однако трудно себе представить, чтобы метеориты, даже большие, смогли образовать кратеры диаметром в 200 километров, как например, у кратера Птолемей. К тому

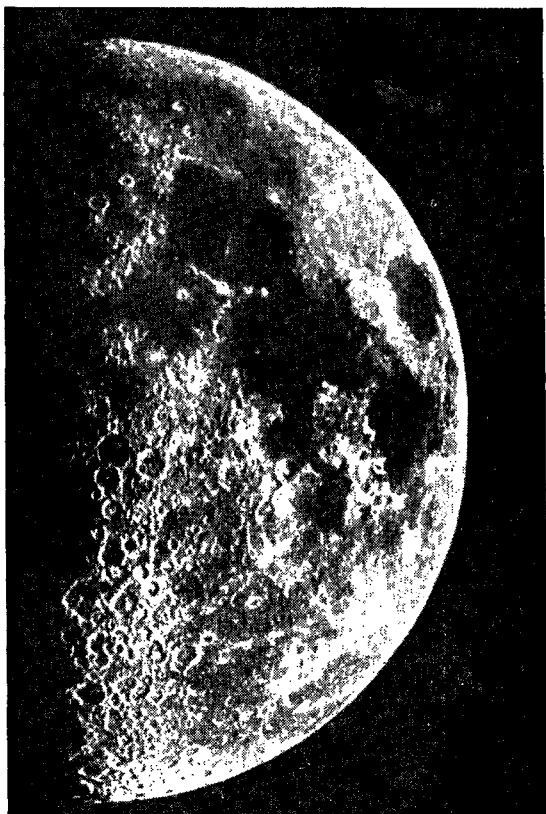


Рис. 95.

же в этом случае непонятно образование центральных гор. Но образование небольших отверстий (пор) в лунной коре вполне объясняется этой метеоритной гипотезой. Следовательно, приходится считать, что большие лунные кратеры образованы вулканической деятельностью, а мелкие поры — ударами метеоритов о поверхность Луны и их взрывами при падении.

**§ 235. Изменения на Луне.** Лунная поверхность не обнаруживает следов выветривания и размывания; поэтому надо думать, что на Луне никогда не было ни значительной атмосферы, ни заметного количества воды. Также и вулканические извержения на Луне давно прекратились. Теперь это мёртвая, каменистая пустыня, в которой не происходит почти никаких изменений, если не считать сравнительно редких случаев падения метеоритов. Только скалы, вследствие громадных колебаний температуры (§ 232), должны мало-помалу трескаться и иногда обрушиваться. Впрочем, до сих пор на поверхности Луны не произошло ни одного заметного изменения.

**§ 236. Влияние Луны на Землю.** Единственное действие Луны на Землю представляют морские *приливы* и *отливы* (§ 18<sup>1</sup>). Никаких других влияний Луна на Землю не оказывает. В частности, распространённое поверие, что погода изменяется с изменением фаз Луны, совершенно неверно. Погода изменяется во всякое время, но сторонники этого поверия естественно запоминают те перемены, которые пришлось близко к переменам фаз Луны (а таких случаев бывает, конечно, немало), и забывают все остальные.

**§ 237. Роль Луны в истории науки и мировоззрения человечества.** Значение Луны для Земли и человека гораздо меньше значения Солнца. Но в истории астрономии и мировоззрений Луна сыграла, пожалуй, не менее важную роль, чем Солнце.

1) Давно сказано, что «астрономия родилась в лунную ночь». Постоянные изменения вида Луны (смена её фаз, § 130) были, несомненно, первыми явлениями ночного неба, в которых человек обнаружил закономерность.

2) Зоркий глаз первобытного охотника при этом не мог не заметить, вначале близ полнолуния, а затем и при других фазах, что на диске Луны всегда видны одни и те же пятна на одних и тех же местах. Как говорили древние, мы знаем только «лицо» Луны, т. е. одно её полушарие, а другого полушария человек не видел никогда. Древним наблюдателям это должно было казаться вполне естественным. На вопрос «на чём держится Луна?» они сначала отвечали: «на небе», т. е. на той же твёрдой вращающейся сфере, к внутренней поверхности которой «прикреплены звёзды». После того, как было доказано, что Луна — шар и что она движется около Земли за 27,3 суток, неизменность её «лица» стали объяснять так же, как объяснялась неизменность созвездий: лунный шар подобно звёздам наглухо прикреплён к особой, также невидимой, твёрдой сфере. Эта сфера разделяет суточное движение звёздной сферы, но, кроме того, ещё и сама вращается вокруг другой оси, в направлении с запада на восток, с месячным периодом. Из всей этой сферы человек видит только прикреплённую к ней Луну. Впоследствии такие невидимые и непостижимые сферы были придуманы и для объяснения движений планет. Так возникла идеалистическая система «геоцентрических сфер», которая превратилась потом в систему Птолемея (§ 144). Возможно, что если бы вращение Луны вокруг оси совершалось с периодом, не равным месяцу, то развитие астрономии и механики пошло бы



другими путями: человек гораздо раньше подметил бы вращение Луны, а также сходство между движениями небесных тел и полётом брошенного камня, так что стадия построения сфер была бы исключена.

### *Упражнения к главе XI*

1. Как видна Земля для воображаемого наблюдателя, находящегося близ центра видимого лунного полушария? Как влияет для него либрация на видимое положение Земли?

2. Может ли наблюдаться с Луны восход и заход Земли?

3. По данным § 132 и 228 вычислить продолжительность аномалистического месяца или период либрации по долготе (до сотых долей суток).

4. Вычислить период либрации по широте (драконический месяц). Почему драконический месяц короче звёздного а аномалистический длиннее?

5. Как происходит на Луне суточное движение светил? Сколько времени продолжаются там день и ночь?

6. Так же ли сильно изменяется на Луне продолжительность дня с временами года, как на Земле?

7. Такой же ли вид имеет Солнце с Луны, как с земной поверхности?

8. Как на Луне происходят явления «падающих звёзд»?

9. Во сколько времени вращалась бы Луна вокруг оси для земного наблюдателя, если бы её истинный период вращения составлял полмесяца (в прямом направлении)? Если бы он был равен месяцу, но вращение происходило бы в обратном направлении?

10. Во сколько времени должна была бы Луна вращаться вокруг оси, чтобы период её вращения для земного наблюдателя равнялся её истинному периоду вращения? Объяснить решение и найти аналогичную задачу в упражнениях к гл. VII.

---

## ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

### ПЛАНЕТЫ

**§ 238. Обзор планетной системы.** В настоящее время нам известно *девять* больших планет и свыше 1500 малых, иначе называемых астероидами. Все эти тела обращаются вокруг Солнца по одному направлению (с запада на восток); плоскости орбит большинства планет очень близки одна к другой; орбиты их — эллипсы, большей частью мало отличающиеся от кругов (рис. 96).

Большие планеты можно разделить по их расстоянию от Солнца на две группы, причём члены каждой группы оказываются сходными между собой и в других отношениях.

К первой группе принадлежат четыре более *близких* к Солнцу планеты: Меркурий, Венера, Земля и Марс. Все эти планеты сравнительно *невелики*; Земля — самая большая из них. Так как они в общем похожи на Землю, то их иногда называют планетами типа Земли. Ко второй группе относятся четыре более *далёких* планеты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. И от Солнца и друг от друга эти планеты находятся на очень больших расстояниях. Размеры их громадны, почему эту группу и называют группой планет-гигантов<sup>1)</sup> (рис. 97). Между Марсом и Юпитером, т. е. как раз на границе двух групп, находится область *малых* планет, или астерондов. Самая далёкая планета Плутон соединяет в себе характерные черты обеих предыдущих групп.

Массы всех планет, вместе взятых, составляют всего около  $\frac{1}{750}$  массы Солнца. В этом одна из главных причин устойчивости солнечной системы; главная сила, управляющая планетными движениями, есть сила солнечного притяжения, и в сравнении с ней взаимные притяжения отдельных планет играют гораздо менее важную роль.

В физическом отношении все планеты сходны между собою тем, что они не излучают собственного света и видны только благодаря тому, что освещаются Солнцем. Поэтому в телескоп они не всегда кажутся правильными кружками, а могут представлять некоторую *фазу*. Нижние планеты (см. § 142) проходят полную смену фаз подобно Луне. Из верхних планет (§ 143) фазы заметны только у Марса.

---

<sup>1)</sup> Название предложено автором книги, (*Прим. ред.*)

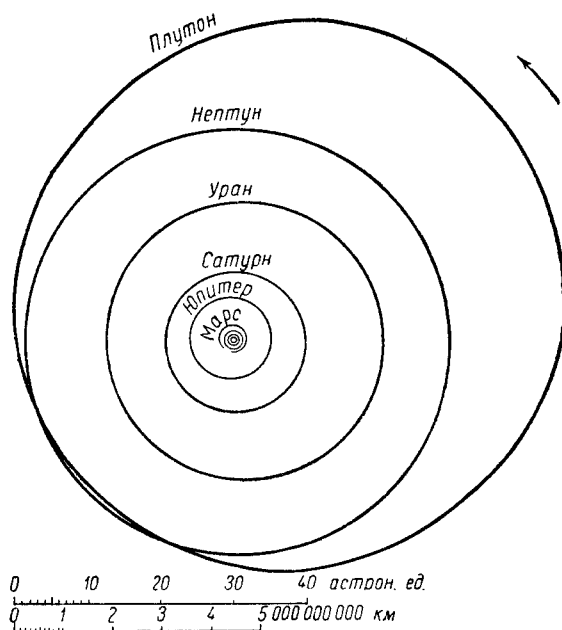


Рис. 96.

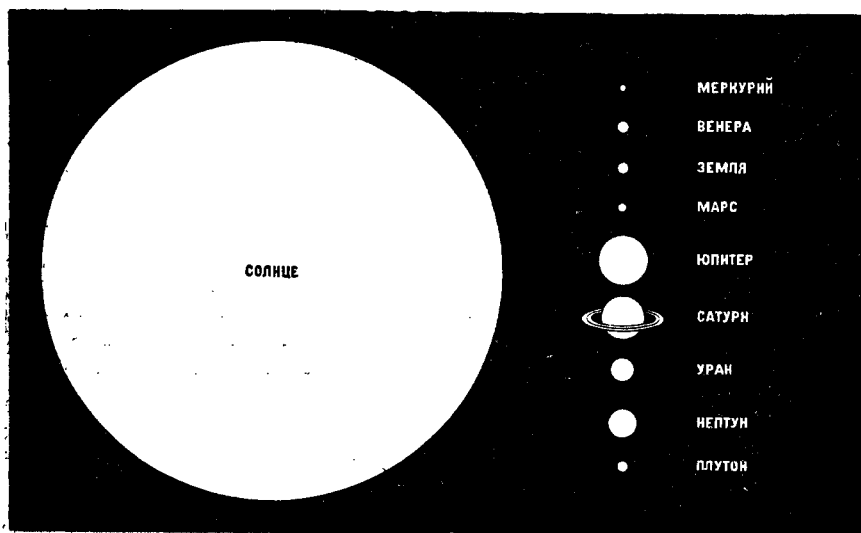


Рис. 97.

Кроме планет к солнечной системе принадлежат ещё: 1) спутники планет, 2) кометы и 3) метеорные тела. Движение всех этих тел также подчиняется закону всемирного тяготения, как и движение планет.

**§ 239. Правило Тициуса.** Третий закон Кеплера (§ 156) дал повод к поискам других соотношений между числами, характеризующими планеты. В 1766 г. было указано, что приближённые значения средних расстояний планет от Солнца получаются, если взять *ряд* чисел (не прогрессивно): 0, 3, 6, 12, 24... и прибавить к каждому из них по 4. Приводим полученный ряд вместе с истинными расстояниями планет, причём расстояние Земли принято за 10:

| Планеты             | Теоретические расстояния | Истинные расстояния |
|---------------------|--------------------------|---------------------|
| Меркурий . . . . .  | $0 + 4 = 4$              | 3,9                 |
| Венера . . . . .    | $3 + 4 = 7$              | 7,2                 |
| Земля . . . . .     | $6 + 4 = 10$             | 10,0                |
| Марс . . . . .      | $12 + 4 = 16$            | 15,2                |
| * Малые планеты . . | $24 + 4 = 28$            | 15—53               |
| Юпитер . . . . .    | $48 + 4 = 52$            | 52,0                |
| Сатурн . . . . .    | $96 + 4 = 100$           | 95,5                |
| * Уран . . . . .    | $192 + 4 = 196$          | 192,5               |
| * Нептун . . . . .  | —                        | 301,1               |
| * Плутон . . . . .  | $384 + 4 = 388$          | 396                 |

Когда это правило было предложено, планеты, отмеченные звёздочкой (\*), ещё не были известны. Открытие Урана и малых планет в промежутке между Марсом и Юпитером как будто доказало правильность «закона», но Нептун ему не удовлетворяет, а Плутон удовлетворял бы, если бы не было Нептуна. Кроме того, и Меркурий не укладывается в правильный математический ряд. Поэтому правило Тициуса нельзя и сравнивать с третьим законом Кеплера, имеющим глубокий динамический смысл (§ 164). Это всего лишь приближённое правило для запоминания планетных расстояний, да и то не всех.

**§ 240. Меркурий** — самая близкая к Солнцу и самая маленькая из «больших» планет; её диаметр составляет около 0,4 диаметра Земли, масса приблизительно в 20 раз меньше земной массы, плотность — примерно около  $2,5 \text{ г/см}^3$ . Среднее расстояние Меркурия от Солнца составляет 57,8 млн. км, а звёздное обращение всего 88 дней.

Так как его наибольшая элонгация от Солнца (§ 142) никогда не превышает  $28^\circ$ , то планета почти постоянно остаётся скрытой в лучах утренней или вечерней зари, и видеть её в наших широтах удаётся редко. Поэтому об её природе мы знаем очень немного.

Простому глазу Меркурий представляется звездой первой величины, иногда даже ярче; в максимуме блеска он почти равен Сириусу, самой яркой звезде неба. В телескоп он обнаруживает фазы подобно Луне

(рис. 98). Фазы эти зависят от его положения относительно Солнца. Близ верхнего соединения, далеко за Солнцем, он имеет вид почти полного маленького кружка. Около наибольшей элонгации он похож на Луну в первой или последней четверти, а близ нижнего соединения (между Солнцем и Землёй) принимает форму сравнительно большого, но узкого серпа.

Наблюдения Меркурия очень трудны. Есть основания думать, что по своей природе (как и по размерам) Меркурий больше похож на Луну, чем на Землю. Повидимому, он лишён атмосферы. Время вращения Меркурия вокруг оси ещё точно не определено, но вероятнее всего оно равно времени обращения вокруг Солнца, т. е. 88 дням. Это значит, что планета всегда обращена к Солнцу одной стороной, как Луна к Земле. Поэтому одно полушарие Меркурия сильно нагрето солнечными лучами (до температуры  $400^{\circ}\text{C}$ , как показывают прямые измерения), на нём вечный день, а на другом — вечная ночь и холод. Спутников Меркурий не имеет.

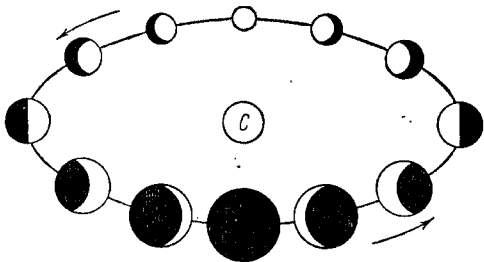


Рис. 98.

**§ 241. Венера.** Это блестящая «утренняя» и «вечерняя» звезда — самое яркое светило неба после Солнца и Луны. Во время своего наибольшего блеска она в 13 раз ярче Спируса. В это время блеск её так велик, что после захода Солнца предметы, освещённые ею, отбрасывают хорошо заметные *тени*, а днём её можно видеть простым глазом при полном солнечном сиянии. Если блеск её оценивать звёздными величинами (§ 281), то получаются отрицательные числа: в максимуме блеска Венера является звездой минус 4-й величины, в минимуме — минус 3-й.

По размерам Венера почти равна Земле: её диаметр меньше земного только на  $3\frac{1}{6}\%$ , а масса составляет  $\frac{4}{5}$  массы Земли. Обращается она вокруг Солнца в 225 дней, на среднем расстоянии в 108,1 млн. км.

В телескопы хорошо видны фазы Венеры, смена которых происходит так же, как у Меркурия, только видимый диаметр диска изменяется гораздо сильнее (рис. 60, стр. 148), так как в нижнем соединении планета к нам в шесть раз ближе, чем в верхнем. В нижнем соединении Венера подходит к Земле на 40 млн. км, т. е. ближе всякого другого небесного тела, за исключением Луны и некоторых малых планет, невидимых простым глазом; но в это время она обращена к Земле тёмной стороной, как Луна в новолуние, так что наблюдать её поверхность нельзя.

На блестящей белой поверхности планеты не видно никаких определённых пятен, по которым можно было бы следить за её вращением

вокруг оси, и время этого вращения до сих пор неизвестно. Есть указание, что вращение Венеры медленное, примерно один оборот в месяц. Думали даже, что эта планета обращена к Солнцу всегда одной и той же стороной, но теперь эта мысль оставлена.

Причиной, мешающей нам ознакомиться с поверхностью Венеры, является её атмосфера, открытая М. В. Ломоносовым 6 июня 1761 г. во время прохождения планеты по диску Солнца (§ 242). Существование атмосферы лучше всего доказывается видом Венеры близ нижнего соединения, когда Солнце находится позади планеты. В это время часто случается наблюдать Венеру не в виде узкого полукруга (серпа), идущего, как у молодой Луны, на  $180^\circ$  (от конца одного рога до

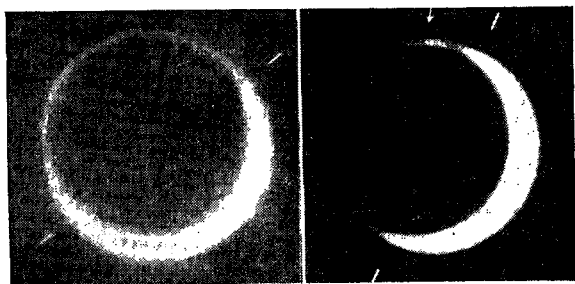


Рис. 99

конца другого), а в виде почти полной окружности (рис. 99). Это явление может быть объяснено лишь преломлением света в плотной атмосфере планеты.

Атмосфера Венеры очень туманна, так что самую поверхность её мы видим чрезвычайно редко, лишь в прорывы облаков, плавающих в атмосфере. По своему составу атмосфера Венеры сильно отличается от земной. В спектре планеты до сих пор не обнаружено ни линий кислорода, ни линий водяного пара, но зато имеются широкие интенсивные полосы *углекислого газа*, которые в спектре земной атмосферы совершенно незаметны. Следовательно, атмосфера Венеры содержит гораздо больше этого тяжёлого газа, чем наша атмосфера, и в основном состоит из него. У Венеры, как и у Меркурия, спутников не имеется. Венера получает тепла от Солнца вдвое больше, чем Земля, и поэтому температура на её поверхности, освещённой Солнцем, значительно выше земной (около  $+100^\circ\text{C}$ ). Температура на ночной стороне планеты, измеренная термоэлементом, оказалась равной около  $-25^\circ\text{C}$ , что лишний раз подтверждает факт вращения Венеры около оси с периодом, значительно меньшим 225 суток (её времени обращения).

**§ 242. Прохождение Меркурия и Венеры по диску Солнца.** Так как обе эти планеты движутся по орбитам, заключённым внутри зем-

ной орбиты, то они иногда проходят в точности между Солнцем и Землей. В это время планету можно заметить на солнечном диске в виде маленького чёрного кружка. Прохождения Меркурия случаются в среднем 13 раз в столетие; они бывают только в мае и ноябре, ближайшее произойдёт 14 ноября 1953 г. Прохождения Венеры, которые бывают только в июне и декабре, наблюдаются гораздо реже. Они повторяются периодически через 8 лет,  $105\frac{1}{2}$ , опять 8 и  $121\frac{1}{2}$  года. Последняя пара прохождений наблюдалась в декабре 1874 г. и 1882 г., следующая пара произойдёт только в июне 2004 и 2012 гг.

Наблюдение прохождений Меркурия важно для исследования движения этой планеты, которое представляет большой интерес с точки зрения небесной механики (§ 188). Прохождения Венеры прежде тщательно наблюдались для определения параллаксов Солнца, но теперь этот способ оставлен, как недостаточно точный.

**§ 243. Земля — Луна.** Третье место по порядку от Солнца занимает единственная в солнечной системе *двойная планета* — наша Земля с Луной. Действительно, размеры Луны по отношению к Земле так значительны, что она не может считаться спутником той же категории, как спутники всех других планет. Для наблюдателя на Венере Земля с Луной представляется двойной звездой необыкновенной красоты: главное светило значительно ярче Венеры, наблюдаемой с Земли, а спутник имеет, примерно, яркость Юпитера, причём расстояние между ними никогда не превосходит  $\frac{1}{2}^\circ$ . Из свойств Земли как небесного тела мы рассмотрим только одно (§ 244).

**§ 244. Движение земных полюсов.** В 1884 г. Кюстнер открыл, что широты точек земной поверхности периодически изменяются. Вскоре это было подтверждено работами других астрономов, и в особенности точными систематическими определениями широты Московской университетской обсерватории (ныне ГАИШ), выполненными П. К. Штернбергом в 1892—1895 гг.

Позднейшие систематические определения широт ряда пунктов, расположенных вокруг всего земного шара на одной и той же широте, показали, что изменения широты каждой точки происходят в строгом соответствии со всеми другими точками; например, когда широта точки *A* увеличивается, широта диаметрально противоположной точки *B* той же параллели на столько же уменьшается. Это может быть объяснено только *движением полюсов* по земной поверхности: в данном случае северный полюс приближается к точке *A* и на столько же отдаляется от точки *B*. Таким же движением обладает, конечно, и южный полюс; следовательно, явление состоит в том, что земная ось изменяет своё положение относительно тела Земли (не смешивать это движение с процессуальным изменением положения оси вращения Земли в пространстве).

Перемещение полюсов ничтожно: широта каждой точки изменяется не более чем на  $0'',7$ . Полюс при своём движении по поверхности Земли всегда остаётся внутри квадрата, сторона которого равна 20 м. В этом квадрате истинный полюс обращается вокруг среднего полюса

всё время в одном и том же направлении. Описываемая полюсом сложная кривая при математическом исследовании оказывается состоящей из нескольких более простых кривых, из которых главными являются: 1) движение по эллипсу с годичным периодом и 2) движение по кругу в том же направлении с периодом около 14 месяцев. Годичная составляющая, повидному, связана со сменой времени года (нарастание и таяние снега и льда то в северном, то в южном полушарии). Причиной четырнадцатимесячного периода может быть не вполне равномерное распределение масс внутри земного шара.

**§ 245. Марс. Его движение и блеск.** Марс принадлежит уже к числу *верхних* планет; поэтому условия его видимости более благо-

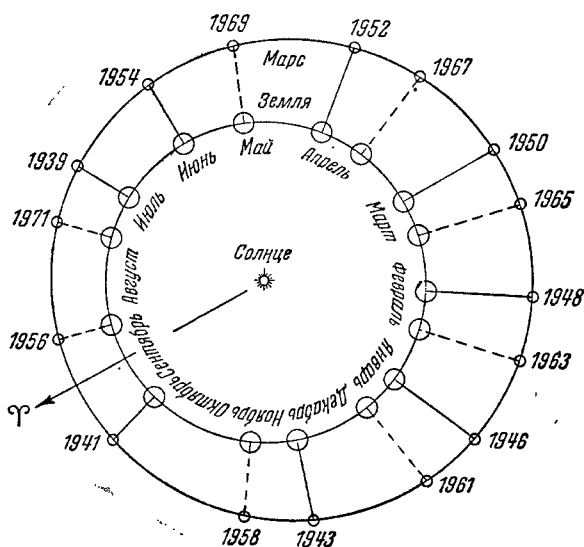


Рис. 100.

приятны, чем для Меркурия или Венеры. Именно, Марс время от времени бывает в *противостоянии* с Солнцем (§ 143); тогда он подходит к Земле на самое близкое расстояние, кульминирует в полночь и доступен для наблюдений в течение целой ночи. Звёздное обращение вокруг Солнца — 687 суток, т. е. несколько меньше двух лет. Если бы оно составляло ровно два года, то в то время как Марс совершает один оборот, Земля делала бы два и противостояния происходили бы через каждые два года. Но так как Марс движется несколько быстрее то Земле нужно ещё, сверх двух лет, около 50 дней, чтобы его догнать. Поэтому промежуток между двумя противостояниями, или так называемое *синодическое* время обращения (§ 151), содержит в среднем 2 года 50 дней.



Не все противостояния одинаково благоприятны. Вследствие значительного эксцентриситета орбиты Марса (0,09) его расстояние от Солнца колеблется в довольно широких пределах (рис. 100). Поэтому, если противостояние придётся на то время, когда Марс находится близ своего афелия, то расстояние от Земли будет 100 млн. км; около перигелия, напротив, расстояние бывает почти вдвое меньше, именно 55 млн. км. Эти последние противостояния называются *великими*; они повторяются через 15 или 17 лет и бывают всегда в июле — сентябре. Последнее великое противостояние было в 1939 г., следующее будет в 1956 г.

Простому глазу Марс представляется яркой красной звездой.

Вследствие сильных изменений расстояния от Земли его блеск чрезвычайно сильно колеблется: около соединений, далеко за Солнцем, он кажется звездой всего лишь 2-й величины, во время же великих противостояний он ненадолго становится самым ярким объектом неба после Венеры.

Марс почти вдвое меньше Земли; его диаметр составляет около 6900 км; масса его меньше земной массы приблизительно в 8 раз; плотность равна  $3,84 \text{ г/см}^3$  или 0,71 земной, а сила тяжести на поверхности планеты — в 5 раз меньше, чем на Земле.

**§ 246. Поверхность Марса. Сходство с Землёй.** Эта планета представляет особый интерес, так как в некоторых отношениях она похожа на Землю.

На поверхности Марса видны постоянные пятна (рис. 101); наблюдение их показало, что Марс вращается вокруг оси почти во столько же времени, как Земля, именно в 24 ч. 37 м. 23 сек.

Ось вращения планеты составляет с перпендикуляром к плоскости орбиты угол около  $25^\circ$  (у Земли —  $23\frac{1}{2}^\circ$ ). Вследствие этого на Марсе происходит такая же смена времён года, как и на Земле, только каждое время года продолжается почти вдвое дольше, так как и самый год Марса почти вдвое длиннее земного.

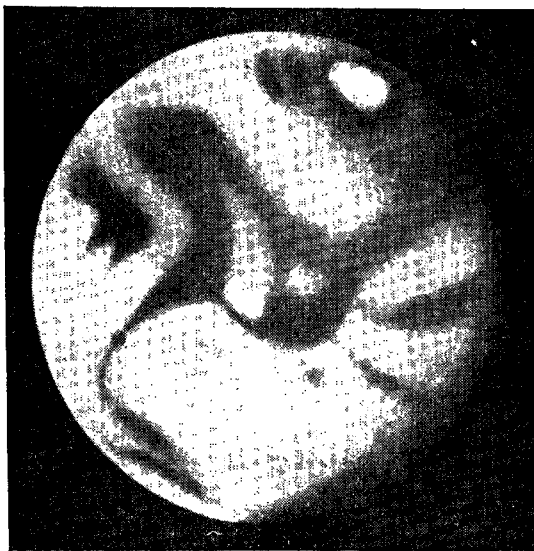


Рис. 101.

Атмосфера на Марсе есть, но гораздо разреженнее и суше земной (как и следовало ожидать ввиду малой массы планеты; § 230); облака и туманы наблюдаются в ней несомненно, но очень редко. Доказательство существования атмосферы Марса было дано Г. А. Тиховым (ныне член-корреспондент АН СССР) в 1909 г. Сделанные им фотоснимки планеты в лучах разных цветов показали, что резкость деталей на диске Марса снижается с приближением к краю диска (так как луч от края диска проходит более длинный путь в атмосфере планеты); притом это ослабление наиболее заметно на голубых снимках и наименее — на красных. Спектральные линии водяного пара и кислорода в атмосфере Марса удалось обнаружить на снимках с полной достоверностью только в 1925 г. По интенсивности этих линий было вычислено, что над единицей поверхности Марса кислорода содержится 15<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, а водяного пара даже только 5<sup>0</sup>/<sub>0</sub> нормального количества, содержащегося в земной атмосфере. Таким образом, атмосфера даже у самой поверхности Марса значительно более разрежена, чем атмосфера на вершинах самых высоких земных гор, и её плотность примерно соответствует плотности земной атмосферы на высоте 15 км над уровнем моря.

На диске Марса бросаются в глаза два светлых пятна, одно вокруг Северного полюса, другое — вокруг Южного. Каждое из этих



Рис. 102.

пятен увеличивается, когда в данном полушарии бывает зима: с наступлением лета оно, наоборот, уменьшается и часто совсем исчезает (рис. 102). Если бы мы могли взглянуть на Землю из мирового пространства, то вокруг её полюсов также увидели бы белые пятна, которые зимой казались бы больше, а летом меньше. Таким образом, не только в атмосфере, но и на поверхности Марса есть вода, но количество её значительно меньше, чем на Земле; это видно из того, что белые пятна вокруг полюсов Марса тают быстро и нередко пропадают совершенно, чего на Земле никогда не бывает. Очевидно, там полярный покров гораздо тоньше, чем у нас. По исследованиям Тихова полярные шапки Марса состоят преимущественно из льда, а не из снега, так как они имеют, собственно говоря, голубоватый цвет.

Кроме светлых полярных пятен, на Марсе видны ещё *тёмные* пятна, которые в общем не изменили своих очертаний за всё время телеско-

пических наблюдений. На картах планеты они названы морями; в противоположность Земле «морья» Марса занимают меньше половины всей поверхности планеты (рис. 101). На оранжево-жёлтых «материках» Марса можно видеть тёмные размытые полосы, тянущиеся по различным направлениям. Итальянский астроном Скиапарелли, который первый обратил на них внимание в 1877 г., назвал их «каналами» (по-итальянски это значит также «пролив», а не только искусственный канал).

*Физические условия* на Марсе значительно отличаются от земных. Прежде всего тепла Марс получает от Солнца вдвое меньше, чем Земля. Даже на экваторе планеты температура её поверхности поднимается днём, по измерениям астрофизиков, примерно только до  $+10^{\circ}$ , к заходу Солнца падает до нуля, а ночью по меньшей мере до  $-50^{\circ}$ . «Моря» Марса имеют совсем другую природу, чем земные моря и океаны. Академик В. Г. Фесенков доказал, что на Марсе отсутствуют открытые водоёмы больших размеров. Исследованиями советских учёных Г. А. Тихова, В. Г. Фесенкова, Е. Л. Кринова и Л. Н. Радловой, занимавшихся изучением отражательной способности областей Марса, установлено сходство в отражении солнечных лучей марсианской и земной поверхностью. Оранжево-жёлтые «материки» обнаружили сходство с земными пустынями, а «морья», в особенности в весеннее и летнее время Марса — с покровами земной растительности. Видно, моря — это более влажные области, покрытые растительностью, тем более, что цвет их изменяется с зелёного (весной) до жёлтого и бурого (в осеннее время). Необходимо помнить, что растительность (как и жизнь вообще) на Марсе должна очень сильно отличаться от земной, так как ей приходится развиваться на планете, крайне скудно снабжённой (по сравнению с Землёй) теплом, водой и воздухом. Большая же часть поверхности Марса представляет собой красно-жёлтую безжизненную пустыню. Наличие растительности на Марсе, доказанное советскими учёными, ещё раз подтверждает правильность марксистско-ленинской философии во взглядах на жизнь как на закономерный процесс развития материи, возникающей всегда там, где для этого существуют подходящие условия.

Вопрос о природе каналов возбуждал ещё недавно много споров. Ловелл настаивал на том, что они являются созданием разумных существ — жителей Марса. Но теперь выяснилось, что в очень сильные инструменты каналы видны не лучше, а хуже, чем в сравнительно слабые. Часто оказывается, что на том месте, где Ловелл рисовал прямую линию, в мощные инструменты видно несколько неправильных пятен, расположенных лишь приблизительно на одной прямой. В слабую трубу ни одно из этих пятен в отдельности не видно, но общее впечатление от всех них получается в виде слабой прямой линии. Таким образом, в действительности поверхность Марса имеет совершенно естественный вид, без правильной геометрической сети каналов, так что вопрос об их искусственном происхождении сам собой отпадает.

**§ 247. Спутники Марса.** Во время великого противостояния 1877 г. у Марса открыты два слабых спутника, которые получили название Фобос и Деймос («Страх» и «Ужас», так назывались в древней мифологии спутники бога войны, Марса). Видеть этих спутников можно только в очень сильные инструменты и на фотографиях с длительной экспозицией, так как диаметр их вряд ли превышает 20—30 км. Первые фотографии спутников Марса были получены русским астрономом С. К. Костинским в Пулкове. Поразительна их близость к планете и, в связи с этим, очень быстрое обращение. Так, Фобос находится к поверхности Марса в 60 раз ближе, чем Луна к Земле, и делает полный оборот всего в 7 ч. 39 м., следовательно, его «месяц» втрое короче «суток» Марса. В своём движении он обгоняет вращение планеты, и для наблюдателя на её поверхности быстро движется навстречу суточному обращению неба, т. е. восходит на западе и через несколько часов заходит на востоке. Деймос удалён от планеты на 24 000 км, и время его обращения составляет 30 часов. С поверхности Марса оба спутника кажутся гораздо слабее нашей Луны.

**§ 248. Малые планеты.** Правило Титцуса (§ 239) заставляло думать, что между Марсом и Юпитером должна быть планета. 1 января 1801 г. такая планета действительно была открыта итальянским астрономом Пиацци; она получила имя Цереры. Её открытие не только вызвало большой интерес, но и сыграло громадную роль в развитии астрономии: когда планета, вскоре после открытия, исчезла в солнечных лучах, Гаусс по немногим наблюдениям Пиацци вычислил её орбиту и указал, в каком месте неба нужно её искать. Способ, которым он решил задачу «определить планетную орбиту по трём наблюдениям», и до настоящего времени успешно применяется теоретической астрономией для определения орбит небесных тел.

Оказалось, что Церера — лишь одна из множества *малых планет*, или *астероидов*, обращающихся вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера. В следующем году была открыта вторая планета — Паллада; теперь их известно уже более 1500, и открытия продолжают непрерывно, — каждый год находят несколько новых планет. Они обозначаются номерами, поставленными в скобки, и именами, большей частью женскими. Вначале это были имена из греческой и римской мифологии, потом просто женские имена разных народов. Теперь малые планеты называют именами выдающихся деятелей, но обычно с женским окончанием. Например, многим планетам присвоены имена знаменитых русских и советских политических и научных деятелей. Одной из них присвоено имя великого вождя трудящихся Владимира Ильича Ленина; она называется «Владилена». Другим планетам даны названия: «Морозовия» в честь Н. А. Морозова, «Бредихина» (в честь Ф. А. Бредихина), «Белопольская» (в честь А. А. Белопольского), «Белявская» (в честь С. И. Белявского), «Штернбергия» (в честь П. К. Штернберга) и т. д. Планеты, выделяющиеся из остальных своими орбитами или другими характеристиками, получают мужские имена.

В настоящее время для открытия новых планет употребляются почти исключительно *фотографические* способы. Самый простой из них состоит в том, что какой-нибудь участок неба близ эклиптики фотографируется с выдержкой в час или больше; при этом инструмент ведётся часовым механизмом так, чтобы изображения звёзд всё время приходились на тех же местах фотографической пластинки; на фотографии они выйдут маленькими кружками и точками. Планета же, если она имеется в этой части неба, выйдет в виде *чёрточки*: она «смажется» благодаря собственному движению. Достаточно одного взгляда на фотографию, чтобы отличить планету от сотен звёзд, полученных на снимке. Однако способ этот не пригоден для поисков более слабых планет: чёрточка, оставленная такой планетой на фотопластинке, может оказаться почти или совсем не заметной. Поэтому в настоящее время чаще употребляется следующий способ поисков малых планет. Телескоп, в фокусе которого помещена фотопластинка, ведётся часовым механизмом так, как должна двигаться суточным движением не звезда, а пока ещё не открытая планета (*среднее* видимое движение по прямому восхождению близ противостояния хорошо известно). Поэтому звёзды на фотопластинке получаются чёрточками, а свет от планеты падает на одно и то же место пластинки, и планета выходит на фотопластинке в виде точки. Таким способом советские учёные открыли свыше 300 планет. Большинство их открыто на обсерватории в Симеизе (Крым), которая занимает ведущее место в мире в изучении малых планет.

Планы, открытые первыми, являются и самыми яркими из всех; Веста (4), открытая в 1807 г., бывает даже видима простым глазом; остальные, особенно открытые за последнее время, очень слабы. Самая большая из них Церера (1) имеет диаметр около 800 км, самые маленькие — меньше 1 км. Самые маленькие из планет имеют не шарообразную, а неправильную форму; это — гигантские «осколки» или «глыбы», при своём полёте вращающиеся. Этим объясняются замеченные у многих из них неправильные изменения блеска. Общая масса всех известных до сих пор планет должна быть в несколько сот раз меньше массы Земли.

Эллиптические орбиты малых планет часто имеют сравнительно *большой эксцентриситет*, значительно больший, чем даже у Меркурия (0,2); есть несколько планет с эксцентриситетом больше 0,5, так что эти последние планеты движутся совершенно так, как периодические кометы (см. § 260). Также наклоны плоскостей их орбит к эклиптике большей частью очень велики, примерно у половины больше  $10^\circ$  (§ 249, в).

Время обращения большей части астерондов составляет от 4 до 5 лет, но встречаются всевозможные периоды, начиная от периода менее 2 лет (как у Марса) до 12 лет (время обращения Юпитера) и даже больше. Эти крайние случаи — самых близких и самых далёких малых планет — мы рассмотрим отдельно.

§ 249. Наиболее интересные из малых планет. а) Планета Эрот. Планета Эрот (433), открытая в 1898 г., движется по эллипсу, большая полуось которого (1,46) несколько меньше большой полуоси орбиты Марса (1,52). Таким образом, планета движется, собственно говоря, между Землей и Марсом. Но так как её эллипс гораздо более вытянут, чем эллипс, описываемый Марсом, то часть его расположена внутри орбиты Марса, а часть — между орбитами Марса и Юпитера (рис. 103). По временам эта планета подходит к Земле в  $2\frac{1}{2}$  раза ближе, чем Марс, именно на расстояние в 22 млн. км. Так было,

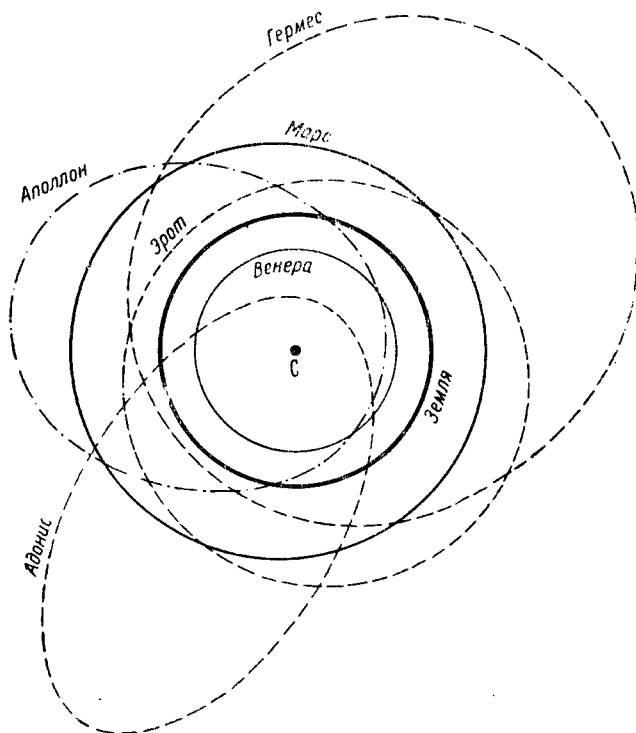


Рис. 103.

например, в 1931 г. Вследствие такого значительного приближения к Земле Эрот является одной из удобных планет для определения расстояния до Солнца (§ 118). Диаметр этой планеты не превышает 20 км.

В XX в. было открыто несколько планет, которые могут, как показало вычисление по наблюдениям первого противостояния, подходить к Земле так же близко, как Эрот, и даже ещё ближе. Им также дали мужские имена (Альберт, Аполлон, Адонис, Гермес; рис. 103). Но при следующих противостояниях некоторые из них не удалось найти.

б) Планеты группы Юпитера. Особенный интерес с точки зрения небесной механики представляют те планеты, у которых среднее расстояние и время обращения приблизительно такие же, как у Юпитера. Таких планет открыто за последнее время больше десяти, все они получили имена героев Троянской войны (Ахиллес, Гектор и т. д.), их называют «тройанской группой». Интерес их заключается в следующем. Лагранж показал, что «задача трёх тел» может быть решена, если три притягивающиеся точки в начальный момент составляют равносторонний треугольник и имеют определённые скорости. Тогда они всё время будут сохранять одинаковое взаимное расположение; треугольник не изменит своей формы, он будет только изменять свои размеры и поворачиваться. Оказалось, что каждая планета «тройанской группы» всё время составляет почти равносторонний треугольник с Солнцем и Юпитером (притяжением остальных тел можно пренебречь). Таким образом, найденный математиком теоретический случай движения осуществляется в действительности.

Открытые до сих пор «тройяницы» движутся двумя группами, численно почти равными. Математический «центр» первой группы идёт всё время впереди Юпитера на  $60^\circ$ , центр второй группы — на столько же позади. Движение каждой планеты математически изображается как очень медленное обращение вокруг этих «точек Лагранжа».

в) Планета Гидальго (944) имеет совершенно кометную орбиту, эксцентриситет 0,65 и наклон к эклиптике  $43^\circ$ . Её среднее расстояние (5,71) и время обращения больше, чем у Юпитера. В афелии планета отходит от Солнца на расстояние 9,4 астроном. единицы, т. е. почти до орбиты Сатурна, а в перигелии возвращается к орбите Марса.

Возможно, что орбита планеты приняла такую форму благодаря притяжению Юпитера, который вообще в движении малых планет производит очень сильные возмущения.

**§ 250. Общая характеристика четырёх далёких планет.** Четыре далёкие планеты (гиганты) сильно отличаются от планет земной группы, а между собой, повидному, очень сходны. При громадном объёме они имеют очень *малую плотность* (от  $\frac{1}{8}$  до  $\frac{1}{4}$  земной плотности) и очень *быстрое вращение* вокруг оси. Все они окутаны очень *густыми атмосферами*, так что мы их поверхности никогда не видим. Эти атмосферы дают в спектрах планет широкие полосы поглощения, которые долго оставались загадочными. Только в 1933 г. было доказано, что они принадлежат аммиаку (соединение азота с водородом) и ядовитому газу метану (один из углеводов).

Физическая природа этих планет нам ещё не вполне ясна, хотя достоверно доказано, что и они являются холодными остывшими телами, ибо прямые измерения тепла, посылаемого этими планетами, доказали, что их атмосферы имеют крайне *низкую температуру* (даже на Юпитере ниже  $-100^\circ \text{C}$ , а на более далёких ещё ниже), как и следовало ожидать по их расстоянию от Солнца.

§ 251. Юпитер. Эта планета-гигант (рис. 104) по своей массе превосходит все остальные планеты, вместе взятые. По диаметру она в 11 раз больше Земли, по объёму — в 1300 раз, но её масса больше земной массы только в 318 раз, так что плотность её составляет около 0,25 земной и приблизительно равна плотности Солнца. Юпитер

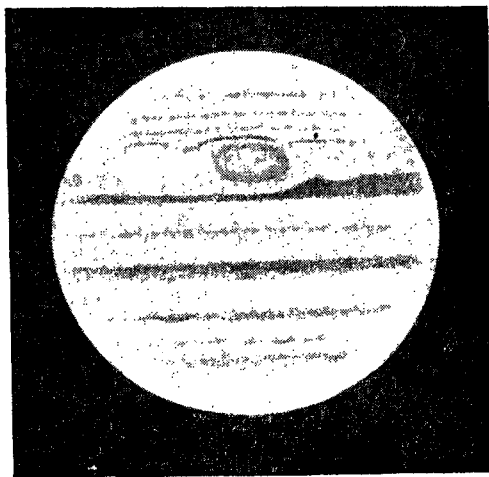


Рис. 104.

удалён от Солнца в среднем на 5,2 астроном. единицы и обращение вокруг него совершает почти в 12 лет. Из всех планет Юпитер наиболее бросается в глаза. По блеску он уступает только Венере; его блеск, в зависимости от расстояния, колеблется от — 2,5 до — 1,5 звёздной величины.

Уже в слабую зрительную трубу на диске Юпитера видны *полосы*, идущие параллельно экватору планеты. Они часто состоят из отдельных пятен, напоминающих облака. Форма их всё время меняется, так что составить карту Юпитера невозможно.

Более постоянным является так называемое «красное пятно». На него впервые обратили внимание в 1878 г.; особенно тщательно его исследовал Бредихин. Пятно имеет овальную форму и его наибольший диаметр примерно в три раза больше диаметра Земли. По временам пятно пропадает, затем опять становится видимым. По современным воззрениям оно является огромным сгустком холодного аммиака, плавающим в углеводородной атмосфере планеты, вблизи её поверхности.

Природа Юпитера. Не подлежит сомнению, что всё, что мы видим на диске Юпитера, представляет собой лишь облачную оболочку, окутывающую поверхность планеты. Раньше считали вероятным, что твёрдая поверхность, подобная земной коре, у Юпитера ещё не образовалась и что планета сохраняет большие запасы собственного тепла. Это доказывалось характерным вращением Юпитера около оси, имеющим ту же особенность, что и вращение Солнца: экваторальный пояс планеты совершает одно обращение в 9 ч. 50 м., а более высокие широты — в 9 ч. 55 м., т. е. несколько медленнее. Твёрдое тело так вращаться не может. Ось вращения планеты почти перпендикулярна к плоскости орбиты Юпитера (и к эклиптике); его экватор наклонён к первой плоскости всего лишь на 3°. Поэтому смены времён года (в отличие от Земли и Марса) на Юпитере не происходит,



В настоящее время считают наиболее вероятным, что планета состоит из центрального твёрдого плотного ядра, объём которого составляет сравнительно небольшую часть видимого нами шара Юпитера. Всё остальное — гигантская атмосфера очень сложного строения. Только верхние слои этой атмосферы доступны нашим наблюдениям. Естественно поэтому, что различные области атмосферы вращаются вокруг оси с различной скоростью: чем ближе к полюсу, тем время вращения больше. Быстрое вращение Юпитера имеет своим следствием сильную *сплюснутость* планеты. Действительно, *сжатие* Юпитера составляет  $\frac{1}{15}$  и при наблюдении планеты в телескоп заметно сразу.

**§ 252. Спутники Юпитера.** В 1610 г. Галилей открыл у Юпитера четырёх спутников. Они очень ярки и были бы видны даже простым глазом, если бы наблюдениям не мешал свет планеты. Два самых больших из них больше Меркурия, самый маленький почти равен нашей Луне. При своём обращении вокруг Юпитера спутники представляют много интересных явлений: то прячутся за планетой (покрытие), то, наоборот, проходят перед её диском, то попадают в тень планеты (затмение), то сами отбрасывают на неё свою тень (затмение Солнца на Юпитере). Наблюдение моментов этих явлений имеет и практическое значение: оно даёт простой (но не очень точный) способ определения *долготы и поправки часов* (§ 102). Кроме того, из этих же наблюдений можно вывести величину *скорости света* (Ремер, 1675 г.) и *постоянную аберрации* (§ 124).

*Галилеевы спутники* движутся почти в точности в плоскости экватора Юпитера, по орбитам, очень близким к кругам, с периодами от  $1\frac{3}{4}$  (I спутник) до 16 суток (IV спутник), на расстояниях, которые составляют от 0,5 до 5 расстояний нашей Луны. Взаимные притяжения спутников вызывают в их движении сильные возмущения, изучение которых открывает много интересного. Например, если обозначить угловые скорости (например, в 1 сутки) каждого спутника через  $n$ , а долготы их, как они видны с Юпитера, — через  $l$ , то получим для первых трёх спутников следующие простые соотношения:

$$n_1 + 2n_3 = 3n_2, \quad (1)$$

$$l_1 + 2l_3 = 3l_2 + 180^\circ. \quad (2)$$

Лаплас доказал, что эти соотношения не случайны и что они должны сохраняться при всех изменениях орбит спутников.

Одним из следствий равенства (2) является такое: три первых спутника не могут находиться в затмении одновременно.

В XIX и XX вв. у Юпитера было открыто ещё 7 очень слабых спутников, обозначаемых номерами в порядке их открытия.

Один из них, V, открытый в 1892 г., значительно ближе к планете, чем галилеевы спутники, и делает один оборот около планеты всего в 12 час.; остальные шесть, наоборот, гораздо дальше. Они, повидимому, образуют две различные группы; к первой принадлежат

VI, VII и X спутники; они имеют прямое обращение с периодами от 250 до 260 дней. Спутники же VIII, IX и XI движутся в *обратном* направлении с востока на запад, навстречу обращению спутников первой группы и самой планеты; они так *далеки* от Юпитера (время обращения около 2 лет), что притяжение планеты крайне ослаблено, и тем сильнее возмущающее действие Солнца. Поэтому движение их очень сложно, и более или менее постоянной орбиты они не имеют. Возможно даже, что их движение *неустойчиво*: солнечное притяжение когда-нибудь вырвет их из сферы притяжения Юпитера и сделает их самостоятельными планетками.

**§ 253. Сатурн.** Простому глазу Сатурн представляется звездой 1-й величины. По размерам это самая большая планета после Юпи-

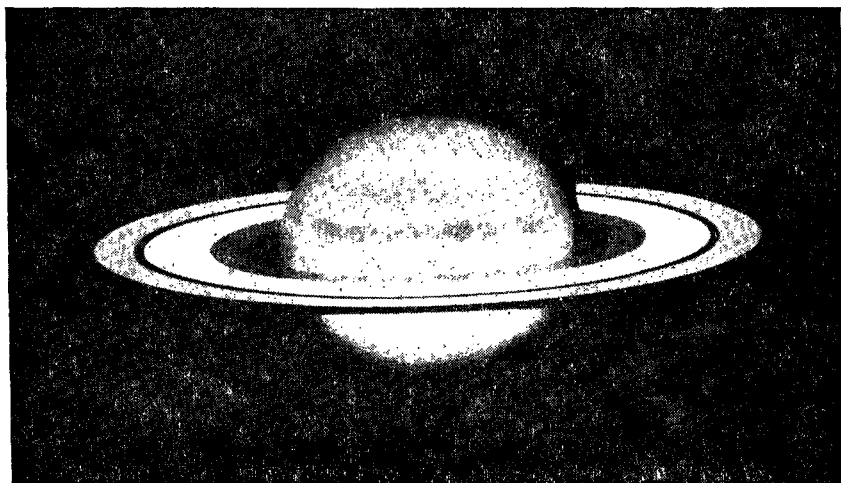


Рис. 105.

тера; её диаметр больше диаметра Земли в 9,5 раза, масса больше земной массы в 95 раз. Один оборот около Солнца Сатурн совершает в  $29\frac{1}{2}$  лет. Сатурн, как и Юпитер, окружён плотной атмосферой из аммиака и метана, которая вследствие большой удалённости Сатурна от Солнца слабо освещена и в ней почти ничего нельзя рассмотреть, кроме слабых полос, тянущихся вдоль экватора. Повидимому, он очень похож на Юпитер: вращается вокруг оси почти во столько же времени, как Юпитер (10 ч. 15 м.), сплюснут даже ещё сильнее (сжатие его равно  $\frac{1}{10}$ ). Замечательна его малая плотность: она равна 0,13 земной плотности, так что Сатурн *легче воды*. Однако малая плотность Сатурна объясняется лишь тем, что его объём определён по размерам диска планеты, включая атмосферу. Истинные размеры твёрдого ядра планеты, безусловно, меньше, и, следовательно, плотность значительно больше 0,13 земной.

Кольцо Сатурна. Сатурн имеет необыкновенный придаток — кольцо совершенно правильной, математически точной формы, которое придаёт планете крайне своеобразный вид (рис. 105).

Кольцо (открытое Гюйгенсом в 1658 г.), очень широкое и плоское, охватывает планету по экватору (который наклонён к эклиптике на сравнительно большой угол, именно на  $27^\circ$ ); оно нигде к планете не прикасается, а свободно движется в пространстве. Поверхность кольца — не сплошная; тёмные промежутки разделяют его на три концентрических кольца. Из них особенно замечательно ближайшее к планете, так называемое тёмное кольцо, видимое только в сильные инструменты: оно прозрачно, и сквозь него виден край планеты. Кольцо очень тонко; когда оно поворачивается к Земле ребром, то исчезает даже для сильных труб; в это время можно видеть Сатурн без кольца. В другое время кольцо кажется то более, то менее широким, смотря по положению планеты (рис. 106).

Долгое время кольца Сатурна считались твёрдыми. Но Лаплас доказал, что однородное кольцо правильной формы, висящее и вращающееся вокруг притягивающей его планеты, вообще не может находиться в состоянии устойчивого равновесия. Оказалась несостоятельной и гипотеза жидкого кольца. Впоследствии несколько учёных выдвинули теорию, что строение кольца Сатурна подобно строению кольца малых планет между Марсом и Юпитером: оно должно состоять из множества отдельных «спутников», обращающихся вокруг планеты каждый по своей орбите. «Спутники» так малы, что различить их отдельно мы не можем. Строго и полно эта теория была разработана С. В. Ковалевской в 1885 г. Вскоре она была подтверждена спектральными наблюдениями А. А. Белопольского по смещению линий в спектре кольца (по принципу Доплера, § 197). Белопольский измерил скорости близких к планете и далёких точек кольца и доказал, что разные точки совершают своё обращение вокруг Сатурна в разное время, в соответствии с третьим законом Кеплера; следовательно, кольцо не может быть сплошным и твёрдым, а состоит из метеоритных тел. Общая масса вещества, распылённого в «кольце», должна быть меньше четверти лунной массы, в противном случае притяжение кольца производило бы

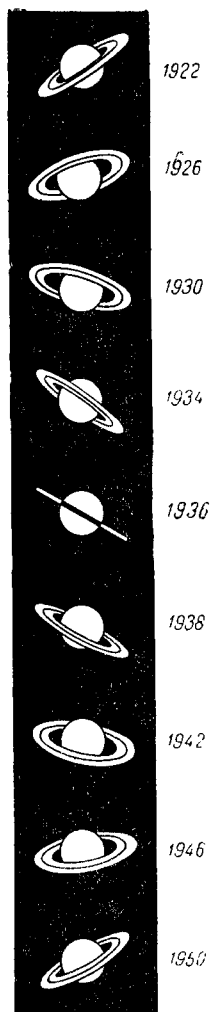


Рис. 106.

заметные возмущения в движении спутников Сатурна. Последние работы советского астрофизика В. В. Соболева приводят к выводу, что кольца Сатурна состоят из небольших метеоритов размером до 6 м.

**§ 254. Спутники Сатурна.** Кроме множества мелких спутников — метеоритов, составляющих кольцо, у Сатурна известно ещё *девять* отдельных больших спутников. Все они значительно слабее спутников Юпитера. Замечательно, что система спутников Сатурна имеет некоторое сходство с планетной системой. Так, например, 6-й (по порядку расстояний от планеты) спутник Титан (открытый первым) далеко превосходит по размерам и массе всех остальных спутников, вместе взятых, подобно тому как 5-я планета Юпитер превосходит все остальные планеты. Масса Титана почти равна массе третьего спутника Юпитера, т. е. вдвое больше массы Луны. Титан пока единственный спутник нашей системы, вокруг которого удалось обнаружить *атмосферу*; спектрограммы, снятые в 1944 г., доказали присутствие в ней газа метана, как и в атмосфере самого Сатурна (§ 253). Титан виден уже в небольшой телескоп. Следующий по блеску и открытый вторым Япет (8) обладает интересной особенностью: при переходе на восточную сторону от планеты он становится в несколько раз слабее, чем был на западной стороне. Объясняют это тем, что он вращается вокруг своей оси во столько же времени, как и около планеты (как наша Луна), причём одно его полушарие почему-то несравненно темнее другого. Подобное же совпадение времени вращения с обращением вокруг планеты подозревается и у других спутников Сатурна и Юпитера; возможно, что это общее правило для всех спутников в нашей системе. Самый близкий спутник движется почти у края кольца с периодом меньше суток; самый далёкий — в 70 раз дальше и совершает один оборот в  $1\frac{1}{2}$  года. Движение его *обратное*, подобно движению далёких спутников Юпитера.

**§ 255. Уран и Нептун.** Обе эти планеты по блеску очень слабы, и потому древние их не знали. Уран был открыт совершенно случайно в 1781 г. Гершелем. Положение Нептуна было математически вычислено в 1846 г., Леверрье и независимо от него Адамсом (§ 177) и в сентябре 1846 г. по вычислениям Нептун был обнаружен астрономом Галле. Обе планеты имеют почти одинаковые размеры; они меньше Юпитера и Сатурна, но больше Земли по диаметру приблизительно в 4 раза. Масса Урана больше массы Земли в 15 раз, масса Нептуна — в 17 раз. Уран обращается вокруг Солнца в 84 года, Нептун в 165 лет.

Уран легко виден в бинокль, а при остром зрении может быть найден даже и простым глазом, так как он имеет блеск звезды 6-й величины; Нептун (8-й величины) виден в сравнительно слабую зрительную трубу. На тускло освещённых маленьких дисках этих далёких планет почти ничего нельзя рассмотреть, поэтому вращение их вокруг оси до сих пор не определено прямыми наблюдениями над дисками. В 1934 г. советский учёный П. П. Параного определил

период обращения Урана по методу наблюдений переменных звёзд, воспользовавшись тем, что блеск Урана меняется с правильным периодом. Он получил значение периода около 10 ч. 40 м. Спектральные наблюдения (по принципу Доплера-Белопольского) дают для Урана время вращения в 10 ч. 45 м. Для времени вращения Нептуна те же способы дают с меньшей уверенностью величину около 15 час.

Вращение Урана имеет ту особенность, что его ось почти лежит в плоскости орбиты, и плоскость экватора, следовательно, почти перпендикулярна к плоскости орбиты (наклон около  $87^\circ$ ). Благодаря быстрому вращению Уран сплюснут почти так же сильно, как Юпитер, но его сжатие можно заметить только в те годы, когда плоскость экватора планеты приблизительно проходит через Солнце, а стало быть, и через Землю. Когда же к Солнцу обращён один из полюсов Урана, планета кажется с Земли совершенно круглой. Обе планеты окружены метановой атмосферой. Аммиак в атмосфере этих планет не обнаружен, и вряд ли он может там существовать, поскольку вследствие колоссального удаления планет от Солнца температура на их поверхности близка к  $-200^\circ\text{C}$ , при которой аммиак полностью замерзает.

У Урана известно пять очень слабых спутников, у Нептуна — два. Все эти спутники<sup>1)</sup> подобно VIII, IX и XI спутникам Юпитера имеют *обратное* движение. При этом спутники Урана движутся в плоскости, почти перпендикулярной к плоскости орбиты, но не вполне совпадающей с плоскостью экватора планеты (наклонение орбит спутников к орбите планеты составляет почти  $98^\circ$ ).

**§ 256. Плутон.** Несколько раз высказывалась мысль, что за Нептуном должны быть ещё планеты, и делались попытки их найти тем же способом, каким был найден Нептун, т. е. по отклонениям от теоретически вычисленного движения Нептуна, а также Урана. Но отклонения эти ничтожны и вполне могут быть объяснены неточностью наблюдений; поэтому в месте, полученном вычислением, никакой планеты не оказывалось. Одно из таких вычислений, произведённое Ловеллом по отклонениям в движении Урана, дало две точки на эклиптике (почти на  $180^\circ$  друг от друга), в которых могла находиться планета. В 1930 г. на расстоянии  $3^\circ$  от одной из этих точек действительно была фотографическим путём открыта планета. Ей дали имя Плутон.

Плутон обращается около Солнца в 248 лет по орбите с большой полуосью около 40 астроном. единиц, т. е. на  $\frac{1}{3}$  больше, чем у Нептуна. Во многих отношениях новая планета является исключительной. Эксцентриситет её орбиты больше, чем у Меркурия, и составляет 0,25, так что в перигелии Плутон бывает даже несколько ближе к Солнцу, чем Нептун, в афелии же удаляется на 50 астроном. единиц (рис. 96, стр. 233). Наклонение орбиты к эклиптике

---

<sup>1)</sup> Кроме второго спутника Нептуна, движение которого ещё подробно не исследовано.

составляет  $17^\circ$ , --- тоже гораздо больше, чем у остальных больших планет. Хотя Плутон обращается в области планет-гигантов, по своим размерам он относится к группе планет типа Земли. Он доступен только сильнейшим телескопам и виден в них звездой 15-й величины, без всяких признаков планетного диска. Это значит, что новая планета по величине сравнима с Землёй или даже с Марсом. Очевидно, что такая маленькая планета должна иметь и малую массу и не может вызывать в движении Урана заметных возмущений. Таким образом, сходство её орбиты с орбитой, по которой нашли планету, есть чистая случайность.

### Упражнения к главе XII

(Числовые данные для решения приведены в конце книги, табл. IV; орбиты считать кругами.)

1. Под каким углом видна Венера с Земли во время прохождения по диску Солнца? Под каким углом видна в это время Земля с Венеры? Луна с Венеры?

2. Почему Земля с Венеры должна казаться ярче, чем в тот же момент Венера с Земли? Всегда ли это верно? (Диаметры и отражательную способность обеих планет считать одинаковыми.)

3. Каков угловой диаметр Солнца с Нептуна? Во сколько раз солнечное освещение на Нептуне слабее, чем на Земле?

4. Доказать, что в момент среднего противостояния Марс с Земли имеет почти такой же угловой диаметр, как Луна с Венеры (упр. 1). Почему в этих условиях Луна с Венеры должна казаться ярче, чем Марс с Земли?

5. На какое угловое расстояние от Солнца может отойти Земля для наблюдателя на Марсе? на Нептуне?

6. Как происходит для наблюдателя на Марсе суточное обращение его спутника Деймоса? *Ответ:* Одно обращение в  $5\frac{1}{2}$  земных суток.

7. Как происходит для наблюдателя на Юпитере суточное обращение V спутника, если время его обращения 12 часов, а время вращения Юпитера приблизительно 10 часов?

8. Как располагаются I, II и III спутники Юпитера в тех случаях, когда Юпитер для наблюдателя, смотрящего с Солнца, виден «без спутников» (§ 252)?

9. Планета Нептун имеет почти такие же размеры и физические свойства, как Уран, но находится дальше от Солнца в 1,5 раза. Объяснить, почему Нептун нам кажется в среднем приблизительно в 5 раз слабее Урана?

10. Почему у верхних планет фазы мало заметны? Почему даже у Марса ущерб никогда не достигает половины?

11. Есть ли разница в виде Юпитера для двух воображаемых наблюдателей, находящихся на Солнце и на планете-тройнице (§ 249, б): а) для невооружённого глаза? б) в телескоп? Пренебрегая сжатием Юпитера, нарисовать приблизительно телескопическое очертание планеты для последнего наблюдателя.

12. Как влияет параллакс на восход и заход Фобоса для наблюдателя на экваторе Марса? (См. гл. V, упр. 13.)

## ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

### КОМЕТЫ И ПАДАЮЩИЕ ЗВЁЗДЫ

**§ 257. Общая характеристика комет.** Привычная нам картина звёздного неба время от времени нарушается появлением светил необычной формы: на небесном своде видна большая звезда с длинным светлым хвостом. Это комета, т. е. «косматая» или «волосатая» звезда. Появляются кометы большей частью неожиданно (даже для астронома), быстро меняют свой вид и размеры, описывают на звёздном небе пути, часто совершенно не похожие на движения планет, а через несколько недель или месяцев исчезают.

По внешности и по движению кометы до того отличаются от других светил, что в древности их считали не небесными, а земными атмосферными явлениями. Только в конце XVI в. Тихо Браге доказал, что кометы отстоят дальше Луны, и, следовательно, движутся в мировом пространстве. Через сто лет после этого Ньютон показал, что движения комет, как и движения планет, подчиняются закону всемирного тяготения.

Кометы — *не редкость*. В настоящее время ежегодно открывают по несколько комет, иногда более 10. Большинство их принадлежит к числу комет *телескопических*, т. е. невидимых простым глазом.

Каждая комета, открытая в данном году, обозначается вначале именем открывшего её, номером года и латинской буквой по порядку открытия. После вычисления кометных орбит буквы заменяются римскими цифрами по порядку прохождения комет через перигелий. Например, первая комета, открытая в 1916 г., и в то же время вторая из семи комет, открытых пулковским астрономом Г. Н. Неуйминым, была сначала обозначена: комета Неуймина 1916 *a*, а затем получила окончательное обозначение: комета Неуймина — 2 (1916 II), так как из всех комет 1916 г. она прошла через перигелий не первой, а второй.

**§ 258. Движение комет.** Кометы приходят из отдалённых областей солнечной системы, в которых они бывают недоступны даже для сильнейших телескопов; туда же они и скрываются. Поэтому за каждой кометой можно следить только на небольшом участке её орбиты, пока она близка к Солнцу и Земле. Приближённое определение орбиты (§ 159) обычно даёт, что на этом участке комета движется

по параболе, т. е. по разомкнутой бесконечной кривой (рис. 107); таким образом, если комета действительно движется по параболе, то она никогда больше к Солнцу не вернётся. Следовательно, в этом случае кометы не являются постоянными членами нашей системы, а случайно попадают в сферу солнечного притяжения, «падают» к Солнцу и, один раз описав около него параболу, уходят, чтобы потом подвергнуться притяжению, быть может, какого-нибудь другого солнца.

Но в настоящее время доказано, что истинные орбиты комет не параболы, а чрезвычайно вытянутые эллипсы (рис. 108), и многие кометы совершают по ним обращение в несколько десятков и сотен тысяч лет, а комета 1914 V даже за  $24 \cdot 10^6$  лет. По небольшой дуге, которую описывают кометы в немногих месяцев своей видимости, та-

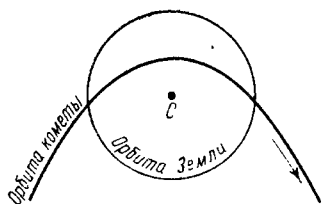


Рис. 107.

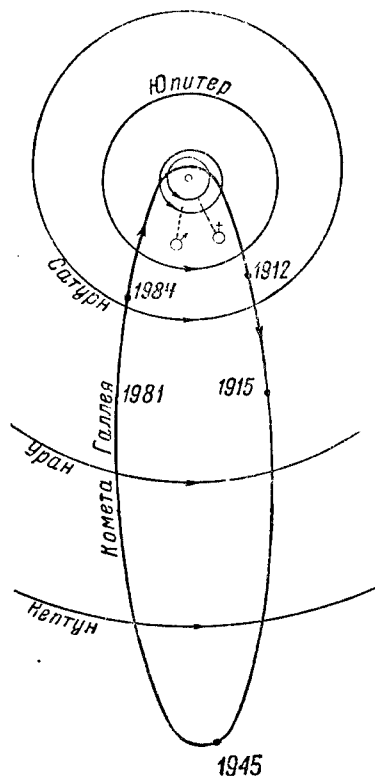


Рис. 108.

кой эллипс нельзя отличить от параболы. Движение кометы по такому вытянутому эллипсу строго подчиняется кеплеровым законам; скорость её может достигнуть нескольких сотен км/сек в перигелии и иметь ничтожно малую величину близ афелия.

Так как истинная форма и эксцентриситет кометного эллипса обыкновенно неизвестны, то предпочитают вычислять положение большинства комет по формулам параболического движения, более простого с математической стороны, чем движение эллиптическое. Так как эксцентриситет параболы равен единице, то для кометной орбиты надо знать только *пять* элементов (а не шесть, как у эллипса), причём размер орбиты определяется не большой полуосью  $a$ , которая у параболы равна бесконечности, а *расстоянием перигелия*  $q$  (т. е. наименьшим расстоянием кометы от Солнца). Таким образом, комет-



ная орбита определяется следующими элементами:  $i$ ,  $\Omega$ ,  $\pi$ ,  $q$ ,  $t_0$  (§ 159). Кометы, орбиты которых не отличаются заметно от параболы, называются *параболическими*.

**§ 259. Изменения кометных орбит.** Притяжения планет, особенно громадного Юпитера, производят в кометных орбитах различные *возмущения*. Рассмотрим два главных случая таких возмущений.

а) Планета своим притяжением *ускоряет* движение кометы. С увеличением скорости, как видно из формул (7) и (8) § 170, должны увеличиваться большая полуось эллипса и время обращения, — эллипс станет более вытянутым. Если скорость при этом превзойдёт параболическую (§ 170, а), то орбита превратится в *гиперболу*, и комета навсегда уйдёт из нашей системы. Явления такого рода наблюдались.

б) Планета *замедляет* движение кометы. При этом кометный эллипс делается менее эксцентрическим, большая полуось и время обращения *уменьшаются*. В редких случаях, когда комета подойдёт особенно близко к планете, возмущение может быть так сильно, что время обращения кометы уменьшится до немногих лет. Кометы, движущиеся по таким небольшим эллипсам, резко отличающимся от параболы, называются *периодическими*. Примеры изменения кометных орбит см. в § 268, д.

**§ 260. Периодические кометы** составляют по числу немногим более десятой части всех известных комет. Точно определено движение только тех из них, которые наблюдались при нескольких возвращениях к Солнцу. Таких комет в настоящее время известно 37. Самое долгое время обращения из комет этой группы, именно 76 лет, имеет яркая комета Галлея (периодичность её доказана английским астрономом Галлеем, современником Ньютона), самое короткое — всего  $3\frac{1}{3}$  года — комета Энке — Баклунда. Большая часть этих комет имеет время обращения от 5 до 7 лет, причём афелии их орбит находятся близ орбиты Юпитера. Они составляют «кометное семейство» Юпитера.

Плоскости орбит большинства *периодических* комет образуют с эклиптикой не очень большие углы (примерно такие же, как орбиты малых планет). Направление движения комет, как правило, *прямое*, в ту же сторону, что и движение планет. Одним из немногих исключений является комета Галлея — её движение обратное.

Эксцентриситеты кометных эллипсов обычно больше 0,5, так что кометные орбиты вытянуты гораздо сильнее планетных (см. рис. 108). Но есть несколько комет, орбиты которых совершенно не отличаются от орбит *малых* планет. Открыты также кометы с орбитами больших планет. Одна из них движется между орбитами Юпитера и Сатурна по орбите, близкой к кругу, и наблюдается подобно планетам ежегодно около своих противостояний (комета Швасмана-Вахмана 1925 II). Другая (комета Отерма) движется по почти круговой орбите между орбитами Марса и Юпитера и отличается от астероидов только своей туманной оболочкой. Кроме кометы Галлея, все остальные периодические кометы очень слабы.

**§ 261. Вид кометы.** Главную часть всякой кометы составляет светящаяся прозрачная масса приблизительно круглой формы. Яркость её в середине обыкновенно больше и к краям постепенно убывает. Часто это «центральное сгущение» имеет вид звезды, просвечивающей сквозь туман. Оно тогда называется *ядром* кометы, а окружающая ядро туманность — *оболочкой* или *комой*. Ядро вместе с оболочкой составляет *голову* кометы (рис. 109). У телескопических комет часто не бывает ни ядра, ни даже резкого центрального сгущения.

Туманное вещество кометной головы, удлиняясь в одну сторону, переходит в *хвост* — светящуюся полосу, которая по мере удаления от головы становится обыкновенно слабее, шире и не имеет резкого конца подобно столбу дыма (рис. 109; комета Галлея). Хвост лежит в *плоскости кометной орбиты* и всегда направлен в сторону, *противоположную Солнцу*, так что комета, уходя, движется хвостом вперёд. Иногда у кометы бывает несколько хвостов, расходящихся в виде веера в плоскости кометной орбиты.

Видимая длина хвоста крайне различна. У телескопических комет хвоста обыкновенно или совсем не бывает, или же бывает очень слабый; у ярких комет он иногда тянется больше, чем на  $90^\circ$  (от горизонта до зенита).

**§ 262. Образование хвоста кометы.** Хвост не есть постоянный придаток кометы; он образуется под действием *солнечных лучей* лишь на короткое время, пока комета близка к Солнцу (около перигелия).

Когда комета ещё далека от Солнца, она имеет вид тусклого круглого пятнышка; в это время она светит, повидимому, только отражённым солнечным светом. Многие кометы сохраняют такую форму в течение всего периода видимости, у других же, по мере приближения к Солнцу, начинаются постепенные изменения (рис. 110). Ядро и вся голова делаются ярче; из ядра начинают «испаряться» светящиеся газовые массы, более яркие, чем остальная кома. Большей частью эти *истечения* собираются на той стороне ядра, которая обращена *к Солнцу*, и тянутся к нему в виде струек и «оболочек», светящихся собственным светом.

Но эти «испарения» не остаются в голове кометы; под действием *отталкивательной* силы, исходящей от Солнца, они отбрасываются прочь и уносятся в сторону, противоположную Солнцу. Так образуется хвост кометы. Состав его, следовательно, постоянно обновляется подобно столбу дыма над трубой паровоза; хвост, который мы наблюдаем сегодня, состоит уже отчасти из новых частиц, а не только из тех, из которых он состоял вчера.

Это движение частиц хвоста можно наблюдать непосредственно при помощи фотографии. На снимках ярких комет видно, что хвосты их имеют очень сложное строение, часто кажутся разорванными, состоящими из отдельных светящихся сгущений, или «*облачных масс*». Сравнивая ряд фотографий, полученных через несколько часов одна



Рис. 109.

после другой, можно заметить, что эти массы перемещаются, и даже измерить их скорость в километрах (см. рис. 111, на котором приведены две фотографии кометы Морхауза, снятые с промежутком в одну неделю). Движение направлено всегда от головы кометы вдоль хвоста: оно оказывается ускоренным: чем дальше от головы, тем быстрее.

Скорость, с которой облачные массы удаляются от ядра, может достигать 100 км/сек. Чем ближе комета подходит к Солнцу, тем энер-

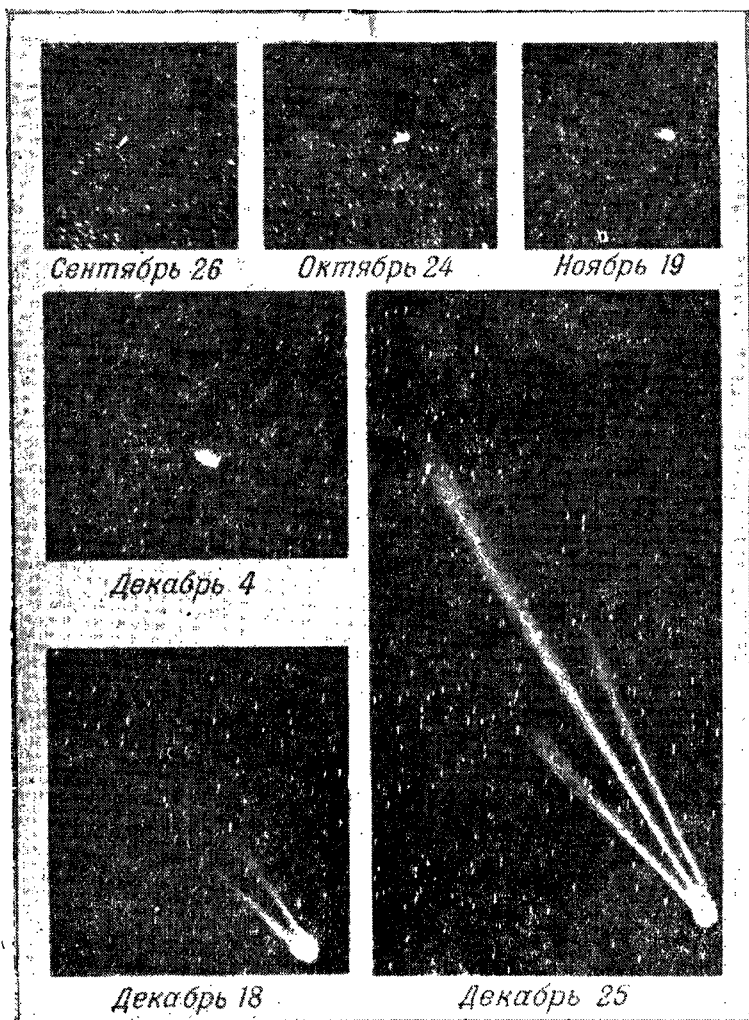


Рис. 110.

гичнее идёт процесс образования хвоста; наибольшей длины он достигает обыкновенно вскоре после прохождения через перигелий, затем постепенно уменьшается и совершенно исчезает; комета уходит в виде такого же туманного пятнышка, как и появилась.

§ 263. Размеры и массы комет. Кометы — *самые большие* тела солнечной системы. Даже самые слабые телескопические кометы, совершенно лишённые хвоста, во много раз больше Земли. Известно несколько комет (одна из них — знаменитая комета 1811 г.), голова которых была больше Солнца. Хвост имеет в длину десятки и сотни

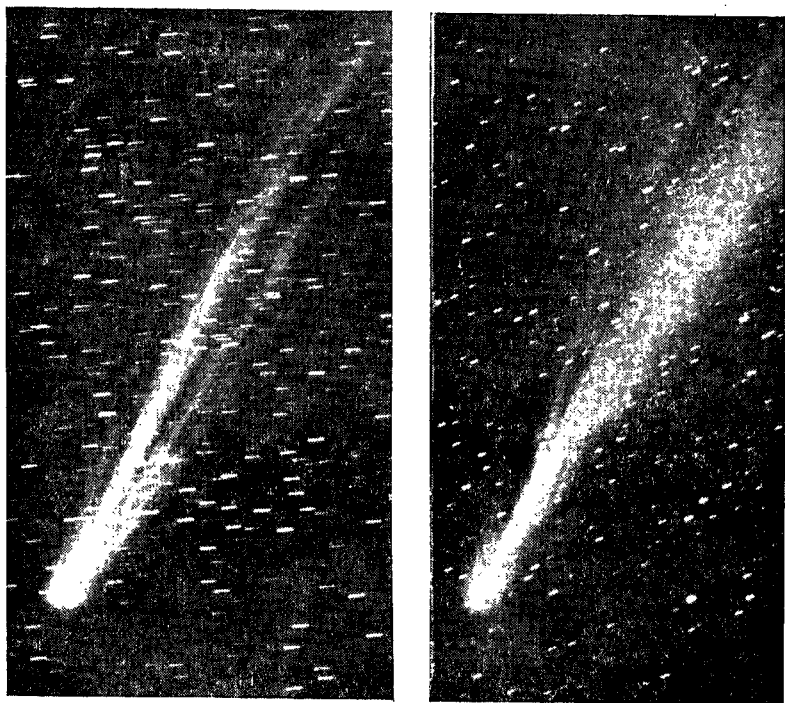


Рис. 111 .

миллионов километров; иногда его длина превышает диаметр земной орбиты. Ширина и толщина хвоста также измеряются миллионами километров. Таким образом, объём комет колоссален.

Тем поразительнее *ничтожность масс* комет. До сих пор ни разу не удалось заметить, чтобы комета, приблизившись к какой-нибудь планете, произвела в её движении хоть малейшее возмущение. Известны даже случаи, когда комета проходила между спутниками Юпитера без всякого нарушения правильности их движений. Поэтому массы комет определить необычайно трудно и для большинства комет они до сих пор остаются неизвестными.

Несмотря на эти трудности, проф. Б. А. Воронцов-Вельяминов разработал изящный метод определения размеров, массы и строения

ядер больших комет. Исследуя своим методом комету Галлея, проф. Воронцов-Вельяминов показал, что ядро этой кометы (одной из наиболее крупных) имеет поперечник порядка 60 км и состоит из отдельных глыб размерами около 100 м каждая.

Масса ядра кометы Галлея оказалась равной массе небольшого астероида.

Исследования проф. Воронцова-Вельяминова доказывают, что массы комет в миллионы (а может быть и в миллиарды) раз меньше массы Земли.

Следовательно, их плотность невообразимо ничтожна, несравненно меньше плотности нашей атмосферы.

**§ 264. Спектр комет.** Почти у каждой яркой кометы можно обнаружить сплошной спектр, в котором при благоприятных условиях заметны даже тёмные фраунгоферовы линии. Это значит, что в комете имеются твёрдые частицы, отражающие солнечный свет.

Наряду со сплошным спектром в спектре ядра — и часто также в хвосте — видны *яркие линии* и полосы самосветящихся газов. В голове кометы найдены углерод  $C_2$ , циан CN и некоторые другие соединения углерода. В хвосте кометы обнаружены ионизованная окись углерода  $CO^+$  и ионизованный молекулярный азот  $N_2^+$ .

Причина свечения этих газов ещё не выяснена; по всей вероятности, это явление люминесценции: падающие на газ лучи Солнца «возбуждают» атомы газа и заставляют их испускать световые волны. Возможно также, что свечение вызывается бомбардировкой кометных газов наэлектризованными частицами и электронами, несущимися от Солнца, подобно тому как вызывается появление полярных сияний в нашей атмосфере. Этим могут быть объяснены случаи *вспышек* яркости, когда некоторые кометы, находясь очень далеко от Солнца, неожиданно увеличивали свою яркость в десятки раз (например, комета Швасмана-Вахмана, § 260).

Давно замечено, что спектр комет тождествен со спектром *метеоритов*. Если кусочки метеорита поместить в трубку, из которой выкачан воздух, и пропустить через неё электрический ток, то трубка начинает светиться и даёт спектр, похожий на спектр комет.

**§ 265. Природа комет.** Комета представляет собой скопление сравнительно небольших метеорных тел, занимающих большое пространство, так что промежутки между телами очень велики сравнительно с их размерами. Это доказывается, между прочим, удивительной *прозрачностью* комет: не только сквозь их хвосты, но и сквозь голову звёзды видны без всякого ослабления. В 1910 г. голова кометы Галлея прошла в точности между Землёй и Солнцем; при этом «прохождении кометы по диску Солнца» солнечная поверхность имела совершенно обычный вид, и никаких следов кометы нельзя было заметить даже в сильнейшие телескопы. Между тем, если бы в ядре кометы были непрозрачные тела диаметром в несколько километров, они были бы замечены в виде чёрных точек на диске Солнца. Это подтверждает выводы Воронцова-Вельяминова о малых размерах метеорных тел, образующих

голову кометы (§ 263), и заставляет предполагать, что у телескопических комет ядра состоят из мелких камней и песчинок. Хвост комет состоит из газов и пыли, причём плотность их настолько мала, что на каждый кубический километр пространства приходится, наверное, меньше десятка пылинок.

В течение большей части своего обращения этот «рой» метеорных тел представляет собою скопление тёмных, холодных и, следовательно, невидимых глыб и частиц. При приближении к Солнцу он делается видимым вначале просто благодаря усилению солнечного *освещения*. Затем, вследствие *нагрева* солнечными лучами, газы, заключённые в порах метеорных тел, выделяются из ядра и начинают светиться. Выбрасываемые ядром кометы газовые массы скопляются преимущественно на обращённой к Солнцу стороне ядра и образуют там нечто вроде сложной и бурно движущейся атмосферы. Сила *солнечного отталкивания* гонит частицы этой атмосферы от Солнца и вызывает таким образом появление хвоста. Вместе с газами, под влиянием отталкивательной силы, улетает от ядра и мелкая пыль, которая в изобилии входит в его состав. Поэтому хвост состоит из газов и пыли.

Образование хвоста, следовательно, всегда сопровождается *потерей вещества* и должно, в конце концов, повести к разрушению кометы. Это наступит тем скорее, чем чаще комете приходится развивать хвост. Вот почему все короткопериодические кометы, которые возвращались к Солнцу, может быть, тысячи раз, в настоящее время очень слабы и почти лишены хвостов. Кроме образования хвостов, в кометах происходит ещё другой разрушительный процесс, именно рассеяние в пространстве метеорных тел, составляющих ядро кометы (§ 268).

**§ 266. Различные типы хвостов.** Механическая теория кометных хвостов была создана главным образом трудами известного русского астрофизика Ф. А. Бредихина, который с 1890 г. по 1895 г. возглавлял Пулковскую обсерваторию. Эта теория состоит в следующем: из кометного ядра непрерывно выбрасываются мельчайшие частицы с определёнными скоростями. Потеряв связь с кометой, они начинают двигаться иначе, чем движется ядро кометы, так как на них действуют две силы, исходящие из Солнца: 1) ньютоновская сила *солнечного притяжения* и 2) сила *солнечного отталкивания*, заметно влияющая только на очень маленькие частицы (см. § 267). Ядро кометы движется, как и другие небесные тела, под действием только *первой* силы, ибо действие *второй* силы на него ничтожно. Зная величину *солнечного отталкивания* и начальную скорость частиц, выброшенных из ядра кометы, легко вычислить положения, которые в данный момент будут занимать частицы, выброшенные в течение нескольких предыдущих дней; это даёт нам форму хвоста для данного момента (рис. 112). На рис. 112 буквами *A, B, C, ...* обозначены различные положения кометы при её движении около Солнца (*S*). Частицы, выброшенные из ядра [при положении кометы в точках *A, B, C, ..*

движутся соответственно по траекториям  $Aa$ ,  $Bb$ ,  $Cc$ , и к данному моменту времени, когда комета находится в точке  $K$ , занимают положения  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ..., что представляется наблюдателю в виде изогнутого хвоста. Можно решить и обратную задачу: по наблюдаемой форме хвоста определить величину отталкивательной силы.

Бредихин показал, что у разных комет отталкивательная сила имеет различные, но не всевозможные значения. Исследовав хвосты большого числа комет, он нашёл, что они могут быть соединены в *три главных класса* (или типа) (рис. 113).

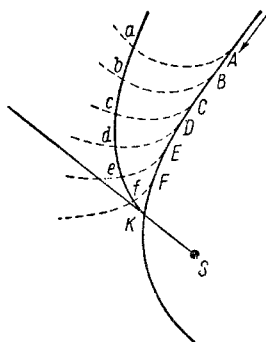


Рис. 112.

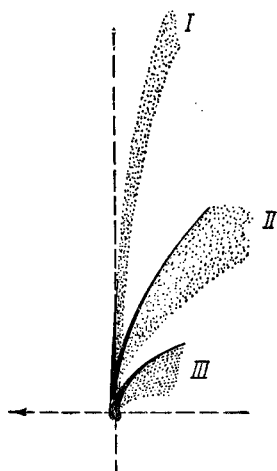


Рис. 113.

У хвостов I типа отталкивательная сила Солнца превосходит силу солнечного притяжения в 20—200 раз, у II типа она равна от 0,5 до 2,5 силы притяжения, а у III — от 0,1 до 0,3. Также и скорость, с которой частицы извергаются из ядра, различна для разных типов: у хвостов I типа она составляет несколько километров в сек., у остальных типов обыкновенно не превышает 1 км/сек. Чем меньше величина отталкивательной силы, тем больше кривизна хвоста; хвосты I типа — почти прямые, и направление их близко к направлению продолженного радиуса-вектора кометы; хвосты II типа заметно изогнуты назад, в ту сторону, откуда движется комета; у III типа это искривление ещё сильнее.

Величина отталкивательной силы зависит, в отличие от силы тяготения, не только от массы частиц хвоста, но и от их *физической* и *химической* природы. Так, хвосты I типа состоят из более лёгкого вещества (по современным данным, из разрежённых газов — окиси углерода и азота), а II и III — из более тяжёлых (космическая пыль). Этим объясняется, например, появление у одной и той же кометы нескольких хвостов, принадлежащих к разным типам.



У некоторых комет наблюдались также короткие веерообразные хвосты, направленные к Солнцу. Эти хвосты называются *аномальными*. Они, очевидно, должны состоять из ещё более крупных частиц, на которые сила солнечного отталкивания действует незначительно.

Фотографии комет последнего времени обнаружили в некоторых хвостах I типа отталкивательные силы, в несколько тысяч раз превышающие силу тяготения. В остальных отношениях теория Бредихина хорошо объясняет все наблюдаемые явления. В последнее время теория кометных хвостов была значительно развита и усовершенствована членом-корреспондентом Академии наук СССР С. В. Орловым. Работы С. В. Орлова по изучению комет удостоены Сталинской премии.

С. В. Орлов разработал современную теорию кометных форм на основе последних достижений механики и физики, с учётом результатов фотометрии и спектроскопии комет, создав тем самым *физическую* теорию кометных хвостов. Он показал, что вещество в кометной голове отталкивается не только Солнцем, но и ядром кометы. Это позволило приблизительно определить размеры и массы ядер; для последних получились значения от  $10^{-15}$  до  $10^{-10}$  массы Земли. Орлов уточнил процессы образования хвостов различных типов и пришёл к выводу, что хвосты I типа — газовые, а II и III типа — пылевые.

При образовании хвостов I типа молекулы данного газа вылетают из ядра непрерывным потоком, стало быть, в различные моменты времени, но движутся под действием одинаковой отталкивательной силы. Поэтому все такие частицы располагаются на *синдинаме*, т. е. на линии «равных сил». Так как из ядра кометы выделяются газы различной химической природы, и молекулы каждого рода газа располагаются вдоль своей синдинами, то хвост I типа представляет собою связку таких синдинам.

Если же из кометного ядра вылетело сразу множество твёрдых частиц (пыль) различных размеров, т. е. произошёл «взрыв», то туча этих одновременно выброшенных частиц при дальнейшем движении растянется для наблюдателя в кривую линию, на одном конце которой будут располагаться частицы, получившие наибольшее отталкивательное ускорение, а на другой — частицы с наименьшим ускорением. Эти линии называются *синхронами*, т. е. линиями «одного времени» (вылета из ядра). Хвосты II и III типов состоят из ряда таких синхрон. Они пылевые и отражают солнечный спектр.

**§ 267. Сущность отталкивательной силы** выяснена только для хвостов II и III типов — это отталкивательная сила солнечных лучей, или *световое давление*. Как показали опыты известного русского физика П. Н. Лебедева, свет производит давление на освещаемые им предметы. Для тел обычных размеров это давление ничтожно, но для чрезвычайно малых тел (пылинок, газовых молекул) сила светового давления может во много раз превосходить силу солнечного притяжения, и частица будет Солнцем отталкиваться, а не притягиваться, в особенности, если она близка к Солнцу.

Действительно, если мы имеем шарики различных размеров с плотностью, равной единице, находящиеся на одном и том же расстоянии от Солнца, то сила светового давления будет тем больше, чем больше *поверхность* шарика. Следовательно, при прочих равных условиях она пропорциональна квадрату радиуса шарика  $D=c_1 r^2$ .

Сила же солнечного притяжения пропорциональна массе шарика; при постоянной плотности она пропорциональна, следовательно, его *объёму*, т. е. кубу радиуса:  $F=c_2 r^3$ .

Отношение отталкивания к притяжению выразится формулой

$$\frac{D}{F} = \frac{c_1}{c_2} \frac{1}{r}.$$

Постоянная  $\frac{c_1}{c_2}$  весьма мала, поэтому обыкновенно отталкивание ничтожно в сравнении с притяжением. Но, как показывает последняя формула, при очень малом радиусе шарика отталкивание может даже превысить притяжение. Это имеет место для частиц, диаметр которых измеряется сотысячными долями сантиметра (пыль).

Что касается хвостов I типа, то наблюдаемые отталкивательные силы в них значительно превосходят теоретические. Безусловно, и в них световое давление играет большую роль, но одной силой светового давления форму хвоста I типа объяснить невозможно. Очевидно, здесь также действуют силы электрического происхождения, на что указывал ещё М. В. Ломоносов.

**§ 268. Некоторые замечательные кометы.** а) Комета Галлея. Это первая комета, возвращение которой было *предсказано*. Когда она появилась в 1682 г., Галлей обратил внимание на сходство её орбиты с орбитами комет, наблюдавшихся в 1607 и 1531 гг. Это навело его на мысль, что все три кометы представляют собой три отдельных появления одной и той же кометы, обращающейся по очень вытянутому эллипсу с периодом обращения около 75 лет, и он решился предсказать её возвращение на 1758 г. Для более точного указания времени возвращения пришлось вычислить планетные возмущения за 75 лет; эта работа была выполнена уже после Галлея. Оказалось, что вследствие возмущений от Юпитера и Сатурна комета должна опоздать больше чем на год. Она вернулась, в полном согласии с вычислениями, в 1759 г., затем в 1835 г. Последнее возвращение, самое замечательное, произошло в 1910 г.; 19 мая комета прошла между Солнцем и Землёй на расстоянии всего около 24 млн. км от Земли, а так как хвост её был значительно длиннее этого расстояния и был направлен, как всегда, от Солнца, то Земля прошла сквозь хвост кометы. Благодаря близости кометы к Земле хвост имел угловую длину свыше 140°. Возвращения кометы Галлея можно проследить по старинным летописям на протяжении 2000 лет. За всё это время яркость её, если и уменьшилась, то незначительно, период

же вследствие возмущений изменялся от  $74\frac{1}{2}$  до  $79\frac{1}{2}$  лет. Следующее возвращение кометы к Солнцу произойдёт в 1986 г. (рис. 108).

б) Комета Энке-Баклунда. Слабая периодическая комета, известная с конца XVIII в., интересна исключительно по своему движению. Она имеет самое короткое время обращения — всего  $3\frac{1}{8}$  года. Энке, впервые доказавший её периодичность, открыл в её движении *ускорение*: именно, каждый следующий оборот оказался почти на 3 часа короче предыдущего. Орбита её, таким образом, постепенно уменьшается в размерах, и если это ускорение будет продолжаться и дальше, то комета в конце концов должна упасть на Солнце. Русский астроном О. А. Баклунд доказал, далее, что ускорение кометы изменяет свою величину: оно теперь гораздо меньше, чем было в середине прошлого века, но это уменьшение происходило не непрерывно, а резкими скачками — 3 или 4 раза за последние 50 лет. И самое ускорение, и его изменения загадочны. Возможная причина заключается в *столкновениях* кометы с роем метеоритов. В движении других комет никаких неправильностей подобного рода до сих пор не обнаружено.

в) Комета 1882 II и её семейство. Эта комета вскоре после открытия прошла через диск Солнца (подобно комете Галлея в 1910 г.). При этом она (в отличие от последней) была так ярка, что её можно было видеть простым глазом на дневном небе около самого Солнца и наблюдать в телескоп её вступление на солнечный диск совершенно так, как наблюдают, например, покрытие звезды Луной. На диске Солнца она исчезла. Время её обращения составляет около 800 лет. Оказалось, что по той же орбите движется ещё несколько (до 7) очень ярких комет, появлявшихся в разное время за последние два столетия. Все они в перигелии необыкновенно близко подходят к Солнцу; так, комета 1843 г. прошла от солнечной поверхности на расстоянии 130 000 км (т. е. 0,1 солнечного диаметра). Она находилась, таким образом, ближе к поверхности Солнца, чем вершины многих протуберанцев. Эта комета также была видна днём.

Повидимому, все члены этого кометного «семейства» образовались из одной гигантской кометы, которая когда-то распалась на части. Деление это продолжается на наших глазах: ядро кометы 1882 II вначале было круглое, потом вытянулось и, наконец, разделилось на четыре отдельных ядра. Пока можно было следить за кометой, расстояние между ними всё увеличивалось; следовательно, каждое ядро двигалось по своей особой орбите. Если комета сохранится до XXVII в., то она вернётся к Солнцу в виде четырёх комет с промежутками в несколько десятков лет одна после другой.

г) Комета Биэлы. Ещё более замечательный пример распада кометы представляет периодическая комета Биэлы. Эта слабая комета в 1846 г. разделилась в течение нескольких дней на две отдельные маленькие кометы почти одинаковой формы; расстояние между ними всё увеличивалось и, пока за кометами можно было следить,

достигло почти величины расстояния от Земли до Луны. В 1852 г. обе кометы взрулись, но расстояние между ними увеличилось за это время приблизительно в 10 раз. С тех пор комету больше не видели, хотя она должна возвращаться через каждые  $6\frac{1}{2}$  лет, и она считается исчезнувшей. В 1872 г. комета должна была подойти к Земле особенно близко, тем не менее найти её не удалось. Зато в ночь на 27 ноября этого же года во многих местах наблюдался настоящий «дождь падающих звёзд», которые, как потом выяснилось, летели по орбите кометы Биэлы. Комета распалась окончательно, и о ней нам напоминает только «метеорный поток», который до сих пор ещё появляется в конце ноября, но с каждым годом становится слабее.

Причина распада комет будет выяснена дальше в связи с вопросом о происхождении комет и их положении в солнечной системе.

д) Комета Лекселя. В 1770 г. появилась комета, видимая невооружённым глазом и наблюдавшаяся несколько месяцев. Для неё была определена из наблюдений вначале параболическая орбита, так как в то время не знали ни одной кометы с эллиптической орбитой, кроме кометы Галлея. Более тщательные вычисления русского академика Лекселя показали, что в действительности комета обращается по эллипсу с периодом всего в  $5\frac{1}{2}$  лет и должна вновь находиться в благоприятных условиях для наблюдений в 1781 г.; но это предсказание не сбылось, и комету вообще больше не видели. Только после смерти Лекселя Лаплас и Леверрье доказали, что комета раньше двигалась по орбите, близкой к параболе, но в 1767 г. подошла так близко к Юпитеру, что его притяжение преобразовало кометную орбиту в сравнительно небольшой эллипс, который был совершенно правильно определён Лекселем. Через 12 лет (время обращения Юпитера) комета опять подошла к Юпитеру, на этот раз так близко, что должна была пройти между его спутниками. Теперь ускорение, вызванное Юпитером, имело другое направление, чем при первой встрече, и оно так сильно увеличило большую ось описываемого кометой эллипса, что комета стала недоступной для земных наблюдателей.

**§ 269. Столкновение кометы с другим мировым телом.** Число комет очень велико, орбиты их разнообразны и постоянно изменяются; поэтому столкновения комет с другими светилами теоретически возможны, хотя должны случаться в действительности очень редко, так как размеры даже гигантских комет незначительны в сравнении с межпланетными расстояниями. В частности, возможно и столкновение с Землёй. Но это столкновение не причинило бы Земле ни малейшего вреда. Если Земля столкнётся с потоками пыли кометы, то дело ограничится великолепным «дождём падающих звёзд». Если же Земля столкнётся с ядром кометы, то на поверхность Земли выпадет большое число метеоритов, которые при значительной массе могут, пожалуй, повести к несчастным случаям, но о катастрофе не может быть и речи. Возможно, что в течение геологической истории Земли такие столкновения случались. Более того, предполагают, что Сихотэ-Алинь-

ский метеорит, выпавший на Дальнем Востоке 12 февраля 1947 г., принадлежал когда-то к ядру одной из комет, а может быть являлся небольшим астероидом. Однако его столкновение с Землей никаких последствий, кроме местных повреждений леса, не оставило.

Что касается встречи Земли с хвостом кометы, то такая встреча должна пройти совершенно незаметно вследствие крайней разреженности кометных хвостов.

Не представляется катастрофическим и падение кометы на Солнце, что тоже возможно. При скорости падения свыше 600 км/сек (гл. VIII, упр. 2) должно, конечно, развиваться значительное количество тепла, но так как поверхность Солнца крайне разрежена, то комета проникнет глубоко внутрь Солнца, прежде чем её энергия движения превратится в теплоту. К тому же выделившееся при падении кометы тепло будет незначительно по сравнению с излучаемой Солнцем энергией и температура солнечной поверхности несколько не повысится. Если же ядро кометы состоит из мелких частиц, то одни из них, в зависимости от их размеров, будут задолго до падения на Солнце отброшены отталкивательной силой его лучей (§ 267), другие же обратятся в газ от солнечного жара.

**§ 270. Вопрос о происхождении комет.** Все явления, наблюдаемые в кометах, доказывают, что эти тела находятся в стадии сравнительно быстрого разрушения. Разрушение это идёт различными путями.

1) Кометы *дробятся*, из одной большой кометы образуется несколько малых (комета Бяэлы, комета 1882 II и др.).

2) Кометы *рассеиваются*; метеорные тела, составляющие ядро кометы, постепенно распределяются всё в большем объеме или совсем улетают из кометы.

3) Кометы *испаряются*; пары и газы, образующие хвост кометы при каждом её приближении к Солнцу, обратно в комету не возвращаются. Этим давно уже объяснена слабая яркость всех короткопериодических комет и несомненно прогрессирующее ослабление многих из них.

Если предположить, что это ослабление и прежде шло с той же скоростью, как в нашу эпоху, то получается вывод, что несколько столетий назад некоторые из слабых периодических комет легко могли быть видны невооруженным глазом. Между тем ни об одной из них не сохранилось сведений у старинных астрономов и летописцев. Поэтому было высказано предположение, что кометы образовались гораздо позже планет, и что их образование, быть может, происходит и в наше время.

Так как афелии орбит многих комет расположены близ орбиты Юпитера, то ещё Лагранж высказал предположение, что такие кометы представляют собой продукты каких-то извержений из недр этой планеты-гиганта. В настоящее время гипотезу Лагранжа поддерживает С. К. Всежвятский. Одним из аргументов в её пользу является то, что химический состав комет близок к составу атмосферы Юпитера;

главное возражение против этой гипотезы: для образования кометы выброшенная масса должна вылетать из весьма плотной *атмосферы* Юпитера со скоростью больше  $60 \text{ км/сек}$ , иначе она упадёт обратно на планету или образует спутника. Но трудно представить себе силу, которая могла бы произвести такие скорости.

Более вероятной представляется в настоящее время метеоритная гипотеза С. В. Орлова. По этой гипотезе комета образуется от столкновения двух тел, например, малой планеты и крупного метеорита. При таком столкновении планета с диаметром в несколько километров должна разлететься на мелкие осколки, которые будут обращаться в солнечной системе по всевозможным орбитам. Представим себе, что рой осколков полетел по такой орбите, сопровождаемый обильным количеством пыли, приблизился к Солнцу и разогрелся в его лучах. В результате нагревания осколки начнут выделять газы, метеоритный рой окутывается газовой и пылевой оболочкой, и образуется комета.

**§ 271. Падающие звёзды (метеоры).** Межпланетное пространство, по крайней мере в области, близкой к орбите Земли, содержит неисчислимое количество маленьких тёмных тел и пылинок, описывающих под действием притяжения Солнца всевозможные орбиты. Научное их название — *метеорные тела*. При своём движении Земля всё время с ними встречается, и только в момент этой встречи мы и узнаём о существовании метеорного тела: влетев из пустого пространства в земную атмосферу с громадной скоростью, оно вследствие сопротивления воздуха почти мгновенно раскаляется и распыляется или, как обыкновенно говорят, «сгорает». Эта короткая блестящая вспышка и представляет явление *падающей звезды*, или *метеора* (рис. 114).

Если наблюдать один и тот же метеор из двух точек, удалённых одна от другой на несколько километров, то легко заметить среди звёзд его параллактическое смещение (§ 108) и вычислить его *высоту* над земной поверхностью. Оказалось, что всё явление совершается в очень высоких слоях атмосферы: метеор вспыхивает на высоте более  $100 \text{ км}$  и гаснет обыкновенно на высоте  $70—80 \text{ км}$ . Истинная длина его видимого пути нередко бывает более сотни километров. Из этих же наблюдений можно определить и скорость метеора в земной атмосфере (*видимую* геоцентрическую скорость). Вследствие сопротивления воздуха эта скорость будет значительно меньше той скорости, с которой двигалось метеорное тело относительно Земли в безвоздушном пространстве (*космической* геоцентрической скорости).

В безлунную ясную ночь можно видеть в среднем 4—5 метеоров в час. Но это число испытывает заметные колебания в зависимости как от часа суток (*суточная вариация*), так и от времени года (*годовая вариация*): после полуночи метеоры появляются почти вдвое чаще, чем до полуночи, а осенью чаще, чем весной. Это явление считалось прежде доказательством земной природы падающих звёзд, но Скиапарелли показал в 1867 г., что оно как раз доказывает их космическое (внеземное) происхождение. Действительно, если бы

Земля была неподвижна, то метеорные тела падали бы на неё приблизительно в одинаковом числе со всех сторон. Но так как Земля движется вокруг Солнца со скоростью около  $30 \text{ км/сек}$ , то на разные её точки падает различное число метеоров: на то полушарие

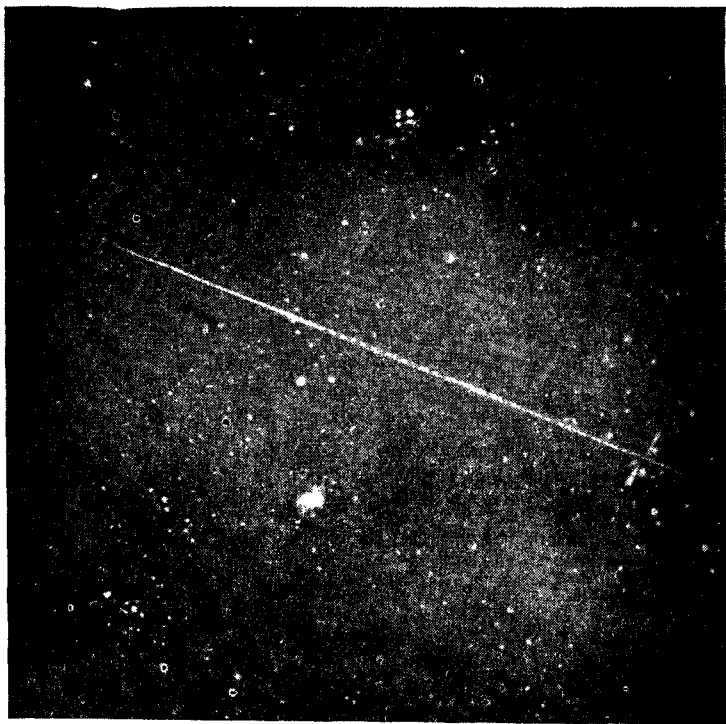


Рис. 114.

Земли, которое идёт впереди, их попадает больше, на заднее — меньше. Вследствие вращения Земли вокруг оси каждая точка земной поверхности оказывается на её передней стороне около 6 часов утра. В это время число падающих звёзд должно быть наибольшим. Так объясняется суточная вариация метеоров.

Точка, к которой направлено в данный момент орбитальное движение Земли, называется *апексом* (§ 124); она находится на эклиптике, на  $90^\circ$  к западу от Солнца. Большинство падающих звёзд должно появляться близ этой точки небесной сферы; чем выше апекс над горизонтом, тем больше метеоров будет наблюдаться. Этим объясняется годичная вариация: осенью апекс находится около точки летнего солнцестояния и поэтому поднимается над горизонтом гораздо выше, чем весной (для северного полушария).

§ 272. **Метеорные потоки.** Метеоры, которые наблюдаются каждую ночь и движутся по всевозможным направлениям, называются *спорадическими*. От них отличают *периодические* метеоры, которые появляются ежегодно в один и тот же день и движутся по опреде-

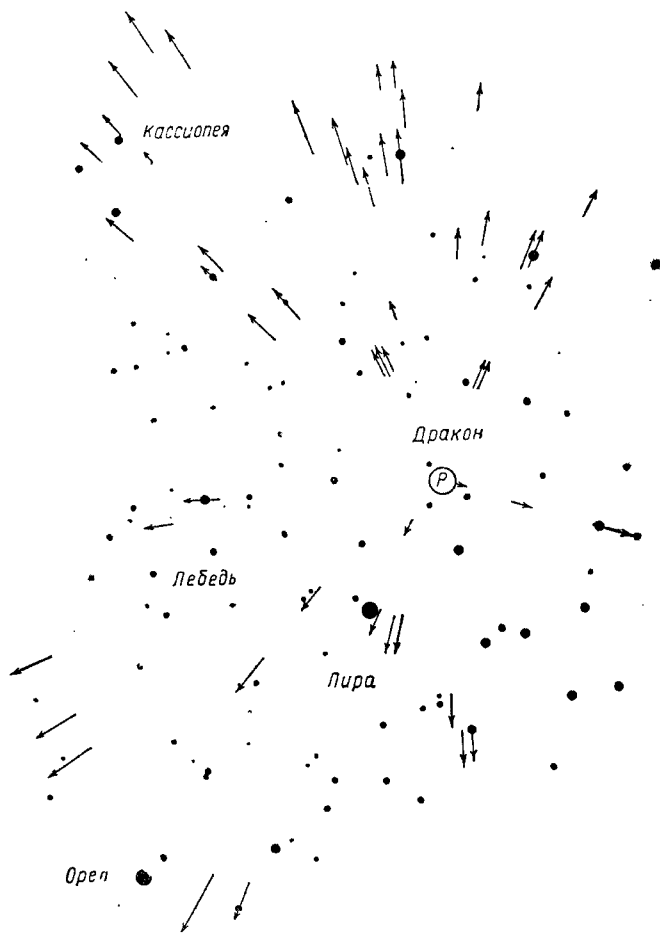


Рис. 115.

лённым направлениям. Именно, если мы нанесём на звёздную карту видимые пути таких метеоров и продолжим их назад, то все они сойдутся приблизительно в одной точке.

Такие метеоры, вылетающие все как бы из одной точки, составляют так называемый *метеорный поток*; точка, от которой во все стороны летят метеоры, называется *радиантом потока* (*P* на рис. 115),



Точка эта занимает определённое положение относительно звёзд, вместе с ними восходит и заходит.

Метеорных потоков теперь известно несколько сотен. Они получили названия по тем созвездиям, в которых находятся радианты, например, Персеиды, Леониды, Дракониды и т. д., по названию созвездий Персея, Льва, Дракона.

По характеру своего появления метеорные потоки резко различаются. Например, Персеиды наблюдаются каждый год приблизительно в одинаковом числе (40—50 метеоров в час для наблюдателя в каком-нибудь одном месте), причём максимум количества метеоров приходится на 11 и 12 августа. Леониды же обыкновенно немногочисленны, но бывали годы, когда они появлялись в виде настоящих *звёздных дождей* (1799, 1833, 1866 гг.) десятками и даже сотнями тысяч в час.

Эти звёздные дожди представляют одно из самых великолепных небесных явлений. По описаниям наблюдателей «делается светло, как при сильной молнии», звёзды «сыплются, как хлопья снега во время метели», и «нужно было бы затратить несколько часов, чтобы пересчитать все падающие звёзды, видимые *одновременно*». При этом всё явление протекает абсолютно бесшумно, и ни один метеор не падает на земную поверхность.

Спорадические метеоры носятся в пространстве совершенно независимо друг от друга, периодические же, наоборот, — целыми *роями*. При каждой встрече Земли с таким роем наблюдается сразу множество падающих звёзд. Все метеоры данного роя летят по параллельным путям, но вследствие перспективы эти пути кажутся расходящимися во все стороны от одной точки (радианта потока).

Так как каждый метеорный поток наблюдается всегда в один и тот же день, то это значит, что Земля ежегодно встречается с метеорным роем в одной и той же определённой точке своей орбиты. Подобные ежегодные встречи объясняются тем, что рой движется около Солнца по *эллиптической* орбите, пересекающейся в одной точке с орбитой Земли, причём метеоры распределены вдоль всей орбиты, так что рой имеет форму сплошного эллиптического кольца. Земля каждый год встречается с новой частью кольцеобразного роя. Толщина кольца огромна; поэтому Земля может проходить сквозь рой в течение нескольких дней.

Если метеорные тела более или менее *равномерно* распределены вдоль всей орбиты, то Земля каждый год встречает приблизительно одинаковое их количество; такой случай представляют Персеиды (рис. 116; орбиты Земли и Персеид).

Наоборот, Леониды *сгущены* в одной части своей орбиты в виде облака, с которым Земля встречалась каждые 33—34 года, и тогда наступали особенно обильные «звёздные дожди». Очевидно, во столько времени совершается одно обращение метеорного роя вокруг Солнца.

Сгущение тянется вдоль его орбиты приблизительно на  $1/10$  —  $1/12$  часть эллипса, так что прохождение роя через точку пересечения с земной орбитой продолжалось больше года. Поэтому обильные звёздные дожди наблюдались два и даже три года подряд (последний раз в 1866—1868 гг.). Внутри роя, даже в самой густой его части, расстояния между отдельными метеорными телами очень велики: в среднем внутри куба со стороной в 150 км приходится только одно метеорное тело. Но так как диаметр сгущения около 200 000 км (а с окружающими более разрежёнными частями составляет миллионы километров), то общее количество метеорных тел громадно.

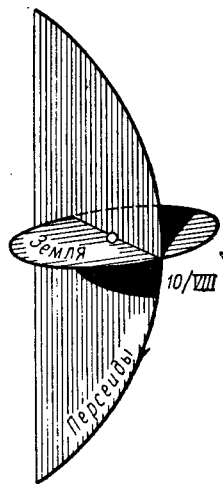


Рис. 116.

§ 273. Определение орбиты метеорного тела представляет сравнительно лёгкую задачу, если при этом не требуется большой точности. То обстоятельство, что оно в определённый момент встретилось с Землёй, даёт его точное *положение* в пространстве, так как положение Земли относительно Солнца известно. Известна также и скорость Земли относительно Солнца. Сложив геометрически эту скорость со скоростью метеорного тела относительно Земли (исправленной за сопротивление воздуха), получим скорость относительно Солнца. Такие вычисления показали,

что у большинства метеоров эта гелиоцентрическая, или космическая скорость в точке встречи с Землёй близка к 42 км/сек, т. е. к *параболической* скорости  $v_0$ , соответствующей данному расстоянию от Солнца (§ 170, в):  $v_0 = v\sqrt{2}$ , где  $v$  есть «круговая» скорость, близкая к скорости Земли. *Скорость* метеорного тела в данной точке, таким образом, может считаться известной. Положение точки радианта даёт нам *направление* скорости метеорного тела. Зная величину и направление скорости в одной данной точке, можно определить параболическую орбиту метеорного тела построением или вычислением. Истинные орбиты метеорных тел, конечно, не параболы, а эллипсы или гиперболы. Но *точное* определение элементов этих орбит возможно лишь в редких случаях, например, когда известно время обращения по эллиптической орбите (как у Драконид и Леонид) или когда удалось *точно* определить космическую скорость метеорного тела относительно Солнца в момент встречи с Землёй (§ 270).

Когда определения такого рода стали производиться для *метеоритов*, падение которых наблюдалось, то орбиты нескольких десятков этих тел оказались гиперболическими, так как их космическая скорость получилась больше 42 км/сек. Отсюда был сделан вывод, что метеориты прилетают в солнечную систему из межзвёздного пространства. Но позднейшими, более точными определениями это было опровергнуто,

скорость оказалась меньше 42 км/сек. Теперь признаётся, что все метеорные тела принадлежат к солнечной системе.

**§ 274. Связь метеоров с кометами.** В 1867 г. было установлено, что августовские метеоры, Персеиды, движутся по орбите одной периодической кометы (1862 III), с временем обращения около 120 лет. В том же году было указано, что и Леониды обращаются по орбите другой кометы (1866 I), имеющей период 33  $\frac{1}{4}$  года, приблизительно равный периоду, по истечении которого повторялись ноябрьские метеорные дожди. Эта связь указывает, что в данных случаях метеорные потоки образовались из комет, т. е. что кометы непрерывно разрушаются. Метеорные тела, составляющие комету (§ 265), распределяются мало-помалу по всей орбите и образуют в конце концов эллиптическое метеорное кольцо. Отсюда следует, между прочим, что поток Персеид древнее, чем Леониды; последний рой далеко ещё не растянулся по всей орбите, а занимает около  $\frac{1}{12}$  части её.

Третий случай связи метеоров с кометой представляют кометы Биэлы и метеорный поток Андромедид, давший великолепные «звёздные дожди» 27 ноября 1872 и 1885 гг. (§ 268). Позднее было найдено ещё несколько подобных случаев, например, связь кометы Джинакобини-Циннера с метеорным потоком Драконид. Ясно, что не все метеорные потоки образуются из комет; целый ряд потоков с кометами не связан.

Распад комет происходит из-за различия действия солнечного притяжения на более близкие и более далёкие от Солнца части кометы, т. е. под действием приливной силы Солнца (§ 186). Если комета имеет значительные размеры и в *перигелии* подходит очень близко к Солнцу, то самые близкие частицы уйдут значительно вперёд по сравнению с далёкими, и ядро кометы вытянется вдоль её орбиты (это явление наблюдалось у кометы 1882 II, § 268); при каждом следующем возвращении будет повторяться то же самое. Играют роль здесь и притяжения планет, в особенности Юпитера и Сатурна.

Бредихин указал другой источник метеорных потоков, независимый от предыдущего; это—*аномальные хвосты* (§ 266), т. е. извержение из кометы твёрдых частиц, которые при вылете из кометного ядра движутся, как показывают наблюдения, слегка *расходящимся* пучком. Этим объясняется то обстоятельство, что и при встрече с Землёй метеоры потока не всегда движутся в точности по параллельным путям.

**§ 275. Наблюдения метеоров** могут производиться без всяких инструментов. Наблюдатель, хорошо знающий созвездия, наносит видимый путь метеоров на карту звёздного неба, обозначая каждый метеор стрелкой с порядковым номером. Регистрируется время проявления и продолжительность полёта метеора, а также его цвет и блеск. Более точные наблюдения ведутся с помощью фотоаппаратов с широкоугольными светосильными объективами, направленными в зенит и радиант. Метеоры фиксируются на фотопластинке в виде прямых линий, пересе-

кающих суточные параллели звёзд. Новую эру в наблюдениях метеоров открыли советские астрономы Б. Ю. Левин и П. О. Чечик, применившие для наблюдений Драконида в ночь с 9 на 10 октября 1946 г. радиолокационные установки, которые ныне регулярно используются для наблюдения метеоров.

Так как метеоры ионизируют атмосферу, то радар регистрирует радиоэхо, отражённое от ионизованных областей полёта метеоров, и даёт возможность наблюдать их в дневное время.

Особенное значение имеет наблюдение метеорных *следов*; так называются светящиеся массы ионизованного воздуха в области полёта метеора. Возбуждённые атомы при сильной ионизации воздуха (яркий метеор) могут светиться в течение нескольких минут (иногда до 30 минут), причём под влиянием воздушных течений след метеора перемещается на фоне звёздного неба.

Эти наблюдения дают ценный материал о состоянии слоёв нашей атмосферы на больших высотах (80—200 км).

**§ 276. Болиды и метеориты.** Изредка в земную атмосферу влетают метеорные тела таких размеров, что за время полёта в атмосфере они не успевают полностью распылиться на большой высоте, как это имеет место при полёте метеоров, а проникают в более низкие слои атмосферы.

Такое тело при полёте в атмосфере быстро создаёт вокруг себя раскалённую газовую оболочку, особенно горячую с передней стороны, где образуется так называемая «воздушная подушка», сжатая до плотности твёрдого тела. Из этой «подушки» вырываются струи раскалённых газов, охватывают тело, «обрабатывают» его, разрушают и образуют позади него «огненный хвост». Наблюдателю с земной поверхности это явление представляется в виде полёта болида или огненного шара, иногда величиной с полную Луну. В громадном большинстве случаев дело этим кончается. Но если метеорное тело очень велико, то оно, или его *остатки*, могут долететь до «точки задержки». Так называется точка, в которой метеорное тело теряет всю свою космическую скорость. Начиная с этой точки, оно летит к земной поверхности уже под действием силы земного притяжения. Через несколько минут после пролёта болида раздаётся грохот, как от орудийного залпа (вследствие сильного сжатия и сотрясения воздуха на пути болида), и на земную поверхность падают камни, так называемые *метеориты*. Иногда их выпадает сразу несколько тысяч, большей частью мелких, но общий вес всех осколков одного метеорита может составлять много тонн. Ежегодно на всём земном шаре находят и доставляют в музеи в среднем 5—6 метеоритов, но их падает, конечно, несравненно больше. Каждый зарегистрированный метеорит получает название по местности, где он упал (например, метеорит Богуславка, рис. 117). Однако, как показали советские учёные В. В. Федынский и К. П. Станюкович, не всякий достигший поверхности Земли метеорит может быть обнаружен на месте падения. Если метеорит каменный и имеет большую массу

(2000—3000 тонн) і огромную скорасць парадка 50—70 км/сек адносна Зямлі, то пры сильным ударе о Зямлю ён нацело взрываецца і пераўтвараецца ў пыль (разрушаецца яго крысталічная структура). Пыль, падхваченная вадздушнымі течениямі, паднімаецца высока ў воздух, дзе, асвятляемая Сонцам, віда ночы ў выглядзе сярэбрыстых обла-



Рис. 117.

ков. На месце жэ падзення метеорита застаецца горадная воронка (так называемы метеоритны кратер), пахожая на воронку от артылерыйскага снаряда ці фугаснай бомбы.

Пры хімічным даследаванні метеоритов у них не адкрыто ні аднаго новага элемента, но знайдены такія злучэнні вядомых элементаў (мінералы), якія на Зямлі да сых пор невядомы. Сущэствуюць і другія прызнакі, па якім мінералогі сразу ўзнаюць метеорит, хоця бы падзенне яго і не наблідалася. Асабліва лёгка ўзнаюцца метеориты, зостаяцца амаль цалкам з чыстага жалеза (сідэриты). Па гэтым ёсць паддапожненне, што ў доісторыіскую эпоху

люди познакомились с железом прежде всего из метеоритов, а потом уже научились добывать его из земных недр.

**§ 277. Гигантские метеоритные падения XX века.** Два величайших метеоритных падения, какие только наблюдались с начала человеческой истории, произошли в XX в. на территории нашей Родины.

а) Падение Тунгусского метеорита. Это падение произошло утром 30 июня 1908 года приблизительно в тысяче километров

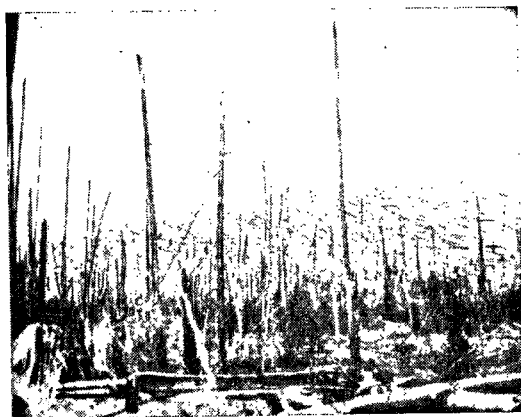


Рис. 118.

севернее Иркутска, в непроходимой заболоченной тайге. Падение сопровождалось полётом болида, по яркости превосходящего Солнце и видимого с расстояния до 500 км, и громовыми ударами, которые были слышны за тысячу километров. Метеорит, благодаря громадной массе, сохранил почти до самой земной поверхности скорость в несколько десятков км/сек. При ударе о Землю энергия его

движения породила грандиозный взрыв такой силы, что сейсмографы на геофизических обсерваториях отметили «землетрясение» какого-то необычного характера, а барографы зарегистрировали сотрясение воздуха, причём воздушная волна, порождённая взрывом, дважды обошла вокруг земного шара.

Экспедиции в район падения метеорита были организованы только после Великой Октябрьской социалистической революции. Руководителем их был проф. Л. А. Кулик. Оказалось, что вокруг места падения лес повален на площади радиусом в 30 км, причём обгорелые столетние сосны лежат все вершинами от центра взрыва (рис. 118). Сам «метеоритный кратер» превратился за двадцать лет в торфяное озеро. Никаких остатков метеорита (который был, повидимому, каменным), найти не удалось.

б) Падение Сихотэ-Алиньского метеорита произошло утром 12 февраля 1947 года, также при безоблачном небе, далеко от населённых мест, в отрогах Сихотэ-Алиньского горного хребта (Приморский край). Падение сопровождалось световыми и звуковыми явлениями примерно такой же силы, как предыдущее. Очевидец падения, художник Медведев, зарисовал это грандиозное явление (рис. 119). Уже через три дня было найдено место падения. К началу весны туда

прибыла экспедиция во главе с акад. Фесенковым и удачно использовала для исследований короткий промежуток времени до развития растительности. Оказалось, что это падение представляет собой единственный в мире железный «метеоритный дождь» (все наблюдав-

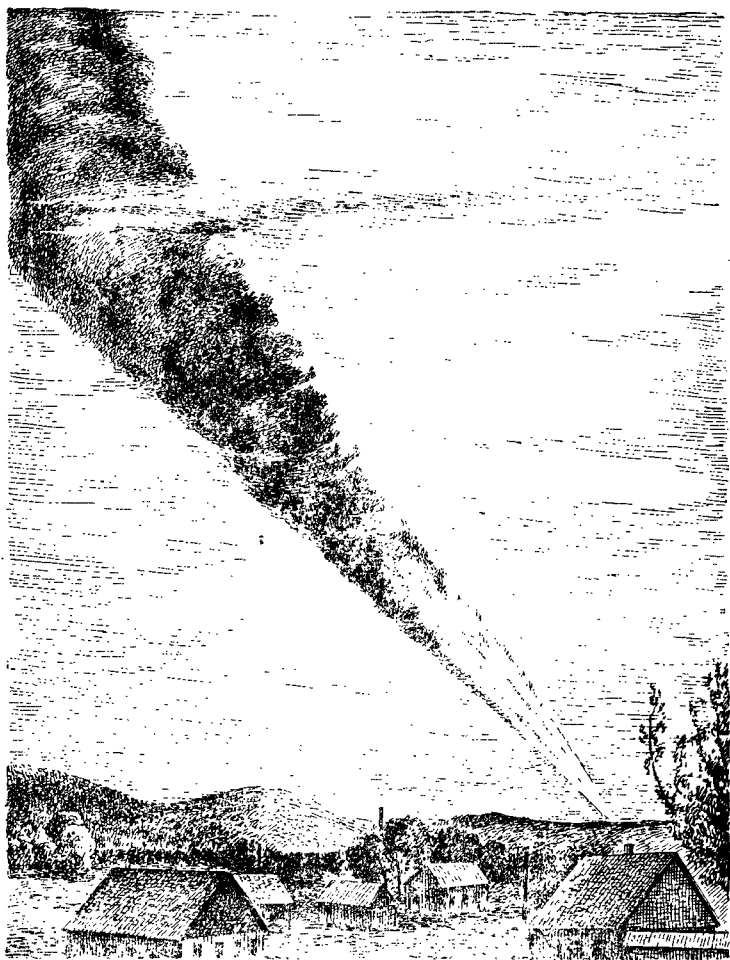


Рис. 119.

шие до этого метеоритные «дожди» относятся к классу каменных метеоритов). Этот «дождь», повидимому, образовался в результате дробления на тысячи частей одной крупной железной массы в сравнительно высоких слоях земной атмосферы. Такое дробление было вызвано большой скоростью (не менее  $20 \text{ км/сек}$ ), с которой метеорное тело вторглось в земную атмосферу.

Самые крупные из этих метеоритных масс, по нескольку тонн каждая, при падении дробили скальные породы, залегающие на месте падения, на глубине полуметра, и разбивались сами на множество осколков. Но скорость метеорита была недостаточной для того, чтобы произвести взрыв, подобный взрыву тунгусского метеорита. Общая масса метеоритного вещества, достигшего земной поверхности, составляет не менее 100 *т*. Первой же экспедицией за короткий срок

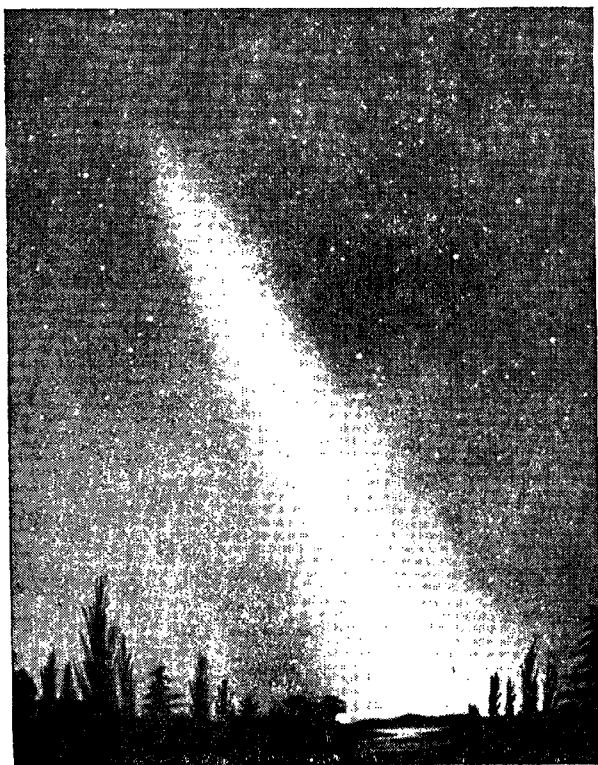


Рис. 120.

её деятельности было собрано несколько тысяч осколков общим весом до 5 *т*, в том числе несколько железных глыб весом около 300 *кг*. Собранные осколки этого метеорита доставлены в Москву и находятся в Метеоритном музее Академии наук СССР.

**§ 278. Значение метеорных тел во вселенной.** По вопросу происхождения метеоритов в настоящее время считается наиболее вероятной гипотеза, что метеориты являются обломками какого-то сравни-



тельно крупного тела, скорее всего — планеты, некогда двигавшейся между орбитами Марса и Юпитера. Причины разрушения этой планеты пока остаются неясными.

Ежегодно на Землю падают тысячи, а может быть, даже десятки тысяч тонн метеорного вещества. Весьма вероятно, что падение этого вещества на Землю и на другие планеты шло так же, как теперь, в течение миллионов лет. Поэтому естественно возникает гипотеза, что метеориты представляют собой материал, из которого образуются светила (§ 346).

Таким образом, в вечном процессе развития материи частицы, являющиеся продуктами разрушения светил, могут в свою очередь быть материалом для их возникновения в новых формах.

**§ 279. Зодиакальный свет.** В ясный зимний или весенний вечер, после наступления полной темноты, над западной частью горизонта можно заметить слабое сияние в виде широкого наклонного конуса; летом и осенью такое же сияние видно на востоке перед рассветом (рис. 120). Так как этот светящийся конус тянется вдоль эклиптики, по созвездиям зодиака, то он назван *зодиакальным* светом. В тропических странах, где эклиптика всегда круто поднимается над горизонтом, зодиакальный свет кажется почти таким же ярким, как Млечный Путь, и его можно проследить вокруг всей эклиптики в виде полного кольца. Наиболее яркое место его, отстоящее точно на  $180^\circ$  от Солнца, называется «противосиянием». Явление зодиакального света доказывает, что Солнце окружено огромным скоплением мелкой пыли и газов, которые освещаются Солнцем и видны наблюдателям. Это скопление имеет форму диска, экваториальная плоскость которого близка к плоскости эклиптики, а его края заходят за пределы земной орбиты.

Противосияние же, по исследованиям В. Г. Фесенкова и И. С. Астаповича, повидимому, связано с *Землей*. Оно может быть объяснено тем, что наша атмосфера не имеет сферической формы, а вытянута в сторону, противоположную Солнцу, подобно кометному хвосту на расстоянии, несколько большее  $\frac{1}{3}$  расстояния Луны.

В. Г. Фесенков считает, что противосияние является газовым хвостом Земли, проектирующимся на фон звездного неба.

---

## ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

### ЗВЁЗДЫ

**§ 280. Звёзды.** Все описанные до сих пор небесные тела занимают ничтожно малую часть видимого нами мира; они составляют так называемую *солнечную систему*. Главным светилом здесь является Солнце — одна из бесчисленных звёзд вселенной. Долгое время астрономия занималась преимущественно изучением тел солнечной системы, и в этом отношении сделаны уже значительные успехи: законы, управляющие *движением* тел этой системы, известны с такой полнотой, что позволяют предвычислять положения тел на много десятков лет вперёд: сравнительно много узнали мы и о *физической природе* ближайших к нам светил.

Несравненно более великую, но и неизмеримо трудную задачу представляет изучение мира звёзд, в который наше Солнце входит как незначительная единица, наряду с миллионами ему подобных солнц — звёзд. Это изучение началось менее двухсот лет назад и до начала XX в. ограничивалось главным образом собиравшем фактического материала. Но за последние десятилетия в этой области были достигнуты большие успехи и стали выясняться основные черты строения «звёздных систем», гораздо более грандиозных, чем наша солнечная система.

*Расстояния* звёзд непосредственно измерены (по их годичным параллаксам, §§ 120—122) лишь для нескольких тысяч самых близких к нам звёзд; но расстояния гораздо большего числа звёзд можно достаточно точно оценивать различными косвенными методами. Поэтому *масштаб* звёздной системы уже выяснен; расстояния от нашего Солнца до ближайших солнц-звёзд в несколько десятков миллионов раз больше диаметров этих небесных тел. Если уменьшить звёздный мир в  $10^{12}$  раз, то он превратится в собрание светящихся шаров крайне разнообразных размеров — от долей миллиметра до метра и больше в диаметре, а расстояния между шарами будут измеряться десятками километров. Планеты, обращающиеся вокруг звёзд (§ 304), на этой модели выйдут микроскопическими несветящимися пылинками.

**§ 281. Блеск и «величина» звёзд.** По видимой яркости или, как теперь принято говорить, блеску (§ 201) звёзды ещё в древности были разделены на классы, так называемые *величины*.

Наиболее яркие звёзды (около 20) названы звёздами 1-й величины, затем идут звёзды 2-й величины и т. д.; самые слабые звёзды, видимые простым глазом, относятся к 6-й величине. Деление на величины продолжается и дальше, в области *телескопических* звёзд, невидимых простым глазом; величайшие современные телескопы показывают при наблюдениях глазом звёзды до 18-й величины, а при фотографировании — до 21-й и даже слабее.

Слово «величина» сокращённо обозначается буквою  $m$  (magnitude). Разделение на «величины» вначале было произвольным, но потом выяснилось, что оно имеет определённое физическое и физиологическое обоснование, основанное на восприятии света глазом. Именно, звёзды 1-й величины в среднем во столько же раз ярче звёзд 2-й величины, во сколько эти последние ярче звёзд 3-й величины и т. д. Таким образом, блеск звёзд последовательных величин составляет *геометрическую* прогрессию. Отношение блеска двух смежных классов (знаменатель прогрессии) оказывается близким к 2,5. В настоящее время условились считать, что блеск звезды 1-й величины ровно в 100 раз превосходит блеск звезды 6-й величины. Тогда величина знаменателя прогрессии оказывается равной  $\sqrt[5]{100} = 2,512$ , а логарифм этого числа — равным 0,4000. Это очень облегчает переход от «величин» звёзд к их блеску.

Пусть более яркая звезда имеет величину  $n$ , более слабая  $m$ , тогда  $m > n$ ; отношение их блеска  $J_n$  и  $J_m$  будет:

$$\frac{J_n}{J_m} = 2,512^{m-n}. \quad (1)$$

Логарифмируя и помня, что  $\lg 2,512 = 0,4000$ , получим:

$$\lg \frac{J_n}{J_m} = 0,4 (m - n), \quad (2)$$

или

$$m - n = 2,5 (\lg J_n - \lg J_m). \quad (3)$$

Если принять за единицу блеск звезды «нулевой» величины, то при  $n = 0$  и  $J_n = J_0 = 1$  получим:

$$\lg J_m = -0,4 m, \quad (4)$$

$$m = -2,5 \lg J_m. \quad (5)$$

Для более точной оценки блеска звёзд введены промежуточные подразделения звёздных величин в виде десятичных дробей. Для очень ярких светил приходится употреблять отрицательные числа. Так, например, величина Сириуса, самой яркой звезды неба, выражается отрицательным числом  $-1^m,6$ . Две самые яркие звезды северного полу-

шария, Вега и Арктур, имеют величину около  $0^m,1$ . При приближённых оценках звёзды с величинами от  $-0^m,5$  до  $+0^m,5$  относят к звёздам нулевой величины, звёзды от  $0^m,6$  до  $1^m,5$  — к звёздам 1-й величины, от  $1^m,6$  до  $2^m,5$  — к звёздам 2-й величины и т. д.

Важное значение имеет звёздная величина Солища, но её точное определение представляет большие трудности. В начале XX в. В. К. Цераский получил для неё величину  $-26^m,5$ . В настоящее время принято близкое к этому значение  $-26^m,8$  как среднее из нескольких определений.

Звёздная «величина» полной Луны в среднем выражается числом  $-12^m,6$ .

**§ 282. Абсолютный блеск и абсолютная величина.** Блеск звезды зависит от расстояния и ничего не говорит нам об её истинной силе света. Чтобы сравнивать силу света различных звёзд, надо вычислить, какую звёздную величину они бы имели, если бы все находились от нас на *одинаковом* расстоянии. По международному соглашению за такое нормальное расстояние принято 10 парсеков, т. е. расстояние, соответствующее параллаксу в  $0'',1$  (§ 120). Блеск звезды, который она бы имела на расстоянии в 10 парсеков, мы назовём *абсолютным блеском*, а её звёздную «величину» — *абсолютной звёздной величиной*. Она легко вычисляется, если известны видимая величина звезды  $m$  и её параллакс  $\pi$  (а стало быть и расстояние  $D$ ).

Обозначим абсолютную звёздную величину через  $M$ , абсолютный блеск звезды  $J_M$ , а её видимый блеск  $J_m$ . Формула (1) § 281 даёт

$$\frac{J_M}{J_m} = 2,512^{m-M}.$$

Но блеск звезды обратно пропорционален квадратам расстояний, а расстояния звёзд можно считать обратно пропорциональными параллаксам:

$$\frac{J_M}{J_m} = \frac{D^2}{D_0^2} = \frac{\pi_0^2}{\pi^2},$$

где  $D_0$  и  $\pi_0$  — расстояние и параллакс, соответствующие абсолютной величине  $M$ . Подставив последнее отношение в левую часть 1-го уравнения, получим:

$$\frac{\pi_0^2}{\pi^2} = 2,512^{m-M}.$$

Логарифмируем, помня, что  $\lg 2,512 = 0,4$ , а  $\pi_0 = 0'',1$ , следовательно,  $\lg \pi_0 = -1$ :

$$0,4 (m - M) = -2 - 2 \lg \pi,$$

$$m - M = -5 - 5 \lg \pi,$$

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi. \quad (6)$$

Формула (6) есть одна из важнейших формул современной звёздной астрономии. Во многих случаях теперь удаётся определить абсо-

лютиую величину  $M$  звезды, например, по её спектру или по изменчивости её блеска; тогда формула (6) сразу даёт параллакс, т. е. *расстояние* звезды.

Следует запомнить вывод, полученный с помощью формулы (6): *абсолютная величина нашего Солнца равна  $-4^m,73$* ; другими словами, с расстояния в 10 парсеков Солнце было бы видно звездой несколько ярче 5-й величины.

Пример. Найдём абсолютную величину Сириуса

$$(m = -1,6, \quad \pi = 0'',37, \quad \lg \pi = 9,568 - 10).$$

Формула (6) даёт:

$$M = -1,6 + 5 + 5 \cdot (-0,432) = -1^m,24.$$

Таким образом, Сириус ярче Солнца на 3,49 звёздной величины. Отношение абсолютного блеска этих светил по формуле (1) § 281 будет:

$$L = 2,512^{3,49}, \quad \lg L = 0,4 \cdot 3,49 = 1,396, \quad L = 24,9.$$

Абсолютный блеск звезды, выраженный по отношению к абсолютному блеску Солнца, называется светимостью звезды ( $L$ ). Светимость показывает, во сколько раз звезда на самом деле ярче Солнца. Например, светимость Сириуса  $L = 24,9$ , т. е. Сириус ярче Солнца почти в 25 раз.

**§ 283. Обозначения звёзд.** В глубокой древности звёздное небо было разделено на *созвездия*; сначала были выделены наиболее заметные группы, получившие особые названия, затем деление было распространено на оба небесных полушария, как северное, так и южное. Созвездия получили имена, взятые большей частью из древней мифологии. С начала XVII в. отдельные звёзды каждого созвездия стали обозначать греческими буквами с прибавлением названия созвездия, большей частью латинского<sup>1)</sup>, например  $\alpha$  Ursae Minoris (или сокращённо  $\alpha$  UMi, альфа Малой Медведицы, т. е. Полярная, § 15). Для немногих, самых ярких звёзд употребляются, кроме того, особые имена, частью греческие и латинские (например, Сириус, Арктур, Капелла), частью арабские (Вега, Альдебаран, Алголь). Так как греческих букв хватает только для немногих звёзд каждого созвездия, то остальные обозначаются или латинскими буквами, или номерами с указанием созвездия, например, 61 Лебеда, или же номерами с указанием (обыкновенно сокращённым) звёздного каталога, в который занесена звезда. Звёзды, ещё не занесённые ни в какой каталог, обозначаются их координатами  $\alpha$  и  $\delta$ , с указанием времени, к которому относятся эти величины (§ 284).

<sup>1)</sup> Латинские названия созвездий и их сокращённые обозначения см. в конце книги, в табл. VIII.

**§ 284. Видимые и средние места звёзд.** Главная величина, характеризующая звезду, это — её *положение*, или «место»; оно определяется координатами  $\alpha$  и  $\delta$ . Определение точных мест возможно большего числа звёзд является главной задачей работы большинства обсерваторий. Определение это чрезвычайно кропотливо, причём обработка каждого наблюдения занимает гораздо больше времени, чем самое наблюдение.

Измеренные непосредственно инструментом (например, меридианным кругом) координаты звезды надо прежде всего исправить за погрешности инструмента (§ 83); получается *наблюдённое* место звезды.

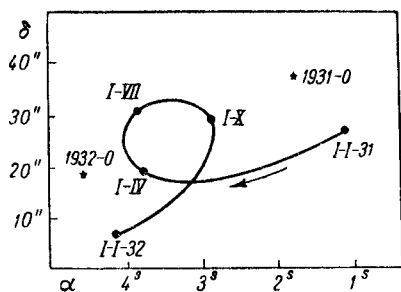


Рис. 121.

Освободив найденные координаты от влияния рефракции, получаем так называемые *видимые* координаты звезды; определяемое этими координатами положение звезды называется её *видимым местом*.

Видимые координаты звёзд всё время изменяются, и это изменение при очень точных наблюдениях можно заметить уже через немного дней (рис. 121; видимые координаты звезды Арктур в 1931 г.). Оно происходит от двух причин: 1) вследствие *абберации* звезда в течение

года описывает небольшой эллипс (§ 125); 2) вследствие *прецессии* и *нутаии* всё время передвигается точка весеннего равноденствия, от которой отсчитываются прямые восхождения, и экватор, от которого измеряются склонения (§ 180). Поэтому дальнейшим вычислением: 1) освобождают координаты звезды от влияния абберации (переносят её в центр абберационного эллипса) и 2) относят координаты звезды, определённые в разные дни, к одному определённом положению равноденственной точки, обычно к тому положению, которое она занимала 1 января данного года (так называемое «приведение к началу года»). Полученное таким образом положение звезды называется *средним местом* звезды, отнесённым к началу такого-то года (рис. 121; обозначены звёздочкой положения на начало 1931 г. и 1932 г.).

Редко случается, что средние координаты звезды, определённые в разное время, но отнесённые к началу одного и того же года, изменяются пропорционально времени; это означает, что звезда имеет заметное *собственное движение*.

Видимые места звёзд даются в астрономических ежегодниках, средние — в *звёздных каталогах*.

**§ 285. Звёздные каталоги и карты.** Звёздными каталогами называются списки звёзд, в которых даны средние координаты ( $\alpha$  и  $\delta$ ) звёзд для начала некоторого определённого года (так называемая *эпоха каталога*) и их блеск. Обыкновенно даются также изменения коор-

динат со временем вследствие прецессии; это облегчает определение места звезды для другой эпохи. Такие списки стали составляться ещё в древности, до изобретения телескопа. Из них до нас дошёл каталог Птолемея (II в. нашей эры), основанный, повидимому, на ещё более древнем каталоге Гиппарха (II в. до нашей эры); он содержит положения (широты и долготы) около тысячи звёзд. В течение почти полутора тысяч лет не было сделано даже попытки проверить путём наблюдений данные там координаты звёзд. Только в начале XV в. положения всех звёзд каталога Птолемея были вновь более точно определены Улугбеком в Самарканде.

Со времени изобретения телескопа появилось уже несколько сот звёздных каталогов, составленных главным образом с помощью наблюдений меридианным кругом (§ 82). На производство наблюдений и их обработку для составления одного такого каталога требуются целые годы утомительной и однообразной работы. Этой тяжёлой цепой приобретены все наши сведения о звёздном мире, его строении и движениях.

По своему содержанию и по точности звёздные каталоги разделяются на две главные группы: 1) звёздные обзоры и 2) точные каталоги.

1) Каталоги первой группы стремятся зарегистрировать возможно *большее число* звёзд, но положение звёзд в них даётся лишь приблизительно (до  $0',1$ ). Важнейший из них — это «Bonner Durchmusterung» (сокращённо BD, «Боннский перечень») Аргеландера (1862 г.), содержащий 324 000 звёзд от  $-23^\circ$  до  $+90^\circ$  склонения, до 9,5 величины. Он составлен ещё до введения астрофотографии, но до сих пор сохранил научную ценность. Для южного небесного полушария подобный же каталог был составлен уже с помощью фотографии, что много легче («Cape Photographie Durchmusterung», т. е. «Капский фотографический перечень», сокращённо CPD).

2) Каталоги второй группы содержат лишь сравнительно немного звёзд, но их положения определяются с величайшей *точностью*, какая только возможна, — до десятой и даже сотой доли секунды ( $0'',01$ ). Успешное составление таких каталогов явилось одним из важнейших вкладов, который внесли в науку русские обсерватории XIX в. (Московская и Казанская университетские обсерватории, морская Николаевская обсерватория и др.). Наибольшее значение из каталогов этой группы имеют *фундаментальные* каталоги. Они содержат лишь определённые, избранные звёзды, которые служат опорными точками для определения положений остальных звёзд, а также планет и комет. Звёзды эти наблюдаются постоянно, и их координаты печатаются каждый год в *астрономических ежегодниках*, без которых в настоящее время астрономические работы почти невозможны. Определение положений фундаментальных звёзд (так называемых *абсолютных* положений) составляет одну из самых важных, но и самых трудных задач звёздной астрономии.

Наблюдения именно этих звёзд и доставили всемирную известность нашей Пулковской обсерватории, опубликовавшей несколько таких каталогов, в которых положения звёзд даны с непревзойдённой ещё точностью.

3) Звёздные карты. Экваториальные координаты звёзд вполне аналогичны географическим координатам точек земной поверхности. Каждую звезду можно отметить «точкой» на координатной сетке, вычисленной в определённой картографической проекции совершенно так, как наносят города на географическую карту. Поэтому уже давно стали составляться звёздные карты и их собрания — звёздные атласы, вначале, конечно, только для звёзд, видимых простым глазом. Также оба «звёздных» обзора изданы и в виде карт. В настоящее время существуют звёздные атласы, дающие по фотоснимкам звёзды до 17-й величины и даже слабее.

**§ 286. Число звёзд.** Чем слабее звёзды, тем число их больше. Приводим данные для звёзд, видимых простым глазом в обоих полушариях, причём к 1-й величине отнесены звёзды ярче 1,5 величины, ко 2-й — звёзды от 1,6 до 2,5 величины и т. д.

| Величина | Число звёзд | Величина | Число звёзд |
|----------|-------------|----------|-------------|
| 1        | 20          | 4        | 458         |
| 2        | 46          | 5        | 1476        |
| 3        | 134         | 6        | 4 840       |

Таким образом, простым глазом на всём небе можно видеть до семи тысяч звёзд, т. е. гораздо меньше, чем обыкновенно думают. Число это сильно меняется в зависимости от остроты зрения.

Для телескопических звёзд имеем:

| Величина | Число звёзд | Величина | Число звёзд |
|----------|-------------|----------|-------------|
| 7        | 15 000      | 10       | 407 000     |
| 8        | 45 000      | 11       | 1 175 000   |
| 9        | 138 000     | 12       | 3 240 000   |

Наблюдения показали, что числа звёзд разных величин *приблизительно* составляют геометрическую прогрессию со знаменателем около 3. По мере перехода к более слабым звёздам знаменатель прогрессии не остаётся постоянным, а медленно убывает. Это ведёт, как увидим дальше (§ 332), к важным заключениям о строении звёздного мира.

Число более слабых звёзд известно лишь очень неточно. Общее количество звёзд до 16-й величины оценивается приблизительно в 100 млн., а число всех звёзд, доступных сильнейшим современным астрономическим инструментам, по меньшей мере, в миллиард.

Все эти числа относятся к *визуальному* блеску, оцениваемому глазом. Для фотографического блеска числа звёзд, отнесённых к дан-



ной величине, получаются значительно меньшими, так как средние звёзды, особенно слабых, есть много красноватых, которые на снимках выходят слабее, чем кажутся глазу, иногда на целую звёздную величину (см. § 281, 287).

**§ 287. Цвета звёзд.** Большинство звёзд — белого цвета, другие имеют жёлтый или красный цвета с различными промежуточными оттенками. Другие цвета, например, синий или зелёный, встречаются только в двойных звёздах, но это явление объясняется действием цветового контраста, а на самом деле все эти звёзды белые, слегка с голубоватым оттенком. Когда рядом с такой звездой видна оранжевая или красная, белая звезда кажется, например, зелёной по известному явлению дополнительных цветов.

*Мерцание* звёзд, при котором они переливаются разными оттенками, происходит от волнений нашей атмосферы. На вопрос «почему же планеты не мерцают?» можно ответить так. Угловые диаметры звёзд в сотни раз меньше угловых диаметров планет (§ 295). С другой стороны, оптические волнения земной атмосферы в любой точке (или, точнее, на бесконечно малой площадке) небесного свода происходят совершенно независимо от волнений на смежных площадках (точках). Поэтому все бесчисленные «точки» планетного диска мерцают по-разному, в каждый данный момент в среднем столько же точек находится в максимуме блеска, сколько в минимуме, и общий блеск планеты *почти* не меняется.

Показатель цвета и его значение. Цвет звезды можно выразить числом. Для этого надо сравнить визуальную звёздную величину (т. е. величину, оцениваемую глазом) с фотографической величиной той же звезды. Так как обыкновенные фотографические пластинки мало чувствительны к красным лучам, то красные звёзды на фотографии выходят слабее белых звёзд того же визуального блеска, и разница тем больше, чем звезда краснее. *Условились*, что фотографическая звёздная величина в точности равна визуальной величине только у чисто белых звёзд, имеющих притом определённый спектр, так называемый спектр А0 (см. § 289). Тогда для звёзд других цветов такого равенства величин не будет: у жёлтых и красных звёзд фотографическая величина будет больше визуальной. *Разность между фотографической величиной звезды и её визуальной величиной называется показателем цвета.* Например, если красная звезда  $2^m,4$  на фотографии выходит звездой  $3^m,9$ , то её показатель цвета равен  $+1^m,5$ . У очень красных звёзд встречаются показатели больше  $+2^m$ ; у голубовато-белых звёзд бывают отрицательные показатели (редко больше чем  $-0^m,3$ ). Эти звёзды, очевидно, на фотографии выходят несколько более яркими, чем они кажутся глазу.

Показатель цвета играет важную роль в астрофизике:

1) По его величине  $S$  можно вычислить эффективную *температуру* звезды. Чем больше  $S$ , тем температура ниже. Связь между ними выражается простой формулой или графиком.

2) Если, кроме показателя цвета, известно ещё и *расстояние* звезды, то по формуле (6) § 282 мы знаем её абсолютную величину  $M$ , которая является мерой полного излучения звезды. Количество этого излучения зависит только от размеров звезды и от её температуры. А так как температура уже определена, то мы получаем линейный *радиус* звезды в радиусах Солнца.

**§ 288. Спектры звёзд.** Спектры разных звёзд различны. В настоящее время изучение звёздных спектров составляет одну из важнейших задач астрономии и принесло такие сведения о природе отдалённых солнц, которые до открытия спектрального анализа всякому показались бы фантастическими.

Спектры звёзд подобно солнечному спектру — сплошные с тёмными линиями, т. е. *спектры поглощения* (§ 194). Это доказывает, что каждая звезда есть солнце, — раскалённый газовый шар, окружённый более холодной атмосферой. Большинство линий в звёздных спектрах удалось отождествить с линиями земных элементов. Оказалось, что вещество звёзд состоит из тех же химических элементов, как наша Земля и Солнце, но в спектрах одних звёзд заметнее одни элементы, в спектрах других — другие.

Спектры звёзд в общем сильно различаются друг от друга числом и распределением линий, но они не бесконечно разнообразны. Наоборот, их можно распределить в сравнительно небольшое число *типов* или *классов*, так что спектры, отнесённые к одному и тому же классу, будут различаться между собой очень мало. Таких спектральных классификаций было предложено несколько.

**§ 283. Классификация спектров.** В настоящее время общепринята классификация спектров, разработанная на Гарвардской обсерватории (США). Классы в этой системе обозначаются буквами (рис. 122); несколько неестественное распределение букв объясняется случайными причинами.

Класс *O*. *Белые* звёзды, в спектрах которых видны линии *ионизованных* элементов, главным образом гелия, азота, кислорода. Если в спектре звёзд такого класса имеются *яркие* линии, то такие звёзды называются звёздами типа Вольфа-Райе.

Класс *B*. *Белые* звёзды, в спектрах которых видны линии *гелия* и *водорода*. Преимущественно яркие звёзды, расположенные главным образом в Млечном Пути и в созвездии Ориона. Из 7 ярких звёзд Ориона 6 принадлежат к этому классу.

Класс *A*. *Белые* звёзды с широкими линиями *водорода* (Сирнус, Вега), появляются линии ионизованных металлов.

Класс *F*. *Желтовато-белые* звёзды; очень интенсивны линии *кальция* как ионизованного, так и нейтрального; линии других металлов заметнее, чем в предыдущем классе (Процион, Канопус).

Класс *G*. *Желтоватые* звёзды, много линий *металлов* (Солнце, Капелла).

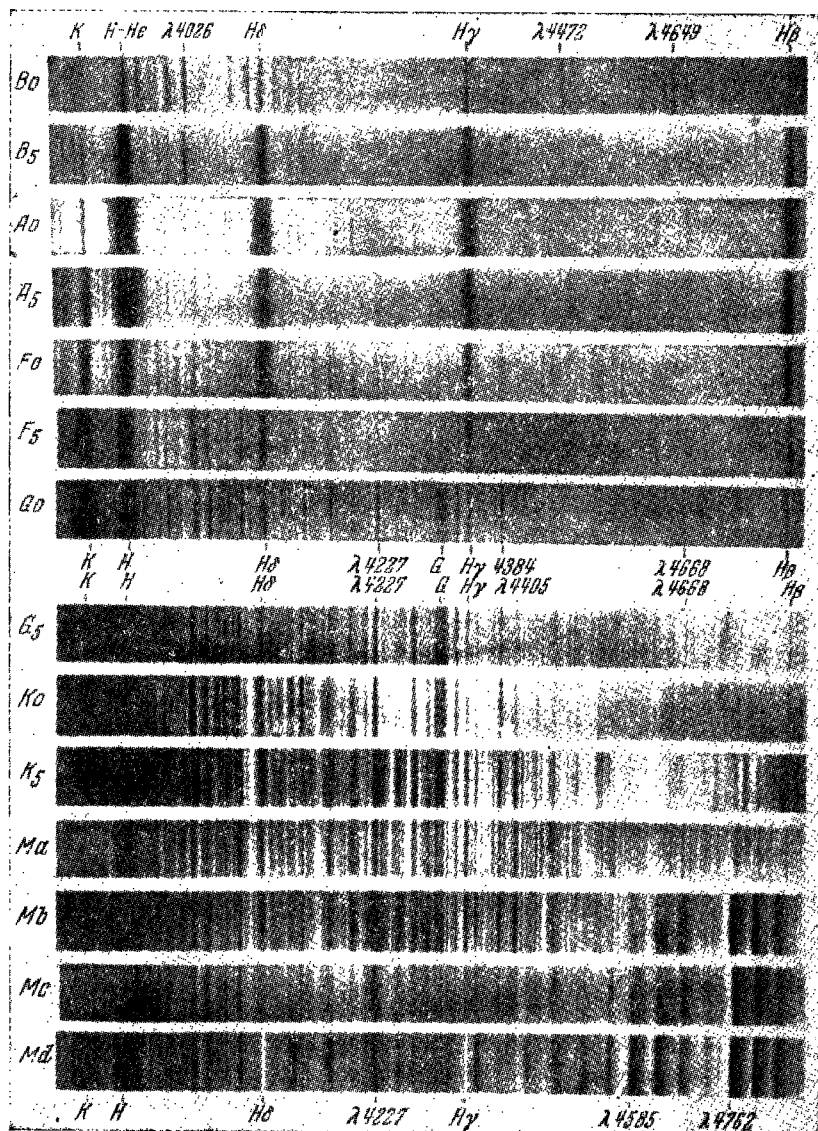


Рис. 122.

Класс К. *Красноватые* звёзды с ослабленной фиолетовой частью спектра, линии *металлов* усилены (Арктур).

Класс М. *Красные* звёзды с широкими *полосами* поглощения соединений *титана* (Бетельгейзе).

Кроме того, для немногих спектров, не укладывающихся в эту таблицу, пришлось ввести ещё несколько добавочных классов R, N, S, P (планетарные туманности).

Все основные классы постепенно переходят один в другой и образуют непрерывный ряд. Поэтому оказалось возможным ввести десятичные подразделения каждого класса, которые обозначаются цифрами. Например, В1 означает звезду класса В, которая очень сходна с типичными звёздами В, но имеет небольшое сходство с классом А; наоборот, звезда В9 гораздо ближе к классу А, чем к В.

Дополнительные классы R, N и S являются ответвлениями от основного класса G. Класс P определяет характерный спектр планетарных туманностей.

**§ 290. Температуры звёзд.** Порядок спектральных классов соответствует порядку убывающих температур — от самых горячих звёзд О, В, А до сравнительно холодных звёзд М и N. Действительно, в звёздах О понижен даже гелий, что указывает на крайне высокую температуру, в звёздах В — водород. В следующих классах появляются линии нейтральных металлов, а затем и линии химических соединений, которые могут существовать только при сравнительно низкой температуре.

Под температурой звезды подразумевают температуру её наружных слоёв.

Для определения температуры звёзд существует несколько способов, но все они основаны на измерении излучения звезды. При этом условно принимается, что звёзды излучают энергию, как абсолютно чёрное тело. Температура, определённая при этом условии, называется эффективной температурой звезды (§ 220). Следовательно, строго говоря, мы определяем эффективную температуру звёзд.

Для главных спектральных классов получились следующие средние температуры:

| О       | В       | А       | F      | G      | K      | M       |
|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|
| 30 000° | 20 000° | 10 000° | 8 000° | 6 000° | 4 000° | 3 000°. |

**§ 291. Гипотетическая зависимость спектрального класса от возраста звезды.** Основатели астрофизики считали, что самые белые и горячие звёзды (классов О, В и А) являются самыми молодыми, а более холодные красные (классов К и М) — самыми старыми, близкими к окончательному потуханию. Но английский астрофизик Локайр в конце XIX в. высказал предположение, что в каждом спектральном классе имеются две различные группы звёзд: 1) звёзды, *температура* которых в данное время *возрастает* («восходящая ветвь температурной кривой»), и 2) звёзды *остывающие*, лежащие на «нисходящей ветви». Различие заключается в том, что в спектрах 1-й группы видны «искровые» линии какого-нибудь металла, т. е. линии, появляющиеся в спектре электрической искры, а в спектрах 2-й группы — линии того же металла в электрической дуге («дуговые»). Локайр считал, что только

эти последние линии принадлежат нормальному элементу, например железу, а «искровые» линии вызваны элементом, находящимся в особом, *разложённом*, состоянии; они принадлежат «протожелезу», т. е. «первичному» железу. Звёзды, содержащие такие «протоэлементы», являются молодыми разгорающимися светилами, звёзды другой группы — остывающими.

Иден Локайра не признавались его современникам, но с физической стороны они подтверждены теперь теорией ионизации («протоэлементы» — это ионизованные элементы); в астрономии же его теория нашла себе подтверждение в открытии *звёзд гигантов* и *звёзд-карликов* и была в переработанном виде развита Ресселлом (1912 г.).

**§ 292. Звёзды-гиганты и звёзды-карлики.** Зная блеск звезды и её расстояние, можно определить светимость звезды (§ 282), т. е. число, показывающее, во сколько раз звезда в действительности ярче или слабее нашего Солнца. Оказалось, что красные звёзды классов К и М разделяются по своей светимости на две резко разграниченные группы: к первой принадлежат звёзды-гиганты, которые во много десятков раз ярче нашего Солнца, а ко второй — звёзды-карлики, в сотни раз слабее Солнца. Между этими двумя группами совсем нет переходных форм. Затем выяснилось, что белые «гелиевые», или «оригиновые» звёзды класса В — все гиганты в сравнении с нашим Солнцем; большинство звёзд следующего класса А — также гиганты, но среди звёзд этого последнего класса уже встречаются «карлики», хотя разница в светимости здесь невелика. У желтоватых звёзд разделение на гигантов и карликов становится очевидным, но попадаются ещё промежуточные светимости. Наконец, у красных звёзд класса М разница в светимости между гигантами и карликами достигает 9—10 величин, т. е. красные гиганты ярче карликов того же класса в 5—10 тысяч раз. Оказалось, что звёзды-гиганты имеют во всех классах в среднем одинаковую светимость, а светимости звёзд-карликов правильно убывают с изменением цвета звезды от белого к красному. Лучшее всего это видно из следующей диаграммы Ресселла (рис. 123), которая заново переработана, дополнена и развита на основании современных данных профессором Московского государственного университета П. П. Паренаго. На рис. 123 эта диаграмма приведена по данным проф. П. П. Паренаго.

По горизонтальной оси отложены спектральные классы, по вертикальной — абсолютные величины  $M$  (§ 282). Каждая звезда, для которой  $M$  известно, отмечена точкой тем выше, чем звезда ярче. Солнце находится на пересечении линий G0 и  $-4,7$ .

Когда такие точки были нанесены для всех звёзд с известным  $M$ , то оказалось, что гуще всего усеяна звёздами полоса, идущая приблизительно по диагонали, это — «главный ряд» или «главная последовательность». Звёзды этой последовательности, начиная примерно с класса G, являются карликами. Правее и выше главного ряда разбросаны гиганты с абсолютной величиной около нуля, выше раз-

брошены гораздо более редкие жёлтые и красные сверхгиганты с абсолютной величиной —2 и ярче. Левее и ниже главного ряда, совершенно отдельно от него, находятся звёзды классов А—F 11—14-й звёздных величин, *белые карлики*. Абсолютные величины далёких гигантов

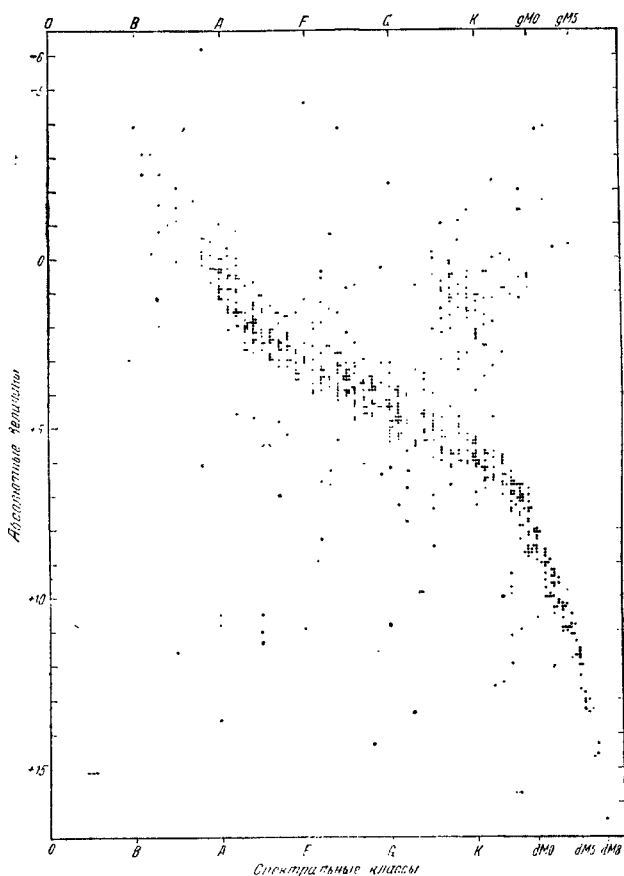


Рис. 123.

определены неточно; этим отчасти объясняется разбросанность соответствующих точек.

В 1945 г. П. П. Паренго открыл новую последовательность «звёзд-субкарликов», которая идёт почти параллельно «главной последовательности», примерно на две звёздные величины ниже неё. Есть основания предполагать, что субкарлики встречаются в природе довольно часто.

Другую, весьма замечательную последовательность, названную бело-голубой последовательностью, открыл Б. А. Воронцов-Вельяминов.

Она состоит из белых и голубых звёзд различной светимости (на диаграмме она расположена с левой стороны по вертикали).

Позднейшие исследования обнаружили, что между спектрами гигантов и карликов того же класса есть некоторые различия. Они объясняются различием *плотностей* звёзд: на звезде-гиганте давление гораздо меньше, чем на карлике той же температуры, поэтому в атмосфере первой звезды элементы ионизованы сильнее (§ 199,б), и спектр их изменён. В спектрах звёзд-гигантов особенно интенсивны линии *ионизованных* элементов или *искровые* линии, в спектрах карликов — *дуговые*, т. е. линии нейтральных элементов.

Оказалось, что по виду спектра можно не только решить вопрос, принадлежит ли звезда к гигантам или к карликам, но даже определить её абсолютную величину. На этом основан *спектральный способ* определения звёздных *параллакс*ов. На снимке спектра звезды выбирают пару линий, одну искровую, другую дуговую, и их интенсивности  $L_1$  и  $L_2$  и измеряют микрофотометром (§ 201,в). Оказывается, что абсолютная величина звезды  $M$  находится в очень простой зависимости от отношения интенсивности выбранных линий  $l = \frac{L_1}{L_2}$ . Закон (или гра-

фик) этой зависимости между  $l$  и  $M$  определяют по спектрам звёзд, параллаксы которых (а следовательно, и абсолютные величины) определены тригонометрическим методом. Полученный график применяют к определению  $M$  по  $l$  для тех звёзд, параллакс которых неизвестен. Затем с найденным значением  $M$  вычисляют параллакс  $\pi$  по формуле (6) § 282. Этим способом уже определены расстояния десятков тысяч звёзд. Преимущество его состоит в том, что он применим к далёким звёздам, параллаксы которых недоступны прямому измерению.

**§ 293. Гипотеза звёздной эволюции Ресселла.** Разделение звёзд на карликов и гигантов Ресселл объяснял следующим образом. «Молодая» звезда представляет собой газовый шар крайне малой плотности и сравнительно невысокой температуры, светящийся слабым красным светом. Так как размеры шара колоссальны, то общее количество света, посылаемого его громадным диском, чрезвычайно велико, и мы имеем красную звезду-гигант. Вследствие сжатия (§ 222,б) размеры шара с течением времени уменьшаются. Но процесс сжатия газовой массы сопровождается повышением её температуры и увеличением благодаря этому поверхностной яркости светила. Звезда становится всё горячей, белей и в течение многих миллионов лет проходит в *обратном* порядке все спектральные классы М, К, G, F, А до «оригинального» класса В, в котором она достигает наивысшей температуры. Всё время она остаётся *гигантом*, так как уменьшение её диска приблизительно уравнивается увеличением поверхностной яркости.

После периода наивысшего расцвета звезды начинается её упадок; она переходит на «главную ветвь», становится *карликом*. Количество

теплоты, развивающейся при дальнейшем сжатии, делается уже недостаточным для покрытия убыли через лучеиспускание, температура начинает понижаться, блеск поверхности слабеет, и светимость звезды падает; теперь она проходит те же спектральные классы, но уже в нормальном порядке A, F, G, K, M и исчезает для нас в виде плотной тёмнокрасной угасающей звезды-карлика, в тысячи раз более слабой, чем в начале своей истории. Наше Солнце принадлежит к карликам класса G, так как оно имеет значительную плотность.

Гипотеза Расселла в общем хорошо согласовалась с наблюдениями до тех пор, пока не были открыты звёзды, называемые белыми карликами (см. § 295), которые не укладываются на главную последовательность диаграммы. Ныне она также не в состоянии объяснить последовательность субкарликов Паренана и бело-голубую последовательность Воронцова-Вельяминова. Поэтому в настоящее время *гипотеза* Расселла считается неудовлетворительной.

Но сама *диаграмма* Расселла играет важную роль в звёздной астрономии, хотя эволюционный смысл её не ясен.

**§ 294. Светимость звёзд** колеблется в очень широких пределах. С одной стороны, мы встречаем звёзды «сверхгиганты» в десятки тысяч раз ярче нашего Солнца (так, например, Ригель, самая яркая звезда в Орионе, ярче Солнца по меньшей мере в 20 000 раз); с другой стороны, нам известны карлики, которые тоже в десятки тысяч раз слабее Солнца; такова, например, «Ближайшая Центавра» (или «Proxima Centauri», см. упр. 12) — далёкий спутник ближайшей к нам звезды  $\alpha$  Центавра; её абсолютная величина  $M = -15$ , т. е. на 10 величин слабее Солнца.

Из звёзд, видимых *простым* глазом, громадное большинство — *гиганты*, которые во много раз ярче Солнца, но это происходит оттого, что гиганты видны с громадных расстояний. Вообще же в звёздном мире *звёзды-карлики* встречаются гораздо *чаще* гигантов.

**§ 295. Диаметры звёзд.** Угловые диаметры звёзд исчезающе малы и недоступны прямому измерению с помощью телескопа. Но в 1920 г. удалось измерить угловой диаметр нескольких красных звёзд-гигантов с помощью интерференционного метода, предложенного Майкельсоном. Советский учёный Натансон предложил новый оригинальный метод определения угловых размеров звёзд, основанный на наблюдениях покрытий звёзд Луною. Регистрируя время исчезновения звезды за краем лунного диска с помощью точного фотоэлемента, можно определить угловой диаметр звезды, а затем (зная параллакс звезды) вычислить её линейные размеры. Этим методом определены диаметры многих звёзд. Угловые диаметры выражаются сотыми долями секунды; по ним были вычислены и истинные «линейные диаметры» этих звёзд. Так, например, оказалось, что диаметр Антареса ( $\alpha$  Скорпиона) в 330 раз больше диаметра Солнца, а диаметр Бетельгейзе ( $\alpha$  Ориона)



даже в 360 раз, т. е. гораздо больше диаметра орбиты Марса (рис. 124; звёзды-гиганты).

Диаметры других звёзд определены пока лишь вычислением по их показателю цвета (§ 287) и светимости. Для белых гигантов классов В и А получились диаметры в 2—30 раз больше Солнца, для красных карликов — примерно во столько же раз меньше солнечного диаметра. Но «белые карлики» оказались меньше Солнца по диаметру в десятки

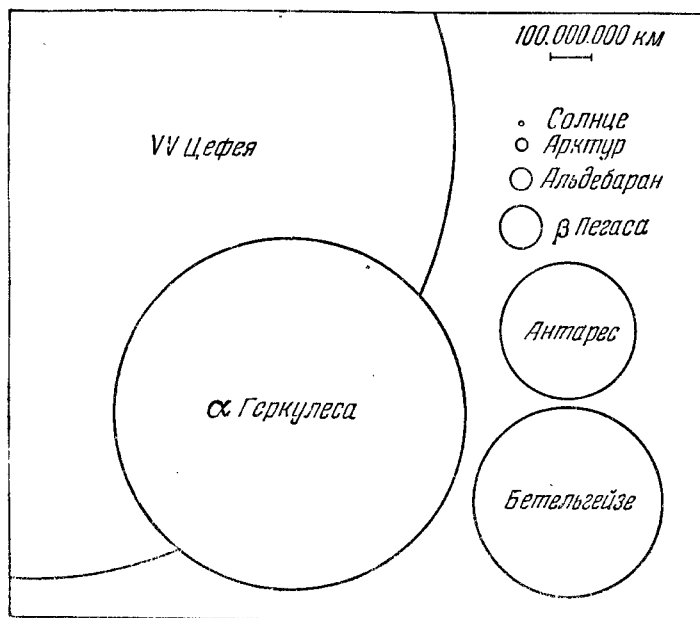


Рис. 124.

раз, а некоторые из них даже, повидному, меньше Земли. Таким образом, размеры звёзд колеблются в очень широких границах.

**§ 296. Массы звёзд** удалось определить только для сравнительно немногих *двойных* звёзд (см. § 300). Они колеблются в гораздо более тесных пределах, чем светимости, и в среднем близки к массе Солнца. До сих пор не найдено звёзд с массой, меньшей 0,1 массы Солнца. Также массы, бóльшие массы Солнца в несколько десятков раз, встречаются редко, главным образом у звёзд классов О и В.

Между массой звезды и её светимостью существует интересная зависимость: чем больше масса звезды, тем больше и её светимость, и, зная одну из этих величин, можно приблизительно определить другую, как видно из нижеприводимой таблицы и диаграммы (рис. 125). Эта диаграмма называется диаграммой «массы — светимости»; приводится по исследованиям Б. В. Куаркина (по горизонтальной оси отложены

абсолютные величины, по вертикальной — логарифмы масс). Исключение из этого правила представляют опять-таки *белые карлики*; при малой светимости они имеют большую массу.

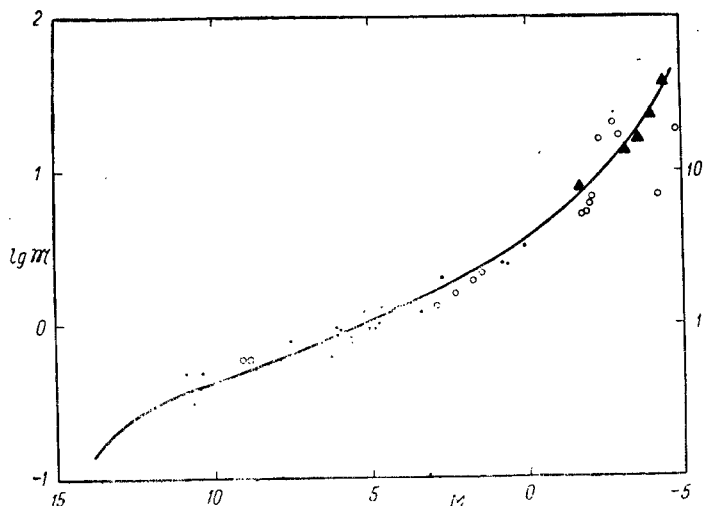


Рис. 125.

**§ 297. Плотности звёзд.** Если радиус и масса известны, то можно вычислить плотность звезды. Но в некоторых случаях (у переменных звёзд) плотность получается и без этих дан-

| Абс. величина звезды | Масса (Солнце=1) |
|----------------------|------------------|
| +15,0                | 0,14             |
| 12,5                 | 0,22             |
| 10,0                 | 0,34             |
| 7,5                  | 0,53             |
| 5,0                  | 0,91             |
| +2,5                 | 1,72             |
| 0,0                  | 4,0              |
| -2,5                 | 12,0             |

ных (см. дальше § 307). У *звёзд-карликов* она оказалась в среднем близкой к плотности Солнца (1,4 плотности воды). У *гигантов*, наоборот, встречаются необыкновенно *малые* плотности. Так, например, плотность Антареса приблизительно в 1 млн. раз меньше плотности воды и, следовательно, составляет меньше одной тысячной доли плотности воздуха у земной поверхности. С другой стороны, плотность белых карликов получается в *тысячи* и даже в *миллионы раз больше плотности воды*. Примером

их является уже упоминавшийся спутник Сириуса, диаметр которого не превышает диаметра планеты Нептун, а масса почти равна массе Солнца. Отсюда выходит, что его плотность в 2—3 тысячи раз больше плотности платины. Впоследствии были найдены звёзды, ещё в тысячу раз более плотные. Теория объясняет и этот невероятный факт: атомы раскалённого газа внутри звезды вследствие ионизации потеряли почти все свои электроны и стали гораздо «меньше», чем при обычных

земных условиях; поэтому они могут быть сближены гораздо теснее, чем «нейтральные» атомы. Положение этих звёзд в схеме звёздной эволюции остаётся пока неясным.

**§ 298. Двойные звёзды.** Найдено очень много звёзд, которые при наблюдении в телескоп оказываются *двойными*; они состоят из двух звёзд, чрезвычайно близких друг к другу, так что для простого глаза (или в слабый телескоп) они сливаются в одну звезду. У некоторых из этих звёздных пар близость только кажущаяся, и в действительности одна звезда находится очень далеко позади другой. Такие двойные звёзды называются *оптическими*; они составляют ничтожное меньшинство. Все же остальные двойные звёзды являются *физическими* и представляют собой пары очень близких солнц, связанных силой взаимного тяготения. Это было доказано В. Гершелем и В. Я. Струве. В самом деле, если пара оптическая, то ряд положений звезды *B* (которую можно называть спутником) относительно звезды *A* (главной звезды) будет располагаться *на прямой* *B*, *B'*, *B''*, ..., так как собственные движения звёзд в пространстве (гл. XV) совершаются во всевозможных направлениях, но всегда по прямым линиям. В случае же физической связи между звёздами положения *B*, *B'*, *B''*, ... расположатся *на кривой*, обращённой вогнутостью к *A*. Такое криволинейное движение указывает на обращение одной звезды вокруг другой по некоторой *орбите* под действием их взаимного притяжения. Это и замечено Гершелем и Струве у нескольких звёздных пар в результате многолетнего обследования неба с помощью телескопов. Особенно большие работы в этой области были произведены В. Я. Струве, который в 1837 г. провёл и опубликовал наблюдения около 3000 двойных звёзд, громадное большинство которых было открыто им самим. Измеренные им положения компонентов пар замечательны по точности и являются весьма ценными при изучении орбитальных движений в звёздных системах.

Если орбитальное движение доказано, то двойная звезда является *несомненно* физической парой. В других случаях физическая зависимость между двумя близкими звёздами является только *весьма вероятной*. Вероятность эта переходит почти в полную достоверность, например, в том случае, когда две очень близкие звёзды имеют *одинаковое собственное движение*. Очевидно, в этом случае орбитальное движение совершается так медленно, что мы его ещё не могли заметить.

Наконец, если и орбитальное и собственное движение пары неощутимо малы (самый частый случай), то физическая связь между звёздами доказывается соображениями из *теории вероятностей*. Чем ярче звёзды, составляющие пару, и чем теснее они стоят, тем вероятнее физическая природа пары. Можно подсчитать, например, что при совершенно случайном распределении звёзд в пространстве почти нет никаких шансов встретить на небе хотя бы *один* случай, когда две звезды ярче 6-й величины находились бы на угловом расстоянии, меньшем 10" одна от другой. В действительности же мы знаем

десятки таких случаев. Ясно, что огромное большинство этих звёзд — физически двойные.

Число известных двойных звёзд в настоящее время превышает 20 000; расстояние между двумя звёздами пары (так называемыми «компонентами») составляет обычно несколько секунд, в открываемых теперь парах — большей частью меньше секунды.

Кривая, описываемая одной звездой пары около другой, всегда оказывается эллипсом. Скорость движения спутника по этому эллипсу

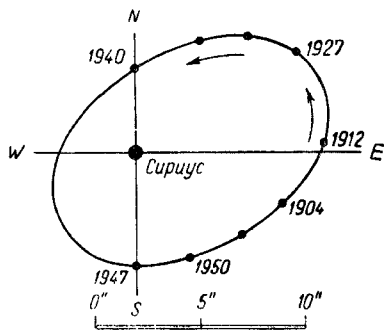


Рис. 126.

в точности подчиняется второму закону Кеплера, но первый закон внешне не соблюдается: главная звезда находится *не в фокусе* эллипса (рис. 126). Но на самом деле соблюдается и первый закон, а несовпадение главной звезды с фокусом орбиты второй объясняется тем, что *видимый* нами эллипс звёздного движения не есть истинный эллипс, описываемый звездой-спутником в пространстве, а лишь его проекция на плоскость, перпендикулярную к лучу зрения. Следова-

тельно, истинные движения двойных звёзд совершаются в точности по законам Кеплера, а стало быть, по тому же закону всемирного тяготения, как и движение планет вокруг Солнца. Периоды обращения большей частью очень велики (сотни и тысячи лет), так что со времён Гершеля и Струве несомненные движения удалось обнаружить только у немногих сотен двойных звёзд. Ещё для меньшего числа, примерно для сотни главным образом очень тесных пар, оказалось возможным вычислить орбиты и определить время обращения. Самый короткий период составляет около 6 лет.

Движения в системах двойных звёзд отличаются от движений в нашей планетной системе тем, что *массы* обоих компонентов нередко *почти равны* или же, во всяком случае, мало разнятся одна от другой, так что центр масс, около которого обращаются оба компонента, часто лежит далеко от главной звезды; кроме того, эллиптические орбиты компонентов пары гораздо более вытянуты, чем орбиты планет.

В тех немногих случаях, когда удаётся измерить *расстояние* двойной звезды от Солнца, можно вычислить её массу и истинные размеры орбиты. Поэтому некоторые пары нам известны уже очень хорошо. Так, например, Сириус (рис. 126) состоит из двух звёзд — одной очень яркой и другой очень слабой (8-й величины); среднее расстояние между ними приблизительно равно расстоянию от Солнца до Урана. Масса спутника равна массе Солнца, масса самого Сириуса в 2,4 раза больше. Оба тела обращаются за 50 лет вокруг общего центра тяжести системы, который лежит ближе к Сириусу, приблизительно на рас-

стоянии от Солнца до Юпитера. Эксцентриситет орбиты очень велик, именно 0,6. Оба компонента описывают эллипсы, подобные между собой, только эллипс спутника в 2,4 раза больше.

Замечательна история открытия этого спутника. В 1844 г. Бессель заметил, что координаты двух ярких звёзд, Сириуса и Прокциона ( $\alpha$  Малого Пса), испытывают периодические изменения. Отсюда он заключил, что каждая из этих звёзд обращается вокруг какого-то центра, и предсказал, что у них должны быть очень близкие слабые спутники с большой массой. Спутник Сириуса был открыт оптиком Кларком в 1862 г. при пробе одного из сделанных им телескопов. В 1896 г. был открыт и спутник Прокциона.

Кроме двойных звёзд существуют тройные, четверные и т. д. Замечательным примером такой *кратной* звезды является  $\theta$  (тэта) Орiona (§ 327), так называемая *трапеция* Ориона. Уже в небольшой телескоп эта звезда 4,5 величины разделяется на 4 звезды, расположенные в виде *трапеции* с наибольшей стороной в  $20''$ . В сильные телескопы в этой звёздной системе видно до девяти звёзд, так что её можно считать настоящей звёздной *скоплением*. Кроме того, вся она окружена громадной туманностью (§ 329).

**§ 299. Вычисление орбит двойных звёзд** представляет математически более лёгкую задачу, чем определение планетных или кометных орбит, так как движение Земли не влияет заметно на видимое движение звёзд по их орбитам. В действительности движение обоих компонентов пары совершается около общего *центра масс*, вокруг которого каждый из них описывает эллипс. Центр масс лежит ближе к большому компоненту, его расстояния от обоих компонентов обратно пропорциональны их массам. Но отношение масс, а следовательно, и положение центра масс, обычно неизвестны. Поэтому один из компонентов («главный», т. е. более яркий) принимается за неподвижный и определяется *относительная орбита* другого компонента («спутника») около «главной звезды». Эта орбита есть эллипс, подобный эллипсам, описываемым обоими звёздами вокруг центра масс. Большая полуось относительного эллипса  $A$  равна сумме полуосей орбит компонентов при их движении около общего центра масс:  $A = A_1 + A_2$ .

При определении орбиты двойной звезды сначала строят видимый эллипс по данным наблюдений, затем переходят от него к истинному эллипсу. Вычисляются следующие элементы орбиты, вполне соответствующие элементам планетных орбит (§ 159): 1) время (эпоха)  $t_0$  прохождения спутника через *периастр*, т. е. через точку орбиты, ближайшую к главной звезде; 2) наклонение  $i$  плоскости истинного эллипса к плоскости видимого эллипса, т. е. к плоскости, перпендикулярной к лучу зрения; 3)  $\Omega$  — так называемый *позиционный угол узла*, т. е. угол, определяющий направление линии, по которой пересекается плоскость истинного эллипса с небесной сферой; 4)  $\omega$  — угловое расстояние *периастра* от *узла*, отсчитываемое от узла по направлению движения спутника; этот элемент даёт положение большой оси

эллипса в плоскости орбиты; 5)  $e$  — *эксцентриситет*, 6)  $a$  — *большая полуось* истинного эллипса в секундах дуги; 7)  $P$  — *время обращения* в годах.

Надо заметить: 1) при определении орбиты двойной звезды не отличаются «восходящего» узла от «нисходящего», так как без особых (спектральных) наблюдений нельзя решить, в какой части орбиты звезда приближается к нам, в какой удаляется; 2) определяются 7 элементов, а не 6, как у планеты, так как здесь период обращения  $P$  нельзя вывести из большой полуоси  $A$  по третьему закону Кеплера: в точную формулу этого закона [§ 168, (5)] входит масса звезды, которая большей частью неизвестна.

Один из лучших способов определения орбит двойных звёзд дал в прошлом веке русский астроном М. А. Ковальский. Его формулы употребляются до сих пор астрономами всех стран.

**§ 300. Определение масс двойных звёзд.** Тот же третий закон Кеплера в его обобщённой форме позволяет определить *массу* двойной звезды, если известен её *параллакс*.

Пусть  $A$  означает большую полуось орбиты спутника около главной звезды в *линейных* единицах,  $P$  — время обращения,  $m_1$  и  $m_2$  — массы компонентов,  $a_1$  — большую полуось земной орбиты (астроном. единица),  $T$  — время обращения Земли (год),  $M$  и  $m$  — массы Солнца и Земли. Означенная формула [§ 168, (5)] даёт

$$\frac{a_1^3}{T^2(M+m)} = \frac{A^3}{P^2(m_1+m_2)}.$$

Приняв  $a_1 = 1$ ,  $T = 1$ ,  $m = 0$ , получаем для отношения масс двойной системы и Солнца

$$\frac{m_1 + m_2}{M} = \frac{A^3}{P^2}. \quad (7)$$

Здесь  $P$  выражено в годах, а полуось  $A$  — в астроном. единицах. Вычислить  $A$  можно, если известен годичный *параллакс* звезды  $\pi$  (§ 120),

$$A = \frac{a}{\pi}. \quad (8)$$

Здесь  $a$  — большая полуось орбиты в *секундах* дуги. Вставив в формулу (7), получим:

$$\frac{m_1 + m_2}{M} = \frac{a^3}{\pi^3 P^2}. \quad (9)$$

**Пример.** Для Сириуса  $a = 7'',57$ ,  $\pi = 0'',37$ ,  $P = 50$  лет. По формуле (9) находим:

$$m_1 + m_2 = \frac{(7,57)^3}{(0,37)^3 \cdot 2500} = 3,4 \text{ массы Солнца.}$$

**§ 301. Спектрально-двойные звёзды.** Одним из самых замечательных результатов современной астрономии является открытие таких

тесных двойных звёзд, что их нельзя разделить даже в сильнейшие телескопы. Истинную природу их раскрыл спектральный анализ. Здесь приходится различать два случая: а) мы получаем свет только от *одного компонента* двойной звезды, второй компонент очень слаб; б) *оба компонента* ярки, так что свет звезды есть соединённый свет двух светил.

а) Представим себе двойную звезду, у которой наблюдается спектр только *одного* компонента. Пусть этот компонент обращается около центра тяжести системы по орбите, плоскость которой проходит через луч зрения, так что мы находимся в этой плоскости. В течение одной половины периода обращения звезда будет приближаться к нам, в течение другой половины — удаляться. По принципу Доплера-Белопольского (§ 197) в первом случае спектральные линии звезды будут сдвинуты к фиолетовому концу спектра, во втором — к красному. Смещение линий будет наибольшее в тех точках орбиты, в которых звезда движется прямо к нам или прямо от нас. Измеряя это периодическое *смещение* линий, можно определить скорость звезды в разных точках её орбиты (построить так называемую «кривую скоростей»), а затем и вычислить самую орбиту.

б) Ещё удобнее это сделать в том случае, когда видны спектры *обоих* компонентов, наложенные друг на друга. В то время как один компонент приближается к нам, другой удаляется: линии первого сдвигаются к фиолетовому концу, линии второго — к красному. Таким образом, если спектры обоих компонентов одинаковы, то в спектре звезды происходит периодическое *раздвоение* линий. Измерение величины этого раздвоения позволяет определить лучевые скорости обоих компонентов (построить две кривые скоростей) и вычислить орбиту.

**§ 302. Определение орбиты спектрально-двойной звезды** нельзя произвести так полно, как для обыкновенных двойных звёзд. Вполне определяются только: 1) период  $P$ , 2) момент прохождения через периастр  $t_0$ , 3) эксцентриситет  $e$ , 4) расстояние периастра от узла  $\omega$ . Большую полуось  $a$  и наклонение плоскости орбиты  $i$  нельзя определить отдельно, определяется только проекция полуоси на луч зрения  $a \sin i$  в километрах. Седьмой элемент  $\Omega$  не определяется.

Нельзя определить и массы звезды, но можно найти отношение масс компонентов по так называемой *функции массы*; для звёзд со спектральными линиями обоих компонентов (§ 301, б) эти функции выражаются так:

$$f_1 = m_1 \sin^3 i, \quad f_2 = m_2 \sin^3 i; \quad (10)$$

для звёзд со спектром одного компонента они имеют более сложный вид. Так как неизвестный множитель  $\sin^3 i$  не может быть больше единицы, то величина  $f$  даёт нам не самую массу компонента, а её нижний предел. Например, для яркой звезды Капеллы, спектрально-двойной с периодом в 104 дня, получились для нижнего предела массы значения:  $f_1 = 1,2$ ,  $f_2 = 0,9$  (массы Солнца). Впоследствии удалось с

помощью интерферометра определить наклонение  $i$ ; оно оказалось равным  $40^\circ$ . По формулам (10) истинные массы поэтому получились значительно больше, именно:  $m_1 = 4,2$ ,  $m_2 = 3,3$ .

**§ 303. Свойства спектрально-двойных звёзд.** Число открытых до настоящего времени спектрально-двойных звёзд превышает 1000. Если иметь в виду, что исследованы в этом отношении пока только яркие звёзды и что открыть двойственность можно лишь в том случае, когда плоскость орбиты мало наклонена к лучу зрения, то общее число их приходится признать громадным. Некоторые астрономы думают даже, что вообще во вселенной двойные звёзды встречаются чаще, чем одиночные.

Период обращения этих тесных пар иногда составляет всего несколько часов; очевидно, солнца, составляющие такую пару, почти касаются друг друга. Встречаются и всевозможные другие периоды продолжительностью до нескольких лет. Наконец, есть спектрально-двойные звёзды, которые в эпоху наибольшего расхождения компонентов могут быть раздвоены в телескоп как обыкновенные двойные звёзды, так что никакой резкой границы между этими двумя классами небесных тел не существует.

Из спектрально-двойных звёзд интересна средняя звезда в хвосте Б. Медведицы,  $\zeta$  Ursae Majoris, или Мицар. Она является в то же время визуально-тройной звездой; уже простым глазом видно, что близ неё на расстоянии  $11'$  находится более слабая звезда Алькор, повидимому, связанная с ней физически. В небольшую трубу сам Мицар представляется двойной звездой с расстоянием компонентов в  $14''$ ; это — первая телескопически-двойная звезда, которая была открыта. Далее, более яркий компонент Мицара есть опять-таки первая звезда, у которой было замечено раздвоение спектральных линий (1890 г.). Впоследствии оказалось, что и второй компонент Мицара и Алькор — спектрально-двойные звёзды, так что эта система по меньшей мере *шестерная*.

**§ 304. Планетные системы вокруг звёзд.** С помощью меридианных кругов, снабжённых автоматической регистрацией, прямые восхождения звёзд определяются с точностью до тысячных долей секунды. Это дало возможность заметить у нескольких близких звёзд *периодические* изменения положения. Периоды получились от  $1\frac{1}{2}$  до 3 лет. Такие колебания могут происходить только от обращения вокруг этих звёзд невидимых спутников. Удалось определить и массы некоторых из них. Наиболее точный результат получился для «Ближайшей Центавра». Эта слабая звезда находится на таком же расстоянии, как  $\alpha$  Центавра (§ 122) и имеет одинаковое с ней собственное движение. Масса её составляет около  $\frac{1}{10}$  солнечной массы. Оказалось, что у неё есть по меньшей мере один невидимый спутник с массой около  $\frac{1}{500}$

массы Солнца. Но такое тело должно считаться уже не звездой, а планетой: его масса превышает массу Юпитера меньше чем в два раза.



Таким образом, планетные системы, подобные нашей, оказываются совсем не редкими во вселенной. Естественно предположить, что хоть некоторые из планет этих далёких систем могут быть похожи на Землю и что на них также развивается жизнь.

**§ 305. Переменные звёзды. Их изучение в СССР.** Блеск большинства звёзд остаётся неизменным в течение столетий, но существуют исключения из этого правила: звёзды, блеск которых меняется. Таких *переменных* звёзд известно теперь более десяти тысяч; громадное большинство их — телескопические звёзды, изменчивость которых открыта в самое последнее время, главным образом с помощью фотографий. Одна из первых работ по систематическим фотографическим поискам переменных звёзд была организована на Московской университетской обсерватории В. К. Цераским в 1896 г. Сравнивая фотоснимки одних и тех же областей неба, сделанные на этой обсерватории в разное время, Л. П. Цераская открыла до 1931 г. более 200 переменных звёзд. Их изменчивость изучил член-корреспондент АН СССР С. Н. Блажко — «отец русских исследователей переменных звёзд».

После Великой Октябрьской социалистической революции исследование переменных звёзд получило в СССР особенно широкое развитие. Не только численно возросли во много раз наши исследования переменных звёзд, но в работу исследователей была внесена плановость и целеустремлённость, приведшая эту область астрономии к новому качественному скачку, и в настоящее время наш Союз занимает по изучению переменных звёзд первое место в мировой науке. Ныне советские астрономы возглавляют эту работу в международном масштабе.

Большая затрата сил и времени, которая расходуется астрономами на изучение переменных звёзд, объясняется тем, что этот отдел астрономии имеет большую важность (см. дальше).

Число, обозначение, классификация переменных звёзд. Составленный в 1948 г. П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркиным «Общий каталог переменных звёзд» содержит 10 912 объектов. Большая часть их принадлежит к слабым звёздам; например, из звёзд 1-й величины переменная только одна — красная  $\alpha$  Орiona (Бетельгейзе). Из звёзд 2-й величины переменных уже 5 (в том числе Полярная) и т. д.

Аргеландер предложил каждую вновь открываемую переменную звезду, если она раньше не была отмечена греческой буквой, обозначать большой латинской буквой, начиная с R, с указанием созвездия (например R Лирь, S Лирь). Начиная с 10-й переменной звезды каждого созвездия, пришлось уже употреблять сочетания двух букв, сначала из последних (RR, RS,...), а затем из первых букв алфавита (AA, AB,...). Для некоторых созвездий и этих комбинаций уже не хватает, так как в них открыто больше 334 переменных. Поэтому следующие переменные обозначаются просто номерами, начиная с 335, с прибавлением названия созвездия. Например, V 335 Стрельца обозначает 335-ю переменную (V — *variabilis*, переменный) в созвездии Стрельца. Эти обозначения даются только после того, как переменность

блеска звезды подтверждена рядом наблюдений. До этого они получают предварительное обозначение (например, в Советском Союзе буквами SVS с порядковыми номерами).

Переменные звёзды прежде всего можно разделить на *непериодические*, или *неправильные*, в изменчивости которых нельзя подметить никакого периода, и *правильные*, с более или менее ясной периодичностью. Последняя группа, гораздо более многочисленная и важная, подразделяется в свою очередь на три класса.

**§ 303. Затменные переменные звёзды.** а) Звёзды типа  $\beta$  Альголя. Изменение блеска этих звёзд отличается особенной правильностью.

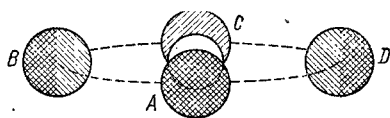
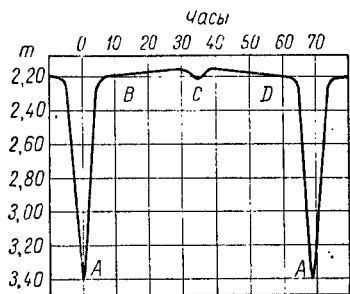


Рис. 127.

Наиболее известная звезда этого класса Альголь, или  $\beta$  Персея, в течение почти  $2\frac{1}{2}$  суток сохраняет неизменный блеск 2,3 величины, затем в течение 5 часов постепенно ослабевает до 3,5 величины и в течение такого же времени снова разгорается до прежнего блеска. Продолжительность периода составляет 2 дня 20 час. 49 м. (рис. 127). Другие звёзды этого типа имеют те же характерные черты: 1) блеск в течение некоторого времени *постоянен*; 2) через одинаковые промежутки («периоды») происходят *ослабления* блеска; 3) падение блеска до минимума и обратный подъём от минимума до нормального

блеска совершаются симметрично, в *равные* промежутки времени.

б) Звёзды типа  $\beta$  Лирь. У затменно-переменных звёзд этого типа в течение одного периода бывают два минимума различной степени. Типичной такой звездой является  $\beta$  Лирь с периодом 12,9 суток. Максимальный блеск её 3,4 величины, блеск в «главном» минимуме 4,5 величины, но между каждым двумя главными минимумами наблюдается «вторичный», в котором звезда ослабевает только до 3,9 величины. Таким образом, промежутков между двумя смежными минимумами составляет 6,5 суток, причём сильные и слабые минимумы чередуются (рис. 128).

Затменно-переменных звёзд известно очень много. Амплитуда изменения блеска у них не превышает 4 величины, большей частью гораздо меньше. Длина периода обыкновенно несколько дней, но встречаются и гораздо более длинные периоды. Самый длинный период имеет  $\zeta$  Возничего, именно 27 лет, причём минимум у неё продолжается 2 года.

Причина переменности звёзд этого типа выяснена с замечательной полнотой: все они в сущности не переменные, а очень тесные *двойные* звёзды; поэтому их называют *оптическими* переменными. Действительно, спектральные наблюдения обнаруживают у них периодические смещения

или раздвоения линий, причём период смещения всегда равен периоду изменения блеска. От остальных спектрально-двойных звёзд они отличаются тем, что наклонения их орбит близки к  $90^\circ$  (другими словами, Земля находится почти в плоскости их орбит). Поэтому более слабый компонент («спутник») то проходит перед диском главной звезды, то — приблизительно через полпериода — сам прячется за её диск.

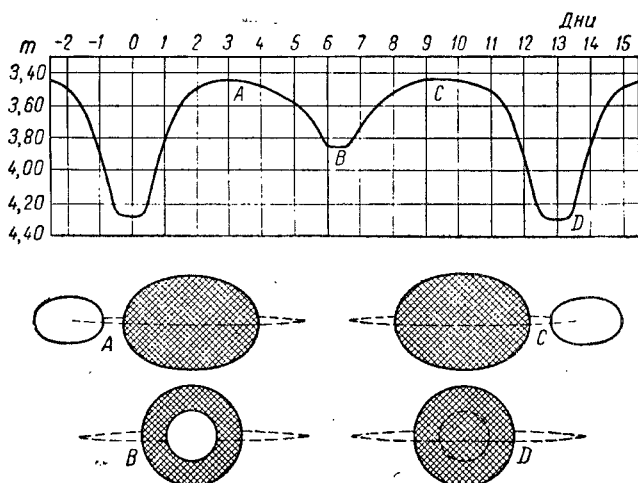


Рис. 128.

У Алголя и у большинства звёзд этого класса спутник имеет сравнительно *тёмную* поверхность; поэтому, когда он заслоняет от нас часть диска главной звезды, наступает ослабление блеска, но когда он сам частью скрывается за ней, то *почти* никакого ослабления не происходит. В действительности же маленькое ослабление, незаметное глазу, должно быть; у Алголя оно открыто (рис. 127) с помощью селенового фотометра (§ 201).

У других звёзд того же класса спутник, наоборот, сам довольно *ярок*. Поэтому в течение одного периода обращения бывают два заметных *минимума* (рис. 128): главный — при затмении главного светила спутником — и вторичный — при покрытии спутника главной звездой. Иногда оба эти минимума бывают почти одинаковы по степени ослабления блеска звезды (одинаковой «глубины»). Это значит, что поверхности обеих звёзд приблизительно одинаково ярки.

**§ 307. Определение элементов затменно-переменной звезды.** Из фотометрических и спектрографических наблюдений звёзд типа Алголя можно узнать чрезвычайно много о строении этих двойных звёзд, которые нельзя разделить ни в какой телескоп. Кроме элементов орбиты спектрально-двойной звезды (§ 302) определяются: 1) наклонение орбиты  $i$ ; 2) большая *полуось* орбиты спутника около

главной звезды  $A$  в километрах; 3) относительный блеск обеих звёзд; 4) масса каждого компонента в единицах массы Солнца; 5) плотность каждого компонента в долях плотности Солнца; 6) линейные диаметры их в километрах. В некоторых случаях удалось даже обнаружить эллипсоидальную форму компонентов, потемнение их дисков к краям (С. Н. Блажко) и вращение их вокруг осей (Г. А. Шайн).

Особенно важное значение имеет определение диаметра и плотности звёзд. Заметим без доказательства, что *плотность* можно приблизительно определить даже из одних только наблюдений изменения блеска, не зная ни размеров, ни массы звезды. Оказалось, что большинство двойных звёзд имеет чрезвычайно *малую плотность*; некоторые звёзды в сотни раз разреженнее воздуха у земной поверхности.

Остальные типы переменных звёзд в отличие от оптических переменных называют *физическими* переменными.

**§ 308. Цефеиды.** Так называется, по имени звезды  $\delta$  Цефея, самый замечательный класс переменных звёзд. Это — звёзды с чрезвычайно

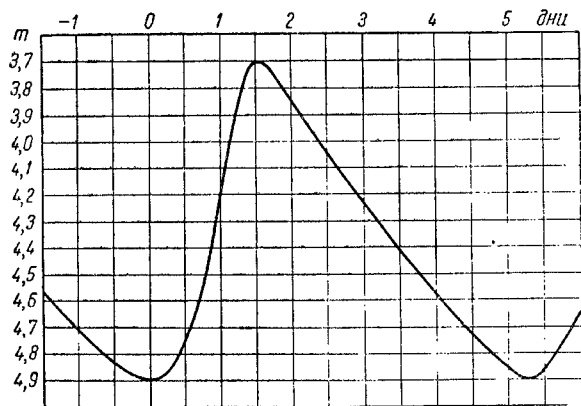


Рис. 129.

правильным периодом, часто очень коротким (известен период в  $3\frac{1}{4}$  часа), причём блеск их в отличие от предыдущего класса изменяется *всё время* (см. рис. 129, на котором изображена кривая изменения блеска  $\delta$  Цефея).

У них различают два подкласса — долгопериодические цефеиды с периодами от 1,5 до 80 дней и короткопериодические цефеиды с периодами меньше суток. Обе группы различаются своим распределением по небу и движением: долгопериодические цефеиды более сосредоточены в Млечном Пути и имеют более медленные движения в пространстве, чем звёзды другого подкласса. Звёзд, промежуточных между обоими типами, с периодами от 1 до 1,5 дней известно очень немного.

Второй тип отличается от первого кривой изменения блеска; звёзды этого типа часто называют «антналголями», так как почти постоянный

блеск прерывается на некоторое время не ослаблением, как у Алголя (§306), а усилением блеска. Величина изменения блеска (амплитуда) у всех цефеид вообще невелика, редко больше одной звёздной величины.

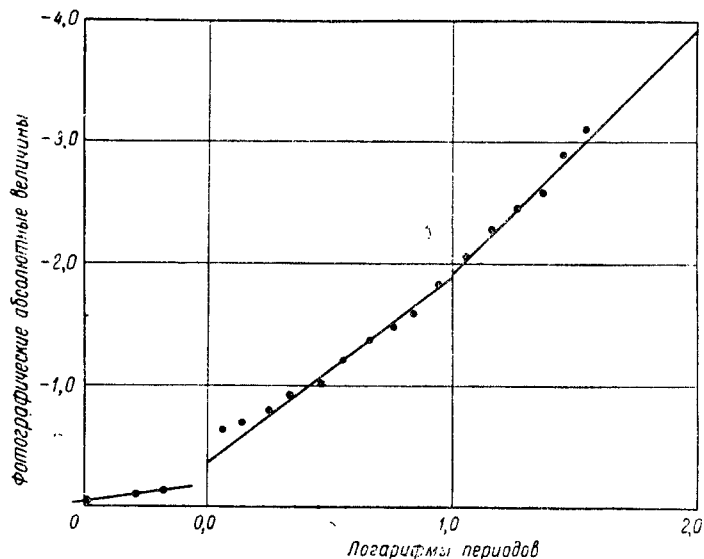


Рис. 130.

Все звёзды этого класса — гиганты. У них обнаружен ряд замечательных свойств:

а) *Чем длиннее период, тем больше светимость звезды.* Это соотношение настолько точно, что по длине периода можно вычислить светимость звезды.

На рис. 130 показана зависимость между периодом и светимостью цефеид по исследованиям советского астронома Б. В. Кукаркина.

В следующей таблице показана связь между периодом, абсолютной величиной и светимостью звезды (по Б. В. Кукаркину):

| Период     | Абсолютная величина | Светимость (Солнце = 1) |
|------------|---------------------|-------------------------|
| $< 1$ дня  | -0,2                | 140                     |
| 1 — 2 дня  | -1,2                | 300                     |
| 2 — 5 дней | -2,1                | 700                     |
| 5 — 10 »   | -3,2                | 1900                    |
| 10 — 20 »  | -4,2                | 4800                    |

Эта таблица даёт так называемую зависимость *период — светимость*: чем ярче звезда, тем медленнее изменяется её блеск.

Редко встречающиеся цефеиды ещё более длинных периодов принадлежат к числу самых ярких звёзд, какие только известны.

Замечание. Соотношение «период — светимость» важно ещё и тем, что оно сразу даёт голичный параллакс звезды по формуле

(6) § 282, в которой известны  $M$  и  $m$ .

б) Чем длиннее период, тем звезда краснее. Цефеиды короткого периода принадлежат к спектральному классу, промежуточному между А и F, долгопериодические — к классу G (солнечному). Это так называемая зависимость *период — спектр*.

в) В спектрах цефеид обнаружено периодическое смещение *линий* (как у спектрально-двойных звёзд), но совсем не такое, как в предыдущем классе: максимум блеска наступает во время движения светила к наблюдателю, минимум — во время удаления (рис. 131). Это важное открытие впервые сделал А. А. Белопольский, фотографируя спектр  $\delta$  Цефея. В спектре всегда видны линии только *одного* компонента.

г) У цефеид обнаружено периодическое *изменение спектрального класса*, состоящее в том, что звезда в максимуме показывает спектр звёзд более высокой температуры (например класса А), чем в минимуме (F или G); следовательно, температура её очень быстро и правильно меняется на много сотен градусов в несколько дней или даже часов (рис. 131).

д) У некоторых короткопериодических цефеид обнаружены периодические изменения *формы кривой блеска* (С. Н. Блажко).

**§ 309. Теория цефеид.** Все эти явления объясняет гипотеза пульсации, высказанная впервые русским физиком Н. А. Умовым и развитая Шэлли и Эддингтоном. Эта гипотеза предполагает, что перед нами гигантский газовый шар, который периодически то сжимается, то расширяется, причём такое изменение объёма и упругости газа должно сопровождаться изменением температуры. Теория показывает, что максимум блеска звезды наступает во время расширения; тогда радиус шара растёт, поверхность его «приближается» к наблюдателю на десятки километров каждую секунду и линии спектра смещаются так, как будто вся звезда движется к нам. Это и наблюдается в действительности. Объясняется этой теорией и зависимость между периодом и светимостью: большой шар должен пульсировать медленнее, чем малый.

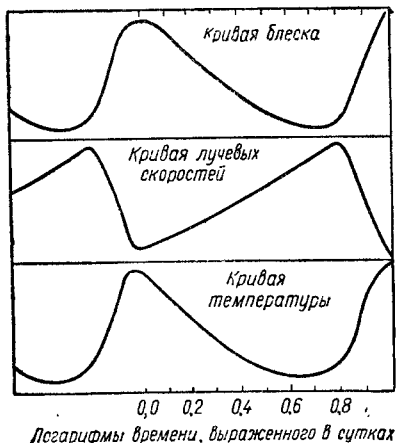


Рис. 131.

**§ 310. Долгопериодические переменные звёзды.** К этому типу принадлежит большинство переменных. Наиболее известной долгопериодической переменной звездой является *Mira Ceti* («Удивительная Кита»); изменчивость её была открыта в конце XVI в. Период её колеблется от 320 до 370 дней (средняя величина 332 дня); в максимуме эта звезда бывает то почти 1-й величины, то только 4-й или даже 5-й. В минимуме её блеск падает до 8—9-й величины. Цвет её красный, спектр принадлежит к классу M и изменяется с изменением блеска.

Те же особенности наблюдаются и у других звёзд этого класса: непрерывное изменение блеска; длинные периоды — от нескольких месяцев до двух лет, подтвержденные значительными колебаниями; большая разница между блеском в максимуме и минимуме; наконец, тот же спектр, большей частью класса M, с широкими *тёмными полосами* окиси титана и со *сеплыми* линиями водорода. В некоторых отношениях спектр этих звёзд похож на спектр *солнечных* пятен. Поэтому прежде предполагали, что на этих звёздах периодически появляются пятна, как на нашем Солнце, но в гораздо большем количестве, так что в максимуме они покрывают почти всю поверхность светила. Но теперь известно, что звёзды этого типа — разрежённые красные *гиганты*, а не плотные карлики, как наше Солнце, и вопрос об их природе усложнился. Возможно, что здесь мы так же, как у цефеид, имеем дело с пульсацией (изменение лучевых скоростей обнаружено), которая сопровождается изменением температуры, плотности и химического состава атмосферы звёзд. Какое-то родство этих звёзд с цефеидами видно ещё из того, что для них также имеют место зависимости «период — спектр» и «период — светимость» (§ 308); только вторая зависимость читается так: «чем ярче звезда, тем *быстрее* она изменяется».

**§ 311. Неправильные переменные звёзды.** Подобным же образом объясняются, вероятно, колебания блеска некоторых из *неправильных* переменных звёзд, у которых нельзя обнаружить определённого периода. Все они, насколько известно, также гиганты.

Изменчивость других переменных этого типа может вызываться прохождением перед звездой тёмных облаков космической пыли (туманностей), поглощающих свет подобно клубам дыма. Вблизи многих переменных звёзд туманности действительно обнаружены. Наконец, некоторые звёзды представляют своего рода переход к так называемым «новым» звёздам (см. § 312), внезапное кратковременное усиление блеска на несколько звёздных величин и постепенное возвращение к нормальному состоянию на много лет, до следующей вспышки.

**§ 312. Новые звёзды.** Время от времени на небе вспыхивают «*новые*» звёзды, иногда очень яркие. Появляется такая звезда всегда внезапно, в 1—2 дня достигает максимума блеска и затем начинает ослабевать сначала быстро, потом всё медленнее; через несколько

недель или в крайнем случае месяцев она скрывается от невооружённого глаза.

Новые звёзды появляются гораздо чаще, чем думали прежде, и почти всегда в Млечном Пути. Фотография открывает слабые новые звёзды каждый год. Очень яркие звёзды появляются, конечно, реже.

В XIX в. была отмечена только одна новая, видимая невооружённым глазом, именно в созвездии Северной Короны в 1866 г. (Т Согопае). Она достигла 2-й звёздной величины, а потом ослабла до 9-й величины (§ 313); такой же блеск она имела и до вспышки.

В XX столетии появились уже четыре новые звезды 1-й величины и ярче: в 1901 г. (Nova Persei, т. е. Новая Персея), в 1918 г. (N. Aquilae, Новая Орла), в 1925 г. (N. Pictoris, Новая Живописца) и в 1934 г. (N. Herculis, Новая Геркулеса), между тем предыдущее появление новой звезды такого блеска произошло только в 1604 г.

Мы знаем теперь, что эти звёзды *не новые*. На старых photographиях «новую» почти всегда можно найти в виде очень слабой звезды. Внезапно с этой звездой происходит катастрофа: блеск её увеличивается во много тысяч раз в течение всего нескольких дней и даже нескольких часов. Проследить рост блеска с самого его начала ещё почти ни разу не удалось, так как обыкновенно «новую» звезду замечают, когда она достигла максимума блеска и начинает слабеть. Падение блеска идёт несравненно медленнее подъёма, с многочисленными неправильными вспышками, но в конце концов звезда через несколько лет всегда возвращается к своему *первоначальному* блеску. Так, например, Новая Орла 1918 г. в течение десятков лет была 11-й величины, а между 5 и 8 июня 1918 г. она разгорелась от +11-й до —1-й величины, т. е. стала в 60 000 раз ярче. Затем началось быстрое падение, к 1 июля звезда была уже 4-й величины, в ноябре 6-й; к 1923 г. она вернулась к своему начальному блеску 11-й величины и остаётся такой и в настоящее время.

Все «новые», появившиеся за последнее время, находятся очень далеко от нас, параллаксы их не поддаются измерению. Отсюда следует, что светимости их очень велики: в максимуме это сверхгиганты от —3-й до —6-й абсолютной величины, а может быть, и ярче. Нормальная их светимость до и после вспышки в среднем, вероятно, близка к светимости Солнца.

В очень далёких спиральных туманностях (см. гл. XV) отмечено несколько случаев появления новых звёзд совершенно исключительной светимости, от —13-й до —15-й абсолютной величины, т. е. в десятки и сотни миллионов раз ярче Солнца. Их называют *сверхновыми* звёздами. Вспышки таких сверхновых звёзд в 1572 и в 1604 гг. наблюдались и в нашей звёздной системе.

*Спектр* новых звёзд очень сложен и изменчив. В начальной стадии бросается в глаза, что линии некоторых элементов, главным обра-



зом *водорода*, сильно сдвинуты к фиолетовому концу. Это указывает на *движение* газовых масс из внутренности звезды к наблюдателю с громадными скоростями, от 1000 до 2000 км/сек. В действительности, конечно, эти газовые массы летят от звезды во все стороны. Таким образом, вокруг звезды появляется газовая *оболочка*, радиус которой увеличивается каждую секунду на 1000—2000 км. По мере уменьшения блеска звезды спектр её упрощается и делается очень похожим на спектр газовой туманности, который характеризуется присутствием ярких линий. Через несколько лет (по крайней мере, у некоторых «новых») линии туманности слабеют, и появляется спектр Вольфа-Райе, тип О (§ 289). Последняя ли это стадия превращений спектра или нет, пока неизвестно.

Появление туманности вокруг новой звезды бывает иногда видно непосредственно. Вокруг Новой Орла 1918 г. появилась через несколько месяцев после вспышки круглая туманная оболочка около 1" в диаметре. На фотографических снимках оболочка была видна до 1930 г.; она постепенно слабела, и радиус её возрастал почти на 1" в год. Эта оболочка была образована водородными массами, которые были выброшены при вспышке «новой» в 1918 г. со скоростью около 1700 км/сек (по спектральным данным) и продолжали двигаться приблизительно с такой же скоростью.

Для объяснения вспышек новых звёзд было предложено множество гипотез. Несомненно, что вспышка «новой» звезды представляет для неё грандиознейшую катастрофу. Но эта катастрофа никогда не уничтожает звезды, которая возвращается постепенно к своему прежнему блеску.

Б. А. Воронцов-Вельяминов считает, что энергия в недрах звёзд постепенно накапливается, а затем вдруг резким скачком освобождается в огромном количестве, которое вызывает вспышку звезды. При этом звезда не разрушается, а сбрасывает с себя часть своей внешней газовой оболочки, которая и образует туманность вокруг звезды.

А. И. Лебединский разработал в 1946 г. стройную теорию, по которой вспышка «новой» есть следствие взрыва в недрах звезды, вызванного атомными реакциями. Звезда раздувается, сбрасывая газовую оболочку и излучая освобождающуюся огромную энергию. После этого она сжимается до следующей вспышки. Б. В. Кукаркин и П. П. Паренаго показали, что такие вспышки происходят лишь со звёздами одного определённого типа (U Ближнецов), к которому наше Солнце не принадлежит и, следовательно, вспыхнуть не может.

**§ 313. Новоподобные звёзды.** Известно несколько переменных звёзд, у которых время от времени *повторяются* вспышки блеска, похожие на вспышку «новой» звезды, причём замечена некоторая зависимость амплитуды изменения блеска от среднего периода между вспышками. Основываясь на этом, Б. В. Кукаркин и П. П. Паренаго в 1934 г. пришли к выводу, что Новая Северной Короны 1866 г. (§ 312) является в сущности новоподобной звездой.

Для периода между вспышками они указали значение от 60 до 100 лет (хотя у предыдущих вспышек звезды не было никаких сведений). Это подтвердилось с замечательной точностью: звезда не надолго вспыхнула опять до 2-й величины в 1946 г., т. е. через 80 лет.

Наблюдая физические переменные звёзды, т. е. массы сверхраскалённых газов, вращающиеся и пульсирующие в безвоздушном пространстве, мы как бы производим грандиозные физические и химические опыты, изучаем вещество в таких состояниях, которые нельзя осуществить в земных лабораториях. В этом значение переменных звёзд не только для астрофизики, но и для физики, т. е. для изучения *строения материи* вообще.

Но и в астрометрии физические переменные звёзды играют чрезвычайно важную роль: они позволяют измерять звёздные *расстояния* (§ 308), и притом такие далёкие, которые не поддаются измерению обычными астрометрическими способами, например расстояния до других звёздных систем.

Таким образом, переменные звёзды являются могущественным оружием для изучения строения звёздного мира.

Сравнительное изучение переменных звёзд в разных звёздных системах должно пролить свет на пути *образования и эволюции* как отдельных звёзд, так и звёздных систем; некоторые из полученных этим путём результатов см. в главе XV.

#### Упражнения к главе XIV

1. Параллакс Капеллы  $0'',06$ . Найти её расстояние в парсеках, в световых годах и в километрах (§ 120).
2. Возможная неточность (вероятная ошибка) в параллаксе Капеллы составляет  $0'',008$ . Как она отражается на расстоянии звезды?
3. Параллакс Ригеля (β Ориона)  $0'',006$ . Вероятная ошибка измерения та же, что у Капеллы. Что можно сказать о расстоянии звезды?
4. Чему равен *годовой* параллакс Солнца? Его расстояние в парсеках? *Указание.* Задачу надо решать по *точной* формуле параллакса (§ 110).
5. Звёздная величина Венеры в наибольшем блеске равна  $-4^m,3$ , Вег  $+0^m,1$ . Во сколько раз Венера ярче Вег?
6. Переменная звезда «Удивительная Кита» (Mira Ceti) в максимуме блеска достигает 2,5 величины, в минимуме 9,2 величины. Во сколько раз она ярче в максимуме, чем в минимуме?
7. Звёзд 6-й величины на северном небе 2000. Во сколько раз их общий свет сильнее света Сириуса, звёздная величина которого  $-1^m,4$ ? *Ответ:* Вдвое.
8. Двойная звезда Кастор (α Близнецов) состоит из двух звёзд 2,0 и 2,8 звёздной величины. Каков общий блеск звезды в звёздных величинах? *Ответ:*  $1^m,6$ .
9. «Новая» звезда 1901 г. (Nova Persei) в двое суток разгорелась от 12-й величины до 2-й. Во сколько раз увеличился её блеск за это время?
10. Видимая звёздная величина Капеллы (упр. 1)  $m = +0,3$ . Определить её абсолютную величину  $M$  и светимость  $L$ . *Ответ:*  $M = -0^m,6$ ,  $L = 110$ .
11. Найти те же величины для Ригеля (упр. 3;  $m = +0,3$ ): 1) при вероятнейшем параллаксе  $0'',006$ ; 2) при параллаксе  $0'',002$ . *Ответ:*  $L_1 = 16\ 000$ .

12. Во сколько раз слабее Солнца звезда Ближайшая Центавра (Proxima Centauri), для которой  $\pi = 0'',76$ ,  $m = 10,5$ ? *Ответ:* В 9200 раз.

13. Если абсолютные величины всех звёзд в среднем одинаковы, то во сколько раз звёзды 6-й величины дальше звёзд 1-й величины?

14. На сколько величин ослабевает звезда, если её расстояние увеличится вдвое? Если расстояние увеличится в  $n$  раз?

15. Во сколько раз должно увеличиться расстояние звезды, чтобы её блеск ослаб на 1 величину? на  $m$  величин?

16. Наша солнечная система приближается к Веге ( $\pi = 0'',12$ ) каждую секунду на 14 км. Через сколько лет блеск Веги увеличится на  $0'',1$ , если и в будущем движение будет совершаться с такой же скоростью? *Ответ:* Через 27 тысяч лет.

17. Новая звезда в созвездии Орла 1918 г. (§ 312) в максимуме блеска имела абсолютную величину  $M = -8,8$ . Во сколько раз она была ярче Солнца? На каком расстоянии она находилась, когда её видимая величина была  $m = -1,1$ ? С какого расстояния она казалась бы такой же яркой, как полная Луна (средний блеск полной Луны равен  $-12'',6$ )? *Ответ:* С расстояния парсека, т. е. дальше ближайших звёзд.

18. Каким кажется Солнце с ближайшей звезды (упр. 12)? *Ответ:* Звездой  $+0,6$  величины.

19. Вычислить массу двойной звезды  $\alpha$  Центавра, у которой  $\pi = 0'',76$ ,  $P = 79$  лет,  $a = 17'',6$ . *Ответ:*  $m_1 + m_2 = 2,1$  массы Солнца.

---

## ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

### І. ДВИЖЕНИЯ ЗВЁЗД

**§ 314. Собственные движения звёзд.** Звёзды в отличие от планет часто называются неподвижными, но в действительности все они движутся по различным направлениям. Видимые движения звёзд так медленны, что простым глазом их можно заметить только по истечении нескольких тысяч лет. Поэтому фигуры созвездий со времён Гиппарха заметно не изменились.

У большей части звёзд, видимых простым глазом, собственные движения составляют меньше  $0",1$  в год; у огромного большинства более слабых звёзд движения ещё медленнее, и величина их в среднем убывает с уменьшением блеска. Но найдено довольно много звёзд, движущихся значительно быстрее; как общее правило, быстрое движение звезды указывает на её *близость*. Так,  $\alpha$  Центавра, ближайшая к нам звезда, имеет собственное движение  $3",7$  в год. Самое быстрое движение, именно,  $10"$  в год, имеет звезда 10-й величины в созвездии Змееносца. Из звёзд ярче 5-й величины, видимых у нас, только одна звезда имеет собственное движение больше  $2"$  в год, это — Арктур.

Собственные движения звёзд направлены всегда по большим кругам небесной сферы; следовательно, звёзды движутся в пространстве по *прямым линиям*. Истинные орбиты звёзд, несомненно, криволинейны, но за короткое время, в течение которого ведуться точные наблюдения, мы этого искривления ещё не могли заметить. Собственные движения звёзд всегда определяются в секундах дуги в год ( $"$ ).

**§ 315. Движение по лучу зрения.** Наблюдения над смещением спектральных линий позволяют по принципу Доплера-Белопольского (§ 197) определить *лучевую скорость* звезды, т. е. скорость, с которой звезда приближается к нам или удаляется. В настоящее время эти лучевые скорости измерены уже для многих тысяч звёзд. Они оказались большей частью того же порядка, что и скорость Земли в её движении вокруг Солнца (около  $30 \text{ км/сек}$ ). Приводим скорости наи-

более ярких звёзд. Знак  $(+)$  обозначает удаление,  $(-)$  — приближение

|                   |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|
| Спирius           | — 8 км/сек | Арктур     | — 5 км/сек |
| Канопус           | + 30 »     | Ригель     | + 21 »     |
| $\alpha$ Центавра | — 22 »     | Процион    | — 4 »      |
| Вега              | — 14 »     | Альтаир    | — 33 »     |
| Капелла           | + 30 »     | Альдебаран | + 55 »     |

Для немногих слабых звёзд были найдены громадные лучевые скорости — свыше 500 км/сек.

**§ 316. Истинные скорости звёзд.** Если известны видимое собственное движение звезды  $\mu''$  в год, её лучевая скорость  $V$  и расстояние  $D$ , то можно вычислить её истинную скорость в пространстве (относительно Солнца).

Тангенциальная скорость звезды  $T$ , т. е. скорость, перпендикулярная к лучу зрения, очевидно, будет:

$$T = D \sin \mu'' = \frac{\sin \mu''}{\pi''}, \quad (1)$$

где  $\pi''$  — годичный параллакс звезды, выраженный в секундах. Ввиду малости угла  $\mu''$  формулу можно написать в виде:

$$T = \frac{\sin \mu''}{\pi''} = \frac{\mu'' \cdot \sin 1''}{\pi''} = \frac{\mu''}{206\,265 \cdot \pi''}. \quad (2)$$

Здесь скорость  $T$  выражена в парсеках в год, поскольку  $\frac{1}{\pi''} = D$ , выраженному в парсеках, а  $\mu''$  даётся за год. Чтобы перейти к километрам в секунду, надо  $T$  умножить на число километров в парсеке и разделить на число секунд в году. Так как 1 парсек = 206 265 астроном. единиц., 1 астроном. единица =  $149,5 \cdot 10^6$  км, год содержит 365,2 суток, а 1 сутки — 86 400 секунд, то

$$1 \frac{\text{парсек}}{\text{год}} = \frac{206\,265 \cdot 149,5 \cdot 10^6}{365,2 \cdot 86\,400} = 206\,265 \cdot 4,74 \text{ км/сек.}$$

Подставляя полученный коэффициент в формулу (2) и сокращая на 206 265, получим окончательно:

$$T = 4,74 \frac{\mu''}{\pi''} \text{ км/сек.} \quad (3)$$

Если известна ещё лучевая скорость  $V$  км/сек, то скорость в пространстве (относительно Солнца) найдётся из формулы

$$v^2 = T^2 + V^2. \quad (4)$$

Определения скорости по этим формулам сделаны уже для многих тысяч звёзд. Для некоторых слабых звёзд получились скорости до 800 км/сек и выше.

**§ 317. Движение солнечной системы.** Подобно остальным звёздам Солнце также движется в пространстве.

Если бы звёзды были неподвижны, а двигалась бы только солнечная система, то собственные движения звёзд были бы просто отражением движения нашей системы. В той стороне неба, куда мы движемся, звёзды расступались бы в разные стороны, а звёзды в противоположной стороне, от которых мы удаляемся, сближались бы. Но так как звёзды и сами движутся, то их видимое, собственное движение составляется из двух движений — «параллактического» и так называемого пекулярного, т. е. присущего самой звезде. Задача упростится, если *предположить*, что *пекулярные движения* звёзд совершенно *беспорядочны*. Тогда, при большом числе звёзд, пекулярные движения в среднем взаимно уничтожатся, но параллактические останутся, и направление движения Солнца можно будет найти так же, как в случае неподвижных звёзд.

Гершель нашёл, что видимые движения звёзд расходятся от созвездия Геркулеса, и, следовательно, в этом созвездии находится *апекс* солнечной системы (точка, к которой направлено её движение). Было предложено несколько способов определения положения апекса и скорости движения солнечной системы относительно звёзд. Один из наилучших способов принадлежит М. А. Ковальскому. Впоследствии координаты апекса и скорость движения солнечной системы относительно ближайших звёзд были определены многими учёными, в том числе советскими учёными В. Г. Фесенковым, П. П. Паренаго, К. Ф. Огородниковым и Р. В. Куницким. Оказалось, что координаты апекса, полученные разными астрономами, хуже согласуются между собой, чем можно было бы ожидать. Поэтому вполне достаточно запомнить для этих координат следующие круглые числа:  $\alpha = 270^\circ$ ,  $\delta = +30^\circ$ ; скорость  $20 \text{ км/сек.}$

Плохое согласие отдельных результатов указывает, что лежащая в основе всех определений гипотеза о полной беспорядочности звёздных движений *не вполне правильна* (см. §§ 318 и 334).

**§ 318. Звёздные потоки Каптейна.** Открытое (в 1783 г.) движение звёзд от апекса более ста лет оставалось единственной закономерностью, подмеченной в звёздных движениях. Но это движение в сущности не принадлежит звёздам, — это движение параллактическое. Движения же самих звёзд считались совершенно беспорядочными. Первая закономерность в пекулярных движениях самих звёзд была открыта только в 1904 г. голландским астрономом Каптейном. Он разделил всё звёздное небо на несколько десятков приблизительно равных областей и исследовал собственные движения нескольких сотен звёзд в каждой области. Если бы движения звёзд были совершенно беспорядочны, а солнечная система неподвижна, то все направления движений в данной области были бы одинаково вероятны; поэтому при большом числе звёзд по каждому данному направлению двигалось бы приблизительно столько же звёзд, сколько и по всякому другому направлению. Скорости имели бы так называемое «круговое распределение»,

Но вследствие движения солнечной системы (§ 317) звёзды имеют, кроме пекулярных движений, ещё «параллактические» движения, направленные от апекса (*к антиапексу*); если область неба не слишком велика, то эти направления к антиапексу для всех звёзд области можно считать параллельными. Прибавим геометрически к пекулярным движениям звёзд эти «параллактические» движения. Теперь число звёзд, движущихся к антиапексу, увеличится. Распределение скоростей станет приблизительно «эллиптическим»: будет *одно* «преобладающее направление», по которому будет двигаться больше всего звёзд — это направление к антиапексу; в противоположном направлении, к апексу, будет двигаться наименьшее число звёзд.

В действительности же оказалось, что в каждой данной области неба имеется не одно преобладающее направление звёздных движений, а *два* направления, составляющие между собой почти всегда тупой угол (рис. 132).

На рис. 132 представлен результат исследования Каптейна. От точки  $O$ , являющейся центром небесной сферы (§ 14), отложены через каждые  $10^\circ$  векторы пропорционально числу звёзд, движущихся по данному направлению. Например, 4 звезды движутся по направлениям, лежащим внутри 1-го сектора ( $0—10^\circ$ ), 5 звёзд — внутри 2-го ( $10—20^\circ$ ), 14 звёзд — внутри 6-го сектора ( $50—60^\circ$ ); эти числа 4, 5,

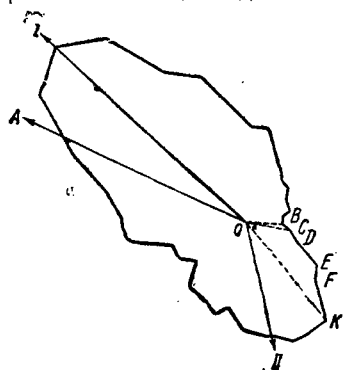


Рис. 132.

14 отложены в виде векторов:  $OB=4$ ,  $OC=5$ ,  $OK=14$ . Концы всех 36 векторов, соединённые замкнутой ломаной линией, дают «фигуру Каптейна». Из диаграммы видно, что в данной области преобладают движения, направленные вдоль линий  $OI$  (I поток) и  $OII$  (II поток), а вовсе не к антиапексу  $A$ . Направление к антиапексу не совпадает ни с одним из этих направлений, а приходится всегда внутри угла между ними. При переходе от одного участка неба к соседнему угол между преобладающими направлениями постепенно изменяется, но направление, которое мы обозначим  $I$  на первом участке, мы легко найдём на всех других и всегда отличим от направления  $II$ . Если продолжить направления  $I$ , определённые для всего неба (разбитого на области), то все эти направления приблизительно *пересекутся в одной точке*. Обозначим её  $V_1$ . Все направления  $II$  пересекутся в другой точке  $V_2$ , находящейся от первой на расстоянии около  $130^\circ$ . Эти точки, к которым преимущественно направлены видимые движения звёзд, названы *видимыми вертексами* (vertex — по-латыни «верхушка»), а самые движения звёзд к ним — «звёздными течениями» или «потоками». В любой области неба перемешаны, приблизительно в равном числе, звёзды, принадлежащие к обоим потокам.

Каптейн объяснил, почему угол между видимыми вертексами не равен  $180^\circ$ . Он имел бы такую величину, если бы мы наблюдали движения звёзд из некоторой неподвижной точки, а не из солнечной системы, которая сама движется. Тогда оказалось бы, что движения обоих потоков направлены к двум диаметрально противоположным точкам небесной сферы. Вычисления положений этих точек, названных *истинными вертексами*, дали следующие результаты:

I поток:  $\alpha = 95^\circ$ ,  $\delta = +10^\circ$  (созв. Орiona),

II поток:  $\alpha = 275^\circ$ ,  $\delta = -10^\circ$  (созв. Щита).

Обе точки лежат в Млечном Пути. Направление движения солнечной системы ближе к направлению II потока. Оба потока содержат приблизительно одинаковое число звёзд. Явление звёздных потоков обнаружено и в лучевых скоростях звёзд (§ 315). Это позволило определить скорость одного потока относительно другого. Она оказалась около  $40 \text{ км/сек}$ .

**§ 319. Движущиеся скопления.** Потоки Каптейна охватывают по меньшей мере десятки тысяч звёзд, но они дают только направления, преобладающие среди данного звёздного комплекса; движения отдельных звёзд потока могут сильно отличаться от движения потока в целом. Но существуют группы звёзд, которые имеют почти в точности одинаковые движения в пространстве. При этом расстояния между звёздами такого «потока» настолько велики, что взаимные притяжения между ними совершенно незаметны. Таких потоков найдено уже около десятка. Самый замечательный из них — это *поток Большой Медведицы*; он известен с 70-х годов прошлого века.

Пять из 7 главных звёзд этого созвездия (средние звёзды «Ковшика») имеют почти одинаковые собственные движения; если направления этих движений нанести на звёздную карту и продолжить их *назад*, то окажется, что все они сойдутся в одной точке, приблизительно на расстоянии  $40^\circ$  от середины созвездия. Как и для метеоров, эту точку также можно назвать *радиантом* (§ 271); она имеет здесь тот же самый смысл: в действительности все 5 звёзд движутся в пространстве *параллельно*, причём весь рой *приближается* к нам.

Хорошо изучен также поток Гиад (звёздное скопление в созвездии Тельца, рис. 133). Этот рой находится далеко от нас. Собственные движения звёзд этого потока *сходятся* к одной точке (а не расходятся, как у потока Б. Медведицы). Точка их схождения, или *вертекс* потока, находится на расстоянии всего  $27^\circ$  от середины скопления. Таким образом, всё скопление *удаляется* от нас, его видимые размеры с течением времени должны уменьшаться и через много миллионов лет оно будет иметь вид тесной звёздной кучи в несколько минут в диаметре (теперь его диаметр больше  $15^\circ$ ). Отсюда видно, что между звёздными потоками и звёздными скоплениями нет



принципиального различия; поэтому потоки часто называются *движущимися скоплениями*.

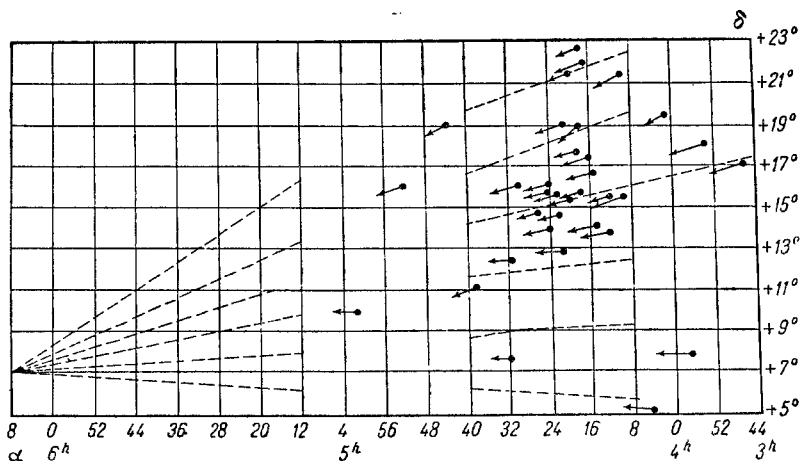


Рис. 133.

Заметим, что направление движения в пространстве потока Б. Медведицы очень близко к направлению вертекса II потока Каптейна, а направление движения Гнад отклоняется от направления I потока приблизительно на  $30^\circ$ .

**§ 320. Определение параллакса движущихся скоплений.** Параллаксы звёзд, принадлежащих к звёздному потоку, легко определяются, если известна *лучевая скорость* хотя бы одной звезды потока. Действительно, направление движения звёзд потока должно быть параллельно тому направлению, по которому с Солнца (или с Земли) виден вертекс потока (рис. 134). Пусть какая-нибудь звезда потока  $M$  находится на угловом расстоянии  $\varphi$  от вертекса. Очевидно, угол  $\varphi$  будет равен углу между лучом зрения  $SM$  и направлением скорости потока  $v$ . Если теперь известна скорость по лучу зрения, равная  $V$  км/сек, то можно определить пространственную скорость звезды:

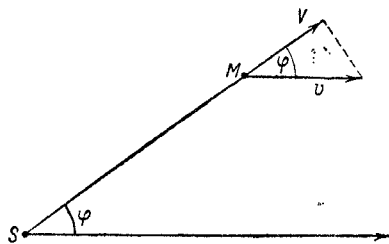


Рис. 134.

$$v = \frac{V}{\cos \varphi}, \quad (5)$$

а также тангенциальную скорость в км/сек:

$$T = V \operatorname{tg} \varphi = v \sin \varphi.$$

Для последней величины мы имеем формулу (3) (§ 316):

$$T = 4,74 \frac{\mu''}{\pi'},$$

где  $\mu''$  — собственное движение звезды. Приравнявая эти два выражения, определяем параллакс  $\pi$ :

$$\pi'' = \frac{4,74 \mu}{V \cos \varphi} = \frac{4,74 \mu''}{v \sin \varphi}. \quad (6)$$

По этой формуле можно вычислить параллакс не только той звезды, для которой измерена лучевая скорость  $V$ , но и для *каждой* звезды потока, так как пространственная скорость  $v$  для всех членов потока одинакова. Это один из лучших способов определения звёздных расстояний. Для потока Гиад (§ 319) он даёт параллакс  $0'',025$  (расстояние  $D = 120$  световых лет).

**§ 321. Связь между спектральным классом и скоростью.** Эта зависимость состоит в том, что средние скорости звёзд тем больше, чем звёзды *краснее*. Медленнее всего движутся «орлиовы» звёзды класса В, почти вдвое быстрее — красные звёзды класса М. Приводим средние пространственные скорости звёзд главных спектральных классов, выведенные на основе изучения 4233 звёзд. Эти скорости исправлены за движение солнечной системы (§ 317).

Спектральный

класс . . . . . О В А F G K M

Пространствен-

ная скорость . . 32,6 14,9 17,6 24,9 51,6 58,8 63,0 км/сек.

Ещё интереснее другая зависимость: повидному *слабые* звёзды движутся *быстрее ярких*. Например, у звёзд спектрального класса К с уменьшением абсолютной величины скорость возрастает: гиганты 1-й абсолютной величины имеют среднюю лучевую скорость около 13 км/сек, карлики слабее Солнца — вдвое больше. Так как светимость звезды связана с её массой, то возможно, что звёзды движутся тем быстрее, чем меньше их массы.

**§ 322. Звёзды, не принадлежащие к большим потокам.** а) Медленные звёзды. Звёзды класса В («гелиевые», или «орлиовы» звёзды), все являющиеся гигантами, не участвуют в потоках Каптейна. Их пространственные скорости очень малы и имеют почти сферическое распределение, т. е. почти одинаково распределены по всевозможным направлениям. Звёзды этого класса часто располагаются группами и образуют местные потоки, но направления этих потоков не имеют ничего общего с направлением больших потоков.

б) Быстрые звёзды. Существует несколько классов небесных объектов, имеющих очень большие пространственные скорости. Это, прежде всего, сравнительно близкие к нам звёзды-карлики; затем из звёзд-гигантов — короткопериодические переменные цефеиды

(§ 308) и долгопериодические переменные (§ 310); наконец, очень далёкие шаровые звёздные скопления (§ 326). Все эти объекты отличаются от более медленных звёзд не только величиной своих скоростей, но и распределением их *направлений*. Именно, скорости, превышающие 60—80 км/сек, направлены не во всевозможные точки небесной сферы, а только к точкам одного небесного полушария, центром которого является точка, определяемая координатами  $\alpha = 130^\circ$ ,  $\delta = -57^\circ$  (в Млечном Пути южного полушария — созвездие Кормы). Это есть *вертекс* быстро движущихся звёзд. Направление к этому вертексу почти в точности *перпендикулярно* к линии вертексов потоков Каптейна.

Различные классы быстрых объектов движутся по этому направлению с различными средними скоростями. Наибольшую среднюю скорость имеют самые отдалённые из них, именно, шаровые звёздные скопления: 268 км/сек по отношению ко всему комплексу звёзд, находящихся в ближайших окрестностях Солнца, и 286 км/сек по отношению к Солнцу.

Это сходство движений близких и далёких светил объясняется почти так же просто, как суточное обращение всех мировых тел. Естественнее принять, что на самом деле движется наша солнечная система, а система шаровых скоплений, очень далеко разбросанных по всем направлениям, вся в целом не имеет поступательного движения, её центр тяжести находится в покое. Тогда по отношению к этой системе (внутри её) Солнце со своими планетами будет двигаться со скоростью 286 км/сек по направлению к точке, диаметрально противоположной вертексу быстрых звёзд; эта точка находится в созвездии Цефея с координатами  $\alpha = 305^\circ$ ,  $\delta = +62^\circ$ . Отдельные скопления внутри системы будут двигаться со скоростями в среднем несколько больше 100 км/сек по всевозможным направлениям.

### § 323. Разрежённая материя в межзвёздном пространстве.

а) Космический кальций. В спектрах многих звёзд классов О и В имеются линии поглощения Н и К ionизованного кальция. Линии эти вначале казались загадочными: 1) звёзды классов О и В имеют такую высокую температуру, что в их спектрах линии Н и К кальция вообще не могут наблюдаться; 2) упомянутые линии дают другую скорость движения по лучу зрения, чем все остальные линии той же звезды. Поэтому была высказана гипотеза, что эти линии вызваны поглощением света облаками кальция, находящимися не на звезде, а где-то в пространстве между звездой и нами. Эти «космические» или «межзвёздные» линии кальция видны в спектрах звёзд, расположенных во всевозможных направлениях, и они тем интенсивнее, чем звёзды дальше. Очевидно, свет от более далёких звёзд проходит на своём пути большую толщу кальциевых паров и испытывает более сильное избирательное поглощение, чем свет от близких звёзд. Впоследствии были обнаружены межзвёздные линии натрия, титана, калия, железа и некоторых других элементов.

Все эти явления хорошо объясняются предположением, что всё межзвёздное пространство «наполнено» отдельными атомами кальция (и других элементов), выброшенными из атмосфер звёзд. Плотность этой межзвёздной «атмосферы» ничтожно мала даже в сравнении с плотностью самых разрежённых туманностей и никакого заметного *общего* поглощения света звёзд она не производит даже в тех частях пространства, где она сгущена сильнее. Ряд данных заставляет предполагать, что главную часть этого межзвёздного газа составляет водород, хотя его межзвёздные линии и не обнаружены.

В последнее время удалось обнаружить даже общее движение всей массы кальциевого облака (см. дальше, § 334).

б) Космическая пыль и вызываемое ею поглощение света. Кроме сверхразрежённых облаков из отдельных атомов кальция, в мировом пространстве находятся скопления разрежённой материи, состоящие из более крупных частиц — *пылинок* и песчинок различных размеров. Они ослабляют свет находящихся за ними звёзд подобно клубам дыма.

На это обстоятельство впервые указал В. Я. Струве ещё в середине XIX в., но начало изучения поглощения света началось с работ советского учёного Б. А. Воронцова-Вельяминова (1930 г.).

Вызываемое межзвёздной пылью общее поглощение света ослабляет все цвета спектра, хотя и не в одинаковой степени. Как показали советские учёные В. А. Амбарцумян и Ш. Г. Горделадзе, поглощающая среда распределена в мировом пространстве неравномерно. По некоторым направлениям мы можем видеть светила, находящиеся на расстоянии многих миллионов световых лет; по другим направлениям, наоборот, мы видим звёзды только до расстояний в несколько сот световых лет, свет от более далёких звёзд уже не может проникнуть сквозь эту своего рода «пылевую завесу».

Очень трудно бывает решить, отчего звезда кажется слабой, от большого удаления или от поглощения её света тёмной материей. Теперь доказано, что поглощение света происходит и в таких областях неба, которые раньше считались совершенно прозрачными, а так как по видимому блеску звёзд часто определяются их расстояния, то во многих случаях они могут оказаться ошибочными, если не учесть поглощения света межзвёздной тёмной материей.

Советские учёные, главным образом П. П. Паренаго, Н. Ф. Флоря и К. Ф. Огородников, дали точные методы определения поглощения света в межзвёздной среде. Ныне поглощение света обязательно учитывается при определении расстояний до звёзд и других далёких объектов вселенной.

## II. ЗВЁЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

**§ 324. Млечный Путь.** В ясные безлунные ночи широкая светящаяся полоса Млечного Пути тянется через весь видимый небесный свод, от горизонта до горизонта. Она продолжается и под горизонтом в южном полушарии и образует *кольцо*, опоясывающее всё небо приблизительно

по большому кругу. Строение Млечного Пути очень сложно. Начиная с самой яркой своей области в северном полушарии (в созвездии Лебедя), он идёт на юг двумя отдельными ветвями, которые соединяются только



Рис. 135.

в невидимом у нас созвездии Южного Креста. В одних местах он расширяется до  $30^\circ$ , в других суживается до  $4-5^\circ$ . Яркость его крайне различна. Та часть Млечного Пути, которая у нас видна летом (Лебедь — Орёл — Стрелец), гораздо ярче и богаче звёздами, чем противоположная зимняя часть. Телескоп разложил Млечный Путь на миллионы очень слабых звёзд, которые образуют множество отдельных сгущений или «облаков» (рис. 135).

Млечный Путь играет важную роль в распределении и движении звёзд. В нём лежат вертексы потоков Каптейна. Почти все «орионовы» звёзды класса В расположены близ Млечного Пути, там же сосредоточены звёзды класса О, большинство переменных и «новых звёзд».

Кроме звёзд, в Млечном Пути сосредоточено множество газообразных *туманностей* (см. § 329), частью слабо светящихся, частью совсем тёмных. На светлом звёздном фоне Млечного Пути очертания таких туманностей, не пропускающих света находящихся за ними звёзд, вырисовываются в виде чёрных пятен (рис. 135), часто называемых угольными мешками.

Из того обстоятельства, что Млечный Путь располагается по большому кругу небесной сферы, следует важный вывод: звёзды, в том числе и наше Солнце, образуют звёздную систему, которая имеет не шарообразную, а сплюснутую форму, примерно форму диска. Наше Солнце находится внутри системы, близ экваториальной плоскости диска. Эта плоскость называется *галактической* плоскостью (см. § 325).

Звёздную систему Млечного Пути прежде иногда называли звёздной вселенной, теперь же её называют *Галактикой* (греческое название Млечного Пути). Галактика имеет хотя и очень большие, но всё же *конечные* размеры; вселенная же бесконечна.

**§ 325. Галактические координаты.** Галактическая плоскость является для звёздной астрономии тем же, чем является эклиптика для планетной астрономии. Поэтому её принимают за основную плоскость так называемой *галактической* системы координат. По большому кругу, который проходит приблизительно посредине полосы Млечного Пути и положение которого определено условно<sup>1)</sup>, отсчитывают галактические долготы  $l$  от одной из точек его пересечения с экватором (в созвездии Орла) к востоку, против часовой стрелки. Отсчёт галактических широт понятен. Например, истинные вертексы потоков Каптейна имеют галактические долготы  $165^\circ$  и  $345^\circ$ , широты же их равны нулю.

**§ 326. Галактические звёздные скопления.** В разных направлениях от солнечной системы встречаются *звёздные скопления*, в которых множество звёзд сосредоточено в сравнительно небольшом объёме пространства. Звёздные скопления разделяются на *рассеянные* (или *открытые*) и *шаровые*, и так как они входят в состав Галактики, то их часто называют галактическими.

а) *Рассеянных* звёздных скоплений известно около пятисот. Они имеют неправильную форму, состоят, самое большее, из нескольких сотен звёзд и во многих случаях не резко выделяются на окружающем их фоне звёздного неба. Все они расположены в Млечном Пути или недалеко от него. Они являются местными сгущениями внутри галактической системы. Так как отличить звёзды данного сгущения от посторонних звёзд тем труднее, чем сгущение дальше, то мы, по всей вероятности, знаем лишь небольшую часть рассеянных скоплений,

<sup>1)</sup> Условились, что северный полюс этого круга имеет координаты:  $\alpha = 190^\circ$ ,  $\delta = +28^\circ$  (для 1900 г.).

и общее число их может составлять десятки тысяч. Самым известным примером рассеянного скопления являются Плеяды в созвездии Тельца (рис. 136)—самое близкое к нам (после Гиад, см. § 319) звёздное скопление; параллакс этого скопления равен  $0'',007$ , а расстояние — около 490 световых лет.

Изучение звёздных скоплений важно в космогоническом отношении, так как каждое скопление представляет собрание множества звёзд, имеющих, по всей вероятности, общее происхождение и одинаковый возраст. Изучение это облегчается тем, что все звёзды скопления находятся от нас почти на одинаковом расстоянии; следовательно, если одна звезда скопления кажется нам в несколько раз ярче другой, то она и в действительности ярче во столько же раз. Это даёт нам возможность сразу найти распределение *абсолютных* величин звёзд скопления, сопоставить их светимости с цветом, спектром и т. д. Надо только уметь отличить звёзды, принадлежащие к скоплению от посторонних звёзд (от звёздного «фона»).

Это было сделано прежде всего для Плеяд. По собственным движениям 2000 звёзд в области, занимаемой скоплением, было доказано, что только 150 звёзд от 2-й до 16-й величины принадлежат к скоплению, а все остальные находятся гораздо дальше. Все звёзды скопления в точности располагаются на главной ветви диаграммы Ресселла (§ 292, рис. 123). Эта диаграмма для звёзд скопления Плеяд принимает вид, показанный на рис. 137. Расстояние до центра скопления составляет около 150 парсеков. Красных гигантов в этом скоплении нет; в других скоплениях они встречаются. Замечательно также, что в рассеянных скоплениях совершенно нет переменных звёзд цефеид, которые играют важную роль в шаровых скоплениях.

Необходимо помнить, что звёзды, составляющие скопление, находятся в движении, как и все звёзды (§§ 314—317). То обстоятельство, что звёзды данного скопления *почти* не изменяют своих относительных положений в течение столетий, означает, что они движутся в пространстве со скоростями геометрически почти равными. Но рас-

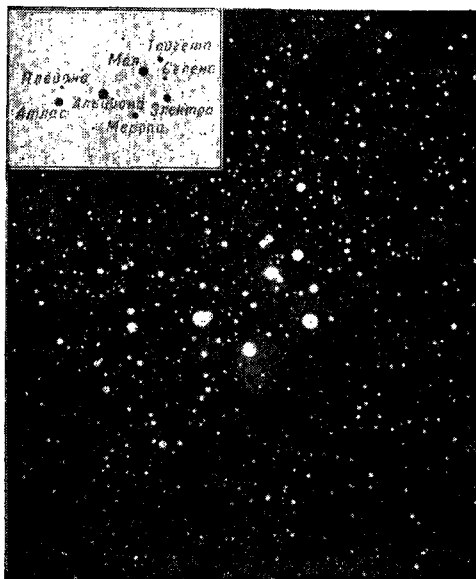


Рис. 136.

стояния между звёздами движущегося скопления всё-таки настолько значительны, что внутренние силы скопления (т. е. силы взаимного тяготения членов скопления или роя, § 319), не в состоянии долго удерживать скопление от распада. Исследованиями В. А. Амбарцумяна выяснено, что в настоящую эпоху эволюции Галактики звёздные скопления теряют составляющие их звёзды: в результате взаимных тесных сближений отдельных звёзд, входящих в состав данного скопления,

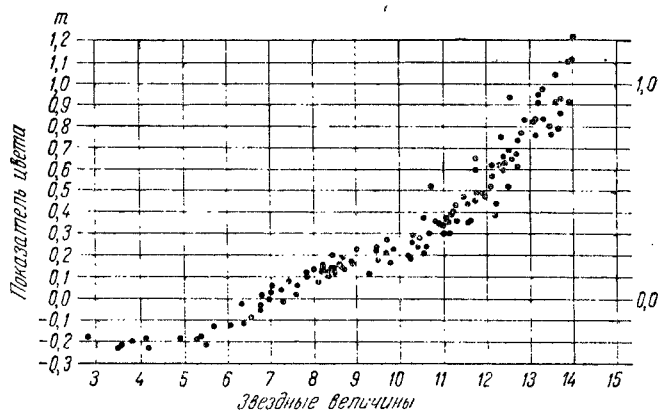


Рис. 137.

и действия ядра Галактики (§ 335), некоторая доля звёзд должна приобрести скорость, достаточную для того, чтобы покинуть скопление. Таким образом, звёзды, принадлежащие к скоплению, постепенно рассеиваются в Галактике. Процесс этот идёт чрезвычайно медленно — в течение миллиардов лет.

б) *Шаровые скопления* (которых известно 96) в слабый телескоп представляются туманными пятнышками с диаметром в несколько минут, с более яркой серединой. В сильные инструменты скопление разделяется на *десятки тысяч* крайне слабых звёзд, сосредоточенных внутри пространства, имеющего форму или шара, или эллипсоида вращения (рис. 138). Последнее обстоятельство наводит на мысль, что всё скопление должно вращаться вокруг наименьшей оси.

*Параллаксы* шаровых скоплений так малы, что недоступны прямому измерению. Также ничтожны и собственные *движения* как самих скоплений, так и звёзд внутри скопления. Но *лучевую скорость* всего скопления в целом у более ярких скоплений удалось измерить. Найденные скорости оказались очень большими в сравнении со средними лучевыми скоростями звёзд, в среднем более 200 км/сек, причём у некоторых скоплений наблюдаются скорости от 300 до 400 км/сек. Значительное большинство исследованных скоплений имеет отрицательные скорости, т. е. *приближается* к Солнцу.



Общий (интегральный) блеск шаровых звёздных скоплений детально изучен М. Е. Набоковым, Б. А. Воронцовым-Вельяминовым

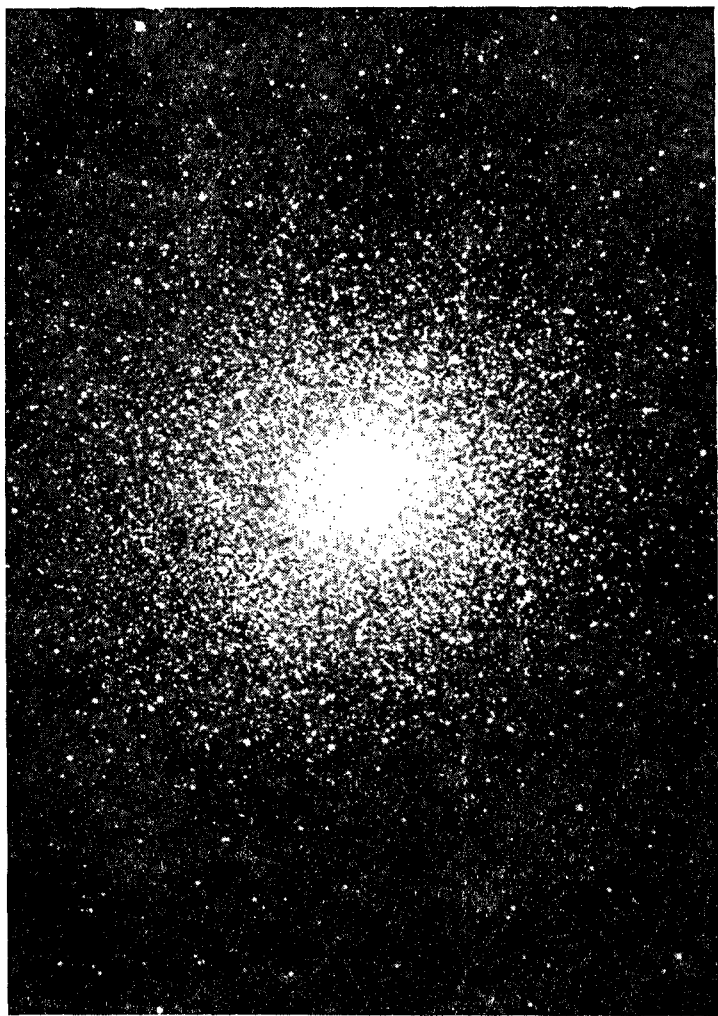


Рис. 138.

и П. П. Паренаго, которыми созданы специальные каталоги их интегрального блеска; он оказалась заключённым в пределах от  $5^m$  до  $13^m$ .

Во многих шаровых скоплениях содержится очень много переменных звёзд типа *цефеид* (§ 308), которые, как мы знаем, — все гиганты

в сравнении с Солнцем. Предполагая, что в шаровых скоплениях звёзды этого типа имеют такую же светимость, как и в Млечном Пути, и сравнивая абсолютную величину их  $M$  с видимой величиной  $m$ , можно определить расстояния скоплений по формуле (6) § 282. Они оказались громадными: от 8000 до 50 000 световых лет. Все звёзды шаровых скоплений — гиганты — в тысячи раз ярче Солнца; карлики в них, вероятно, тоже имеются, но ни один из них не может быть виден на таком громадном расстоянии. Истинные диаметры скоплений составляют около 100 световых лет, т. е. они гораздо меньше диаметра Млечного Пути. Звёзды в скоплениях находятся друг к другу гораздо ближе, чем в окрестности нашего Солнца (так называемая «звёздная плотность» там в тысячи раз больше), но столкновений звёзд и там не наблюдается.

Самые яркие звёзды в шаровых скоплениях — красные сверхгиганты.

Шаровые скопления совсем не наблюдаются в плоскости Млечного Пути (где, наоборот, сосредоточены рассеянные скопления); они разбросаны симметрично к северу и к югу от этой плоскости, на расстояниях не очень больших в сравнении с размерами самой Галактики. При этом почти все шаровые скопления находятся около «летней», самой блестящей части Млечного Пути. По этому направлению они встречаются до расстояния около 50 000 световых лет; в противоположной, «зимней» стороне Млечного Пути имеется лишь 2—3 сравнительно очень близких скопления. Шаровые скопления образуют гигантскую конечную систему, имеющую форму слабо сплюснутого эллипсоида; плоскость Млечного Пути является экваториальной плоскостью системы. Солнце находится вблизи этой плоскости, но далеко от геометрического центра системы, который расположен в направлении к созвездию Стрельца, к самой яркой и сложной по строению части Млечного Пути. Галактическая долгота этого центра по определению Крымской обсерватории составляет  $l_0 = 330^\circ$ ; расстояние, по Паренаго и Кукаркину, получилось около 7200 парсеков (см. дальше, § 334).

В самом Млечном Пути шаровые скопления нам не видны потому, что их свет не может проникнуть сквозь поглощающую среду, расположенную в галактической плоскости (§ 323). По остальным же направлениям мы, по всей вероятности, видим систему до конца, до самых далёких скоплений. Другими словами, почти все члены системы скоплений, не закрытые поглощающей средой, нам уже известны. Полное число шаровых скоплений в Галактике, по Паренаго, не превышает 250.

в) *Открытие космического поглощения света по звёздным скоплениям.* Изучение шаровых звёздных скоплений привело в 1930 г. Б. А. Воронцова-Вельяминова к выводу о наличии межзвёздного поглощения света. Через год это было подтверждено работами других учёных.

Расстояния скоплений можно определять двумя способами: 1) по видимому блеску звёзд и 2) по видимым угловым диаметрам скоплений. При этом предполагается, что средняя светимость звёзд всех скоплений одинакова и одинаковы также и линейные диаметры скоплений. Поэтому чем скопление дальше, тем оно должно казаться меньше и тем слабее будут звёзды, из которых оно состоит. Это вполне соответствует наблюдениям: большие (т. е. близкие) скопления состоят всегда из ярких звёзд, маленькие — из слабых.

Оказалось, что расстояния, определённые по угловым диаметрам, систематически расходятся с расстояниями, выведенными по видимому блеску (так называемыми фотометрическими). Для маленьких и слабых, т. е. далёких, скоплений фотометрические расстояния получаются больше диаметральных, и чем скопление слабее, тем разница больше.

Это явление и доказывает, что мировое пространство не абсолютно прозрачно, в нём происходит *поглощение* света. На угловой диаметр скопления поглощение света не влияет, а на блеск влияет тем сильнее, чем длиннее путь, проходимый светом в поглощающей среде. Не зная о поглощении, мы приписываем слабый блеск звёзд только их большому удалению; в действительности же звёзды находятся ближе, чем это следует по их видимому блеску.

Общее поглощение света (§ 323, б) составляет в галактической плоскости в среднем около 1,7 звёздной величины при прохождении расстояния в 1000 парсеков; по мере удаления от галактической плоскости поглощение уменьшается. Поглощение для фиолетовых лучей сильнее, чем для красных. Поэтому чем *дальше* звёзды, тем они кажутся *краснее*. Эффект покраснения составляет 0,3 звёздной величины на 1000 парсеков (на 1 килопарсек), именно на такую величину возрастает вследствие поглощения показатель цвета, характеризующий красноту звезды.

Первые исследователи галактического поглощения предполагали, что поглощающая материя расположена в галактической плоскости в виде сравнительно тонкого сплошного слоя или диска. Но в 1938 г. В. А. Амбарцумян и Ш. Г. Горделадзе доказали, что тёмная материя состоит из *отдельных* пылевых облаков. Каждое такое облако ослабляет блеск находящейся за ним звезды в среднем на 0,25 звёздной величины. Таким образом, приведённое выше ослабление блеска на 1,7 звёздной величины наблюдается в том случае, если луч от звезды на пути в 1 килопарсек пронизет 7 тёмных туманностей. Этим открытием объясняется прерывистый характер поглощения: у соседней звезды ослабление блеска может быть вдвое меньше, если луч от неё встретит, например, только три туманности.

Поглощение света внутри Галактики сильно затрудняет её изучение. Но кроме нашей Галактики во вселенной существуют другие подобные ей звёздные системы, на которые мы посмотрим со стороны. Их исследование помогает нам раскрыть природу нашей звёздной системы.

**§ 327. Звёздные ассоциации.** В. А. Амбарцумян в работе, удостоенной Сталинской премии за 1949 г., показал, что в Галактике наряду с рассеянными и шаровыми скоплениями существуют ещё звёздные группы, которые он назвал *звёздными ассоциациями*. Звёздную ассоциацию можно определить как весьма разрежённое открытое (или движущееся) скопление звёзд *одного и того же физического типа*. Такое скопление легче всего выделить на окружающем звёздном фоне в том случае, если звёзды ассоциации принадлежат к редко встречающемуся типу (например, сверхгиганты классов О и В, некоторые физические переменные звёзды). Примером звёздной ассоциации являются звёзды Ориона: группа звёзд-гигантов типа В, в центре которой расположено звёздное скопление, известное под названием *трапеции* (§ 298) и окружённое громадной туманностью.

По В. А. Амбарцумяну размеры ассоциаций должны увеличиваться, и немного миллионов лет назад члены ассоциации могли быть очень близки друг к другу. А так как ассоциации состоят из молодых звёзд, возраст которых оценивается миллионами, а не миллиардами лет, то отсюда им был сделан вывод, что ассоциации и входящие в них звёзды образовались сравнительно недавно. Очевидно, должны существовать ассоциации, в которых образование целых групп звёзд продолжается и в нашу эпоху из какой-то, вероятно тёмной, материи, занимающей в эпоху образования ассоциации сравнительно небольшой объём.

К такому же выводу о различном возрасте звёзд Галактики и о рождении звёзд в настоящее время независимо пришёл Б. В. Кукаркин в 1944 г.

Работы Б. В. Кукаркина и В. А. Амбарцумяна нанесли сокрушительный удар буржуазным идеалистам, пытающимся доказывать одновременное происхождение всех звёзд, и воочию показали тот великий круговорот материи, который вечно совершается во вселенной.

### III. ТУМАННОСТИ

**§ 328. Два класса туманностей.** В слабые телескопы многие звёздные скопления имеют вид туманных пятен, но существует также много туманностей, которые не разделяются на звёзды при наблюдении даже в сильнейшие инструменты. Исследование их было начато в конце XVIII в. Громадные успехи в этой области были достигнуты с применением фотографии, которая при изучении этих слабо светящихся объектов даёт несравненно больше, чем визуальные наблюдения.

Туманности разделяются на два класса: 1) *галактические* и 2) *внегалактические*. Различие между этими двумя классами у туманностей огромно: они имеют совершенно различную природу.

**§ 329. Галактические туманности.** Наиболее яркие туманности этого класса дают спектр светящихся газов — ряд *светлых* линий, принадлежащих водороду, гелию, азоту и ещё одному газу, спектр которого в земных лабораториях долгое время не удавалось получить

Он был назван *небулием* (от слова *nebula* — туманность). Недавно было доказано, что небулий не что иное, как смесь кислорода и азота, находящихся в крайне разрежённом и высоко ионизованном состоянии.

В этом классе туманностей различают три подразделения:

а) Неправильные туманности — массы слабо светящихся газов и пыли самой разнообразной формы, без резких границ (рис. 139).

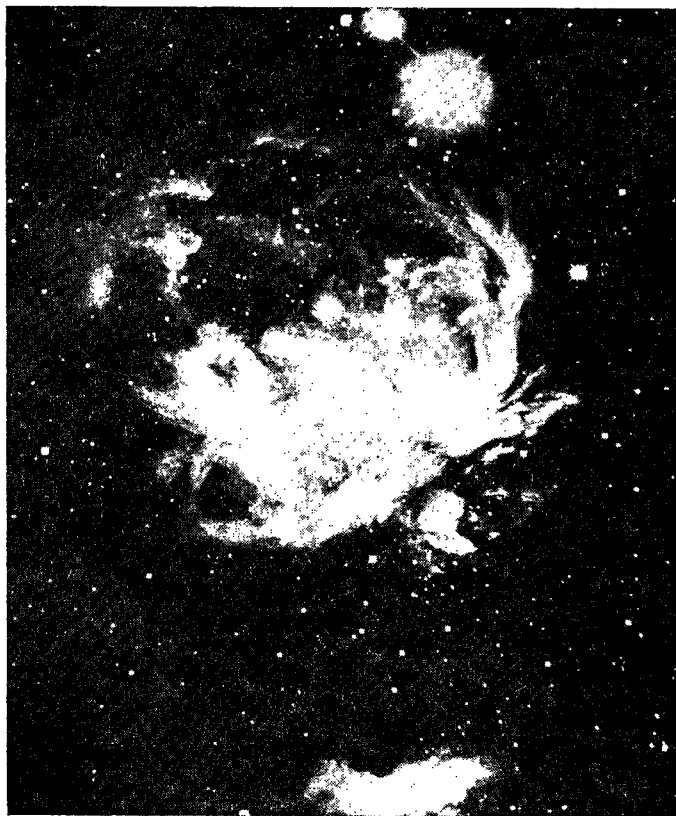


Рис. 139.

*Размеры* их такого же порядка, как звёздные расстояния, т. е. измеряются десятками световых лет; *плотности* крайне мала, несравненно меньше плотности воздуха в самом совершенном «вакууме» наших лабораторий. Светлая туманность часто бывает окружена почти беззвёздным пространством; это значит, что крайние части туманности — *тёмные* и заслоняют собой звёзды, находящиеся за ними.

подобно клубам дыма. Туманности эти находятся внутри Галактики на таких же расстояниях, как звёзды. Самая известная из них — туманность Ориона, легко видимая в бинокль (см. рис. 139). Она несомненно связана с главными звёздами этого созвездия; её расстояние от нас около 200 парсеков.

Амбарцумян и Горделадзе показали, что свечение туманностей происходит от их *освещения* ближайшими *звёздами*. Если звезда, освещающая туманность, принадлежит к самым горячим спектральным классам В0 или О, то свет такой звезды, богатый фиолетовыми и ультрафиолетовыми лучами, вызывает в газах туманности сравнительно яркое свечение, своего рода *люминесценцию* — явление, хорошо известное в земных лабораториях. Возможно также, что свечение туманности вызывается бомбардировкой газов электронами, выбрасываемыми звездой.



Рис. 140.

Если же близ туманности находится звезда более низкой температуры (классов В, А, иногда и более холодная), то такая звезда просто *освещает* массу туманности. В этом случае туманность будет светить отражённым светом и покажет *непрерывный* спектр, такой же, как у звезды, но крайне слабый.

Этим объясняется давно замеченный факт, что звёзды класса В и туманности на небе постоянно встречаются вместе (как, например, в Орионе и Плеядах). Близость эта может быть случайной. Но если близ туманности нет достаточно горячей звезды, то и туманность не будет видна; её можно будет обнаружить только по поглощению ею света в виде *тёмной* туманности, или «угольного мешка» на фоне Млечного Пути (рис. 137).

б) Планетарные туманности имеют гораздо меньшие размеры. В слабые инструменты они имеют вид круглых или сплюснутых слабо светящихся дисков, похожих на планетные, от нескольких секунд до нескольких минут в диаметре. В центре туманности всегда видна слабая звёздочка, *ядро* туманности, имеющая спектр класса О, реже спектр звезды типа Вольфа-Райе. Иногда края туманного диска светят гораздо ярче его середины и туманность кажется *кольцеобразной* (туманность в созвездии Лиры, рис. 140). В действительности же это не кольцо, а шар или эллипсоид из прозрачного светящегося вещества, более разреженный внутри.

Спектры этих туманностей линейчатые, как у предыдущего типа. Проф. Б. А. Воронцов-Вельяминов показал, что смещения спектраль-

ных линий у некоторых из них объясняются тем, что газообразные оболочки туманностей непрерывно *расширяются*, удаляясь во все стороны от центрального ядра. Диаметры туманностей, таким образом, всё время увеличиваются на десятки километров в секунду. Это явление связывает их с *новыми* звёздами (§ 312), у которых тоже наблюдается непрерывное удаление изверженных газовых масс; следовательно, планетарные туманности должны считаться сравнительно кратковременными образованиями.

Ядра планетарных туманностей являются, повидному, чрезвычайно плотными звёздами — голубовато-белыми карликами весьма высокой температуры и того же типа, в какой превращаются «новые звёзды» после окончания их вспышки.

Диаметры туманных оболочек в сотни и тысячи раз больше диаметра планетной системы.

в) Глобулы (т. е. «шарики») были открыты только в 1946 г. на фотоснимках *светлых* туманностей в виде тёмных кругловатых пятнышек. Они являются *тёмными* туманностями размером лишь в несколько тысяч астрономических единиц. Это — огромные почти совершенно непрозрачные пылевые и газовые шары. Возможно, что это *зарождающиеся* звёзды. Изучение их только начинается.

Все газовые туманности сосредоточены в Млечном Пути и входят в состав Галактики, поэтому их и называют *галактическими* туманностями. Число известных туманностей этого класса далеко не достигает тысячи и за последние годы не увеличилось.

**§ 330. Внегалактические туманности.** Все туманности этого класса дают *спектр поглощения*, как звёзды. Они несравненно многочисленнее газовых туманностей. Гигантским рефлектором нашего времени доступны (фотографически) миллионы туманностей и с применением более сильных инструментов число их быстро увеличивается. Подобно звёздам (§ 286), туманностей этого класса тем больше, чем слабее их интегральный блеск. Но в отличие от звёзд знаменатель прогрессии числа туманностей не обнаруживает даже для самых слабых объектов никаких признаков уменьшения. Есть области неба, в которых на площади, равной диску полной Луны, фотографии показывают до 500 крошечных туманностей — больше, чем звёзд.

а) Спиральные туманности. В конце XVIII и первой половине XIX в. у некоторых туманностей было замечено спиральное строение. Научное изучение таких туманностей началось только с применением фотографии. Оказалось, что спиральные туманности составляют примерно половину всех туманностей со звёздным спектром. Самая большая из них, туманность Андромеды (обозначаемая M 31), легко видна простым глазом, но её спиральное строение заметно только на фотографических снимках (рис. 141). Другая значительная спиральная туманность видна в созвездии Гончих Псов (рис. 142).

Спиральные туманности состоят из более яркого центрального сгущения, или ядра, из двух диаметрально противоположных точек которого выходят две ветви, состоящие из колоссального количества



Рис. 141.

звёзд. Ветви эти закручиваются по одному и тому же направлению и отходят всё дальше от ядра, до самого конца не встречаясь одна с другой. Непрерывный спектр этих туманностей давно уже показал, что они состоят не из газа, но разложить их на звёзды удалось только в 1925 г.



Ядра туманностей вращаются, и спиральные ветви также находятся в движении, но направление этих движений ещё не определено с полной уверенностью.

Замечательную особенность спиральных туманностей представляет частое появление в них «новых» звёзд. В одной лишь туманности Андромеды открывают ежегодно до 30 «новых», большей частью слабых, от 16 до 18-й величины, но одна из них, вспыхнувшая в 1885 г., была 7-й величины. Это наиболее известный случай появления так называемой «сверхновой звезды» (§ 312).

Ещё интереснее обнаруженные в спектрах спиральных туманностей *смещения спектральных линий*. Эти смещения чрезвычайно велики, гораздо больше, чем у каких бы то ни было других объектов, и обнаруживают следующие закономерности: 1) смещения к *фиолетовому* концу сравнительно невелики и наблюдаются только у самых ярких (т. е. самых близких) туманностей; 2) у подавляющего большинства туманностей найдены смещения линий к *красному* концу; это смещение тем больше, чем слабее туманность (т. е. чем она дальше).

Причина этого «красного смещения» линий туманностей пока ещё не совсем ясна. Если объяснять его, как для остальных небесных тел, движением по лучу зрения, то мы приходим к странному выводу, что спиральные туманности удаляются от нашей системы во все стороны: притом чем слабее туманность (т. е. чем она дальше), тем быстрее она удаляется. Скорость удаления пропорциональна расстоянию: на каждый миллион парсеков расстояния она увеличивается на  $560 \text{ км/сек}$ . Поэтому у наиболее далёких туманностей она превышает  $40\,000 \text{ км/сек}$ . Две ближайшие к нам туманности в Андромеде и в созвездии Треугольника, впрочем, не удаляются, а приближаются со скоростью  $300 \text{ км/сек}$ , но их приближение объясняется движением нашей солнечной системы во встречном направлении к созвездию Цефея (§ 322).

Спиральные туманности вовсе не встречаются в Млечном Пути, а чем дальше от Млечного Пути, тем число их больше. Это только подтверждает заключение, что они не принадлежат к системе Млеч-



Рис. 142.

ного Пути, а находятся далеко за пределами «галактической» системы. Поэтому их называют *внегалактическими* туманностями. Видеть их в галактической плоскости мешает тот же слой поглощающей материи, который скрывает от нас и шаровые скопления, близкие к этой плоскости.

Уже давно высказывалась мысль, что внегалактические туманности являются звёздными системами, похожими на систему нашего Млечного Пути, и поэтому их стали называть галактиками. Но это было доказано только в 1925 г., когда с помощью 100-дюймового рефлектора удалось разложить спиральные ветви (но не ядро) туманностей в Андромеде и в Треугольнике на тысячи слабых звёзд. Среди этих звёзд многие оказались переменными, именно цефеидами. По их видимому блеску сейчас же было получено расстояние туманностей тем же способом, как и для шаровых скоплений (§ 326). Для обеих туманностей расстояние оказалось почти одинаковым, около 205 000 парсеков или 700 000 световых лет. Такое же расстояние получилось по «новым» звёздам, появлявшимся в туманностях (при допущении, что их средняя светимость та же, что и в Млечном Пути). Диаметр туманности Андромеды получился сначала около 14 000 парсеков. Но впоследствии выяснилось, что если исследовать снимок туманности с помощью микрофотометра (§ 201), то её изображение оказывается значительно больше, и диаметр туманности выходит от 20 до 30 тысяч парсеков, т. е. почти до 100 000 световых лет.

Вокруг туманности Андромеды и внутри неё было открыто свыше сотни круглых пятнышек, которые окружают ядро этой звёздной системы, подобно тому как шаровые скопления окружают ядро нашей Галактики. Очень вероятно, что это — действительно шаровые скопления, но только их размеры и блеск меньше, чем у шаровых скоплений нашей звёздной системы.

В 1944 г. с помощью фотографии было разложено на звёзды центральное ядро туманности Андромеды (М 31), а также два её «спутника» (рис. 141; более яркий из них обозначается М 32). На фотоснимках *в красных лучах* в этих «туманностях» было обнаружено множество красных звёзд-гигантов и короткопериодических цефеид.

б) Остальные типы внегалактических туманностей. Фотографии, полученные с помощью гигантских рефлекторов, показали, что далеко не все внегалактические туманности имеют спиральную форму. Кроме спиральных туманностей, встречаются ещё туманности: 1) шаровые, 2) эллиптические, 3) веретенообразные (в действительности, очевидно, дискообразные, видимые с ребра) и 4) неправильные (рис. 143, 144). Все они имеют все признаки спиральных туманностей (тот же спектр, такое же распределение по небу, такие же громадные лучевые скорости) и отличаются только отсутствием спиральной структуры.

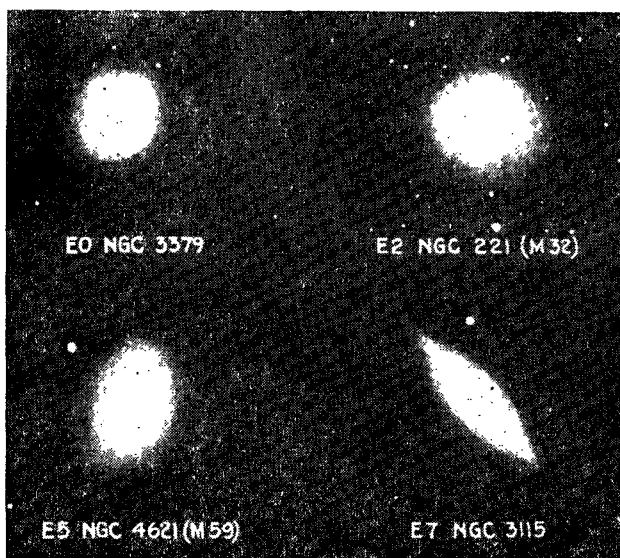


Рис. 143.

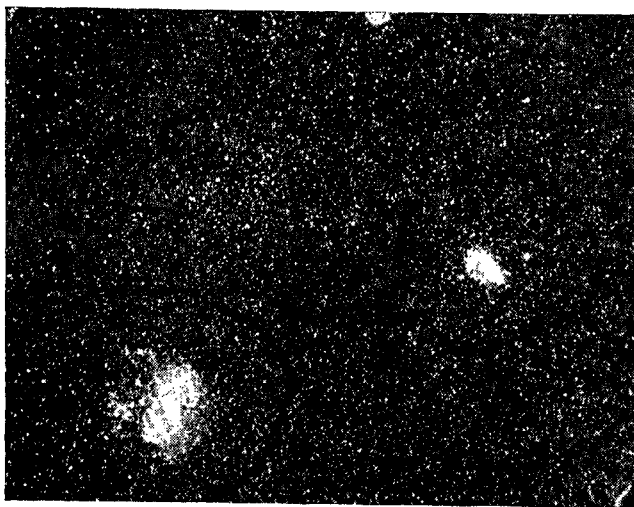


Рис. 144.

К числу сравнительно редко встречающихся *неправильных* внегалактических туманностей принадлежат две самые яркие туманности всего неба, — так называемые *Магеллановы Облака*, видимые в южном

полушарии (рис. 144). Они кажутся «оторванными» частями Млечного Пути, видны простым глазом даже при Луне и имеют диаметры: большее — около  $7^\circ$ , меньшее — около  $4^\circ$ . На фотографиях они представляют собрание сотен тысяч слабых звёзд и множества звёздных скоплений и газовых туманностей. По многочисленным цефеидам, найденным в облаках, было вычислено, что оба облака находятся почти на одинаковом расстоянии от нас, около 25 000 парсеков (80 000 световых лет). Таким образом, Магеллановы Облака — *ближайшие* к нам звёздные системы (галактики). Диаметр Большого Облака — свыше 2400 парсеков, Малого — 1800.

**§ 331. Метагалактика.** Фотографии с гигантскими рефлекторами XX века ставят на очередь вопрос об изучении системы, членами которой являются «галактики» и в которой наша Галактика занимает примерно такое же место, какое в ней самой занимает солнечная система.

Каждая звёздная система этой сверхсистемы галактик представляет собой «остров» в океане мирового пространства. Диаметры галактик колеблются от 1 до 100 000 световых лет, каждая содержит сотни миллионов или миллиардов солнц. Расстояния между галактиками в среднем составляют около 1 млн. световых лет. Самые далёкие звёздные системы, доступные 100-дюймовому рефлектору, находятся на расстоянии свыше 400 млн. световых лет. На фотографических снимках они имеют вид пятнышек, почти не отличимых от звёзд 21-й величины.

Внутри сферы диаметром в 1 млрд. световых лет их открыто свыше 100 миллионов. Эту совокупность галактик, или «звёздных островов», называют *метагалактикой*.

Метагалактика не вполне однородна. Составляющие её «звёздные острова» во многих местах располагаются группами, образуют скопления галактик, похожие на рассеянные звёздные скопления, но несравненно больших размеров; их называют *сверхгалактиками* (рис. 145). Одно из самых близких скоплений находится в созвездиях Волос Вероники и Девы и известно уже давно. Оно состоит по меньшей мере из 300 туманностей с интегральным блеском от 8-й до 15-й звёздной величины, имеет в диаметре около 2 млн. световых лет и находится от нас на расстоянии 10 млн. световых лет. Внутри четырёхугольника Большой Медведицы открыто скопление диаметром меньше  $1\frac{1}{4}^\circ$ , содержащее около 60 туманностей. Истинный диаметр скопления не превышает 500 000 световых лет, а расстояние должно составлять около 100 млн. световых лет.

Наша Галактика, или звёздная система Млечного Пути, также является членом одного из таких *местных скоплений* галактик. По последним данным в наше местное скопление входят, кроме семи галактик, упомянутых в предыдущем параграфе (перечислите их!), ещё 6 менее известных. Самая маленькая из них имеет диаметр 290 парсеков; наибольшими считаются галактика в Андромеде и наша

Галактика (диаметр 26 000 парсеков), но размеры Галактики определяются с меньшей точностью (почему?).

Метагалактика представляет величайшую матерпальную систему, какая только нам известна в настоящее время. Наши сильнейшие астрономические инструменты далеко ещё не достигли её границ, и



Рис. 145.

возможно, что границ этих и не существует. Но если бы метагалактика даже и оказалась конечной, то это несколько бы не доказывало конечности вселенной.

Та «сверхсистема», которая нам пока кажется единственной, является лишь одной из бесчисленных метагалактик, состоящих из галактик, или «звёздных островов», подобно тому, как наш Млечный Путь есть одна из звёздных систем метагалактики.

Замечательную особенность метагалактики представляет *красное смещение* линий в спектрах галактик (§ 330). Основываясь на нём, некоторые западноевропейские «теоретики» развили идеалистическую схему «разбухания пространства», или «конечной расширяющейся вселенной». Одним из следствий этой схемы является вывод, что всего 2 млрд. лет назад «радиус вселенной» был равен нулю, вся материя вселенной была сконцентрирована в одной точке, и из

этой точки каким-то сверхъестественным способом образовалось всё многообразие природы. Так как такое «начальное состояние» вселенной ничем не отличается от «сотворения мира из ничего», то понятно, что «теория» расширяющейся вселенной встретила горячее сочувствие со стороны церковников.

Но и помимо этих абсурдных выводов, «теория» расширяющейся вселенной не выдерживает критики. Она наделяет бесконечное свойствами конечного, произвольно обобщает и развивает и без того абстрактные и ещё недоказанные положения общей теории относительности и т. д. Поэтому она является лишь одним из наиболее показательных примеров глубокого кризиса, переживаемого наукой и культурой капиталистических стран.

В своём выступлении на философской дискуссии (по книге Г. Ф. Александрова) 23 июня 1947 г. А. А. Жданов сказал:

«Современная буржуазная наука снабжает поповщину, фидеизм новой аргументацией, которую необходимо беспощадно разоблачать... Не понимая диалектического хода познания, соотношения абсолютной и относительной истины, многие последователи Эйнштейна, перенося результаты исследования законов движения конечной, ограниченной области вселенной на всю бесконечную вселенную, договариваются до конечности мира, до ограниченности его во времени и пространстве, а астроном Милл даже «подсчитал», что мир создан 2 миллиарда лет тому назад. К этим английским учёным применимы, пожалуй, слова их великого соотечественника, философа Бэкона о том, что они обращают бессилие своей науки в клевету против природы».

Причина «красного смещения» пока ещё не совсем ясна, но несомненно, что для него будет найдено вполне материалистическое объяснение. Возможно, что здесь мы впервые встречаемся с каким-то новым законом природы, который оставался до сих пор неизвестным потому, что он проявляется только при очень больших расстояниях.

Возможно и более простое объяснение: это какое-то местное явление в нашей части метagalктики в нашу эпоху, вызванное распределением *относительных* скоростей ближайших к нам галактик (орбиты которых, как и орбита нашей Галактики, нам пока совершенно неизвестны). В другой области метagalктики и в другую эпоху может наблюдаться совсем другое распределение лучевых скоростей.

#### IV. СТРОЕНИЕ ЗВЁЗДНОГО МИРА

**§ 332. Исследования звёздной системы.** Из исследований над распределением звёзд в пространстве получаются следующие выводы:

1. По мере удаления от нашей солнечной системы *звёздная плотность* (т. е. число звёзд внутри определённой единицы объёма) постепенно *убывает* и на некотором конечном расстоянии обращается в нуль. Это значит, что звёзды, которые мы видим как отдельные точки, принадлежат к *единой конечной системе*. Система эта и есть

система Млечного Пути, или Галактика. Она имеет громадные, но измеримые, а не бесконечно большие размеры. Иногда это выражают так: звёздная система есть «остров» в беспредельном мировом пространстве.

Доказать это можно следующим образом. Предположим, что звёзды равномерно распределены в пространстве и имеют одинаковую среднюю светимость. Пусть «нормальная» звезда с расстояния  $r$  кажется нам величины  $m$ . Тогда все те звёзды, которые имеют для нас величину  $m$  и ярче (число их  $N_m$ ), будут находиться внутри шара, описанного около Солнца радиусом  $r$ . Подобным же образом все звёзды до величины  $m+1$  включительно находятся внутри шара радиуса  $R$ ; число их назовём  $N_{m+1}$ . При равномерном распределении звёзд эти числа должны относиться как объёмы шаров, т. е.

$$f = \frac{N_{m+1}}{N_m} = \frac{R^3}{r^3}. \quad (7)$$

Но видимый блеск звёзд обратно пропорционален квадратам расстояний, а звезда величины  $m$  ярче звезды величины  $m+1$  в 2,512 раза (§ 281):

$$\frac{I_m}{I_{m+1}} = \frac{R^2}{r^2} = 2,512. \quad (8)$$

Определяя  $\frac{R}{r}$  из (8) и вставляя в (7), получим:

$$f = \frac{N_{m+1}}{N_m} = \sqrt[3]{2,512^3} = 3,98. \quad (9)$$

Таким образом, при равномерном распределении звёзд в бесконечном пространстве отношение  $f$  для всех величин должно оставаться постоянным числом, близким к 4. Между тем в действительности, даже в начале,  $f < 3$ , убывает с ослаблением блеска звёзд, а начиная с 18-й величины  $f < 2$ , т. е. число звёзд следующей величины уже меньше числа звёзд всех предыдущих величин, а не больше, и ряд начинает «сходиться».

2. По мере приближения к плоскости Млечного Пути *видимое число звёзд* (особенно слабых) быстро *увеличивается*. Это явление так называемой *галактической концентрации* видно из следующей таблички, в которой приведено среднее число звёзд на 100 квадратных градусов в плоскости Млечного Пути (галактическая широта  $b=0^\circ$ ) и у его полюсов ( $b=90^\circ$ ).

|                | $m$  | $0^\circ$ | $90^\circ$ | Отношение |
|----------------|------|-----------|------------|-----------|
| Число звёзд до | 7,0  | 36        | 10         | 3,6       |
| » » »          | 9,0  | 280       | 72         | 3,9       |
| » » »          | 11,0 | 2 080     | 450        | 4,8       |
| » » »          | 13,0 | 14 600    | 2 140      | 6,8       |
| » » »          | 16,0 | 91 000    | 8 700      | 10,4      |
| » » »          | 17,0 | 478 000   | 28 800     | 16,6      |
| » » »          | 19,0 | 2 075 000 | 77 000     | 27,0      |

Следовательно, плоскость Млечного Пути есть основная плоскость звёздной системы, а сама система имеет сплюснутую структуру.

**§ 333. Трудность изучения Галактики.** Так как мы находимся внутри звёздной системы Млечного Пути, то нам гораздо труднее понять её строение, чем строение отдалённой галактики, на которую мы смотрим извне. Оценки расстояний слабых звёзд по их видимому блеску должны быть основательно пересмотрены вследствие открытия поглощения света тёмной материей, рассеянной в межзвёздном пространстве, поэтому потеряло ценность и большинство выводов, основанных на подсчётах звёзд разных величин и изучении их видимого распределения по небу.

Например, самым ярким местом северной половины Млечного Пути является «звёздное облако» в созвездии Лебедя (§ 324). Поэтому, когда была высказана гипотеза о спиральной структуре Галактики, сначала предположили, что ядром системы является это «звёздное облако». На самом же деле это «облако» — кажущееся, и ничего общего с ядром Галактики не имеет. Ядро Галактики (её центральное сгущение) находится в направлении созвездия Стрельца, и половина ядра расположена как раз в наиболее бедной звёздами части Млечного Пути, в «тёмном промежутке» между двумя его ветвями (см. § 324). В этом направлении межзвёздное поглощение так сильно, что, по словам акад. В. Г. Фесенкова, «если бы удалось устранить эту рассеянную материю, то поверхностная яркость Млечного Пути увеличилась бы не менее чем в 1000 раз».

В настоящее время мы располагаем, кроме статистического, ещё *динамическим* способом исследования звёздной системы. Он основан на изучении звёздных движений, и поглощение света на его результаты не влияет (см. § 334).

**§ 334. Теория галактического вращения Оорта.** Звёздная система настолько сложна, что мы не в состоянии вывести законов движения каждого отдельного её члена, как это сделано, например, для планетной системы. В настоящее время мы можем изучать лишь средние или «нормальные» движения звёзд для данной области системы. Такие движения проще всего представляет теория галактического вращения, разработанная голландским астрономом Оортом (1927 г.).

По этой теории вся система Млечного Пути вращается в галактической плоскости около центрального сгущения. Это сгущение имеет настолько значительную массу, что в каждой точке системы сила притяжения к центру Галактики (по закону Ньютона) является главной силой. Кроме неё, на данную звезду действует ещё сила притяжения всего комплекса звёзд системы. Если система имеет форму, близкую к эллипсоиду вращения, то эта вторая сила, как известно из механики, также будет направлена приблизительно к центру системы. Силы же взаимного притяжения отдельных звёзд ничтожны.

Если бы из двух центральных сил существовала только вторая, то система вращалась бы как твёрдое тело, линейные скорости её точек возрастали бы пропорционально расстоянию от центра. Но ньютоновское притяжение перевешивает и получается обратное: линейные



скорости точек системы убывают с увеличением расстояния от центра, но не пропорционально квадрату расстояния, а в несколько меньшей степени.

Если бы нам была известна масса всей системы и её центрального ядра, то мы могли бы подсчитать линейную скорость вращательного движения на данном расстоянии от центра. Но это была бы не фактическая скорость звезды, находящейся в данной точке, а лишь *средняя* скорость некоторого «роя», группы звёзд, находящихся вблизи этой точки. Внутри роя каждая звезда имеет ещё свою индивидуальную скорость. Например, скорость Солнца (20 км/сек к созвездию Геркулеса; § 317) есть только его скорость относительно ближайших звёзд, т. е. индивидуальное отклонение его скорости от той, с которой вся «солнечная группа» звёзд обращается около очень далёкого центра.

Чтобы обнаружить это обращение, надо исследовать средние лучевые скорости далёких звёзд, например белых гигантов класса В. Они находятся в среднем на других расстояниях от центра Галактики, чем Солнце, и скорость их обращения поэтому будет другая. Оорт показал, что влияние этого «дифференциального вращения» на наблюдаемую лучевую скорость звезды  $v_r$  должно изменяться с галактической долготой звезды  $l$  по простому закону, именно:

$$v_r = Ar \sin 2(l - l_0), \quad (10)$$

где  $r$  есть среднее расстояние группы звёзд от Солнца,  $l_0$  — долгота центра вращения,  $A$  — постоянное. Из этого уравнения можно вывести направление  $l_0$ , по которому лежит центр вращения, если удастся измерить в лучевых скоростях данной группы звёзд «вращательный член»  $v_r$  ( $l$  и  $r$  известны).

В самом деле, при обращении звёзд  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_8$  и Солнца ( $S$ ) около центра Галактики ( $l_0$ , рис. 146), звёзды  $E_1, E_3, E_5, E_7$  будут иметь лучевую скорость относительно Солнца ( $S$ ), равную нулю. Звёзды  $E_2$  и  $E_6$  будут удаляться от Солнца и в их спектрах появится смещение линий к красному концу. Звёзды  $E_4$  и  $E_8$  будут приближаться к Солнцу; следовательно, в их спектрах появится смещение к фиолетовому концу.

Теоретические выводы Оорта были подтверждены наблюдениями. Замечательно, что для направления к центру вращения получилась галактическая долгота  $l_0 = 330^\circ$ , т. е. то же направление к созвездию Стрельца, которое раньше получено было для центра Галактики другими способами (§ 326). Оказалось, что «вращательный член» можно обнаружить и в лучевых скоростях масс космического межзвёздного кальция (§ 323). При этом и скорости вращения и положение центра получаются теми же, что и по лучевым скоростям звёзд. Таким образом, звёздная система вращается вместе со всем облаком разреженной материи, которое её охватывает и заполняет.

Чтобы определить скорость, с которой обращаются около галактического центра звёзды, окружающие Солнце, Оорт для простоты предположил, что система шаровых скоплений, окружающая ядро Галак-

тики, почти неподвижна в пространстве. Как мы уже видели (§ 322), при этом допущении выходит, что наше Солнце движется со скоростью  $286 \text{ км/сек}$  к точке в созвездии Цефея: галактическая долгота этого направления получается около  $60^\circ$ , т. е. как раз под прямым углом к линии, проведённой к центру вращения. Так и должно быть: скорость обращения по кругу перпендикулярна к радиусу. Зная скорость обращения Солнца, можно приблизительно рассчитать расстояние до галактического центра и период обращения Солнца.

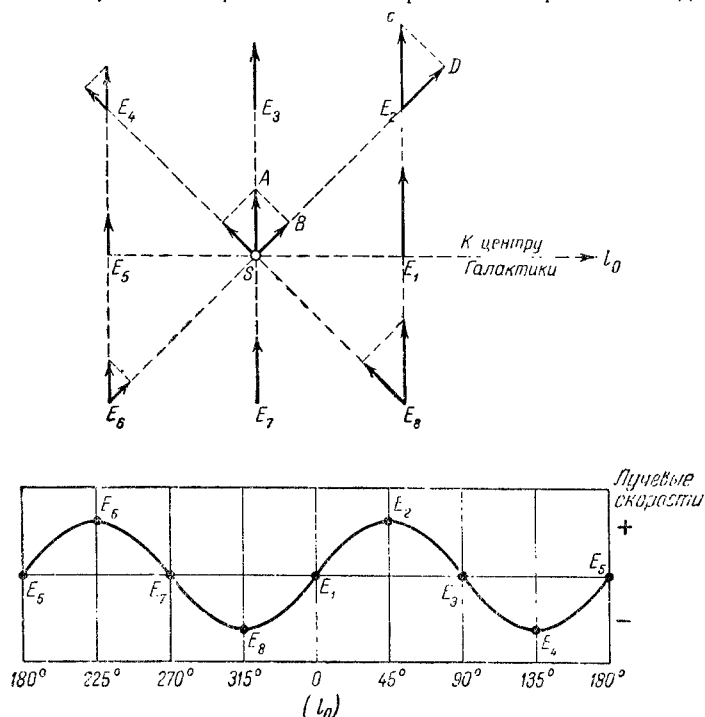


Рис. 146.

тического центра и период обращения Солнца. Для этих величин, вычисленных П. П. Паренаго, получились значения около 7200 парсек и 185 миллионов лет. Диаметр Галактики оказался близким к диаметру туманности Андромеды, т. е. 26 000 парсек.

Вращение звёздной системы происходит по направлению движения часовой стрелки (для наблюдателя в северном полушарии).

Движение остальных звёзд, которые мы считаем быстрыми, объясняется теорией Оорта аналогично движению шаровых скоплений. Эти «быстрые» звёзды на самом деле (т. е. относительно центра Галактики) движутся сравнительно *медленно*. Поэтому в движении нашей звёздной группы к созвездию Цефея мы эти медленные звёзды обго-

нием с громадной относительной скоростью, а нам кажется, что, наоборот, они очень быстро движутся к противоположной точке Млечного Пути (созвездие Кормы). Возможно, что малая скорость этих звёзд в нашу эпоху объясняется тем, что они не обращаются, как большинство остальных звёзд, по орбитам, близким к кругу, а описывают вокруг галактического центра очень вытянутые эллипсы, «афелии» которых расположены в близкой к нам области звёздного мира. Этим и объясняется их медленное движение (вспомним, что по закону площадей скорость в «афелии» — наименьшая).

Нечто подобное можно найти и в нашей планетной системе. Для воображаемого наблюдателя, находящегося на одной из малых планет «тройной» группы (§ 249, б), остальные планеты той же группы будут почти неподвижными, так как они все имеют почти одинаковое движение вокруг Солнца. Если же внутри группы между планетами-тройняцами окажутся ещё некоторые из комет семейства Юпитера (§ 260), то эти последние в момент встречи с ними будут находиться близ своего афелия и будут, следовательно, двигаться с малыми скоростями относительно Солнца. Поэтому для наблюдателя на планете-тройнице эти кометы покажутся быстро движущимися светилами и будут проходить через группу планет со скоростями, почти равными скорости самой группы, но только во встречном направлении.

Явление звёздных потоков также объясняется теорией вращения Галактики. Одним из математических следствий вращения под действием центральной силы является «эллипсоидальное» распределение звёздных скоростей, причём наибольшая ось эллипсоида (т. е. линия вертексов) должна быть направлена к центру вращения. Это тоже подтверждается наблюдениями: галактическая долгота одного из истинных вертексов (§ 325) мало разнится от долготы центра системы.

Для размеров Галактики советскими исследователями, главным образом П. П. Паренаго (удостоенного премии им. Ф. А. Бредихина за глубокое изучение строения Галактики), Б. В. Кукаркиным и К. Ф. Огородниковым получены следующие круглые числа:

|                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Расстояние Солнца от центра . . . . . | $R = 7\,200$ парсеков    |
| Диаметр Галактики . . . . .           | $D = 26\,000$ парсеков   |
| Скорость Солнца . . . . .             | $V = 233$ км/сек         |
| Период обращения Солнца . . . . .     | $P = 185 \cdot 10^6$ лет |
| Масса системы (Солнце = 1) . . . . .  | $M = 165 \cdot 10^9$     |
| Число звёзд в Галактике . . . . .     | $n = 150 \cdot 10^9$     |

Таким образом, динамические размеры Галактики также довольно близки к размерам туманности Андромеды (§ 330).

**§ 335. Подсистемы, составляющие Галактику.** Теория Оорта даёт лишь общую упрощённую схему движения в Галактике, строение которой в действительности очень сложно. Московская школа

звёздной астрономии (П. П. Паренаго, Б. В. Кукаркин и их сотрудники) подчёркивает то обстоятельство, что галактическая система есть совокупность нескольких *подсистем* (Б. В. Кукаркин). Каждая подсистема состоит из объектов со *сходными физическими* характеристиками, причём члены разных подсистем перемешаны в пространстве. Каждая подсистема обладает своим определённым строением и определённым движением в пространстве. Например, долгопериодические цефеиды и звёзды типа В обладают большой степенью концентрации к галактической плоскости. Их скорость обращения вокруг центра Галактики на расстоянии Солнца (т. е. в нашей области звёздной системы) составляет около  $250 \text{ км/сек.}$  Между тем короткопериодические цефеиды и шаровые скопления распределены в доступной нам части пространства более равномерно и скорость их обращения в среднем вдвое меньше. Изучение всех подобных закономерностей должно пролить свет на происхождение и развитие звёздных систем.

Галактическое ядро. В 1948 г. советские астрономы В. Б. Никонов, А. А. Калиняк и В. И. Красовский, применив совершенно новый

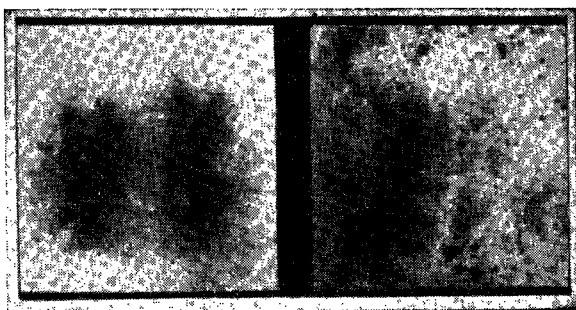


Рис. 147.

фотографический метод исследования, с помощью электронно-оптического преобразователя открыли галактическое ядро в той области неба, которая была указана теоретиками, именно в созвездии Стрельца (рис. 147, дано негативное изображение). На фотографии ясно выделилась область ядра Галактики, скрытая от нас тёмной пылевой материей. Другая половина ядра, как стало ясно из этих исследований, видна в созвездии Стрельца простым глазом в виде известного «звёздного облака в Стрельце» (правый снимок на рис. 147). Таким образом, от нас скрыта половина ядра, имеющего шаровидную или эллипсоидальную форму (левый снимок на рис. 147).

Видимый диаметр ядра около  $8^\circ$ , что соответствует линейным размерам порядка 1000 парсек. Измерение яркости неба в инфракрасных и красных лучах, которые слабее других лучей задерживаются кос-

мической пылью, обнаружило, что в этой области «яркость звёздного поля» заметно повышена. Это значит, что в ядре имеется (кроме звёзд других типов) громадное скопление красных звёзд-гигантов и сверхгигантов. На периферии ядра, где поглощение света меньше, обнаружено множество переменных звёзд, именно короткопериодических цефеид (около 400 на квадратный градус). Всё это типично для ядер спиральных туманностей типа туманности Андромеды. Расстояние до ядра составляет 7,2 килопарсека. Ныне считается общепризнанным, что наша Галактика относится к числу спиральных и по своей структуре напоминает галактику в Андромеде (М 31). По В. А. Амбарцумяну наше Солнце расположено между двумя соседними спиральными рукавами Галактики.

---

## ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

### ЭВОЛЮЦИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

**§ 336. Космология начала XVIII века.** В середине XVIII в. в науке окончательно утвердилась система мира, основанная на законе тяготения, а взгляды древних на строение вселенной были признаны ошибочными. Ньютон говорил о небесных телах: «по законам тяготения они *продолжают* оставаться на своих орбитах, но получить первоначальное расположение орбит лишь по этим законам они совершенно не могли. Такое изысканейшее соединение Солнца, планет и комет не могло произойти иначе, как по намерению и по власти могущественного и премудрого существа».

Другие мыслители того времени, не бывшие такими церковниками, как Ньютон, просто даже и не ставили вопроса о происхождении мировых тел. Так произошла, говоря словами Энгельса: «выработка своеобразного общего мировоззрения, центром которого является представление *об абсолютной неизменяемости природы*» (Диалектика природы, стр. 8, изд. 1948 г.). В противоположность этому древнегреческие философы-материалисты высказывали совершенно определённые мысли о возможности эволюции, об образовании вселенной в её современной форме из некоторого простейшего состояния, но эти идеи были забыты в мрачную пору средневековья.

**§ 337. Гипотеза Канта.** «Первая брешь в этом окаменелом воззрении на природу была пробита не естествоиспытателем, а философом. В 1755 г. появилась «Всеобщая естественная история и теория неба» Канта. Вопрос о первом толчке был устранён; земля и вся солнечная система предстали как нечто *ставшее* во времени» (Энгельс, Диалектика природы, стр. 10). Подобно греческим мыслителям (на которых он и ссылается), Кант предполагает, что мировые тела образовались из некоторого простейшего состояния посредством действия причин или сил, присущих самой материи. Главной силой, действовавшей при образовании светил, является, по Канту, та же сила, которая управляет теперь их движениями, т.е. сила *всемирного тяготения*. Она собирает частицы, или пылинки, рассеянные вначале по всему пространству солнечной системы и имеющие самые разнообразные движения, и хаос «начинает формироваться в точках более сильного притяжения частиц».

Возникшие таким образом большие сгущения притягивают к себе меньшие и т. д. Но единого гигантского шара (как должно быть в действительности), по Канту, не получается, так как при чрезмерном сближении частиц начинают действовать отталкивательные силы (силы упругости). В результате их действия возникают кругообразные движения меньших масс около больших, вращение образовавшихся планет вокруг осей и т. п. Это рассуждение Канта ошибочно: по законам механики сумма вращательных движений в системе, не зависящей от других систем, не может измениться от взаимодействия членов системы. Таким образом космогоническая гипотеза Канта в настоящее время не имеет научного значения. Но эта его книга и сейчас представляет ценность по бодрой уверенности в «вечности природы» и пронизывающей её идее о саморазвитии миров без участия сверхъестественных сил. Последнее он выразил знаменитой формулой: «дайте мне материю и я построю из неё мир». Не следует, конечно, забывать, что в более поздних своих работах Кант предстаёт перед нами как реакционный философ-идеалист.

**§ 338. Идеи Гершеля об эволюции туманностей.** Разнообразие форм туманностей, которые Гершель мог рассмотреть в свои телескопы, привело его к следующим гипотезам: 1) туманности постепенно сгущаются в звёзды; 2) в настоящее время различные туманности находятся на разных ступенях сгущения.

Отсюда следует, что мы видим одновременно туманности всевозможного «возраста»; сопоставляя их между собой, мы можем представить себе эволюцию отдельной туманности. Гершель сравнивал мир туманностей с лесом, состоящим из деревьев одной породы, но разного возраста; достаточно пробыть в таком лесу самое короткое время, чтобы проследить по отдельным экземплярам всю жизнь дерева от прорастания до засыхания и падения.

Начальную стадию эволюции туманности представляют, по Гершелю, большие разрежённые туманные массы, равномерно светящиеся почти на всём своём протяжении. Дальше следуют туманности, содержащие отдельные сгущения, которые, быть может, впоследствии превратятся в звёзды. В туманностях, ещё более уплотнившихся, туманные массы перемешаны со звёздами. Последней стадией эволюции являются звёздные скопления, уже не содержащие туманного вещества.

Природа «туманностей» в действительности гораздо разнообразнее, чем думал Гершель, который не знал даже деления их на галактические и внегалактические; их изучение до сих пор не дало никаких указаний на то, что звёзды могли образоваться из разрежённых газовых туманностей. Поэтому нельзя считать все формы туманностей за ступени развития какого-то одного типа: «лес» Гершеля состоит из «растений разных пород». Тем не менее, мысль Гершеля, что *туманности* (но, конечно, не все) являются *материалом*, из которого образовались другие небесные тела, признаётся правильной и в настоящее время. Она лежит в основе большинства *космогонических* гипотез (т. е. гипотез об эволюции планетных и звёздных систем).

**§ 339. Гипотеза Лапласа.** В 1796 г. Лаплас в конце одной из своих популярных книг поместил «Примечание», в котором на немногих страницах, без математики, дан очерк возможного пути превращения туманного клубка в солнечную систему.

Под действием взаимного тяготения своих частиц газообразный туманный клубок должен принять шарообразную форму и сильно уплотниться к центру. Центральное сгущение Лаплас называет солнцем, более разрежённую внешнюю часть — «оболочкой», или «атмосферой»; атмосфера эта занимает вначале всё пространство нынешней планетной системы и имеет, как и центральное сгущение, очень *высокую температуру*. Благодаря силе, которая могла действовать, например, при отделении нашего комка от большой туманности (и которую Лаплас не рассматривает), вся шарообразная масса *вращается* вокруг оси. Вследствие охлаждения туманность сжимается, радиус её уменьшается, но общее «количество вращения» системы (т. е. сумма линейных скоростей частиц, умноженных на массы и на расстояния от оси вращения) по законам механики должно остаться неизменным; следовательно, скорость вращения увеличивается. С увеличением скорости возрастает и центробежная сила, под действием которой газовый шар принимает форму всё более сплюснутого сфероида, вращающегося около наименьшей оси. При дальнейшем ускорении вращения наступает момент, когда в точках, лежащих вдоль экватора туманности, величина центробежной силы сравняется с силой притяжения. Тогда внешние экваториальные частицы туманности «теряют вес» и отделяются в виде вращающегося тонкого «пояска» (зоны), а внутренняя часть продолжает сжиматься. После первого «пояска» отделяется второй, несколько меньшего радиуса, затем третий и т. д., так как скорость вращения туманности увеличивается; поэтому граница, на которой сила притяжения уравнивается центробежной силой, непрерывно приближается к центру (рис. 148). Отделение частиц на экваторе туманности не могло идти совершенно равномерно, могли оказаться пояски плотнее окружающих, они притянули к себе частицы как с внутренней, так и с внешней стороны, и так образовались постепенно мощные концентрические «лапласовские кольца» с громадными промежутками между ними. Каждое кольцо имело радиус, приблизительно равный радиусу орбиты одной из теперешних планет. Впоследствии кольцо разрывается, так как более плотные его части постепенно притягивают к себе менее плотные. Получается несколько отдельных туманных масс, обращающихся по одной и той же круговой орбите. Все эти массы благодаря взаимному притяжению с течением времени собираются в один комок, который продолжает двигаться вокруг Солнца на расстоянии, равном радиусу кольца. Так образуются планеты; первое время они находятся в газообразном состоянии, а затем постепенно остывают.

Образовавшиеся планетные комки должны были получить также и вращательное движение, происхождение которого Лаплас объясняет



следующим образом. Каждое кольцо вращалось после своего образования как твёрдое тело: угловая скорость всех его точек была одинакова, а линейная скорость тем больше, чем дальше точка находилась от оси вращения. Таким образом, внешние точки кольца имели несколько большую скорость, чем внутренние, более близкие к Солнцу. Это же осталось и после того, как кольцо (или часть его) сгустилось в планету: точка планетного клубка, наиболее удалённая от Солнца, стремилась двигаться быстрее, чем центр клубка, более близкая, наоборот, — медленнее. В результате планета получила такое вращательное

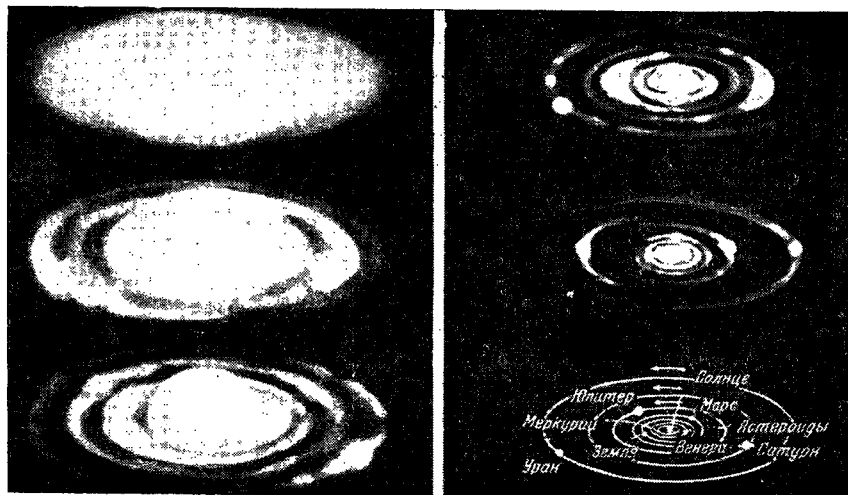


Рис. 148.

движение, при котором более далёкие точки уходят вперёд, а более близкие отстают. Очевидно, это вращение происходит в *прямом* направлении, т. е. в том же, в каком планета обращается около Солнца.

В тех случаях, когда вращение планетного клубка оказывалось достаточно быстрым, оно приводило опять к отделению колец, кружащихся вокруг планеты, и из них сформировались *спутники*. Их образование есть повторение в уменьшенном виде образования самой планеты. У планеты Сатурн (§ 253) одно из отделившихся колец оказалось таким однородным, что кольцо не разорвалось, и его затвердевшие частицы не сблизись в один комок.

**§ 340. Оценка гипотезы Лапласа.** Гипотеза Лапласа долгое время считалась почти доказанной. Действительно, ею объясняются все главнейшие особенности строения планетной системы, как, например: 1) близкая к кругам форма орбит; 2) движение всех планет приблизительно в одной плоскости; 3) движение всех планет вокруг Солнца в одном направлении; 4) вращение Солнца и планет вокруг осей в том

же направлении; 5) обращение большинства планетных спутников в том же направлении.

Но с течением времени против гипотезы Лапласа был выдвинут ряд возражений. Укажем некоторые из них.

1. Так как вещество планет, составляющее по массе меньше  $\frac{1}{700}$  массы Солнца, было рассеяно внутри объёма шара с радиусом, не меньшим расстояния Плутона, то плотность туманности получается в сотни миллионов раз меньше плотности земной атмосферы. При такой малой плотности притяжение между частицами раскалённого пара было ничтожным. Поэтому отделившиеся частицы не могли собраться в кольца.

2. Если бы кольцо даже образовалось, оно вряд ли могло бы сгуститься в одну планету, опять-таки вследствие незначительности взаимных притяжений между частицами.

3. По той же причине туманность не могла вращаться как твёрдое тело, а каждая её частица двигалась вокруг центрального сгущения под действием его притяжения как отдельная планетка, т. е. приблизительно по кеплеровым законам. Таким образом, чем дальше частица от центра, тем она движется медленнее (а не быстрее, как предполагал Лаплас). Отсюда следует, например, что его объяснение «прямых» вращений планет и спутников ошибочно.

4. Совершенно невозможно объяснить большое наклонение орбит Плутона и некоторых астероидов, близко подходящих к Земле.

5. Не объясняется обратное движение некоторых спутников планет-гигантов и быстрое обращение Фобоса около Марса.

Вследствие этих и других возражений гипотеза Лапласа в настоящее время считается устарелой. Однако и до сих пор продолжают попытки возродить эту гипотезу в различных видоизменениях.

**§ 341. Приливное трение.** Некоторые факты, противоречащие гипотезе Лапласа, становятся понятными, если учесть действие силы приливного трения. На существование этой силы указал ещё Кант, но её роль в космогонии была выяснена главным образом двумя учёными: Джорджем Дарвином (сыном знаменитого биолога Чарльза Дарвина) и выдающимся русским математиком А. М. Лянуновым.

Луна своим притяжением поднимает воду земных океанов в виде двух «приливных выступов» (§ 184). Вследствие вращения Земли приливные выступы всё время передвигаются вокруг Земли в направлении, противоположном направлению её вращения. Движение этой «приливной волны» сопровождается трением. Так как сила приливного трения всё время направлена навстречу суточному вращению Земли, то она является силой тормозящей, которая постепенно *замедляет вращение Земли* вокруг оси.

Таким образом, первым следствием приливного трения является *удлинение суток*. Это удлинение так незначительно, что до сих пор не обнаружено наблюдениями с полной достоверностью. Наиболее вероятная величина его — около  $\frac{1}{1000}$  секунды за сто лет.

Второе следствие приливного трения есть *удлинение месяца*, т. е. времени обращения Луны вокруг Земли. Оно объясняется на основании принципа неизменности количества вращения системы. Если скорость вращения Земли уменьшилась, то количество движения Луны по орбите должно увеличиться, так как общее количество вращения системы Земля—Луна не изменяется. Следовательно, увеличивается секторная скорость Луны, которая для орбит, близких к кругу, пропорциональна  $\sqrt{r}$ . Радиус лунной орбиты, таким образом, всё время растёт, а вместе с этим, по третьему закону Кеплера, удлиняется и время обращения вокруг Земли. В настоящую эпоху это удлинение месяца ещё менее заметно, чем удлинение суток. Но в течение миллионов лет действие обоих факторов должно было произвести в нашей системе громадные изменения.

**§ 342. Происхождение Луны и приливная эволюция.** Считая, что приливное трение действовало в прошлом в течение огромного промежутка времени, Д. Дарвин, основываясь на исследованиях А. М. Ляпунова и А. Пуанкаре, разработал теорию происхождения Луны и «приливной эволюции» системы Земля—Луна.

Луна, как исключительно крупный спутник, должна была образоваться иным путём, чем спутники остальных планет. Некогда Земля и Луна составляли одну массу, по всей вероятности, огненно-жидкую. Эта масса вследствие взаимного тяготения своих частиц и вращения вокруг оси имела форму сплюснутого сфероида; благодаря охлаждению и сжатию вращение жидкой массы ускорялось.

Исследования А. М. Ляпунова показали, что форма эллипсоида, вращающегося ускоренно, изменялась следующим образом: эллипсоид вращения превратился постепенно в трёхосный эллипсоид, вращающийся около наименьшей оси, а затем в грушевидное тело (рис. 149), так называемый «аннионд». Ляпунов впервые строго доказал, что эта форма неустойчива; достаточно было сравнительно небольшой внешней силы, чтобы она разорвалась. Такой силой было приливообразующее действие Солнца, периодически поднимавшее на каждой половине аннионда приливные выступы.

Так как скорость вращения аннионда увеличивалась, то центробежная сила непрерывно возрастала. Когда период вращения аннионда уменьшился до  $1\frac{1}{2}$ —2 часов, центробежная сила достигла такого значения, что, в соединении с приливообразующей силой Солнца, разорвала аннионд на два неравных шара; из большего шара образовалась Земля, из меньшего—Луна. Это произошло около 4 миллиардов лет назад.

Первое время после разрыва Земля и Луна почти соприкасались (начальное состояние приливной эволюции), находясь друг от друга, как показал Дарвин, на расстоянии около 15 000 км. Земля своим притяжением вызывала приливные выступы на Луне. Точно так же Луна вызывала такие же выступы на Земле. Каждое из этих тел вращалось вокруг своей оси за 2—3 часа, и за этот же период Луна

обращалась вокруг Земли, так что «месяц» был равен «суткам». Вследствие этого Луна находилась всё время над одной и той же точкой Земли, и приливные выступы, обращённые друг к другу, не перемещались по их поверхностям; приливное трение отсутствовало (если не считать сравнительно слабого действия солнечных приливов).

Однако такое вращение является неустойчивым и долго продолжаться не может. Поэтому оно было нарушено и уже не могло вос-

становиться. «Месяц» стал длиннее суток, приливные выступы стали перемещаться вокруг Земли, и так как масса её была вязкой, то между выступами и её поверхностью возникло приливное трение, значительно более сильное, чем теперь, ибо Луна была гораздо ближе. Под действием приливного трения Земля постепенно замедляла своё вращение, её момент количества движения уменьшался, и поэтому Луна удалялась от Земли, поскольку сумма моментов количества движения в системе Земля — Луна должно оставаться постоянной.

С увеличением расстояния Луны от Земли возрастал (согласно третьему закону Кеплера) период обращения спутника около планеты; «месяц» постепенно удлинялся.

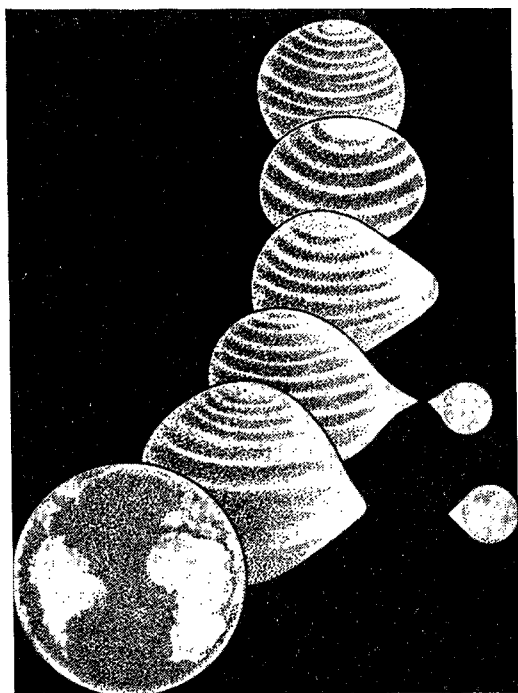


Рис. 149.

В течение 3—4 миллиардов лет, протекших с начала приливной эволюции, сутки удлинились в 8—12 раз и достигли 24 часов, а месяц — в гораздо большей степени, до 27,3 суток. Таким образом месяц удлинялся быстрее суток. Но в будущем, по вычислениям Дарвина, сутки станут расти быстрее месяца. Через несколько миллиардов лет (если до того времени сохранятся земные океаны) сутки и месяц опять сравняются и будут содержать приблизительно 50—60 наших теперешних суток. Земля будет обращена к Луне всё время одним и тем же полушарием, а так как Луна уже и теперь находится по отношению к Земле в этом положении (§ 227), то оба тела будут

обращаться так, как будто они насажены на твёрдый стержень. Это положение будет устойчивым и сможет поэтому сохраняться неопределённо долгое время.

В пользу теории Дарвина говорит тот факт, что Луна обращена к Земле одной стороной: такое положение Луны вызвано силой трения приливов, которые Земля когда-то производила на Луне. Этой же особенностью обладают, повидному, спутники других планет, и причина должна быть той же.

Приливным трением можно объяснить ещё движение Фобоса, спутника Марса (§ 247), время обращения которого около планеты втрое короче времени вращения самой планеты. Можно допустить, что Марс когда-то вращался вокруг оси быстрее, чем теперь, так что его сутки были длиннее периода обращения спутника. Но с течением времени вращение Марса было замедлено действием солнечных приливов, которые на Марсе были гораздо сильнее приливов, производимых спутниками, поскольку масса спутников ничтожна (на Земле, наоборот, лунные приливы сильнее).

Приливной теорией также пытаются объяснить образование двойных звёзд.

**§ 343. Видоизменения гипотезы Лапласа.** В течение второй половины XIX в. появилось много гипотез, дополняющих или заменяющих гипотезу Лапласа. Главнейшие новые идеи, содержащиеся в этих гипотезах, следующие:

1. Начальную туманность представляют не газообразной и раскалённой, как у Лапласа, а холодной и состоящей из отдельных твёрдых частиц-пылинок, или *метеорных тел*. В результате столкновений между частицами такое тёмное пылевое облако может разогреться и частично или полностью обратиться в газ.

2. Допускают, что в туманности возникли *вихревые* движения, подобные вихрям в земной атмосфере, и что Солнце и планеты образовались из частиц, втянутых внутрь вихря.

**§ 344. Гипотезы механической эволюции звёзд.** Теоретические исследования начала XX в. привели к заключению, что развитие изолированного в пространстве клубка материи (будущей звезды) должно нормально идти не так, как представлял себе Лаплас, а по одному из следующих двух путей.

1. Если газовый клубок обладает с самого начала достаточно быстрым вращением, то, как показал А. М. Ляпунов, при дальнейшем ускорении этого вращения масса может разорваться на две и образовать *двойную звезду*, два солнца. Если бы вокруг звезды была разрежённая «лапласовская» атмосфера, то она рассеялась бы в пространстве под действием светового давления со стороны центрального тела (§ 267).

2. Если начальная скорость вращения окажется недостаточной для разрыва, то получится *одинокое* солнце, медленно вращающееся вокруг своей оси.

Ни на том, ни на другом пути «нормальной» звёздной эволюции не видно объяснения образованию планет, т. е. мелких спутников звезды, с массами, в тысячи раз меньшими, чем масса центрального тела. Поэтому учёные-механисты считали, что планеты могли образоваться только в том случае, если ход эволюции был нарушен действием внешней силы. Отсюда, по их мнению, вытекает возможность третьего пути.

3. Мимо одинокого Солнца прошло другое тело или группа тел, и в результате этого «полустолкновения» появилась планетная система. Самое полустолкновение теоретически представляют себе по-разному.

**§ 345. Гипотезы «полустолкновения».** а) По гипотезе Мультона и Чемберлина приближившаяся звезда должна была вызвать на Солнце громадные приливы (§ 184), под действием которых из *двух* диаметрально противоположных точек солнечной атмосферы были выброшены большие массы вещества — нечто вроде гигантских протуберанцев (§ 216). Из этих газовых струй и образовались планеты.

б) По гипотезе Джинса возмущающая звезда подошла к Солнцу чрезвычайно *близко*, так что приливообразующая сила на одном полушарии Солнца оказалась гораздо больше, чем на противоположном; поэтому частицы приливного выступа на *одной* стороне Солнца оторвались от него и устремились к возмущающему телу. Выброшенная таким образом газовая струя (более плотная и мощная, чем струи предыдущей гипотезы) потом разбилась на отдельные клубки — планеты.

Гипотезы «полустолкновения» являются антинаучными, ибо все они основаны на случайности сближения звёзд и в конечном итоге ведут к исключительности солнечной системы во всей бесконечной вселенной.

Действительно, расстояния между звёздами (по сравнению даже с размерами звёзд-гигантов) настолько велики, что тесные их сближения, при которых возможен выброс массы с их поверхностей, совершенно невероятны, тем более, что в звёздных системах каждая звезда движется около центра системы по своей орбите.

Отсюда авторы гипотез «полустолкновения» и их последователи делают вывод о том, что наша планетная система является *единственной* во вселенной, а Земля — *единственная*, особая планета, на которой существует жизнь. Таким образом, проповедники этих гипотез неминуемо скатываются к религиозному антропоцентризму и сказкам о сотворении мира и Земли.

Советские учёные Н. Н. Парныйский, Н. Ф. Рейн и другие наглядно показали идеологическую, физическую и математическую несостоятельность одной из таких «гипотез», именно, гипотезы английского маркобеса Джинса, вскрыв при этом фальсификацию и подтасовку Джинсом наблюдаемых фактов.

К этому надо добавить, что за последние 10 лет у многих звёзд обнаружены планеты (§ 304). Правда, эти планеты из-за удалённости звёзд, непосредственно в телескопы не наблюдаются, но их присутствие вызывает неправильности в движениях звёзд, хорошо

обнаруживаемые современными точными методами наблюдений. Отсюда следует, что во вселенной имеется множество солнечных систем, подобных нашей.

**§ 346. Космогонические гипотезы советских учёных.** Несмотря на невероятные трудности решения проблемы происхождения небесных тел, советские учёные указали материалистические пути, по которым эта проблема может быть решена. Создать в настоящее время законченные теории происхождения небесных тел не представляется возможным из-за отсутствия достаточного наблюдательного материала, а также из-за недостаточной ещё разработки ряда теоретических вопросов в области развития небесных тел.

В настоящее время речь может идти только о первом приближении к решению этой проблемы, о создании научных гипотез, которые могли бы объяснить происхождение многих планетных систем (а не одной нашей) на основе законов развития материи. Такие пути указаны советскими учёными академиком О. Ю. Шмидтом, академиком В. Г. Фесенковым и президентом Академии наук Армянской ССР В. А. Амбарцумяном.

1. Гипотеза О. Ю. Шмидта основывается на трёх известных фактах: 1) вращение Галактики; 2) «наличие в Галактике, и притом главным образом в её центральной плоскости, облаков тёмной материи, состоящей кроме газа из твёрдых частиц, от дыма и пыли до более крупных тел...»<sup>1)</sup>; 3) метеорные тела, наблюдаемые нами в виде «падающих звёзд» и метеоритов, принадлежат к солнечной системе, а не являются пришельцами из межзвёздного пространства.

Шмидт считает, что Солнце при движении вокруг центра Галактики, пересекая галактическую плоскость, прошло через гигантский плоский рой метеорной материи. Под влиянием солнечного притяжения, а также светового давления солнечных лучей, метеорные тела в наиболее уплотнённых частях роя стали сгущаться в небольшие комки. Эти комки явились местными центрами притяжения, на которые попадали ближайшие метеорные тела. Захваченные солнечным притяжением, комки стали двигаться вокруг Солнца и, проходя через метеорный рой, росли за счёт падающих на них метеорных тел. По подсчётам Шмидта в течение 7 миллиардов лет планеты выросли до современных размеров, причём размеры образовавшихся планет зависят от толщины метеорного роя, неодинаковой в различных его областях, а также от расстояния первоначальных центров сгущения от Солнца. Возраст Земли, указанный Шмидтом, близок к данным современной геофизики, которая оценивает возраст земной коры в 2—3 миллиарда лет. Очевидно, что земная кора должна быть моложе самой Земли.

Эта гипотеза удовлетворительно объясняет прямые движения всех планет, поскольку неоднородность захваченного Солнцем метеорного

---

<sup>1)</sup> О. Ю. Шмидт, Четыре лекции о теории происхождения Земли, Изд. АН СССР, 1949.

роя должна была привести планеты в движение в одном направлении, причём их орбиты должны быть близкими к круговым.

Подобным же образом образовались и спутники (кроме Луны), захваченные планетами. Здесь могли иметь место и обратные движения спутников — всё зависело от местных уплотнений метеорного роя и влияния на метеорные частицы не только планетного, но и солнечного притяжения.

Так как многие звёзды в своём движении вокруг ядра Галактики пересекают её центральную плоскость, то у тех из них, которые пройдут через метеорные рои, могут образоваться планеты. Этим по гипотезе Шмидта объясняется многочисленность планетных систем в нашей Галактике.

2. Гипотеза В. Г. Фесенкова основана на эволюции самого Солнца, на тех процессах и реакциях, которые происходили в его недрах. Известно, что в настоящее время Солнце выделяет огромное количество энергии за счёт превращения водорода в гелий. Этот процесс превращения возможен лишь при очень высокой температуре в недрах Солнца, превышающей  $2 \cdot 10^7$  градусов. Но несколько миллиардов лет назад Солнце имело совсем другое состояние, нежели теперь — оно было огромной холодной звездой с температурой в недрах около 2—3 миллионов градусов. При такой низкой температуре превращения водорода в гелий быть не может, но зато источниками энергии Солнца были другие ядерные реакции с участием бериллия, бора или лития, которые могут протекать при этих условиях. Однако, израсходовав эти химические элементы, Солнце, лишённое источников энергии, начало быстро сжиматься, вследствие чего скорость его вращения резко возросла. Этот период сжатия должен был продолжаться несколько тысяч лет до тех пор, пока температура в недрах Солнца не поднялась до 20 миллионов градусов, когда начались ядерные реакции превращения водорода в гелий.

В этот переходный период при непрерывно возрастающей скорости вращения Солнце потеряло устойчивость и постепенно деформировалось, приняв неустойчивую грушевидную форму (§ 342, исследования А. М. Ляпунова и Д. Дарвина). При ускорении вращения грушевидный отросток в виде вытянутой струи был выброшен Солнцем и распался на шарообразные сгустки, которые постепенно охладились и образовали планеты. Первоначально планетная система имела весьма небольшие размеры (несколько миллионов километров в диаметре), но затем под влиянием приливного трения (§ 341) и вековой потери массы Солнца за счёт излучения планеты удалялись от Солнца, и планетная система достигла современных размеров. Поскольку подобные переходные периоды возможны в развитии многих звёзд, планетные системы должны быть многочисленны.

3. Гипотеза В. А. Амбарцумяна основана на его последних работах, которые установили наличие звёздных групп — ассоциаций и чрезвычайно разнообразный возраст звёзд в Галактике



(Амбарцумян, Кукаркин). Звёзды, по идее Амбарцумяна, конденсируются (рождаются) из дозвёздной материи не в одиночку, а группами, называемыми ассоциациями. Постепенно, вследствие различия скоростей, ассоциации распадаются. Количество рождающихся звёзд в данной возникающей ассоциации зависит от многих условий, в том числе и от количества дозвёздной материи, состояние которой скорее всего газо- или пылеобразное. При этом возможны случаи, когда в ассоциации возникают одна большая звезда и целый ряд малых звёзд. Вследствие огромной силы притяжения со стороны большой звезды малые звёзды не рассеются в пространстве, а станут обращаться вокруг большой. Сравнительно быстро остывнув, малые звёзды превратятся в холодные планеты, обращающиеся вокруг главной звезды — Солнца.

Следовательно, Амбарцумян считает, что возраст Солнца и планет примерно одного и того же порядка. Подобным же образом могли образоваться планетные системы вокруг других звёзд.

Характерное отличие всех трёх гипотез советских учёных от космогонических гипотез учёных капиталистических стран состоит в том, что советские гипотезы материалистичны; в них происхождение планет рассматривается не как исключение в природе, а как закономерный процесс развития материи.

**§ 347. Гипотезы о происхождении спиральных туманностей.** Путём, описанным в § 345, п. а), могла идти эволюция гораздо более грандиозных систем, именно галактик спиральной формы, в том числе и нашего Млечного Пути: в них две струи, состоящие теперь из миллионов солнц, выходят из двух диаметрально противоположных точек ядра. Это наводит на мысль, что возникновение струй у данной туманности могло быть вызвано приливным действием какой-то другой галактики, которая миллиарды лет назад прошла близко от первой системы, находившейся тогда ещё в газообразном состоянии. Такое сближение галактик сравнительно гораздо более вероятно, чем сближение звёзд: вспомним, что расстояния между галактиками не так велики в сравнении с их размерами, как расстояния между звёздами; они составляют не миллионы диаметров галактик, а только сотни, а часто бывают и значительно меньше (§ 330, 331).

**§ 348. Физическая эволюция звёзд.** Вопрос об эволюции звезды представляет большие трудности, так как он зависит от вопроса об *источниках энергии*, излучаемой звёздами. Видимо, этих источников несколько, и в одну эпоху жизни звезды действуют преимущественно одни источники, а в другую — другие.

Теория эволюции звёзд Расселла рассматривает в качестве источника энергии только сжатие газовой массы, но источник этот явно недостаточен. По акад. В. Г. Фесенкову, он играет роль лишь в начальных стадиях эволюции газового шара.

Под его действием температура внутри звезды повышается и, наконец, достигает такого значения, при котором близ центра звезды

начинаются *ядерные реакции* углеродного цикла (§ 223), а может быть, и другие.

Эти реакции и являются источником энергии звезды в течение её дальнейшей эволюции. Громадное выделение энергии, связанное с ядерными реакциями, производит внутри звезды постоянное перемешивание газовых масс. Потоки нагретых газов направляются наружу и замещаются более холодными, притекающими к центру. Этой постоянной циркуляцией вещества и вызываются сложные явления, наблюдаемые на поверхности ближайшей звезды — нашего Солнца.

Физика атомного ядра возникла буквально на наших глазах, первые же её применения к астрономии дали блестящие результаты. Подтверждается уже давно высказанное положение: «Дорога к звёздам ведёт через атом».

До сих пор многие авторы космогонических гипотез при своих рассуждениях учитывали почти исключительно силу тяготения. Созданные ими гипотезы можно поэтому назвать *механическими*; они явно оказываются недостаточными. Будущее принадлежит, конечно, гипотезам *физическим*, которые сумеют учесть наряду с тяготением космогоническую роль внутренней энергии звезды, влияние сил, имеющих внутриатомное происхождение. Именно в этом направлении и работают советские учёные.

Полное теоретическое обоснование физических гипотез в настоящее время вряд ли может оказаться успешным, поскольку законы ядерных реакций далеко ещё не изучены полностью, а они несравненно сложнее простой формулы тяготения. Но это не значит, что нужно отказаться от разработки космогонических гипотез. Наоборот, нужно упорно искать новых путей, с помощью которых может быть решена задача происхождения планет, но при этом необходимо основываться на данных астрофизики, которая в оболочках Солнца и звёзд и в туманностях изучает материю в разных состояниях и на разных стадиях эволюции.

Кроме этого, научная космогония должна учитывать и замечательные результаты *звёздной астрономии* XX в., как, например, существование в нашей Галактике различных подсистем (§ 335), природу и эволюционную роль межзвёздной материи (§ 323), а также строение других планетных систем и других галактик. Их изучение поможет нам раскрыть историю и судьбу Галактики, солнечной системы и нашей Земли.

**§ 349. Возраст звёзд и планет.** Геология, минералогия и физика в настоящее время располагают несколькими способами для оценки возраста *Земли*. Так, например, можно приблизительно подсчитать, сколько нужно времени, чтобы в океанах накопились имеющиеся в настоящее время запасы соли, и определить, таким образом, возраст земных океанов. Геологи сумели приблизительно оценить время, в течение которого размыwanie могло образовать мощные пласты осадочных пород. Наконец, явление радиоактивности позволяет определить возраст некоторых минералов. Этот последний способ, повидимому наиболее точный, основан на том, что элемент уран непрерывно рас-

падается и превращается в свинец, причём скорость превращения известна. Таким образом, сопоставляя процентное содержание свинца и урана в каком-нибудь минерале, можно найти его возраст.

Все эти способы дают для возраста земной коры числа в несколько миллиардов лет и, во всяком случае, не менее 3 миллиардов. Жизнь на Земле существует около 1 миллиарда лет. Первобытный человек появился, вероятно, 1—2 миллиона лет назад, а историческая жизнь человечества началась примерно несколько десятков тысячелетий назад, но от её первых ступеней не сохранилось почти никаких следов.

Возраст остальных планет должен быть такого же порядка — несколько миллиардов лет.

Возраст большинства звёзд Галактики и Солнца, без сомнения, больше, но во сколько именно раз — пока точно сказать нельзя. Оценки *астрофизиков* начала XX в., по которым Солнце примерно в тысячу раз древнее Земли, теперь признаются ошибочными. *Астрономические* оценки возраста большинства звёзд основаны, например, на следующих соображениях. В звёздной системе есть особенности, которые могли развиться только в течение чрезвычайно долгого времени. Одна из них — приблизительно равномерное распределение кинетической энергии между звёздами: звёзды с большой массой имеют малые скорости (§ 321). Это соотношение объясняется соображениями из кинетической теории газов, если уподобить звёзды молекулам: взаимное притяжение звёзд произвело в конце концов «выравнивание» распределения энергии по законам математической статистики. Но для этого нужны чрезвычайно длительные промежутки времени, измеряемые десятками и сотнями миллиардов лет.

**§ 350. Превращения материи.** Как мы видели, источником энергии Солнца и других звёзд являются ядерные реакции, сопровождающиеся излучением и уменьшением массы звезды (§ 223). Таким образом во вселенной постоянно и в громадных размерах происходит уменьшение масс звёзд и разбрасывание материи в межзвёздных просторах. Но из этого совершенно не следует, что вселенная идёт к разрушению, что когда-нибудь наступит «конец мира». Выброшенная через излучение из звёзд материя снова конденсируется в огромные космические тела. Работы советских учёных В. А. Амбарцумяна и Б. В. Кукаркина приводят нас к выводу, что рождение звёзд происходит в нашей Галактике и в настоящее время; тем более этот процесс образования звёзд имеет место в бесконечной во времени и безграничной в пространстве вселенной.

Из материи, выброшенной звёздами, вновь возникают новые звёздные и планетные миры, и в этом круговороте «ничто не вечно, кроме вечно изменяющейся, вечно движущейся материи и законов её движения и изменения» (Энгельс, «Диалектика природы», 1948, стр. 20).

## ПРИЛОЖЕНИЕ I

### ОЗНАКОМЛЕНИЕ С НЕБОМ

**§ 351. Ознакомление с созвездиями (астрогнозия).** Знакомство со звёздным небом удобнее всего начинать с созвездия Б. Медведицы, которое в наших широтах никогда не заходит. В летние вечера Б. Медведица видна в северо-западной стороне неба «хвостом» вверх, осенью она располагается вдоль северного горизонта и занимает самое низкое положение, зимой — на северо-востоке хвостом вниз, наконец, в весенние вечера — близ зенита в опрокинутом положении. Найдя Б. Медведицу, переходим от неё прежде всего к Полярной, проводя прямую через звёзды  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 150). Полярная даст нам раз навсегда достаточно точно направление севера. Очень важно в разные часы ночи и в разные дни года уметь находить по Б. Медведице эту «путеводную звезду».

Проведя от «хвоста» Б. Медведицы прямую через полюс и продолжив её на такое же расстояние, найдём также очень заметное незаходящее созвездие Кассиопеи — пять звёзд 2-й и 3-й величины в Млечном Пути, расположенные в виде буквы W (или M в перевёрнутом положении). Это созвездие симметрично с Б. Медведицей относительно полюса: когда одно проходит верхнюю кульминацию вблизи зенита, другое бывает в это время в нижней кульминации, под полюсом.

От этих двух незаходящих созвездий легко перейти к другим созвездиям. Например, продолжив хвост Б. Медведицы и изгибая его в направлении его кривизны, мы увидим жёлтую звезду 1-й величины: это Арктур в созвездии Волонаса ( $\alpha$  Boötis). Эта звезда принадлежит уже к заходящим звёздам, так что мы сможем увидеть её не каждый вечер. Двигаясь от Кассиопеи вдоль Млечного Пути по часовой стрелке, мы найдём цепочку звёзд Персея, затем яркую желтоватую Капеллу в созвездии Возничего.

Капелла — ближайшая к полюсу звезда первой величины. Продолжив отрезок Капелла — Полярная за Полярную, на расстояние немного большее его длины, найдём самую яркую звезду северного неба — белую Вега в созвездии Лиры. На широте Москвы и Вега, и Капелла никогда не заходят; вместе с Б. Медведицей и Кассиопеей они обра-

зуют четыре исходных ориентира, от которых постепенно можно перейти к остальным созвездиям.

**§ 352. Вечернее небо в разные времена года.** На прилагаемых картах схематически изображено звёздное небо для широты Москвы ( $\varphi = +56^\circ$ ) в разные часы звёздного времени.

На каждой карте круг изображает горизонт, зенит находится в центре. Если повернуться лицом к югу и поставить карту вертикально, то около точки Ю будет южная часть горизонта, а восточная и западная стороны неба будут соответственно налево и направо, как на

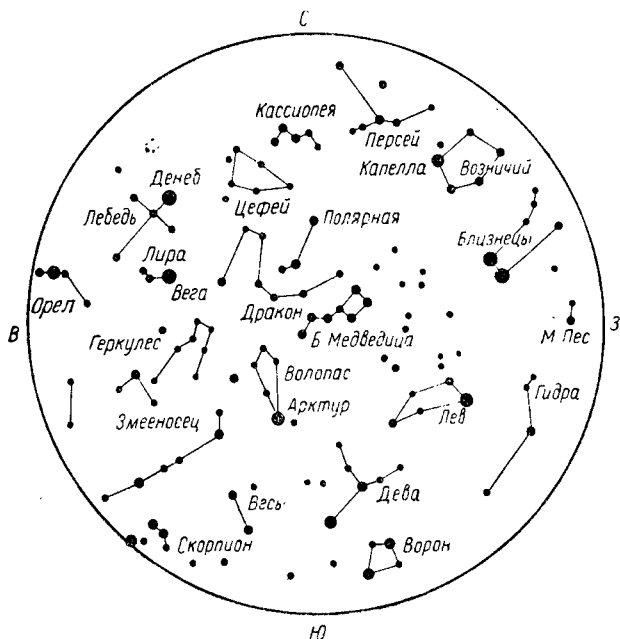


Рис. 150.

карте. Карты эти предназначены только для общей ориентировки и не могут заменить карт из звёздных атласов.

Весеннее небо — самое бедное яркими звёздами. Млечный Путь располагается близко к горизонту и поэтому плохо виден. Самые заметные из весенних созвездий — это Лев, главные звёзды которого образуют довольно правильную трапецию, Дева и Волопас с Арктуром. Низко на юге стоит другая неправильная трапеция — Ворон, а на юго-востоке несколько позднее восходит красный Антарес в созвездии Скорпиона (рис. 150).

Летнее небо. В северной части СССР в это время благодаря белым ночам видны только самые яркие звёзды. Только в начале августа под широтой Москвы к полуночи темнеет настолько, что во всей

красоте виден Млечный Путь, и притом самая богатая «летняя» его часть. Самой яркой звездой летнего неба является Вега в маленьком созвездии Лиры (близ зенита) и Арктур (на западной стороне). Вега образует хорошо заметный большой треугольник с двумя другими звёздами первой величины, Альтанром в созвездии Орла и Денебом

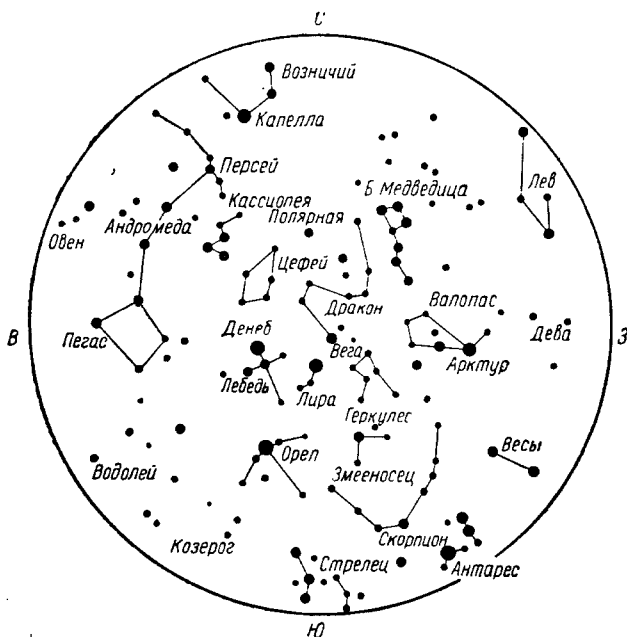


Рис. 151.

в Лебеде (оба в Млечном Пути). В северной части Союза этот треугольник только и заметен на светлом летнем небе. На юге же главное украшение летнего неба составляют созвездия Скорпиона и Стрельца, лежащие в самой яркой и широкой части Млечного Пути (рис. 151).

Осеннее небо. До самой поздней осени картина вечернего неба меняется очень медленно, и те же созвездия Лиры и Лебеда долго остаются близ зенита. Начало осени у нас — лучшее время видности Млечного Пути. В восточной стороне неба видна Андромеда с Пегасом, составляющие вместе фигуру, похожую на ковшик Б. Медведицы, только значительно больших размеров. За ними поднимается Телец с красным Альдебараном и Плеядами. Незаходящая «зимняя» Капелла поднимается с каждым вечером всё выше, а лежащая почти против неё, по другую сторону полюса, «летняя» Вега опускается всё ниже (рис. 152).

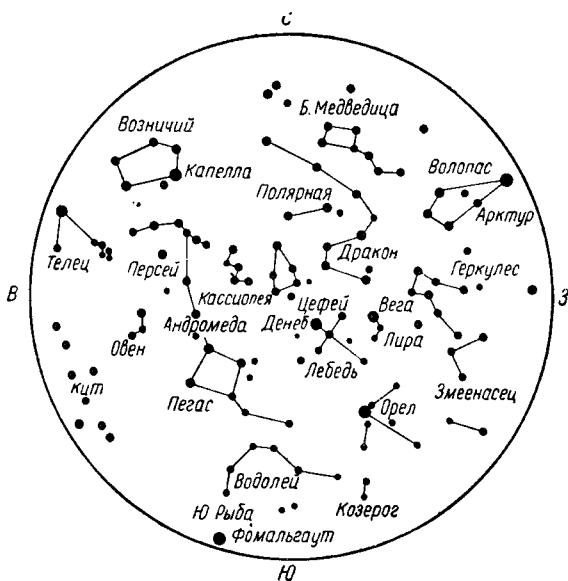


Рис. 152.

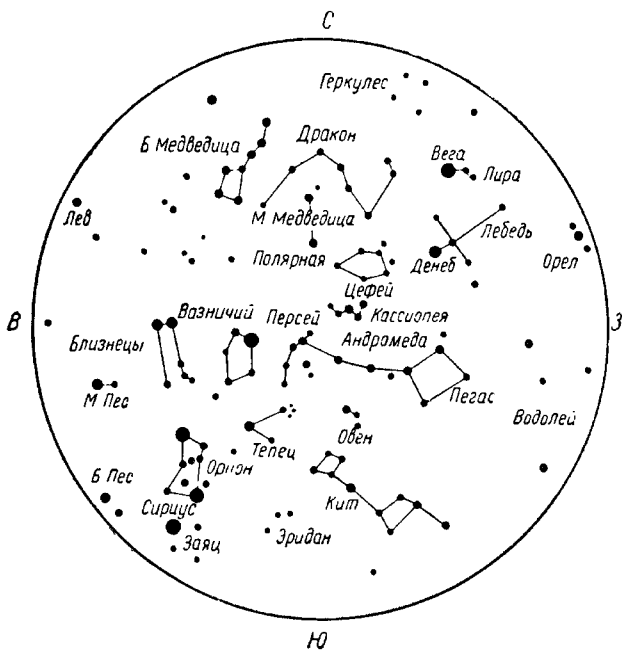


Рис. 153.

Зимнее небо (рис. 153) — самое богатое яркими звёздами. Наиболее заметные созвездия этого времени года: Близнецы с яркими звёздами Кастором и Поллуксом, Орион — самое красивое созвездие неба с двумя звёздами 1-й величины — Ригелем и Бетельгейзе — и Большой Пёс с Сириусом, самой яркой звездой всего неба. Зимняя часть Млечного Пути, наоборот, мало интересна.

Полезно сравнить каждую карту с предыдущей и последующей, начиная с околополярных созвездий. Это даст представление об изменении вида неба вследствие суточного вращения и годового движения Земли и до некоторой степени может заменить небесный глобус.

### § 353. Практические указания для наблюдений простым глазом.

Надо научиться оценивать *угловые расстояния* между звёздами в градусах. Например, расстояние между  $\alpha$  и  $\beta$  Б. Медведицы составляет около  $5\frac{1}{2}^\circ$ , от  $\alpha$  Б. Медведицы до Полярной  $29^\circ$ . Три яркие звезды 2-й величины, составляющие «пояс Орiona», стоят особенно близко одна к другой, всего на расстояниях  $1\frac{1}{2}^\circ$ .

Затем надо научиться приблизительно оценивать блеск звёзд в звёздных *величинах*. Типичными звёздами 1-й величины являются Альтаир в Орле и Альдебаран в Тельце; Вега, Арктур и Капелла относятся, строго говоря, к нулевой величине, а Сириус даже к минус второй (точнее, к  $-1,58$ ). Нормальными звёздами 2-й величины являются Полярная и  $\alpha$  Б. Медведицы. К звёздам 2-й величины относятся ещё 5 звёзд Б. Медведицы. Из 5 звёзд Кассиопеи три относятся к звёздам 2-й величины, остальные две к 3-й; самая слабая звезда семи-звездия Б. Медведицы ( $\delta$ ) имеет звёздную величину 3,5.

При ознакомлении с небом следует обращать внимание на зодиакальные созвездия, которыми отмечена на небе эклиптика. В противоположность экватору, который занимает на небе неизменное положение, эклиптика в разные часы среднего времени располагается различным образом, но всегда пересекается с горизонтом в двух диаметрально противоположных точках. Указать зодиак на прилагаемых картах представляет полезное упражнение для учащегося.

### § 354. Движения Луны и планет.

Изучение собственных движений светил надо начинать с Луны. Необходимо самостоятельными наблюдениями проверить главнейшие особенности лунного движения, описанные в гл. VI.

Интереснее всего наблюдать серп «молодого месяца» в январе — апреле, через 3—6 дней после новолуния. В это время года он заходит намного позже Солнца (почему?) и долго виден на тёмном ночном небе. Заметив положения Луны относительно звёзд для ряда вечеров и нанеся их на звёздную карту, мы убедимся в быстром перемещении Луны к востоку по созвездиям зодиака. При этом отметим:

- 1) изменение фазы с изменением углового расстояния от Солнца;
- 2) положение «рогов» лунного серпа и терминатора относительно Солнца;
- 3) пепельный свет. Если наблюдения достаточно точны, то можно убедиться в том, что Луна движется не по эклиптике, и отме-



тить приблизительно положение её наибольшего отклонения от эклиптики ( $5^\circ$ , т. е. 10 лунных дисков), а также положение узлов. Наконец, если отмечать из месяца в месяц возвращения Луны к одной и той же звезде, то можно обнаружить изменение положения лунной орбиты.

Планеты передвигаются гораздо медленнее Луны. Поэтому, чтобы обнаружить их движение, достаточно отмечать на карте положение планеты относительно звёзд через большие промежутки времени: например, для Марса через каждые 5—10 дней, для Юпитера — через месяц. Следить за движением планет следует около эпохи противостояния, начав за 1—2 месяца до противостояния, чтобы вычертить «петлю» попятного движения. Сведения о времени противостояния даются в астрономических календарях. Для этих наблюдений особенно удобен Юпитер. Он совершает полное обращение вокруг Солнца в 12 лет и поэтому «петлю» обратного движения каждый следующий год описывает приблизительно в следующем (к востоку) зодиакальном созвездии: в 1950 г. в Козероге, в 1951 г. в Водолее и т. д.

Часто одновременно можно видеть несколько планет и следить за тем, как одна из них обгоняет другую. Когда же планеты далеко одна от другой, то это даёт возможность приблизительно наметить на небе положение эклиптики.

**§ 355. Телескопическое знакомство с небом.** Сравнительно часто встречаются телескопы (рефракторы) с объективом от 40 до 100 мм в диаметре (1,5—4 дюйма) и астрономическими окулярами, дающими обратное изображение. Телескоп должен быть установлен на массивном, нетряском штативе. Если при нём есть несколько окуляров, то надо, по крайней мере вначале, ставить самое *слабое* увеличение (самый большой окуляр). Для каждого наблюдателя окуляр должен «ставиться по глазам», вдвигаться или выдвигаться, чтобы не очень яркие звёзды выходили «точками», а край Луны был резко очерчен.

а) Солнце. Так как телескоп собирает лучи в одну точку, как зажигательное стекло, то *прямо смотреть в окуляр на Солнце нельзя ни в каком случае*; нельзя и наводить телескоп на Солнце, как на другие светила, прицеливаясь. Телескоп наводит по его тени, а для наблюдений Солнца на окуляр навинчивают специальное очень тёмное стекло. Но гораздо удобнее в телескоп совсем не смотреть, а отбрасывать изображение Солнца на белый экран, поставленный перед окуляром (без тёмного стекла). Чем дальше экран от окуляра, тем больше, но зато и слабее, получается изображение Солнца. Поэтому следует устроить какое-нибудь затемнение, например, надеть на объективный конец телескопа картонный круг. Даже слабый телескоп показывает на Солнце пятна и факелы (последние — у краёв диска) с массой деталей. Зарисовывая какую-нибудь группу пятен несколько дней подряд, мы проследим её изменения, исчезновение одних пятен и появление других. А измеряя каким-нибудь способом положение отдельных пятен на солнечном диске, мы сможем

приблизительно определить время вращения Солнца вокруг оси и направление оси вращения. Интересно подсчитать, когда должна опять появиться из-за восточного края какая-нибудь группа, скрывшаяся за западным краем, и подметить её возвращение. Особенно большие группы рекомендуется попробовать увидеть простым глазом (в законченное стекло), что удаётся довольно часто. При определении положения пятен на солнечном диске надо помнить, что в течение дня угол солнечной оси с вертикальной линией сильно изменяется, как изменяется, например, наклон лунного серпа. Надо научиться отличать перемещения солнечных пятен, вызываемые этой причиной, от их действительного движения. Ещё проще производить наблюдения несколько дней подряд по возможности в один и тот же час.

б) Луна — наилучший объект для наблюдений, производящий на наблюдателей самое сильное впечатление. Даже в слабую трубу на ней видны *пейзажи* — освещённые Солнцем равнины и горы, от которых тянутся чёрные тени. В полнолуние Луна мало интересна, а у неполной Луны особый интерес всегда представляет световая граница (терминатор). На этой линии горы отбрасывают особенно длинные тени, поэтому рельеф поверхности выступает чрезвычайно отчётливо. К следующему вечеру терминатор передвигается в новую часть поверхности, а вчерашние области становятся менее эффектными. Поэтому с лунной поверхностью приходится знакомиться по частям, по мере роста или убывания Луны. Самое лучшее время наблюдения Луны — это 1—2 дня после первой четверти, когда виден самый красивый лунный пейзаж: Альпы и Апеннины с кратерами Платон и Архимед (рис. 95). В полнолуние интересны главным образом светлые лучи, которые тянутся от кратеров Тихо, Конерник и др. Следует обращать внимание также на пятна и кратеры у краёв диска, которые заметно перемещаются благодаря *либрации*. При ознакомлении с лунной поверхностью необходима карта Луны с подробным описанием.

в) Планеты. У Меркурия (который бывает виден редко) и у Венеры можно различать только *фазы*, никаких деталей на самих планетах не видно. Также и на Марсе в 3—4-дюймовый телескоп можно увидеть только светлое полярное пятно и одно-два тёмных пятна. Гораздо интереснее две большие планеты — Юпитер и Сатурн. Хорошо видны сжатие Юпитера и полосы на его диске, а в 4-дюймовый телескоп можно иногда подметить даже некоторые изменения, происходящие в полосах. Четыре галилеевых спутника видны в любой телескоп и представляют один из благодарнейших объектов для демонстрации. При этом необходимо иметь под руками астрономический календарь, в котором на каждый день даётся расположение спутников и явления, представляемые ими, в частности затмения и покрытия.

Сатурн с его кольцом хорошо виден в телескоп средних размеров и на многих производит почти такое же сильное впечатление, как

и Луна. Из девяти спутников Сатурна в слабые телескопы виден только один Титан.

Остальные планеты для слабых инструментов не отличаются по виду от звёзд и не представляют никакого интереса.

г) Звёздный мир. Ни на одной звезде ни в какой телескоп ничего не видно; они все представляются «искорками», «точками»; видимые в телескоп их «диски» не реальны, а являются результатом несовершенства объектива; это не звёзды, а их «изображения». Чем лучше качество инструмента, тем они меньше. Поэтому для наблюдения представляют интерес, главным образом, не отдельные звёзды, а звёздные группы, т. е. *двойные звёзды и звёздные скопления*.

Из двойных звёзд, доступных самым слабым телескопам, интересна  $\zeta$  Большой Медведицы (Мицар; § 303), состоящая из двух звёзд 2-й и 4-й величины с расстоянием  $14''$ . При наблюдении надо обратить внимание на её далёкого спутника, Алькор, видимого даже простым глазом. Самой красивой двойной звездой нашего неба является  $\gamma$  Андромеды, оранжевая, 3-й величины с синим спутником 5-й величины на расстоянии  $10''$ . Самая яркая двойная звезда, видимая у нас, это Кастор ( $\alpha$  Близнецов), 2-й величины со спутником 3-й величины на расстоянии  $5''$ . Эта звезда разделяется в телескоп с отверстием не менее  $80\text{ мм}$  (3 дюйма). С более сильным телескопом рекомендуется найти  $\epsilon$  Лиры, звёздочку 4-й величины, около Веги. Люди с очень хорошим зрением видят её двойной (расстояние  $3\frac{1}{2}''$ ). В 3—4-дюймовый телескоп каждая из звёзд  $\epsilon$  Лиры разделяется на две (расстояния по  $3''$ ), так что звезда эта, собственно, четверная.

Из звёздных скоплений самое доступное — Плеяды, оно эффектно даже при Луне, так как состоит из ярких звёзд. Ещё красивее и богаче звёздами двойное скопление в созвездии Персея, так называемое  $\chi$  и  $h$  Персея; оно видно в бинокль как сгущение в Млечном Пути на половине расстояния между Кассиопеей и «цепочкой» Персея. При наблюдении скоплений надо применять самое слабое увеличение, чтобы всё скопление было в поле зрения телескопа. Слабым телескопам доступны только рассеянные скопления.

*Туманности* также обнаруживают очень мало подробностей. Самую яркую из них, туманность Андромеды, легко найти простым глазом при помощи звёздной карты. Но её спиральное строение не видно ни в какой телескоп, а выходит только на фотографиях. Также и туманность Ориона, заметная уже в бинокль (в так называемом «мече» Ориона, под «поясом»), видна несравненно хуже, чем обычно изображается на рисунках, сделанных тоже по фотографиям. Заслуживает внимания кольцевая туманность в Лире, которую легко найти по карте. И туманности и звёздные скопления надо наблюдать в безлунные ночи и с самыми слабыми увеличениями; только планетарные туманности нужно наблюдать с сильным увеличением.

Таблица I. Греческий алфавит

|           |          |           |           |
|-----------|----------|-----------|-----------|
| α альфа   | η эта    | υ ни      | τ тау     |
| β бета    | θ тэта   | ξ кси     | ο ипсилон |
| γ гамма   | ι иота   | ς омикрон | φ фи      |
| δ дельта  | χ каппа  | π пи      | χ хи      |
| ε эпсилон | λ ламбда | ρ ро      | ψ пси     |
| ζ дзета   | μ ми     | σ сигма   | ω омега   |

Таблица II. Превращение интервалов среднего времени в интервалы звёздного времени

| Часы            |                                    | Минуты         |                       |                 |                       |
|-----------------|------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| Среднее время   | Поправка прибавляется              | Среднее время  | Поправка прибавляется | Среднее время   | Поправка прибавляется |
| 1               | 2                                  | 3              | 4                     | 5               | 6                     |
| 1 <sup>h</sup>  | 0 <sup>m</sup> 9 <sup>s</sup> ,856 | 1 <sup>m</sup> | 0 <sup>s</sup> ,164   | 31 <sup>m</sup> | 5 <sup>s</sup> ,093   |
| 2               | 0 19,713                           | 2              | 0,329                 | 32              | 5,257                 |
| 3               | 0 29,569                           | 3              | 0,493                 | 33              | 5,421                 |
| 4               | 0 39,426                           | 4              | 0,657                 | 34              | 5,585                 |
| 5               | 0 49,282                           | 5              | 0,821                 | 35              | 5,750                 |
| 6               | 0 59,139                           | 6              | 0,986                 | 36              | 5,914                 |
| 7               | 1 8,995                            | 7              | 1,150                 | 37              | 6,078                 |
| 8               | 1 18,852                           | 8              | 1,314                 | 38              | 6,242                 |
| 9               | 1 28,708                           | 9              | 1,478                 | 39              | 6,407                 |
| 10              | 1 38,565                           | 10             | 1,643                 | 40              | 6,571                 |
| 11              | 1 48,421                           | 11             | 1,807                 | 41              | 6,735                 |
| 12              | 1 58,278                           | 12             | 1,971                 | 42              | 6,900                 |
| 13              | 2 8,134                            | 13             | 2,136                 | 43              | 7,064                 |
| 14              | 2 17,991                           | 14             | 2,300                 | 44              | 7,228                 |
| 15              | 2 27,847                           | 15             | 2,464                 | 45              | 7,392                 |
| 16              | 2 37,704                           | 16             | 2,628                 | 46              | 7,557                 |
| 17              | 2 47,560                           | 17             | 2,793                 | 47              | 7,721                 |
| 18              | 2 57,417                           | 18             | 2,957                 | 48              | 7,885                 |
| 19              | 3 7,273                            | 19             | 3,121                 | 49              | 8,049                 |
| 20              | 3 17,129                           | 20             | 3,285                 | 50              | 8,214                 |
| 21              | 3 26,986                           | 21             | 3,450                 | 51              | 8,378                 |
| 22              | 3 36,842                           | 22             | 3,614                 | 52              | 8,542                 |
| 23              | 3 46,699                           | 23             | 3,778                 | 53              | 8,707                 |
| 24              | 3 56,555                           | 24             | 3,943                 | 54              | 8,871                 |
| Секунды         |                                    | 25             | 4,107                 | 55              | 9,035                 |
|                 |                                    | 26             | 4,271                 | 56              | 9,199                 |
|                 |                                    | 27             | 4,435                 | 57              | 9,364                 |
|                 |                                    | 28             | 4,600                 | 58              | 9,528                 |
|                 |                                    | 29             | 4,764                 | 59              | 9,692                 |
|                 |                                    | 30             | 4,928                 | 60              | 9,856                 |
|                 |                                    |                |                       |                 |                       |
|                 |                                    |                |                       |                 |                       |
|                 |                                    |                |                       |                 |                       |
|                 |                                    |                |                       |                 |                       |
| 10 <sup>s</sup> | 0 <sup>s</sup> ,027                |                |                       |                 |                       |
| 20              | 0,055                              |                |                       |                 |                       |
| 30              | 0,082                              |                |                       |                 |                       |
| 40              | 0,110                              |                |                       |                 |                       |
| 50              | 0,137                              |                |                       |                 |                       |

Средние сутки = 24<sup>h</sup> 03<sup>m</sup> 56<sup>s</sup>,555 = 1,00273791 звёздных суток.

**Таблица III. Превращение интервалов звёздного времени  
в интервалы среднего времени**

| Часы            |                                    | Минуты         |                     |                 |                     |
|-----------------|------------------------------------|----------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| Звёздное время  | Поправка вычитается                | Звёздное время | Поправка вычитается | Звёздное время  | Поправка вычитается |
| 1               | 2                                  | 3              | 4                   | 5               | 6                   |
| 1 <sup>h</sup>  | 0 <sup>m</sup> 9 <sup>s</sup> ,830 | 1 <sup>m</sup> | 0 <sup>s</sup> ,164 | 31 <sup>m</sup> | 5 <sup>s</sup> ,079 |
| 2               | 0 19,659                           | 2              | 0,328               | 32              | 5,242               |
| 3               | 0 29,489                           | 3              | 0,491               | 33              | 5,406               |
| 4               | 0 39,318                           | 4              | 0,655               | 34              | 5,570               |
| 5               | 0 49,148                           | 5              | 0,819               | 35              | 5,734               |
| 6               | 0 58,977                           | 6              | 0,983               | 36              | 5,898               |
| 7               | 1 8,807                            | 7              | 1,147               | 37              | 6,062               |
| 8               | 1 18,636                           | 8              | 1,311               | 38              | 6,225               |
| 9               | 1 28,466                           | 9              | 1,474               | 39              | 6,389               |
| 10              | 1 38,296                           | 10             | 1,638               | 40              | 6,553               |
| 11              | 1 48,125                           | 11             | 1,802               | 41              | 6,717               |
| 12              | 1 57,955                           | 12             | 1,966               | 42              | 6,881               |
| 13              | 2 7,784                            | 13             | 2,130               | 43              | 7,045               |
| 14              | 2 17,614                           | 14             | 2,294               | 44              | 7,208               |
| 15              | 2 27,443                           | 15             | 2,457               | 45              | 7,372               |
| 16              | 2 37,273                           | 16             | 2,621               | 46              | 7,536               |
| 17              | 2 47,102                           | 17             | 2,785               | 47              | 7,700               |
| 18              | 2 56,932                           | 18             | 2,949               | 48              | 7,864               |
| 19              | 3 6,762                            | 19             | 3,113               | 49              | 8,027               |
| 20              | 3 16,591                           | 20             | 3,277               | 50              | 8,191               |
| 21              | 3 26,421                           | 21             | 3,440               | 51              | 8,355               |
| 22              | 3 36,250                           | 22             | 3,604               | 52              | 8,519               |
| 23              | 3 46,080                           | 23             | 3,768               | 53              | 8,683               |
| 24              | 3 55,910                           | 24             | 3,932               | 54              | 8,847               |
| Секунды         |                                    | 25             | 4,096               | 55              | 9,010               |
|                 |                                    | 26             | 4,259               | 56              | 9,174               |
| 10 <sup>s</sup> | 0 <sup>s</sup> ,027                | 27             | 4,423               | 57              | 9,338               |
| 20              | 0,055                              | 28             | 4,587               | 58              | 9,502               |
| 30              | 0,082                              | 29             | 4,751               | 59              | 9,666               |
| 40              | 0,109                              | 30             | 4,915               | 60              | 9,830               |
| 50              | 0,137                              |                |                     |                 |                     |

Звёздные сутки =  $23^h 56^m 04^s,091 = 0,99726957$  средних суток.

Таблица IV. Элементы Солнца и больших планет

| Название планет | Звёздное время обращения вокруг Солнца |                    | Среднее расстояние от Солнца |           | Эксцентриситет $e$ | Наклонение к $150,0^\circ$ | Масса (Земля = 1) | Плотность (Земля = 1) | Экваториальный диаметр |         | Сжатие           | Время вращения вокруг оси | Число спутников |
|-----------------|--|--------------------|------------------------------|-----------|--------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|---------|------------------|---------------------------|-----------------|
|                 | в сутках                               | в звёздных годах   | в астр. единицах             | в млн. км |                    |                            |                   |                       | (Земля = 1)            | в км    |                  |                           |                 |
| Меркурий ☿      | 87,97                                  | —                  | 0,387                        | 57,8      | 0,206              | $7^\circ 0'$               | 0,04              | 0,68                  | 0,38                   | 4800    | 0                | $87^d 23^h 16^m$          | —               |
| Венера ♀        | 224,70                                 | —                  | 0,723                        | 108,1     | 0,007              | $3^\circ 24'$              | 0,83              | 0,94                  | 0,96                   | 12200   | 0                | $30^d$                    | —               |
| Земля ♂         | 365,26                                 | 1г                 | 1,000                        | 149,5     | 0,017              | 0                          | 1,00              | 1,00                  | 1,00                   | 12757   | $\frac{1}{297}$  | $23^h 56^m 4^s$           | 1               |
| Марс ♂          | 686,98                                 | 1 322 <sup>d</sup> | 1,524                        | 227,8     | 0,093              | $1^\circ 51'$              | 0,11              | 0,71                  | 0,53                   | 6800    | $\frac{1}{192}$  | $24^h 37^m 23^s$          | 2               |
| Юпитер ♃        | 4332,59                                | 11 315             | 5,203                        | 777,8     | 0,048              | $1^\circ 18'$              | 318,4             | 0,24                  | 11,2                   | 142700  | $\frac{1}{15,4}$ | $9^h 50^m 30^s$ 1)        | 11              |
| Сатурн ♄        | 10759,20                               | 29 167             | 9,539                        | 1426,1    | 0,056              | $2^\circ 29'$              | 95,2              | 0,12                  | 9,5                    | 120800  | $\frac{1}{9,5}$  | $10^h 14^m 24^s$ 2)       | 9               |
| Уран ♅          | 30685,93                               | 84 4               | 19,191                       | 2869,1    | 0,047              | $0^\circ 46'$              | 14,6              | 0,25                  | 3,9                    | 49700   | $\frac{1}{14}$   | $10^h 45^m$               | 5               |
| Нептун ♆        | 60187,64                               | 164 285            | 30,071                       | 4495,7    | 0,009              | $1^\circ 46'$              | 17,3              | 0,24                  | 4,2                    | 53000   | $\frac{1}{40}$   | $15^h 48^m$               | 2               |
| Плутон ♇        | 90737,2                                | 248 153            | 39,518                       | 5908      | 0,249              | $17^\circ 09'$             | 1?                | ?                     | ?                      | ?       | —                | ?                         | ?               |
| Солнце ☉        | —                                      | —                  | —                            | —         | —                  | —                          | 333400            | 0,26                  | 10,91                  | 1391000 | 0                | $25^d$                    | —               |

1) Для околополярных зон период вращения =  $9^h 55^m 41^s$ .2) Для околополярных зон период вращения =  $10^h 38^m$ .

Таблица V. Элементы спутников планет

| Название      | Открытие       | Ср. расстояние от планеты |                      | Среднее расстояние (в Солнца) | Звездное время обращения в сутках | Наклон орбиты      |                  | Диаметр в км | Звездная величина в среднем положении | Эксцентриситет орбиты |
|---------------|----------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|
|               |                | в радиусах планеты        | в километрах         |                               |                                   | к экватору планеты | к орбите планеты |              |                                       |                       |
| 1             | 2              | 3                         | 4                    | 5                             | 6                                 | 7                  | 8                | 9            | 10                                    | 11                    |
| <i>Земля</i>  |                |                           |                      |                               |                                   |                    |                  |              |                                       |                       |
| Луна          | —              | 60,27                     | 384000               | 8'50"                         | 27,32166                          | 18°18'—<br>—28°36' | 5°9'             | 3478         | —12,7                                 | 0,055                 |
| <i>Марс</i>   |                |                           |                      |                               |                                   |                    |                  |              |                                       |                       |
| Фобос         | Холл 1877      | 2,77                      | 9400                 | 0'9"                          | 0,31891                           | 1°                 | 27°29'           | 12?          | 11,5                                  | 0,017                 |
| Деймос        | Холл 1877      | 6,95                      | 23600                | 0'21"                         | 1,26244                           | 2                  | 27°25'           | 9?           | 13,0                                  | 0,003                 |
| <i>Юпитер</i> |                |                           |                      |                               |                                   |                    |                  |              |                                       |                       |
| I Ио          | Галилей 1610   | 5,91                      | 422000               | 1'52"                         | 1,76914                           | 0                  | 3°7'             | 3700         | 5,5                                   | 0,000                 |
| II Европа     | Галилей 1610   | 9,40                      | 671000               | 2'58"                         | 3,55118                           | 0                  | 3°6'             | 3220         | 6,1                                   | 0,000                 |
| III Ганимед   | Галилей 1610   | 14,99                     | 1070000              | 4'44"                         | 7,15455                           | 0                  | 3°2'             | 5150         | 5,1                                   | 0,001                 |
| IV Каллисто   | Галилей 1610   | 23,36                     | 1881000              | 8'19"                         | 16,68902                          | 0                  | 2°43'            | 5180         | 6,2                                   | 0,007                 |
| V             | Барнарда 1892  | 2,53                      | 181000               | 0'48"                         | 0,49818                           | 0                  | 3°7'             | 160?         | 14,0                                  | 0,003                 |
| VI            | Перрайн 1904   | 160,46                    | 11,4·10 <sup>6</sup> | 0°51'                         | 250,621                           | 31                 | 28°45'           | 160?         | 14,7                                  | 0,155                 |
| VII           | Перрайн 1905   | 164,46                    | 11,7·10 <sup>6</sup> | 0°52'                         | 260,07                            | 30                 | 27°58'           | 65?          | 17,5                                  | 0,207                 |
| VIII*)        | Меллотт 1908   | 329,30                    | 23,5·10 <sup>6</sup> | 1°44'                         | 738,9                             | 145                | 148°4'           | 65?          | 16,5                                  | 0,378                 |
| IX*)          | Никольсон 1914 | 351,00                    | 25,1·10 <sup>6</sup> | 1°46'                         | 745,0                             | 154                | 156°             | 30?          | 18,0                                  | 0,275                 |
| X             | Никольсон 1938 | 164,70                    | 11,7·10 <sup>6</sup> | 0°51'                         | 254,2                             | —                  | 28°16'           | 25?          | 18,8                                  | 0,140                 |
| XI*)          | Никольсон 1938 | 316,00                    | 22,6·10 <sup>6</sup> | 1°39'                         | 692,5                             | —                  | 163°             | 25?          | 18,5                                  | 0,207                 |

## Продолжение

| Название       | Открытие       | Ср. расстояние от планеты |   | Среднее углов. расстояние (с Солнца) | Звездное время обращения в сутках | Наклон орбиты      |                  | Диаметр в км | Звездная величина в среднем положении | Эксцентриситет орбиты |
|----------------|----------------|---------------------------|---|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|
|                |                | в радиусах планеты        | в километрах                            |                                      |                                   | к экватору планеты | к орбите планеты |              |                                       |                       |
| 1              | 2              | 3                         | 4                                       | 5                                    | 6                                 | 7                  | 8                | 9            | 10                                    | 11                    |
| <i>Сатурн</i>  |                |                           |   |                                      |                                   |                    |                  |              |                                       |                       |
| I Мимас        | Гершель 1789   | 3,08                      | 185000                                  | 0° 27'                               | 0,94242                           | 2                  | 23° 44'          | 640          | 12,1                                  | 0,019                 |
| II Энцелад     | Гершель 1789   | 3,95                      | 238000                                  | 0° 34'                               | 1,37022                           | 0                  | 26° 44'          | 800          | 11,6                                  | 0,005                 |
| III Тетия      | Кассини 1684   | 4,88                      | 294300                                  | 0° 43'                               | 1,88780                           | 1                  | 26° 44'          | 1300         | 10,5                                  | 0,000                 |
| IV Диона       | Кассини 1684   | 6,26                      | 377000                                  | 0° 55'                               | 2,73692                           | 0                  | 26° 44'          | 1100         | 10,7                                  | 0,002                 |
| V Рея          | Кассини 1672   | 8,74                      | 527000                                  | 1° 16'                               | 4,51750                           | 0                  | 26° 42'          | 1750         | 10,0                                  | 0,001                 |
| VI Титан       | Гюйгенс 1655   | 20,26                     | 1,2·10 <sup>6</sup>                     | 2° 57'                               | 15,94545                          | 0                  | 26° 7'           | 4150         | 8,3                                   | 0,029                 |
| VII Гиперион   | Болд 1848      | 24,56                     | 1,5·10 <sup>6</sup>                     | 3° 34'                               | 21,27666                          | 1                  | 26° 0'           | 500          | 13,0                                  | 0,119                 |
| VIII Янус      | Кассини 1671   | 59,03                     | 3,6·10 <sup>6</sup>                     | 8° 35'                               | 79,33082                          | 14                 | 16° 18'          | 1600         | 10,1                                  | 0,028                 |
| IX Феба *)     | Пиккеринг 1898 | 214,49                    | 12,9·10 <sup>6</sup>                    | 31° 10'                              | 530,45                            | 149                | 174° 42'         | 320          | 1405                                  | 0,166                 |
| Кольцо         | Гюйгенс 1658   | 1,48—2,29                 | 90·10 <sup>3</sup> —138·10 <sup>3</sup> | 20°                                  | 4 часа—14 часов                   |                    | 28° 6'           | 276000       | —                                     | —                     |
| <i>Уран</i>    |                |                           |   |                                      |                                   |                    |                  |              |                                       |                       |
| I Ариэль *)    | Лассель 1851   | 7,10                      | 191700                                  | 0° 14'                               | 2,52038                           | 0?                 | 97° 59'          | 950          | 15,5                                  | 0,007                 |
| II Умбриэль *) | Лассель 1851   | 10,00                     | 267100                                  | 0° 19'                               | 4,14418                           | 0?                 | 97° 59'          | 640          | 15,8                                  | 0,008                 |
| III Титания *) | Гершель 1787   | 16,41                     | 488200                                  | 0° 32'                               | 8,70588                           | 0?                 | 97° 59'          | 1600         | 14,0                                  | 0,002                 |
| IV Оберон *)   | Гершель 1787   | 21,94                     | 585900                                  | 0° 42'                               | 13,46326                          | 0?                 | 97° 59'          | 1450         | 14,2                                  | 0,001                 |
| V Миранда *)   | Кейпер 1948    | 5,25                      | 130400                                  |                                      | 1,41                              |                    | —?               | ?            | 17,0                                  | —?                    |
| <i>Нептун</i>  |                |                           |   |                                      |                                   |                    |                  |              |                                       |                       |
| I Тритон *)    | Лассель 1846   | 14,24                     | 353700                                  | 0° 16'                               | 5,87683                           | —                  | 139° 49'         | 5000         | 13,6                                  | 0,000                 |
| II Нереида     | Кейпер 1949    | 151                       | 8·10 <sup>6</sup>                       | 67"                                  | —2 года                           | —                  | 3° 14'           | 300          | 19,5                                  | ?                     |

\*) Толщина кольца &lt; 15 км

\*) Обратное движение.



Таблица VI. Самые яркие звёзды

| Обозначение         | Название    | Видимая<br>величина | Спектр | Собств.<br>движ. | Парал-<br>л. движ. | Рассто-<br>яние в свет.<br>годах | Абсолютн.<br>величина | Свети-<br>мость<br>( $\odot=1$ ) | Диаметр<br>( $\odot=1$ ) | Масса<br>( $\odot=1$ ) | Плотность<br>в $g/cm^3$ |
|---------------------|-------------|---------------------|--------|------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| $\alpha$ Б. Пса     | Сириус      | — 1,6               | A2     | 1" 315           | 0",376             | 8,7                              | +1 <sup>m</sup> .3    | 26                               | 1,8                      | 3,4                    | 0,42                    |
| $\alpha$ Кия        | Капеллус    | — 0,9               | F0     | 0,022            | 0,018              | 180                              | —4,6                  | 5400                             | 85                       | (50)                   | 0,0001                  |
| $\alpha$ Центавра   | Толимак     | —                   | G5     | 3,682            | 0,756              | 4,3                              | +4,7                  | 1,0                              | 1,0                      | 1,1                    | 1,4                     |
| $\alpha$ Лирь       | Beta        | 0,1                 | A1     | 0,348            | 0,121              | 27                               | +0,5                  | 50                               | 2,2                      | 2,8                    | 0,28                    |
| $\alpha$ Возничего  | Капелла     | 0,2                 | G0     | 0,439            | 0,063              | 52                               | —0,3                  | 110                              | 12                       | 7,5                    | 0,018                   |
| $\alpha$ Волопаса   | Арктур      | 0,2                 | K0     | 2,287            | 0,088              | 37                               | —0,0                  | 80                               | 26                       | (11)                   | 0,001                   |
| $\alpha$ Ориона     | Ригель      | 0,3                 | B8     | 0,005            | 0,006              | 540                              | —5,8                  | 16000                            | 33                       | (40)                   | 0,0014                  |
| $\alpha$ М. Пса     | Прокцион    | 0,5                 | F4     | 1,242            | 0,291              | 11,2                             | +2,8                  | 6                                | 1,8                      | 1,2                    | 0,28                    |
| $\alpha$ Эридапа    | Ахернар     | 0,6                 | B6     | 0,093            | 0,034              | 96                               | —1,7                  | 370                              | —                        | —                      | —                       |
| $\beta$ Центавра    | Альтаир     | 0,9                 | B2     | 0,039            | 0,017              | 180                              | —3,0                  | 1200                             | —                        | —                      | —                       |
| $\alpha$ Орла       | Бетельгейзе | 0,9                 | A6     | 0,659            | 0,204              | 16                               | +2,5                  | 8                                | 1,4                      | (1,7)                  | 0,6                     |
| $\alpha$ Ориона     |             | (0,9)               | M2     | 0,032            | 0,011              | 300                              | —3,9                  | 2800                             | 360                      | (15)                   | 10 <sup>-6</sup>        |
| $\alpha$ Креста     |             | 1,0                 | B1     | 0,048            | 0,013              | 250                              | —2,8                  | 1000                             | —                        | —                      | —                       |
| $\alpha$ Тельца     | Альдебаран  | 1,1                 | K5     | 0,205            | 0,051              | 64                               | —0,4                  | 110                              | 40                       | (4)                    | 2,10 <sup>-6</sup>      |
| $\alpha$ Львы       | Спика       | 1,2                 | B2     | 0,051            | 0,011              | 300                              | —2,8                  | 1000                             | 5                        | (11)                   | 0,14                    |
| $\beta$ Близнецов   | Поллукс     | 1,2                 | G9     | 0,032            | 0,100              | 33                               | +1,2                  | 26                               | —                        | —                      | —                       |
| $\alpha$ Скорпиона  | Антарес     | 1,2                 | M1     | 0,032            | 0,012              | 270                              | —3,4                  | 1800                             | 330                      | (50)                   | 10 <sup>-6</sup>        |
| $\alpha$ Южной Рыбы | Фомальгаут  | 1,3                 | A3     | 0,367            | 0,141              | 23                               | +2,2                  | 10                               | —                        | —                      | —                       |
| $\alpha$ Лебедя     | Денеб       | 1,3                 | A2     | 0,004            | 0,004              | 800                              | —5,2                  | 9400                             | 35                       | (35)                   | 0,001                   |
| $\alpha$ Льва       | Регул       | 1,3                 | B8     | 0,244            | 0,041              | 80                               | —0,6                  | 140                              | —                        | —                      | —                       |
| $\beta$ Креста      |             | +1,5                | B1     | 0,054            | 0,010              | 330                              | —3,5                  | 2000                             | —                        | —                      | —                       |
| $\alpha$ Солнце     |             | —26,7               | G0     | —                | —                  | —                                | +4,7                  | 1                                | 1                        | 1                      | 1,4                     |

В списке помещены все звёзды 1-й величины (21). Звёздочкой отмечены двойные и спектрально-двойные звёзды. В 8-м столбце даны абсолютные величины, т. е. «величины» звёзд, видимые с одного и того же расстояния, соответствующего параллаксу 0",1. Для звёзд-гигантов они выходят отрицательными. Для сравнения в последней строке приведено наше Солнце. Расстояния даны в световых годах. Диаметры 4-х самых больших звёзд определены по измерениям интерферометром. Для остальных вычислены по показателю цвета. Массы определены точно только для пяти двойных звёзд, остальные (в скобках) по кривой «масса — светимость». Для двойных звёзд дана общая масса обоих компонентов.

Таблица VII. Ближайшие звёзды

| Название или обозначение<br>по каталогу | Видимая<br>величина | Спектр | Собств.<br>движение | Параз-<br>итакс     | Расстоя-<br>ние (в све-<br>тов. годах) | Абсолют-<br>ная<br>величина | Свети-<br>мость<br>(☉=1) | Примечание                      |
|---|---------------------|--------|---------------------|---------------------|--|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 1                                       | 2                   | 3      | 4                   | 5                   | 6                                      | 7                           | 8                        | 9                               |
| Проксима                                | 10,5                | M      | 3 <sup>h</sup> 45   | 0 <sup>m</sup> 7,62 | 4,2                                    | +14,9                       | 0,0001                   | Двойная                         |
| α Центавра A                            | 0,3                 | G5     | 3,68                | 0,736               | 4,3                                    | +4,7                        | 1,14                     |                                 |
| α Центавра B                            | 1,7                 | K4     | 3,68                | 0,756               | 4,3                                    | +6,1                        | 0,32                     | Двойная                         |
| Лиланд 726-8                            | 9,7                 | M5     | 10,27               | 0,546               | 5,9                                    | +13,4                       | 0,0001                   |                                 |
| Звезда Барнарда                         | 11,9                | M6     | 3,37                | 0,360               | 5,8                                    | +15,7                       | 0,00005                  | Двойная, спутник — белый карлик |
| Вольф 359                               | 13,5                | M7     | 4,67                | 0,403               | 8,2                                    | +15,5                       | 0,00002                  |                                 |
| Лаклай 21185                            | 7,6                 | M2     | 4,77                | 0,388               | 8,5                                    | +10,5                       | 0,00035                  | Двойная, спутник — белый карлик |
| Сириус A                                | -1,6                | A2     | 1,32                | 0,376               | 8,7                                    | +1,3                        | 26                       |                                 |
| Сириус B (спутник)                      | +8,0                | A6     | 1,32                | 0,376               | 8,7                                    | +10,9                       | 0,0049                   | Двойная, спутник — белый карлик |
| Росс 154                                | 10,7                | M4     | 0,68                | 0,350               | 9,5                                    | +13,4                       | 0,0004                   |                                 |
| Звезда Кантейна                         | 9,2                 | M0     | 8,75                | 0,262               | 12,4                                   | +11,3                       | 0,0027                   | Двойная, спутник — белый карлик |
| Росс 248                                | 12,2                | M6     | 1,82                | 0,320               | 10,1                                   | +14,7                       | 0,0001                   |                                 |
| τ Кита                                  | 3,6                 | G6     | 1,92                | 0,298               | 10,7                                   | +6,0                        | 0,35                     | Двойная, спутник — белый карлик |
| Процион A                               | 0,5                 | F4     | 1,24                | 0,291               | 11,2                                   | +2,8                        | 5,9                      |                                 |
| Процион B                               | 10,8                | ?      | 1,24                | 0,291               | 11,2                                   | +13,1                       | 0,0005                   | Двойная                         |
| ε Эриды                                 | 3,8                 | K2     | 0,97                | 0,305               | 10,5                                   | +6,2                        | 0,31                     |                                 |
| 61 Лебедя A                             | 5,6                 | K6     | 5,26                | 0,299               | 10,7                                   | +8,0                        | 0,056                    | Двойная                         |
| 61 Лебедя B                             | 6,3                 | M0     | 5,21                | 0,299               | 10,7                                   | +8,7                        | 0,029                    |                                 |
| Лакзаль 9352                            | 7,4                 | M2     | 6,91                | 0,278               | 11,7                                   | +9,6                        | 0,012                    | Двойная                         |
| Струис 2398                             | 8,3                 | M4     | 2,31                | 0,289               | 11,4                                   | +11,0                       | 0,004                    |                                 |
| Грумбидж 34                             | 8,1                 | M2     | 2,89                | 0,284               | 11,7                                   | +10,4                       | 0,0092                   | Двойная                         |
| ε Иллейда                               | 4,7                 | K5     | 4,60                | 0,288               | 11,4                                   | +6,9                        | 0,13                     |                                 |
| Росс 614                                | 10,9                | ?      | 0,97                | 0,255               | 12,7                                   | +12,9                       | 0,0017                   | Двойная                         |
| Кротер 60 A                             | 9,6                 | M3     | 0,87                | 0,258               | 12,6                                   | +11,7                       | 0,0017                   |                                 |
| Кротер 60 B                             | 11,3                | M6     | 0,87                | 0,258               | 12,6                                   | +13,4                       | 0,0004                   | Двойная                         |
| Звезда ван-Маанена                      | 12,3                | F      | 3,0                 | 0,26                | 12,8                                   | +14,4                       | 0,0002                   |                                 |
| Кордоба 29191                           | 6,6                 | M1     | 3,51                | 0,257               | 12,6                                   | 8,6                         | 0,029                    | Белый карлик                    |
| Солнце                                  | -26,7               | G0     | —                   | —                   | —                                      | 4,7                         | 1                        |                                 |

В таблице приведены почти все звёзды внутри сферы с радиусом в 4 парсека и с центром в Солнце. Внутри этой сферы могут быть ещё звёзды, нам неизвестные, но их, вероятно, немного. Состав звездного «населения» этой небольшой области нашей галактической системы является типичным для всей системы. Подавляющее большинство звёзд — карлики, только три звезды ярче Солнца, и лишь одна из них — настоящий гигант. Ни одной звезды спектрального класса B, и ни одного красного гиганта не оказывается в нашей области, они слишком редки. Наоборот, белых карликов здесь имеется не менее трёх, очевидно, они далеко не представляют редкости во вселенной.

Таблица VIII. Названия и обозначения созвездий

В таблице помещены: 1) полные латинские названия всех созвездий, 2) их сокращённые международные обозначения, 3) русские названия. Созвездия, лежащие к югу от — 35° склонения, отмечены буквой ю.

| Латинское название | Обозначение | Русское название | Латинское название    | Обозначение | Русское название  |
|--------------------|-------------|------------------|-----------------------|-------------|-------------------|
| Andromeda          | And         | Андромеда        | Leo                   | Leo         | Лев               |
| Antlia             | Ant         | Насос            | Leo Minor             | LMi         | Малый Лев         |
| Apus ю             | Aps         | Райская птица    | Lepus                 | Lep         | Заяц              |
| Aquarius           | Aqr         | Водолей          | Libra                 | Lib         | Весы              |
| Aquila             | Aql         | Орёл             | Lupus ю               | Lup         | Волк              |
| Ara ю              | Ara         | Жертвенник       | Lynx                  | Lyn         | Рысь              |
| Aries              | Ari         | Овен             | Lyra                  | Lyr         | Лира              |
| Auriga             | Aur         | Возничий         | Mensa ю               | Men         | Столовая Гора     |
| Bootes             | Boo         | Волопас          | Microscopium ю        | Mic         | Микроскоп         |
| Caelum ю           | Caе         | Резец            | Monoceros             | Mon         | Единогор          |
| Camelopardalis     | Cam         | Жираф            | Musca ю               | Mus         | Муха              |
| Cancer             | Cnc         | Рак              | Norma ю               | Nor         | Наугольник        |
| Canes Venatici     | CVn         | Гончие Собаки    | Octans                | Oct         | Октант            |
| Canis Major        | CMA         | Большой Пёс      | Ophiuchus             | Oph         | Змееносец         |
| Canis Minor        | CMi         | Малый Пёс        | Orion                 | Ori         | Орион             |
| Capricornus        | Cap         | Козерог          | Pavo ю                | Pav         | Павлин            |
| Carina ю           | Car         | Киль             | Pegasus               | Peg         | Пегас             |
| Cassiopeja         | Cas         | Кассиопея        | Perseus               | Per         | Персей            |
| Centaurus ю        | Cen         | Центавр          | Phoenix ю             | Phx         | Феникс            |
| Cepheus            | Cep         | Цефей            | Pictor ю              | Pic         | Живописец         |
| Cetus              | Cet         | Кит              | Pisces                | Psc         | Рыбы              |
| Chamaeleon ю       | Cha         | Хамелеон         | Piscis Austrinus      | PsA         | Южная Рыба        |
| Circinus ю         | Cir         | Циркуль          | Puppis                | Pup         | Корма             |
| Columba ю          | Col         | Голубь           | Pyxis                 | Pyx         | Компас            |
| Coma Berenices     | Com         | Волосы Бероники  | Reticulum ю           | Ret         | Сетка             |
| Corona Austrina    | CrA         | Южная Корона     | Sagitta               | Sge         | Стрела            |
| Corona Borealis    | CrB         | Северная »       | Sagittarius           | Sgr         | Стрелец           |
| Corvus             | Crv         | Ворон            | Scorpius              | Sco         | Скорпион          |
| Crater             | Crt         | Чаша             | Sculptor ю            | ScI         | Скульптор         |
| Cruх ю             | Cru         | Крест (Южный)    | Scutum                | Sct         | Щит               |
| Cygnus             | Cyg         | Лебедь           | Serpens               | Ser         | Змея              |
| Delphinus          | Del         | Дельфин          | Sextans               | Sex         | Секстант          |
| Dorado ю           | Dor         | Золотая Рыба     | Taurus                | Tau         | Телец             |
| Draco              | Dra         | Дракон           | Telescopium ю         | Tel         | Телескоп          |
| Equuleus           | Equ         | Малый конь       | Triangulum            | Tri         | Треугольник       |
| Eridanus           | Eri         | Эридан           | Triangulum Australe ю | TrA         | Южный Треугольник |
| Fornax             | For         | Печь             | Tucana ю              | Tuc         | Тукап             |
| Gemini             | Gem         | Близнецы         | Ursa Major            | UMa         | Большая Медведица |
| Grus ю             | Gru         | Журавль          | Ursa Minor            | UMi         | Малая Медведица   |
| Hercules           | Her         | Геркулес         | Vela ю                | Vel         | Паруса            |
| Horologium         | Hor         | Часы             | Virgo                 | Vir         | Дева              |
| Hydra              | Hya         | Гидра            | Volans ю              | Vol         | Летучая Рыба      |
| Hydrus ю           | Hyl         | Южный Змей       | Vulpecula             | Vul         | Лисица            |
| Indus ю            | Ind         | Индеец           |                       |             |                   |
| Lacerta            | Lac         | Ящерица          |                       |             |                   |

## **ЛИТЕРАТУРА**

### **Курсы общей астрономии**

1. Блажко С. Н., Курс общей астрономии, Гостехиздат, 1947 г.
2. Попов П. И., Баев К. Л., Воронцов-Вельяминов Б. А., Куницкий Р. В., Астрономия. Учебник для высших педагогических учебных заведений, изд. 2-е, Учпедгиз, 1949 г.

### **К главе II. Солнце и время**

3. Полак И. Ф., Время и календарь, Гостехиздат, 1947 г.
4. Россовская В. А., Время и его измерение, Гос. из-во «Стандартизация и рационализация», 1933 г.
5. Никольский В. К., Происхождение нашего летоисчисления, ГАИЗ, 1938 г.

### **К главе III. Задачи на время и координаты.**

6. Блажко С. Н., Курс сферической астрономии, Гостехиздат, 1948 г.
7. Казаков С. А., Курс сферической астрономии, изд. 2-е, под ред. проф. Паренаго П. П., ГИТТЛ, 1940 г.
8. Степанов Н. Н., Сферическая тригонометрия, Гостехиздат, 1948 г.

### **К главе IV. Астрономические инструменты и наблюдения**

9. Димитров Г. и Бэкер Д., Телескопы, Гостехиздат, 1947 г.
10. Навашин М. С., Телескоп астронома-любителя, Гостехиздат, 1949 г.
11. Навашин М. С., Инструкция к изготовлению самодельного рефлектора. Изд. АН СССР, 1949 г.
12. Паренаго П. П., Астрономические обсерватории, ОНТИ, 1936 г.
13. Максудов Д. Д., Астрономическая оптика, Гостехиздат, 1946 г.

### **К главе V. Основные задачи астрометрии**

14. Блажко С. Н., Курс практической астрономии, изд. 2-е, ГИТТЛ, 1940 г.
15. Попов П. И., Общедоступная практическая астрономия, изд. 2-е, Гостехиздат, 1950 г.
16. Хлюстин Б. П., Мореходная астрономия, изд. «Морской транспорт», 1948 г.
17. Куницкий Р. В., Авиационная астрономия, изд. 2-е, Воениздат, 1947 г.
18. Михайлов А. А., Курс гравиметрии и теории фигуры Земли, изд. 2-е, ГУГК, 1939 г.
19. Жекулин В., Астрономия и социалистическое строительство, изд. Московского Планетария, 1939 г.

### **К главе VI. Движение Луны. Затмения**

20. Михайлов А. А., Теория затмений, Гостехиздат, 1945 г.
21. Михайлов А. А., Солнечные и лунные затмения, Гостехиздат, 1946 г.,
22. Баев К. Л., Солнечные затмения, изд. 2-е, ГАИЗ, 1936 г.

**К главе VII. Движение планет и VIII. Закон всемирного тяготения**

23. Дубошин Г. Н., Введение в небесную механику, ОНТИ, 1933 г.
24. Баев К. Л., Всемирное тяготение, ОНТИ, 1936 г.
25. Орлов А. Я. и Орлов Б. А., Курс теоретической астрономии, ГИТТЛ, 1940 г.
26. Дубяго А. Д., Определение орбит, Гостехиздат, 1949 г.
27. Дарвин Дж. Г., Приливы и родственные им явления в солнечной системе, ГИЗ, 1923 г.
28. Паули В., Теория относительности, Гостехиздат, 1947 г.

**К главе IX. Спектральный анализ и фотометрия**

29. Воронцов-Вельяминов Б. А., Курс практической астрофизики, ГИТТЛ, 1940 г.
30. Тихов Г. А., Астрофотометрия, Научное книгоиздательство, 1922 г.
31. Сытинская Н. Н., Абсолютная фотометрия протяжённых небесных объектов, изд. ЛГУ, 1948 г.

**К главе X. Солнце**

32. Массвич А. Г., Что происходит в недрах Солнца и звёзд, Изд-во Правда, 1948 г.
33. Шаронов В. В., Солнце и его наблюдение, Гостехиздат, 1948 г.
34. Попов П. И., Солнце и Земля, Изд. Правда, 1949 г.
35. Калитин Н. Н., Лучи Солнца, Изд. АН СССР, 1947 г.

**К главе XI. Луна**

36. Баев К. Л., Шишаков В. А., Луна, Изд. АН СССР, 1941 г.
37. Радлова Л. Н., Природа лунной поверхности, Природа, № 8, стр. 23 — 28, 1939 г.
38. Уинпл Ф., Земля, Луна и планеты, Гостехиздат, 1948 г.

**К главе XII. Планеты**

39. Уинпл Ф., Земля, Луна и планеты, Гостехиздат, 1948 г.
40. Шаронов В. В., Марс, Изд. АН СССР, 1947 г.
41. Полак И. Ф., Планета Марс и вопрос о жизни на ней, изд. 3-е, ГОНТИ, 1939 г.
42. Тихов Г. А., Новейшие исследования по вопросу о растительности на планете Марс, Изд. Правда, 1948 г.
43. Сытинская Н. Н., Есть ли жизнь на других мирах? Изд. АН СССР, 1949 г.
44. Воронцов-Вельяминов Б. А., Как открывают планеты, ГАИЗ, 1937 г.

**К главе XIII. Кометы и падающие звёзды**

45. Бредихин Ф. А., О хвостах комет, ГИТТЛ, 1939 г.
46. Орлов С. В., Природа комет, Гостехиздат, 1944 г.
47. Орлов С. В., Голова кометы и новая классификация кометных форм, Советская наука, 1945 г.
48. Всехсвятский С. К., Что такое кометы? Изд. АН СССР, 1938 г.
49. Астапович И. С. и Федынский В. В., Метеоры, Изд. АН СССР, 1940 г.
50. Ватсон Ф., Между планетами, Гостехиздат, 1947 г.
51. Кринов Е. Л., Метеориты, Изд. АН СССР, 1948 г.
52. Федынский В. В. и Астапович И. С., Малые тела вселенной, Гостехиздат, 1948 г.
53. Кринов Е. Л., Сихотэ-Алиньский метеоритный дождь, Изд. АН СССР, 1948 г.
54. Фесенков В. Г., Метеорная материя в межпланетном пространстве, Изд. АН СССР, 1947 г.

## К главе XIV. Звёзды

55. Паренаго П. П. и Кукаркин Б. В., Переменные звёзды и способы их наблюдения, изд. 2-е, Гостехиздат, 1947 г.
56. Кукаркин Б. В. и Паренаго П. П., Физические переменные звёзды, ОНТИ, 1938 г.
57. Мартынов Д. Я., Затменные переменные звёзды, ГОНТИ, 1939 г.
58. Воронцов-Вельяминов Б. А., Новая звезда в созвездии Геркулеса, ОНТИ, 1935 г.
59. Воронцов-Вельяминов Б. А., Газовые туманности и новые звёзды, Изд. АН СССР, 1948 г.

## К главе XV. Строение вселенной

60. Паренаго П. П., Курс звёздной астрономии, изд. 2-е, Гостехиздат, 1946 г.
61. Бок Б. и Бок П., Млечный Путь, Гостехиздат, 1948 г.
62. Шепли Х., Галактики, Гостехиздат, 1947 г.
63. Гольдберг Л. и Аллер Л., Атомы, звёзды и туманности, Гостехиздат, 1948 г.
64. Полак И. Ф., Введение в звёздную астрономию, ОНТИ, 1935 г.
65. Паренаго П. П., Строение вселенной, Госкультпросветиздат, 1949 г.
66. Фесенков В. Г., Современные представления о вселенной, Изд. АН СССР, 1949 г.
67. Воронцов-Вельяминов Б. А., Вселенная, Гостехиздат, 1947 г.

## К главе XVI. Эволюция небесных тел

68. Энгельс Ф., Диалектика природы, Госполитиздат, 1948 г.
69. Ленин В. И., Материализм и эмпириокритицизм, Госполитиздат, 1948 г. (Сочинения, изд. 3-е, т. XIII, изд. 4-е, т. XIV).
70. Воронцов-Вельяминов Б. А., Происхождение небесных тел, Гостехиздат, 1945 г.
71. Субботин М. Ф., Происхождение и возраст Земли, Гостехиздат, 1945 г.
72. Фесенков В. Г., Космогония солнечной системы, изд. АН СССР, 1944 г.
73. Амбарцумян В. А., Эволюция звёзд и астрофизика, Изд. АН Арм. ССР, 1947 г.
74. Шмидт О. Ю., Четыре лекции о теории происхождения Земли, Изд. АН СССР, 1949 г.

## К приложению I: Инструкции к наблюдениям

75. Бронштэн В. А. и Орлов С. В., Инструкции для наблюдений планет и комет, Изд. АН СССР, 1948 г.
76. Бугославская Н. Я. и Базилевич В. В., Инструкция для наблюдений Солнца, Изд. АН СССР, 1948 г.
77. Дагаев М. М. и Федынский В. В., Инструкция для наблюдений метеоров, Изд. АН СССР, 1949 г.
78. Исаев С. И., Бугославская Н. Я. и Бронштэн В. А., Инструкция для наблюдений полярных сияний и серебристых облаков, Изд. АН СССР, 1948 г.
79. Зигель Ф. Ю., под редакцией Кукаркина Б. В., Инструкция для наблюдений переменных звёзд, Изд. АН СССР, 1948 г.

## Пособия и карты

80. Воронцов-Вельяминов Б. А., Сборник задач и упражнений по астрономии, изд. 2-е, Гостехиздат, 1949 г.
81. Попов П. И. и Бугославская Н. Я., Практикум по астрономии в педагогических институтах, Учпедгиз, 1947 г.
82. Набоков М. Е., Астрономические наблюдения с биноклем, изд. 3-е, Гостехиздат, 1948 г.

83. Глазенап С. П., Другам и любителям астрономии, изд. 3-е, под редакцией Вороцова-Вельяминова Б. А., ОНТИ, 1936 г.
84. Куликовский П. Г., Справочник астронома-любителя, Гостехиздат, 1949 г.
85. Михайлов А. А., Звёздный атлас, изд. 2-е, Моск. Об-ва Любителей Астрономии, 1920 г.
86. Михайлов А. А., Атлас северного звёздного неба, ГИЗ, 1920 г.
87. Шишаков В. А., Вселенная. Альбом наглядных пособий, 40 листов с объяснительным текстом, Госкультпросветиздат, 1945 г.
88. Гальперсон С., Атлас Луны, изд. 2-е, Научное книгоиздательство, 1922 г.

### История астрономии

89. Куницкий Р. В., Развитие взглядов на строение солнечной системы, изд. 3-е, Гостехиздат, 1944 г.
  90. Берри А., Краткая история астрономии, изд. 2-е, под ред. Куницкого Р. В., Гостехиздат, 1946 г.
  91. Баев К. Л., Коперник, Журнально-газетное объединение, 1936 г.
  92. Николай Коперник (1473—1543). Сборник статей к 400-летию со дня смерти, изд. АН СССР, 1947 г.
  93. Джордано Бруно, О бесконечности, вселенной и мирах, Соцэкгиз, 1936 г.
  94. Джордано Бруно, О причине, начале и едином, Соцэкгиз, 1934 г.
  95. Галилео Галилей, Диалог о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой, Гостехиздат, 1948 г.
  96. Цейтлин З., Галилей, Журнально-газетное объединение, 1935 г.
  97. Гурев Г. А., Системы мира, Изд. Московский рабочий, 1950 г.
  98. Куликовский П. Г., Ломоносов — астроном и астрофизик, Изд. МГУ, 1947 г.
  99. Райков Б. Е., Очерки по истории гелиоцентрического мировоззрения в России, изд. 2-е, АН СССР, 1947 г.
  100. Труды Института истории естествознания АН СССР, том II, 1948 г., статьи Фесенкова В. Г. и Воронцова-Вельяминова Б. А. по истории астрономии в России и в СССР.
  101. Воронцов-Вельяминов Б. А., Лаплас, Журнально-газетное объединение, 1937 г.
  102. Вавилов С. И., Исаак Ньютон (1643—1727), Изд. АН СССР, 1943 г.
  103. Леонов Н. И., Улугбек — великий астроном XV века, изд. 2-е, Гостехиздат, 1950 г.
  104. Кары-Ниязов Т. Н., Астрономическая школа Улугбека, Изд. АН СССР, 1950 г.
  105. Бируни, Сборник статей, Изд. АН СССР, 1950 г.
-

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адамс 172, 250  
Амбарцумян В. А. 322, 326,  
329, 330, 332, 347, 357, 361  
Аргеландер 285, 303  
Аристарх 25, 140, 228  
Аристотель 138, 147, 159  
Астапович И. С. 279

Баклунд О. А. 255  
Белопольский А. А. 20, 22, 189,  
197, 249, 308  
Белявский С. И. 242  
Бессель 103, 117, 259  
Бете 218, 219  
Бируни 140  
Блажко С. Н. 22, 303, 306, 308  
Браге Тихо 148, 149, 228, 253  
Брадлей 117, 118, 119  
Бредихин Ф. А. 20, 22, 242, 246,  
261, 262  
Бруно Джордано 146, 147

Воронцов-Вельяминов Б. А.  
259, 260, 292, 294, 311, 322, 327,  
328, 332  
Всехсвятский С. К. 257

Галилей 15, 20, 147, 151, 158,  
159, 247  
Галле 172, 250  
Галлей 255, 264  
Ганский А. II. 22, 209  
Гершель В. 20, 172, 250, 297  
316, 349  
Гиппарх 174, 285  
Гневнышев М. Н. 203  
Горделадзе Ш. Г. 322, 329, 332  
Гук 159  
Гюйгенс 159, 249

Дарвин Джордж 352, 353, 354,  
358  
Джинс 356  
Джонс Спенсер 115

Жданов А. А. 340  
Изотов А. А. 107  
Индикоплов Козьма 21

Калиняк А. А. 346  
Канг 348, 349, 352  
Кантеин 317  
Карамзин 21  
Кеплер 20, 148, 149, 151, 158,  
159, 163, 164, 167  
Кирхгоф 187  
Ковалевская С. В. 249  
Ковальский М. А. 172, 300, 316  
Конт 184  
Коперник Николай 15, 19, 21,  
25, 114, 117, 140, 141, 142, 145,  
151, 159, 228  
Костинский С. К. 22, 242  
Красовский В. И. 346  
Красовский Ф. Н. 105, 107  
Крат В. А. 203  
Кринов Е. Л. 241  
Кукаркин Б. В. 295, 303, 307,  
311, 328, 330, 345, 346, 359,  
361  
Кулик Л. А. 276  
Куницкий Р. В. 316.  
Кюстнер 237

Лагранж 171, 267  
Лаплас 167, 171, 172, 249, 266,  
349, 350  
Лебедев П. Н. 216, 263  
Лебединский А. И. 311  
Леверрье 172, 250, 266  
Левин Б. Ю. 274  
Лексель А. И. 172, 236  
Ленин В. И. 25, 242  
Лилио 61  
Липский Ю. Н. 225  
Ловелл 241, 251  
Локайр 204, 290, 291

Ломоносов М. В. 20, 22, 77,  
236, 264  
Любимов А. 21  
Ляпунов А. М. 352, 353, 355,  
358

Магеллан, 58  
Майкельсон 294  
Максутов Д. Д. 77, 211  
Маркс К. 19, 25  
Милан 340  
Михайлов А. А. 129, 212  
Морозов Н. А. 242

Набоков М. Е. 327  
Натансон 294  
Неуёмин Г. Н. 253  
Никонов В. Б. 346  
Ньюгон 15, 20, 158, 159, 160,  
161, 162, 163, 167, 173, 235, 348

Огородников К. Ф. 316, 322, 345  
Оорт 342, 343, 344  
Орлов С. Б. 263, 268

Павлов Н. Н. 83, 193  
Паренато П. П. 251, 291, 292,  
294, 303, 311, 316, 322, 327,  
328, 344, 345, 346

Парийский Н. Н. 356  
Петр I 21  
Пнанци 242  
Пономарёв Н. Г. 211  
Попов А. С. 103  
Птолемей 21, 138, 140, 145,  
285

Пуанкаре А. 353  
Радлова Л. Н. 241  
Рейн Н. Ф. 356  
Ремер 247  
Рёсселл 291, 293  
Рубашев Б. М. 220

Скиапарелли 241, 268  
Србодев В. В. 250



# ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

|                                  |                               |                                 |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Созинген 60                      | Фесенков В. Г. 218, 225, 241, | Шайн Г. А. 306                  |
| Сталин И. В. 18, 22, 23, 24, 25, | 277, 279, 316, 342, 357, 359  | Шкловский И. С. 214             |
| 140, 158                         | Флоря Н. Ф. 322               | Шмидт О. Ю. 357                 |
| Станюкович К. П. 274             | Фраунгофер 187                | Штернберг П. К. 108, 237, 242   |
| Столетов А. Г. 193               |                               | Шэпли 308                       |
| Струве В. Я. 20, 97, 105, 117,   | Хэл 200, 201                  |                                 |
| 297, 322                         | Цезарь Юлий 60                |                                 |
|                                  | Цераская Л. П. 303            | Эддингтон 308                   |
| Тихов Г. А. 22, 240, 241         | Цераский В. К. 95, 196, 213,  | Эйлер Л. 20, 74, 167, 174       |
|                                  | 282, 303                      | Эйнштейн 163, 211, 340          |
| Улугбек 97, 285                  | Цингер П. Я. 100              | Энгельс Ф. 18, 19, 24, 25, 146, |
| Умов Н. А. 308                   |                               | 348, 361                        |
| Федьинский В. В. 274             | Чечик П. О. 274               | Эратосфен 103                   |

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аберрация света** 118—122, 284  
 — хроматическая 74  
**Абсолютная величина** 282, 283  
 — — Солнца 283  
**Абсолютный блеск** 282, 283  
**Абсолютное определение координат** 94  
**Абсолютно чёрное тело** 212  
**Адонис** 244  
**Азимут** 36, 83  
**Аксиомы движения** 159, 160  
**Алголь** 283, 304, 305  
 —, звёзды его типа 304, 305  
**Альберт** 244  
**Амбарцумяна гипотеза** 358, 359  
**Андромеды** 273  
**Аномалия истинная** 155  
 — средняя 153  
 — экцентрическая 154  
**Антарес** 294, 363, 375  
**Апионд** 353  
**Апекс** 120, 269  
**Апогей** 46, 127, 139  
**Аполлон** 244  
**Апохроматы** 74  
**Апсид линия** 127  
**Арктур** 282—284, 289, 314, 315, 363, 364, 369, 375  
**Астероиды** 232, 242—245  
**Астрогнозия** 362  
**Астрограф** 95  
**Астрология** 19, 21  
**Астрометрия** 16, 100—122  
**Астрономическая единица** 113  
**Астрономические ежегодники** 235  
 — инструменты 72—98  
 — наблюдения 72—98  
 — пункты 107  
**Астрономический треугольник** 69  
**Астрономия** 11  
 —, значение 16, 17  
 —, историческое развитие 18—23  
 —, методы 14, 15  
 —, определение 11  
**Астрономия авиационная** 15  
 — звёздная 16, 22, 285, 360  
 — мореходная 15  
 — описательная 16  
 — полевая 16  
 — практическая 15, 17, 83  
 — сферическая 15  
 — теоретическая 16  
**Астрофизика** 16, 22  
**Астрофотографические инструменты** 95, 96  
**Астрофотография** 94—96  
**Астрофотометрия** 192  
**Атмосфера больших планет** 245  
 — Венеры 236  
 — земная 27  
 — Луны 224—226  
 — Марса 240  
 — Солнца 203  
 — Юпитера 247  
**Афелий** 46  
**Ахиллес** 245  
**Ахроматический объектив** 73, 74  
**Базис геодезический** 105  
 — астрометрический 109, 113  
**Белые карлики (звёзды)** 292, 295  
**Бетельгейзе** 289, 294, 303, 366, 375  
**Блеск** 192  
**Ближайшие звёзды** 376  
**Боиды** 274  
**Боннский перечень** 285  
**Бороздки на Луне** 228  
**Быстрые звёзды** 320, 321  
**Вега** 282, 283, 288, 315, 364, 366, 369, 375  
**Вековое ускорение Луны** 181  
**Вековые возмущения Луны** 170  
 — — планет 171  
**Венера** 12, 20, 137, 144, 150, 232—237, 368, 372  
 —, прохождение по диску Солнца 236  
**Вертексы звёздных потоков** 317, 318  
**Вертикал** 36  
**Вертикальная линия** 30  
**Вертикальный круг** 36  
**Верхнее соединение планеты** 137  
**Верхние планеты** 137, 139, 144, 232, 238  
 — Весеннее небо 363  
 — равноденствие 42  
**Беста** 243  
**Видимый блеск звезды** 280—282  
**Видимые места звёзд** 284  
**Вильсона явление** 159  
**Високосный год** 60  
**Владилена** 242  
**Внешние планеты** 142, 143  
**Внутренние планеты** 142  
**Возмущающая сила** 168  
 — — движения Луны 169, 170  
**Возмущения** 167  
 — вековые 171  
 — движения Луны 170  
**Возмущения движения планет** 171  
 — периодические 171  
**Возраст Земли** 360  
 — Солнца 361  
**Волокна хромосферы** 209  
**Восход, вычисление** 69, 89  
**Вращение Галактики** 342—345  
 — небесной сферы 29, 30  
**Времена гола** 42, 43, 144  
 — — на Марсе 239  
**Время всемирное** 55  
 —, задачи на обращение 65, 66  
 — гражданское 51  
 — декретное 56, 58  
 — звёздное 53, 54  
 — местное 54, 55  
 — поясное 55—57  
 — солнечное истинное 50  
 — среднее 53  
**Вселенная** 13, 14, 17, 18, 26, 314—347  
**Всемирное тяготение** 158, 161—165  
**Высота полюса** 33  
 — светила 36  
**Вычисления астрономические** 14  
**Газовый хвост Земли** 279  
**Галактика** 13, 14, 323, 340, 342, 345—347  
**Галактическая плоскость** 323  
**Галактическое ядро** 346, 347  
**Гарвардская классификация спектров** 288—290  
**Гаусса постоянная** 165  
**Гектор** 245  
**Гермес** 244  
**Гелий на Солнце** 204  
 — на звёздах 288  
**Гелиоцентрическая система** 141—146  
**Гелиоцентрическое мировоззрение** 146, 147  
**Геодезические съёмки** 107  
**Геодезия** 17, 20  
**Геонд** 106  
**Гиады** 318—320, 325  
**Гидальго** 245  
**«Глаз и ухо», способ** 82  
**Глобулы** 333  
**Год григорианский** 61  
 — драконический 134  
 — звёздный 175  
 — лунный 69  
 — тропический 43, 59, 175  
 — юлианский 60  
**Годовая комета** 256, 261

- Голубой цвет неба 27  
 Горизонт 31  
 Горизонтальная плоскость 30  
 Гравитационное смещение 190  
 Гравиметрия 107, 108  
 Градус земного меридиана 105  
 Градусное измерение 104  
 Гравуляция 197
- Движение земной оси (полюсов) 174, 237, 238  
 — планет 136—156  
 — солнечной системы 315, 316  
 Движущиеся скопления (звезд) 318—320  
 Деймос, спутник Марса 373  
 Денеб 366  
 Деферент 138  
 Джинса гипотеза 356  
 Долгота астрономическая 44  
 — в эпоху 153  
 — восходящего узла 152  
 — галактическая 323  
 — географическая 54  
 — определение 102, 103  
 Допплера-Белопопольского принципа 189, 196, 249, 251, 301, 314  
 Дракониды 271—274  
 Дуга меридиана, измерение 105  
 «Дуговые» линии в спектрах 290
- Задача двух тел 163, 164, 167  
 — трёх тел 167  
 Закон всемирного тяготения 15, 158—182, 342  
 — смещения Вина 213  
 — Стефана 212  
 Законы Кеплера 128, 149—153, 158, 160, 173, 223, 234, 300, 353  
 Затмения Луны 132—134  
 — Солнца 128—135, 209, 212  
 Заход светил, вычисление 69, 89
- Звезд блеск 280  
 — спектры 288  
 — температуры 290  
 — цвета 287  
 — число 286  
 — эволюция 293, 294, 355, 356  
 Звездное время 38, 48, 49  
 Звездные ассоциации, 329, 330  
 — величины видимые 281  
 — абсолютные 282  
 — дожди 271  
 — карги 284—286  
 — каталоги 284—286  
 — потоки 316—318  
 — параллаксы и расстояния 117, 118, 280, 300  
 — скопления 322—330  
 — — рассеянные 323—326  
 — — шаровые 326, 328—369  
 — спектры 288—290  
 — сутки 47, 48
- Звездный год 124  
 — месяц 123  
 Звезды 281—312  
 — видимые и средние места 284  
 — Вольфа-Райе 288  
 — возраст 290, 360  
 — восходящие и заходящие 34  
 — гиганты и карлики 291—293, 296  
 —, движения 284  
 —, диаметры 294—295
- Звезды двойные 297—302, 355  
 —, источники энергии 359  
 —, невосходящие 34  
 —, незаходящие 34  
 —, новоподобные 311, 312  
 —, новые 309—311  
 —, обозначения 283  
 —, переменные 303—309  
 —, расстояния 117, 118  
 —, скорость 315  
 —, спектрально-двойные 306—362  
 —, субкарлики 292  
 —, фундаментальные 80
- Земля 144, 150, 232—234, 372  
 —, возраст 360  
 —, вращение 32  
 —, масса 295  
 —, плотность 296  
 —, размеры 106  
 —, сжатие 106  
 —, шарообразность 103—107  
 Зенит 30, 32  
 Зенитное расстояние 36  
 Зеркальные телескопы 75  
 Зимнее небо 366  
 —, солнцестояние 42  
 Зодиак 45  
 Зодиакальный свет 279
- Инструменты астрономические 72—98  
 —, измерительные 79—98  
 Ионизация 190  
 Искривление светового луча в поле тяготения 211, 212  
 «Искровые» линии в спектре 291  
 Источники солнечной энергии 216—220  
 — звездной энергии 359
- Календарь 16, 18, 59—69  
 — григорианский 61  
 — египетский 60  
 — еврейский 59  
 — лунно-солнечный 59  
 — лунный 59  
 — мусульманский 59  
 — солнечный 59, 60  
 — юлианский 60
- Канопус 288, 315, 375  
 Канта гипотеза 348, 349  
 Капелла 283, 288, 302, 315, 362, 366, 375  
 Капский фотографический процесс 285  
 Каптейна потоки 316—318, 323  
 — фигуры 317  
 Кастор 366, 369  
 Кассини закон 222  
 Кирхгофа закон 188  
 Классификация звездных спектров 288—290  
 Коллиматор 186  
 Коллимация 83  
 Кольцо Сатурна 249—250  
 Кольцеобразное солнечное затмение 129, 131  
 Кома 266  
 Комета Биззэ 265, 266, 273  
 — Галлея 21, 255, 256, 260, 264  
 — Джиакони-Циннера 273  
 — Лекселя 266  
 — Морхауза 257  
 — Неуймина 1916а 253  
 — Швасмана-Вахмана 255, 260
- Комета Энке-Баклунда 264  
 — 1680 г. 169  
 — 1811 г. 259  
 — 1862 II 273  
 — 1866 I 273  
 — 1882 II 265  
 — 1914 V 254  
 Кометы 12, 13, 253—273  
 —, вид 256  
 —, движение 253—255  
 —, периодические 255  
 —, природа 260, 261  
 —, происхождение 267  
 —, размеры и массы 259  
 —, разрушение 261, 273  
 —, столкновение 266  
 Кометы спектр 260  
 Контракционная теория солнечной теплоты 216  
 Координаты астрономические 35  
 — галактические 323  
 — гелиоцентрические 156  
 — географические 17  
 — геоцентрические 155  
 — горизонтальные 36  
 — экваториальные 36—38  
 — эклиптические 44  
 Короний 210  
 Космическая пыль 322  
 Космический кальций 321, 322  
 Космогонические гипотезы 349  
 Космогония 16  
 Космология 348  
 Кратеры лунные 226—228  
 Красное пятно Юпитера 246  
 «Красное смещение» 25, 335, 339, 340  
 Критическая скорость 225  
 Круг склонения 36, 37  
 — суточный 30  
 — часовой 36  
 — широты 44  
 Круговая скорость 166  
 Кульминация 31, 88  
 Лапласа гипотеза 349—352, 355  
 Леониды 271—273  
 Летнее небо 363, 364  
 Летосчисление 18  
 Либрация Луны 368  
 Линия изменения даты 58  
 Личные ошибки 84  
 Луна 178, 181, 182, 220—231, 368, 373  
 —, атмосфера 224—226  
 —, блеск 226  
 —, возмущение 169, 170  
 —, вращение 221, 222  
 —, горы 228, 229  
 —, движение 123—135, 366, 367  
 —, диаметр 221  
 —, затмения 132, 133  
 —, изменения 229, 230  
 —, либрация 222—224  
 —, масса 221  
 —, наблюдения 368  
 —, орбита 127, 128  
 —, параллакс 109  
 —, плотность 221  
 —, происхождение 353—355  
 —, размеры 221  
 —, расстояние 110  
 —, строение поверхности 226, 228  
 —, теплота 226  
 —, фазы 125, 126

- Лучевые скорости 188, 319  
 Магеллановы облака 337  
 Магнетизм солнечных пятен 200—202  
 Магнитные бури 203  
 Малые планеты 115, 232, 234, 242—245  
 Марс 22, 114, 136, 144, 149, 150, 232—234, 238—241, 368, 372  
 —, спутники 242  
 Маятник 84  
 Меридиан небесный 36  
 Меридианный круг 81—83  
 Меркурий 144, 150, 182, 232—235, 368, 372  
 —, движение перигелия 182  
 —, прохождение по диску Солнца 236, 237  
 Меридиан звезд 287  
 Месяц аномалистический 223  
 — драконический 134, 223  
 — звёздный 123, 134  
 — сидерический 123  
 — синодический 124  
 Метагалактика 338—340  
 Метеориты 229, 266, 267, 274—278  
 Метеоритная гипотеза образования лунных кратеров 229  
 Метеорные потоки 270—272  
 — рои 273  
 — теля 13, 260, 261, 268, 272, 278, 279  
 Метеоры 12, 13, 20, 238, 269, 273, 274  
 Методы астрономических исследований 14, 15  
 Микрометр 81  
 — безлинейный 83  
 — нитяной 93  
 Микрофотометр 193  
 Млечный Путь 322, 323  
 Мицар 302  
 Моря на Луне 226  
 — на Марсе 241  
  
 Надир 30  
 Наклонение орбиты 152  
 — эклиптики 42, 47  
 Небесная механика 16, 20, 167  
 — сфера 27—40  
 Небесный свод 27  
 — меридиан 31  
 Небулы 331  
 Нептун 144, 150, 172, 232—234, 250, 251, 372  
 —, спутники 251  
 Неравенства 167  
 Нивелирование 107  
 Нижнее соединение 137  
 Нижние планеты 137, 143, 144  
 Нолундние 123, 125  
 Новый стиль 61  
 Нутация 178, 284  
 Ньютоны законы движения 159, 160  
  
 Обращающий слой 203, 204  
 Обращение линий спектра 203  
 — звёздное 143, 144  
 — синодическое 143, 144  
 Обсерватории 96, 98  
 Объектив 73, 74  
 — ахроматический 73, 74  
 Объективная призма 191  
 Окись углерода в кометах 260  
  
 Окуляр 73  
 Оорта гипотеза галактического вращения 342—345  
 Ориентировка по небу 18  
 Осеннее небо 364  
 Ось мира 29, 31  
 — склонений 92  
 Отклонение луча в поле тяготения 211, 212  
 Отталкивательная сила Солнца 261—263  
  
 Падающие звёзды 12  
 Паллада 242  
 Параболическая скорость 163, 225, 272  
 Параболические кометы 255  
 Параллакс годичный 112, 116—118  
 — движущихся скоплений 319, 320  
 — звёзд 116—118, 293  
 — Солнца 113—116  
 — спектральный 293  
 — суточный 112  
 — шаровидных скоплений 326  
 Параллактическая установка 92  
 Параллактический треугольник 69  
 Параллактическое смещение 141  
 Параллель суточная 30  
 Парсек 118  
 Пассажный инструмент 86  
 Пенельный свет 128  
 Первый вертикал 36  
 Периастр 299  
 Перигей 46, 127, 139  
 Перигелий 46  
 Периодические возмущения Луны 170  
 — — планет 171  
 — кометы 255  
 Периодичность солнечных пятен 201, 202  
 Персеиды 274  
 Планеты 12, 232—252  
 —, движение виллиное 366, 367  
 —, — истинное 141  
 —, измерение расстояний 113  
 —, наблюдение 368, 369  
 Плеяды 325, 332, 364, 369  
 Плутон 144, 150, 232—234, 251, 252, 352, 372  
 Поглощение света космическое 321, 322, 328  
 Показатель цвета 287  
 Покрытия светил Луной 128  
 Полнолуние 132  
 Полдукс 366, 375  
 Полулунная линия 31  
 Полус мира 29, 32, 175  
 Полярная звезда 30, 175, 362, 366  
 — ось экваториала 92  
 Полярные пятна на Марсе 240  
 — сияния 203  
 Поправка наблюдений 83, 84  
 — часов 85, 247  
 Попытное движение планет 137, 138, 142  
 Постоянная абберации 121, 247  
 — рефракции 89  
 — тяготения 163  
 Потоки звёздные 316—318  
 — метеорные 271—273  
 Предварение равноденствий 175  
  
 Преобразование координат 69  
 Прессессия 175—177, 222, 284  
 — луно-солнечная 177  
 — общая годовая 178  
 — планетная 177  
 Прикладной час 181, 222  
 Приливная волна 180  
 — сила 179, 180  
 — эволюция 353—355  
 Приливное трение 222, 352, 353  
 Приливы и отливы 178—181, 230  
 Проблема Земля — Солнце 220  
 Противосияние 279  
 Противостояние планет 115, 137, 238, 239  
 Протуберанцы 205—218  
 Прохождение планет по диску Солнца 236, 237  
 Пропион 288, 299, 315, 375, 376  
 Прямое восхождение 37, 80  
 Протомея система 21, 138—140, 230  
 Пятна на Солнце 198—203  
  
 Равноденственный колдор 37  
 Радиан 35  
 Радиант 270, 271, 318  
 Расширяющаяся вселенная 339  
 Расселла гипотеза 293, 294, 350  
 Расселла диаграмма 291, 295  
 Рефлекторы 75, 77, 95  
 Рефракторы 72, 75, 77  
 Рефракция 44, 87, 91  
 Ригель 315, 366, 375  
  
 Сарос 134  
 Сатурн 144, 170, 171, 232—234, 248, 273, 368, 372  
 —, кольцо 249  
 —, спутники 250  
 Сверхгалактика 338  
 Световое давление 211, 215, 216, 263  
 Световой год 117  
 Секстан 101  
 Сжатие Земли 106  
 Сидериты 275  
 Сизигии 180  
 Сила приливная 179  
 — тяжести 160, 161, 190  
 — на Луне 221  
 — на Солнце 195  
 Синдринама 263  
 Синхрона 293  
 Сириус 19, 281, 283, 288, 298, 315, 375  
 Склонение 36, 80  
 Скорость света 118  
 Служба времени 85  
 — Солнца 220  
 Собственное движение звёзд 314  
 Соединение планет с Солнцем 137  
 Созвездия 11, 283, 314  
 Солнечная корона 131, 203, 209, 210, 214  
 — постоянная 212  
 — система 13  
 — энергия 214, 215, 216  
 Солнечное время истинное 50, 51  
 — — среднее 51  
 Солнечные затмения 128—134  
 — пятна 198—203  
 —, магнетизм 200, 201  
 —, периодичность 201, 202

- Солянце 194—220, 288, 343, 347, 367  
 —, атмосфера 203  
 —, видимое движение 41—47  
 —, возраст 361  
 —, восход и заход 89  
 —, вращение 195, 196  
 —, годовичное движение 41, 44  
 —, гравитация 197  
 —, масса 194  
 —, наблюдения 367, 368  
 —, параллакс 113—116  
 —, плотность 195  
 —, размеры 194  
 —, расстояние 194  
 —, спектр 204  
 —, температура 212—214  
 —, теория 215—220  
 —, фотосфера 197  
 —, энергия 216—220  
 —, ультрафиолетовая радиа-  
 ция 203  
 —, яркость 195  
 Солнцестояние 42  
 Спектр вспышки 204  
 — излучения 186  
 — линейчатый 186  
 — непрерывный 186  
 — поглощения 187, 288, 333  
 — полосчатый 150  
 Спектральные классы звезд  
 288—290  
 Спектральный анализ 184—192  
 Спектрогелиограф 208  
 Спектрограф 191  
 Спектроскоп 191  
 Спутники планет 13  
 — Марса 242  
 — Сатурна 250  
 — Урана и Нептуна 251  
 — Юпитера 170  
 Среднее солнечное время 51  
 Среднее Солнце 51  
 Старый стиль 60  
 Стефана закон 212  
 Стояние планеты 137, 139  
 Сутки звездные 47, 48  
 — солнечные 49, 50, 59  
 Сферический треугольник 29,  
 66, 68  
 — — полярный 67, 68  
 Сферонд земной 105  
 Талькотта способ определения  
 широты 101, 102  
 Телескопы 72—79  
 — Максудова 77—79  
 Теодолит 90  
 Теория относительности 211  
 Титан 250, 369, 374  
 Тициуса правило 234, 242  
 Точка весеннего равноденствия  
 37, 38  
 — осеннего равноденствия 42  
 Точки солнцестояний 42  
 Трапеция Ориона 299, 330  
 Триангуляция 104, 105  
 Туманности 12, 330—340  
 — внегалактические 333—338  
 — галактические 330—333  
 — планетарные 290  
 — спиральные 333—336, 359  
 Тяготение 158, 161—165  
 Увеличение трубы 73  
 Угловое расстояние 35  
 Узлы орбиты 299  
 —, движение у Луны 124  
 Универсальный инструмент 90,  
 91  
 Уран 144, 150, 172, 232—234,  
 250, 251, 372  
 —, спутники 251  
 Уравнение времени 48, 51, 52  
 — Кеплера 155  
 — синодического движения  
 124, 143  
 — центра 52  
 Устойчивость солнечной си-  
 стемы 171, 172  
 Фазы луны 11, 125, 126  
 — планет 147, 232, 235  
 Факелы 199  
 Фесенкова гипотеза 358  
 Флоккулы 209  
 Фобос, 352, 373  
 Фотометрия 192, 193  
 Фотоэлектрический метод ре-  
 гистрации 83  
 Фраунгофера линии 188, 208  
 Фундаментальные каталоги 285  
 Хвосты комет 256—261, 264  
 Ход часов 85  
 Хромосфера Солнца 203, 205—  
 209  
 Хронограф 82  
 Хронометр 85  
 Хэла гипотеза солнечных пя-  
 тен 200, 201  
 Цвета звезд 287  
 Цвета показатель 287  
 Церера 242, 243  
 Цефеиды 300—309, 327, 336  
 Часовой круг 36, 37  
 — механизм 93  
 — угол 36  
 Часы 80  
 Четверти лунные 126  
 Широта астрономическая 44  
 — галактическая 323  
 — географическая 33  
 Шмидта гипотеза 357, 358  
 Эволюция небесных тел 348—  
 361  
 — приливная 353—355  
 — туманностей 349, 359  
 Экватор небесный 31  
 Экваториал 92  
 Экваториальное ускорение  
 Солнца 196  
 Эклиптика 41—43, 46, 47  
 Эксцентриситет 83, 152  
 Эксцентрическая аномалия 154  
 Элементы орбит 152  
 Эллипсоид земной 105, 106  
 Элонгация внутренних планет  
 137  
 Энергия Солнца и звезд 214  
 Эпидиклы 138, 145  
 Эра от «рождества Христова»  
 63  
 Эрот 115, 244  
 Эфемериды 16, 153  
 Юпитер 12, 144, 150, 171, 232—  
 234, 246—248, 267, 273, 367,  
 368, 372  
 —, спутники 247, 248  
 Ядерные реакции 217—220, 358,  
 360  
 Ядро кометы 256  
 — солнечного пятна 199  
 Япет 250, 374  
 Яркость изображения 74

Редактор *М. М. Дагасв.*  
Техн. редактор *С. С. Гаврилов.*

\*

Подписано к печати 26/XII 1950 г. Т-09197.  
Бумага 60×92/16. 12,125 бум. л. 24,25 печ. л.  
28,83 уч.-изд. л. 45 000 тип. зн. в печ. л.  
Тираж 12 000 экз.  
Цена книги 9 руб. 75 коп. Переплёт 2 руб.  
Заказ № 52.

---

Набрано в Первой Образцовой типографии  
имени А. А. Жданова Главполиграфиздата  
при Совете Министров СССР.  
Москва, Вадовая, 28.

Отпечатано в 3-й типографии «Красный  
пролетарий» Главполиграфиздата при Со-  
вете Министров СССР. Москва, Краснопро-  
летарская, 16.

Опечатки

| Страница | Строка              | Напечатано   | Следует читать                                       | Почерк |
|----------|---------------------|--|--|--------|
| 43       | 17 снизу            | $+ 23^{\circ}37'$                                      | $+ 23^{\circ}27'$                                    | Тип.   |
| 52       | 10 сверху           | Тогда среднее солнце и истинное Солнце опять совпадёт. | Тогда среднее время и истинное время опять совпадут. | Авт.   |
| 59       | 21 сверху           | $365^d 5^h 48^m 46^s, 0,45$                            | $365^d 5^h 48^m 46^s, 0,45$                          | Тип.   |
| 89       | 5-й столбец таблицы | $89^{\circ}30''$                                       | $89^{\circ}30'$                                      | Ред.   |
| 144      | 3 сверху            | их   | её   | Ред.   |
| 156      | 7 снизу             | $\zeta$  | $\delta$   | Ред.   |
| 168      | 1 сверху            | (в 1825 г.)  | (к 1825 г.)  | Авт.   |
| 251      | 9 сверху            | $87^{\circ}$   | $98^{\circ}$   | Авт.   |
| 255      | 1 сверху            | $i \delta$   | $i, \delta$  | Ред.   |
| 300      | 12 снизу            | $A^3$<br>$P_2$   | $A^3$<br>$P^2$                                       | Корр.  |
| 332      | 23 снизу            | непрерывный спектр                                     | спектр   | Авт.   |
| 343      | 2 сверху            | расстояние   | расстояния   | Тип.   |

