

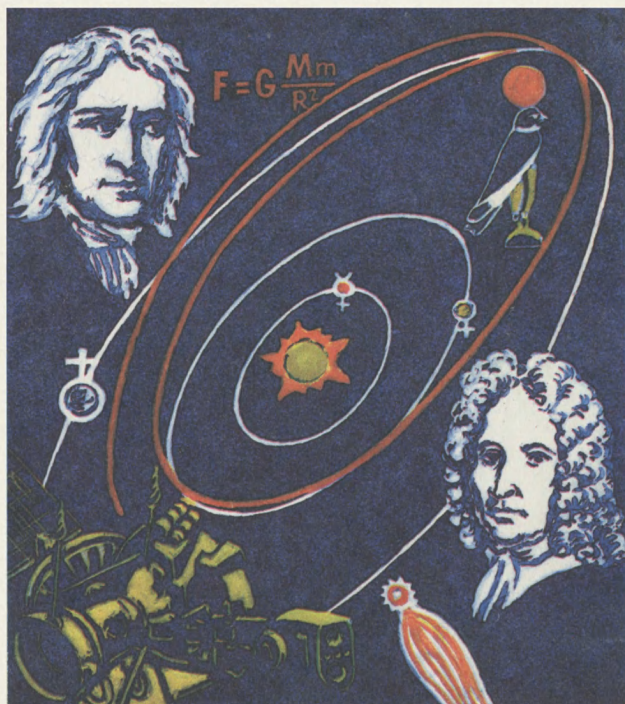


БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

выпуск 47

Л. С. МАРОЧНИК

СВИДАНИЕ С КОМЕТОЙ



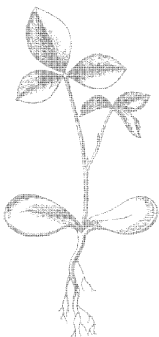


БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

выпуск 47

Л. С. МАРОЧНИК

СВИДАНИЕ С КОМЕТОЙ



**МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1985**

ББК 22.655

М28

УДК 523.64(023)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Ю. А. Осипьян** (председатель), академик **А. Н. Колмогоров** (заместитель председателя), профессор **Л. Г. Асламазов** (ученый секретарь), член-корреспондент АН СССР **А. А. Абрикосов**, академик **Б. К. Вайнштейн**, заслуженный учитель РСФСР **Б. В. Воздвиженский**, профессор **С. П. Капица**, академик **С. П. Новиков**, академик АПН СССР **В. Г. Разумовский**, академик **Р. З. Сагдеев**, профессор **Я. А. Смородинский**, академик **С. Л. Соболев**, член-корреспондент АН СССР **Д. К. Фаддеев**, член-корреспондент АН СССР **И. С. Шкловский**.

Рецензент

доктор физико-математических наук *Л. М. Мухин*

Марочник Л. С.

М28 Свидание с кометой.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985.— 208 с.— (Библиотечка «Квант». Вып. 47.) — 35 к.

На окраинах Солнечной системы вращается гигантское облако комет. Иногда одна из них покидает облако и устремляется к Солнцу. Физика многих явлений, наблюдаемых в кометах, до сих пор непонятна, а понять ее важно, так как именно кометы несут в себе информацию о тех временах, когда Солнечная система только начинала формироваться. Существует гипотеза, что кометы ответственны за происхождение жизни и могут, следовательно, иметь отношение к проблеме внеземных цивилизаций. Для ответа на эти и многие другие вопросы в разных странах мира к кометам снаряжены экспедиции — космические зонды. Обо всем этом рассказано в книжке.

Для школьников старших классов, учителей, лекторов.

М $\frac{1705050000-147}{053 (02)-85}$ 188-85

ББК 22.655

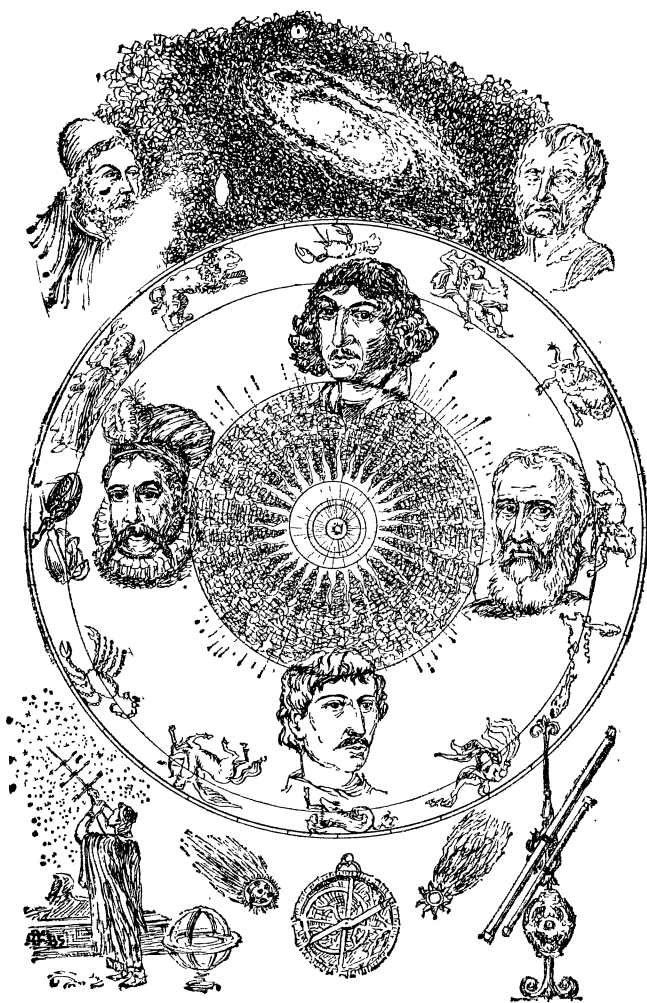
ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга писалась в период подготовки миссий человечества к знаменитой комете Галлея, которая приблизительно каждые 76 лет в течение уже многих веков будоражит воображение наиболее впечатлительной части населения нашей планеты. Подобное обстоятельство не могло не оказать заметного влияния на расстановку акцентов в книге. Вместе с тем автор стремился дать возможность читателю взглянуть на вещи шире, — познакомив его не только с «внутренними проблемами» физики комет, но и с тем местом, которое занимают кометы в истории человечества, в современной астрофизике, их связью с проблемой происхождения Солнечной системы и, может быть, даже — жизни на Земле.

Я глубоко благодарен кинодраматургу и поэту А. П. Тимофеевскому, написавшему специально для этой книги множество смешных и серьезных стихов*), которые по существу могли бы составить содержание отдельной книжки с одноименным названием (в публикуемый текст вошла из-за недостатка места лишь небольшая часть этих стихов). Им же сделаны помещенные в книгу стихотворные переводы из П.-Ж. Беранже, Вольтера и «Оды Ньютону», принадлежащей перу Эдмунда Галлея; часть подстрочных переводов с французского выполнена Л. И. Гринцер — моей матерью. Ее поблагодарить мне особенно приятно.

Я искренне признателен сотрудникам отдела научно-технической информации Института космических исследований АН СССР Ю. И. Зайцеву, Э. В. Воронцовой, В. С. Корниленко, С. Н. Штейну за неоценимую помощь в оформлении рукописи.

*) Встречающиеся в тексте стихи без указания автора принадлежат А. П. Тимофеевскому.



КОМЕТЫ И СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

Годы, люди и народы
Убегают навсегда,
Как текучая вода.
В гибком зеркале природы
Звезды — невод, рыбы — мы,
Боги — призраки у тьмы.

В. Хлебников

Более четверти века назад человечество было потрясено известием о запуске искусственного спутника Земли. Во всем мире радиоприемники были настроены на волну его передатчика. Простенькие радиосигналы первого спутника возвестили о начале космической эры в истории человечества.

Нынешние десятиклассники, не говоря уже о более молодой поросли, родились в эпоху космических полетов. Все постепенно становится привычным. И сейчас даже полеты кораблей к другим планетам Солнечной системы — Венере, Марсу, Сатурну, — наверное, меньше поражают воображение, чем некогда — запуск первого спутника, полет Юрия Гагарина, высадка американских астронавтов на Луне. Тем не менее и нынешнее поколение ожидают кое-какие «сюрпризы», граничащие с научной фантастикой. Один из ближайших поражающих воображение космических экспериментов — экспедиции к комете Галлея, которые будут осуществлены в 1985—1986 гг., когда эта комета в очередной раз вернется из окраин Солнечной системы и приблизится к Солнцу.

Сейчас, когда пишутся эти строки (1984 г.), готовятся три экспедиции землян к комете Галлея. Когда книга увидит свет, космические корабли — миссии человечества — уже будут в пути. Экспедиции к этой знаменитой комете, самой, пожалуй, замечательной в истории человечества, осуществляются под флагами Советского Союза, Европейского космического агентства и Японии. Безусловно, самым нетривиальным является советский проект, по которому два космических аппарата следом друг за другом полетят сначала к Венере, а затем к комете Галлея. Руководит этим проектом его автор — академик Р. З. Сагдеев, директор Института космических исследований АН СССР.

Первые в истории человечества экспедиции к комете являются, без сомнения, «экспериментами века». Почему это так, вы поймете, надеюсь, прочитав книгу. Моральная нагрузка, которую несут на себе эти эксперименты, имеет по крайней мере два важнейших аспекта: научный и психологический. Научный аспект всем ясен даже интуитивно — прямой контакт с кометой позволит получить уникальную научную информацию. Психологический аспект проблемы не так очевиден. Он связан с тем необычным местом, которое всегда занимали кометы в человеческом восприятии.

«Кошмарный» вид яркой кометы, внезапно появлявшейся на фоне пусть непонятного, но привычного звездного неба, не мог не вселять ужас в сердца впечатлительного человечества. Жизнь не баловала его избытком комфорта и благополучия — ничего хорошего ждать от нее не приходилось. «Огненная звезда» с распущенными «пылающими волосами», простирающимися иногда на полнеба, могла предвещать войны, смерть, холод и голод. «Специалисты» — шаманы, а позднее астрологи и гадалки — могли, конечно, кое-что «предсказать» по поводу причин «гнева божьего», а главное его последствий. Тут все зависело от таланта и фантазии. Впрочем, существовали и некоторые правила, по которым можно было узнать:

§ 1. «Что было, что будет, чем сердце успокоится...»

Слово «комета» в переводе с греческого означает «волосатая звезда». И в древние времена, и в средние века кометы изображали чаще всего как отрубленные головы с развевающимися волосами. Человек всегда искал на звездном небе аналогии с известными ему понятными образами; отсюда — названия многих созвездий: Большая Медведица, Близнецы, Весы и т. п. В этом смысле кометы не были исключением. Однако если звездное небо даже искусному наблюдателю виделось практически неизменным из ночи в ночь, то появление яркой «волосатой звезды», довольно быстро, иногда в течение всего нескольких дней, исчезавшей с небосвода, было событием выдающимся.

Вид яркой кометы — зрелище впечатляющее. По своему блеску она может быть как Венера, например, и даже как Луна в полнолуние. Посмотрите на фотографию кометы Галлея (рис. 1), сделанную во время ее последнего появления в 1910 г. Эффектно, не правда ли? Во всяком случае, можно понять, почему кометы во все времена у многих народов

считались вестниками несчастий, дурными знамениями, «гласом божьим» или, лучше сказать, «дьявольским». История человечества изобилует войнами, эпидемиями, дворцовыми переворотами и убийствами особ королевского происхождения, так что почти всегда появлению кометы сопутствовало какое-нибудь трагическое событие.



Рис. 1. Комета Галлея, сфотографированная 13 мая 1910 г. (внизу слева — Венера)

В 44 г. до н. э. смерть Юлия Цезаря совпала с появлением на небе яркой кометы (об этом известно из трудов римских историков), поэтому в средние века и даже позднее при европейских дворах существовало мнение, что появление яркой кометы может предвещать смерть особ царствующего дома.

Любопытно, что «китайская точка зрения» на кометы радикально отличалась от «европейской». По мнению древних китайцев, кометы были курьерами, разносящими по «звездным провинциям» волю императора. Планеты были правителями провинций, а звезды — местными властями. Кометы, перемещаясь из провинции в провинцию, переносили правительственные депеши. Не исключено, что под влиянием «китайской точки зрения» известный советский поэт С. Кирсанов в стихотворении «На смерть звезды» писал:

Известье по созвездьям
Комета развезла:
— О горе! Умирает великая звезда.

Знаменитый французский хирург Амбруаз Паре (его имя мы встречаем не только в истории науки, но и в романах А. Дюма, в «Королеве Марго», например) так описывает комету 1528 г.:

«Эта комета была столь ужасна и страшна и порождала в народе столь великое смятение, что некоторые умирали от одного лишь страха, а другие заболели. Она представляла собой светило громадной длины и кровавого цвета;



Рис. 2. Комета 1528 г. Рисунок из книги Амбруаза Паре

в вершине ее была видна сжатая рука, держащая длинный меч, как бы готовый разить. У конца его клинка были видны три звезды. По обе стороны лучей, выходящих из хвоста этой кометы, виднелось множество топоров, ножей, мечей, обгаренных кровью, а среди них были видны ужасные человеческие лица с всклокоченными бородами и дыбом стоящими волосами» (рис. 2).

В поэме В. Хлебникова «Гибель Атлантиды» мы находим вполне созвучное описание кометы, только выраженное поэтическим языком:

...И вот плывет между созвездий,
Волнуясь черными ужами,
Лицо отмщенья и возмездий,
Глава отрублена ножами.
Повис лик длинно-восковой,
В змей одежде боковой,
На лезвее лежит ножа.
Клянусь, прекрасная глава,
Она глядит, она жива.

• • • • •

На лезвее ножа лежа,
В предверье судеб рубежа,
Глазами тайными дрожа
Где туч и облака межа,
Она пучины мести вождь.
Кровавых капель мчится дождь *).

Влиянию громадной и зловещей кометы 1556 г. приписывали смерть папы Урбана IV. Король Карл V Испанский был убежден, что она грозит ему смертью. Надеясь уничтожить комету, он стрелял в нее из пистолета, но, как известно, безуспешно. Тем не менее португальский король Альфонс VI через 100 с лишним лет, опасаясь, что яркая комета 1664 г. явилась за ним, стрелял в нее из аркебузы.

Эта же комета 1664 г. заставила изрядно понервничать французского короля Людовика XIV, знакомого юному читателю по роману А. Дюма «Виконт де Бражелон». Людовик XIV собрал в Париже астрологов и теологов, чтобы получить у них ответ на больной вопрос — не повлияет ли эта комета на его здоровье и здоровье других членов королевской фамилии. Конечно, при дворе Людовика XIV были и люди, смеявшиеся над предрассудками. Знаменитая фраза брата короля «Хорошо вам, господа, шутить: вы не принцы!» — осталась в истории.

Шли годы. Исааком Ньютоном был открыт закон всемирного тяготения. К концу XVIII столетия образованные люди прекрасно понимали, что кометы — небесные тела, движущиеся в космическом пространстве в соответствии с этим законом. Однако феерические зрелища, связанные с появлением больших и ярких комет, продолжали порождать мутные волны страха у обывателя. Теперь, правда, боялись столкновения кометы с Землей.

В 1773 г. в Парижской академии наук известный астроном Ж. Лаланд должен был прочитать лекцию о кометах, которые могут приблизиться к Земле. На самом деле в лекции должна была идти речь о возможном влиянии комет на высоту приливов в океанах. Париж, однако, гудел как улей. Пошли слухи о том, что лекция запрещена полицией, так как в ней Лаланд должен объявить о катастрофе — столкновении кометы с Землей. Называлась и дата — 17 мая. В результате катастрофы все живое на нашей планете по-

*) Эти (и подобные им) описания страдают, однако, существенным недостатком. Нередко наблюдаются «безхвостые» кометы, у которых видна только голова. Когда Алиса попала в Страну Чудес, она невольно подслушала слова палача, который «говорил, что нельзя отрубить голову, если кроме головы ничего больше нет».

гибнет. Слухи росли. Обыватели ждали страшного дня. Были известны случаи нервных заболеваний и даже смерти от страха. Быстро возросли доходы служителей церкви: за хорошее вознаграждение можно было незамедлительно получить индульгенцию — отпущение грехов. Позднее Пьер-Жан Беранже писал:

На нас летит ужасная комета.
Ее послал разгневанный творец.
Бессильны мы. Обречена планета.
Погибло все. Неотвратим конец.
В разврате закосневшие без меры
Меж тем твердят народам лицемеры:
Довольно с нас! Состарился наш мир...
И пьют, и жрут, и продолжают пир.

Через 73 года, в 1856 г., в одном из календарей появилось сенсационное сообщение о том, что в следующем году, 13 июня, комета Карла V (о которой упоминалось) при своем появлении столкнется с Землей. Слухи о «конце света» немедленно поползли по Европе. Множество людей предприняли длительные путешествия только для того, чтобы ко дню «конца света» — 13 июня — оказаться на родине со своими близкими и умереть вместе.

Что же будет все-таки, если какая-либо комета столкнется с Землей?

Предоставим слово замечательному математику и астроному П. Лапласу, жившему во второй половине XVIII — начале XIX веков:

«Чувство ужаса, которое вселяло некогда появление кометы, уступило место страху, что среди большого числа комет, проносящихся сквозь Солнечную систему по всем направлениям, может оказаться такая, которая столкнется с Землей; и в самом деле, действие подобного столкновения нетрудно себе представить. Положение земной оси и характер вращения Земли должны измениться; море покинуло бы свое теперешнее ложе и устремилось бы к новому экватору; люди и животные погибли бы в этом всемирном потоке, если бы только они могли уцелеть от страшного толчка, полученного земным шаром; все народы были бы уничтожены, все памятники человеческого ума разрушены, если бы масса кометы, вызвавшей толчок, оказалась сравнимой с массой Земли».

Обратите внимание на условие, упомянутое Лапласом: масса кометы должна быть того же порядка, что и масса Земли. К счастью, как теперь мы знаем, это не так: масса даже больших комет в миллионы и даже тысячи миллионов

раз меньше земной, да и само событие — прямое столкновение кометы с Землей — является крайне маловероятным. Тем не менее такие события, похоже, все-таки происходили (см. гл. 4, § 3) и, возможно, еще будут происходить, хотя и нечасто. Поэтому, когда я пишу «к счастью», это — не пустые слова.

Как видим, и в древности, и в средние века, и даже в XIX веке «кометных ужасов» было предостаточно. Не следует думать, однако, что научное изучение комет начисто отсутствовало. Отнюдь нет. Уже в древних китайских хрониках отражен фундаментальный научный факт, лежащий в основе современных представлений о физике комет, заключающийся в том, что хвосты комет всегда направлены в сторону, противоположную Солнцу. Об этом было известно также римскому философу Луцию Сенеке.

Однако эволюция научных представлений о кометах прошла долгий и извилистый путь длиной более двух с половиной тысяч лет. Путь этот лежал от звездочетов Древнего Вавилона (Халдеи) и Древнего Египта до Эдмунда Галлея и Исаака Ньютона. Нам «не пробежать этот марафон» — объем книги ограничен, но без краткой экскурсии в историю астрономии, пожалуй, не обойтись. Попробуем, хотя бы бегло, наметить основные вехи на тернистом пути эволюции научной мысли, который ей пришлось пройти

§ 2. От древнего халдея до Эдмунда Галлея

Мысль бьется рыбою об лед,
И впрямь, и вкривь, в обход, в облет,
И что ж — живой воды журчанье
Сковало льдом повсюду сплошь.
Мысль изреченная есть ложь...

Эволюция научного знания о кометах не могла не зависеть от эволюции человеческого мировоззрения вообще и астрономических воззрений в частности. Поэтому мы и предпринимаем этот экскурс в историю астрономии. Впрочем, астрономия, хоть и оказывала практические услуги человечеству (помогала морякам, ориентируясь по звездам, находить пути в безбрежном океане, измерять время и т. п.), все же была, главным образом, наукой о том, как устроен мир, так что наша экскурсия неизбежно подводит к необходимости обратиться, хотя бы бегло, к эволюции человеческих представлений по этому, столь волновавшему во все времена лучшие умы, вопросу.

Зигзаги в истории науки, конечно, следовали в какой-то степени зигзагам в истории человеческой мысли и культуры. Поразительно, но в более ранние времена представления об устройстве мира (и природе комет, в частности) больше соответствовали истине, чем представления более поздние. Задолго до начала новой эры древние вавилоняне (халдеи) и египтяне, благодаря многочисленным и тщательным астрономическим наблюдениям, уже умели предсказывать затмения и многое из того, что, как говаривал Диодор Сицилийский, «превышало силы человеческого ума». О кометах египтяне говорили, что их столько, сколько рыб в море, и что они, подобно планетам, движутся по определенным орбитам. Известно, что блестящая плеяда греческих философов многое заимствовала у древних египтян и вавилонян и хотя и умозрительно, но в общем правильно представляла себе устройство нашего мира. Аполлоний Миндийский и Пифагор (VI век до н. э.) учили, следуя древним египтянам, что Солнце находится в центре Вселенной, а Земля и планеты вращаются вокруг него. Кометы во всем подобны планетам и перестают быть видимыми просто потому, что временно удаляются от нас.

Ученики и последователи Пифагора, такие как знаменитый Платон (IV век до н. э.), развивали его учение, довольно разумно объясняя небесные явления. К великому сожалению, до потомков почти не дошло письменное наследие этих блестящих мыслителей. С IV века до н. э. стало повсеместно преобладать учение Аристотеля, величайший авторитет которого во всех вопросах естествознания был настолько высок, что нельзя было и помыслить поставить под сомнение положения его трактатов.

Аристотель и его последователи учили, что Земля — центр мира, планеты катятся по неподвижным хрустальным сферам, а кометы — это блуждающие звезды, которые не могут находиться в области планет, а представляют собой лишь «подлунные испарения».

Конечно, учение Аристотеля утвердилось не сразу. Еще в I веке н. э. Луций Сенека, философ и драматург, ставил вопрос: «Вращается ли мир вокруг неподвижной Земли, или неподвижен мир, а вращается Земля? Может быть, восходит и заходит не небо, а Земля?» Он же писал, что «следовало бы иметь список всех комет, потому что редкость их появления препятствует удостовериться — не возвращаются ли они опять и каков их путь». Он пишет о том, что «... кометы появляются не в одной какой-нибудь части неба и не вблизи пути планет, а повсюду: на востоке и западе, чаще всего на

севере... Кометы имеют свою область; они удаляются, но не потухают.

Если это была планета, она вращалась бы в круге зодиака, но кто может положить предел звездам, запереть и держать в плену эти божественные существа?» Сенека предсказывает: «Настанет день, когда явится человек, который покажет, в какой части неба блуждают кометы, почему они так резко отличаются от планет и определит их природу. На долю наших потомков останется часть истин, еще не открытых».

Пророчество Сенеки сбылось, но до того, как это свершилось, прошло шестнадцать веков. Человеком этим был Исаак Ньютон, но об этом я расскажу немного позже.

Можно только удивляться ясности мысли Сенеки. По существу он был первым, кто высказал гипотезу, что кометы появляются периодически, т. е. то, что доказать удалось только Эдмунду Галлею. Тогда же, в I веке н. э., Сенека еще задавал себе вопрос о том, «что вокруг чего вращается», но уже через какие-нибудь 100 лет подобные вопросы стали звучать совершенно «антинаучно». После появления учения Птолемея, основанного на трактатах Аристотеля, непременно утвердилось мнение, что центром мира является Земля. Страшно подумать, что понадобится полторы тысячи лет для того, чтобы снова вернуться к представлению о том, что Земля не есть центр Вселенной и что она вращается вокруг Солнца, а не наоборот.

Трудно сказать, что именно привело к смене первоначальных умозрительных, но правильных воззрений на неправильные. Видимо, здесь сыграли свою роль авторитет Аристотеля и пресловутый здравый смысл: каждый видел, что Солнце всходит и заходит, т. е. обращается, как казалось, вокруг Земли. Не обошлось, конечно, и без человеческого эгоцентризма и интуитивного ощущения (ни на каких реалиях, конечно, не основанного) того, что в мире, существующем вне нас, на самом деле все происходит из-за нас, в связи с нашими человеческими проблемами и трудностями. Вероятно, поэтому антропоцентрические воззрения, ставящие (в философском плане) человека в центр всего мироздания, прекрасно сочетались с идеей о том, что и Земля, место пребывания человека, есть тоже нечто уникальное, выделенное в этом мире. Отсюда возникла система мира Птолемея, отсюда, по-видимому, берет начало астрология, заменявшая астрономию как науку в течение полутора-двух десятков веков. Полторы тысячи лет — срок немалый, так что астрологию нельзя обойти молчанием.

Астрология как «отрасль астрономии» возникла в древности, но особенно пышным цветом расцвела в средние века. Коль скоро человек — центр, то, ради чего существует Вселенная, естественно было считать все происходящее на небе так или иначе связанным с человеческими судьбами — расположение светил, яркие кометы и т. п.

Возникло искусство составления гороскопов, когда по расположению светил (в день рождения человека в той местности, где это произошло) астролог мог предсказать не только будущее человека, но и свойства его характера, привычки, склонности. Астрология в буквальном смысле отнюдь не была шарлатанством, так как нужно было быть астрономически и математически весьма образованным человеком, чтобы вычислять положения светил в нужные эпохи. Даже такие известные астрономы, как Иоганн Кеплер, составляли гороскопы сильным мира сего, потому что эта работа приносила солидный доход. Правила составления гороскопов очень интересны, ими, как известно, увлекаются шутки ради и сейчас. Правда, в наше время работа по составлению гороскопов сильно облегчилась, так как громоздкие вычисления современные шутники поручают обычным компьютерам.

Чтобы закончить разговор об астрологии, приведу красочный отрывок из астрологического сочинения времен французского короля Людовика XIII*):

«В первом знаке зодиака Юпитер производит епископов, губернаторов, знатных, сильных, судей, философов, мудрецов, купцов и банкиров. Марс отмечает военных, артиллеристов, убийц, медиков, брадобре-ев, мясников, позолотчиков, поваров, булочников, людей всяких занятий, совершаемых при помощи огня. Венера производит цариц и красавиц, затем аптекарей, портных, ювелиров, торговцев сукном, игроков, посетителей кабаков, развратников и разбойников. Меркурий — дьяков, философов, астрологов, геометров, вычислителей, пишущих по-латыни, художников, искусных и остроумных мастеров и мастериц во всяких работах и сами эти искусства. Те, кто находится под влиянием Марса, бывают людьми суровыми, жестокосердными, неумолимыми, которых

*) Время от времени мне придется отступать от основного рассказа, чтобы давать пояснения, прямо к нему не относящиеся, но с моей точки зрения, необходимые или, по крайней мере, полезные. Конечно, есть риск, что книга станет похожа на «Рукопись, найденную в Сарагосе» Яна Потоцкого, построенную по принципу «повести-шкатулки», в которой сюжетная линия прерывается, когда герой рассказывает по ходу действия о какой-то истории, с ним приключившейся; затем «внутри» этой истории возникает следующая, «внутри» нее — следующая и так далее, и так далее...

Я постараюсь избежать этой опасности и отступать от основного текста, не забывая о том, что он все-таки существует. Здесь и далее такие отступления набраны петитом. При чтении их можно опускать,

нельзя убедить никакими доводами, упрямыми, сварливыми, дерзкими, смелыми, наглыми и буйными, любящими всех обманывать; они обыкновенно много едят, могут переваривать большое количество мяса, сильны, крепки, властны, с налитыми кровью глазами, с рыжими волосами, несколько не расположены к дружбе и любят всякие работы с огнем и раскаленным железом. Одним словом, Марс производит обыкновенно людей бешеных, горластых, распутных, самодовольных и раздражительных».

Что думали астрологи о кометах? Астрология полагала, что рождение комет происходит от вредных испарений разложившихся планет, когда последние близко подходят друг к другу. Даже Кеплер считал, что комета вызовет чуму, если, проходя мимо Земли, заденет ее. Знаменитый средневековый врач Парацельс, основываясь на астрологических концепциях, учил, что кометы могут оказывать доброе или дурное влияние на здоровье людей.

Однако значительно более пагубным, чем астрология, следствием антропоцентризма и идей Аристотеля была система мира Птолемея, отбросившая науку назад на полторы тысячи лет.

Подробности жизни Клавдия Птолемея, жившего во II веке н. э., достоверно неизвестны. Главный труд его носил название «*Megale Syntaxis*» («Великое построение»), который потомкам более известен под искаженным арабским названием «Альмагест». Эта книга была главным источником астрономических знаний. Изложенная в ней теория движения планет носит название птолемеевой системы мира. Смысл ее в том, что Земля — неподвижный центр Вселенной. Вокруг нее движутся остальные светила: ближе всего Луна, затем Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн. Каждое светило имеет свою сферу. Все эти сферы заключены внутри восьмой сферы, управляющей звездами.

Потребовалось около полутора тысяч лет для того, чтобы преодолеть это великое заблуждение. Сделал это польский каноник Николай Коперник.

Самые ранние его работы, относящиеся к доказательству правильности гелиоцентрической системы мира (т. е. системы, согласно которой в центре находится Солнце, а Земля и другие планеты вращаются вокруг него), датируются, как считают, приблизительно 1507 г. Ему понадобилось 29 лет для того, чтобы закончить свои исследования. Так же как и в современной науке, в те времена о новейших открытиях коллеги сообщали друг другу в частной переписке. Именно таким путем идеи Коперника получили широкое распространение задолго до того, как вышел основной труд его жизни. Уже в 1536 г. кардинал Шёнберг имел на руках

его копию. Система мира Коперника противоречила «совершенно очевидному» — тому, что люди наблюдали каждый день — движению Солнца вокруг Земли, с восходами и заходами, летами и зимами. Идеи Коперника противоречили тому, что подсказывал людям их здравый смысл. Над ним смеялись и даже изображали на сцене в балаганах.

Великий труд назывался «Шесть книг о круговых движениях небесных светил Николая Коперника из Торуня». Книга была посвящена папе Павлу III. В этом посвящении Коперник назвал «нелепым суеверием» общепринятое мнение о покое Земли. Он пишет о том, что «если пустые болтуны, не имеющие математических знаний, осмелятся произносить суждения о его труде, намеренно извращая места священного писания, он заранее презирает подобные нападки». Коперник не дожил до триумфа своих идей. Великий каноник лежал на смертном одре, когда ему принесли первый экземпляр его книги. Он успел только взглянуть на него и прикоснуться к нему; через несколько дней, 24 марта 1543 г., его не стало.

Идеи Коперника несли в себе нечто большее, чем просто новый взгляд на старую астрономическую проблему (что вокруг чего вращается). Они ставили вопрос о месте человека во Вселенной, под удар попали веками устоявшиеся антропоцентрические представления, освященные библией, мнением просвещенных людей и, наконец, просто здравым смыслом.

Следует заметить, сильно забегая вперед по пути развития науки, что пресловутый здравый смысл не раз игрывал злые шутки с человечеством. Так же как во времена Коперника казалось невероятным, что вопреки очевидности Земля не покоится, а вращается вокруг Солнца, в начале XX века казались невероятными основные положения теории относительности Эйнштейна. Разве мог здравый смысл обывателя «освоить» то, что время течет по-разному в системах отсчета, движущихся с разными скоростями, или что пространство, в котором мы живем, искривлено, т. е. кратчайшее расстояние между двумя точками в нем не есть прямая линия? Альберту Эйнштейну в отличие от Джордано Бруно не пришлось идти на костер, его идеи были восприняты сразу, но, вероятно, потому, что они в каком-то смысле уже давно «носились в воздухе» (искривленные пространства в чисто математическом смысле еще в XIX веке рассматривали крупнейшие математики того времени Г. Риман и Н. И. Лобачевский), и интеллигенция, конечно, знала о них.

Вернемся, однако, в XVI—XVII века нашей истории. Идеи Коперника с трудом пробивали себе дорогу. То, что вопреки очевидности Земля по новому учению не неподвижна, а быстро летит в «мировом эфире», вращаясь вокруг Солнца, вызывало полное неприятие даже у просвещенных современников.

М. Лютер (основоположник лютеранства — простите тавтологию) писал: «Говорят о каком-то новом астрологе, он доказывает, будто Земля движется, а небо, Солнце и Луна неподвижны; будто здесь происходит то же, что при движении в повозке или на корабле, когда едущему кажется, что он сидит неподвижно, а земля и деревья бегут мимо него. Ну, да ведь теперь всякий, кому хочется прослыть умником, старается выдумать что-нибудь особенное. Вот и этот дурак намерен перевернуть вверх дном всю астрономию». Иезуиты же вообще считали, что автора нового учения следует высечь. У католицизма и лютеранства не было разночтений по поводу идей Коперника. Книги, защищающие учение Коперника, были осуждены и запрещены римской церковью, «дабы оно не распространялось более к великому ущербу католической истины».

Первой жертвой борьбы за новое учение стал Джордано Бруно. Это был необыкновенный человек, обладавший феноменальной памятью, гигантским воображением, искрометной фантазией, совершенно блестящими способностями и красноречием. Он обладал исключительными дарованиями и прожил необыкновенную жизнь, полную странствий и приключений. Как и большинство других образованных людей того времени, Бруно сначала был монахом. Познакомившись с трудом Коперника, он становится безоговорочным его последователем. Бруно бежит из монастыря, путешествуя по Европе — иногда в рясе монаха, иногда в латах странствующего рыцаря, — вызывает на диспуты ретроградов, выступает с удивительными, поражающими воображение речами. Он идет существенно дальше Коперника. Его идеи опережают время на века. Бруно говорит о том, что Земля — маленький, сплюснутый у полюсов шар, который вместе с остальными планетами вращается вокруг Солнца. Солнце также сплюснуто у полюсов и вращается около собственной оси. Главное же, наша Солнечная система — лишь один из неисчислимого множества подобных миров. Каждая звезда — то же Солнце. Вокруг этих солнц вращаются серебристые стаи планет. На них живут существа, более совершенные, чем мы с вами. Мировые появляются и исчезают, Вселенная безгранична...

Подумать только, что все эти мысли Бруно высказывал в XVI веке! Говорят, что Кеплер испытывал головокружение при чтении сочинений Бруно. Ужас охватывал его при мысли о том, что мы, возможно, живем во Вселенной, где нет

ни центра, ни начала, ни конца (то, что это действительно так, было доказано только в XX веке А. Эйнштейном, А. А. Фридманом и Э. Хабблом).

Бруно был объявлен еретиком, его заманили в Италию, бросили в тюрьму, где он провел 8 лет, томимый допросами и требованиями инквизиции отречься от своих взглядов. Бруно был негибким, и 17 февраля 1600 г. на одной из площадей Рима он взшел на костер бессмертия.

Через 33 года перед той же дилеммой — костер или отречение — был поставлен семидесятилетний Галилео Галилей, в то время уже великий ученый, совершивший революцию в астрономии, слава о котором разнеслась по всему миру.

Древнейшая наука астрономия пережила за время своего существования две революции, коренным образом изменившие ее лицо. Мы являемся современниками второй революции. Суть ее сводится к тому, что астрономия, коротко говоря, стала всеволновой! Что это значит? Земная атмосфера поглощает электромагнитное излучение, идущее из космоса, почти во всем диапазоне длин волн. В атмосфере есть окна прозрачности. Одно из них лежит в оптическом диапазоне. Именно поэтому человек видит звезды. Будь земная атмосфера устроена немного иначе (или если бы несколько иначе был устроен человеческий глаз), неизвестно, как выглядела бы, например, поэзия.

Второе окно прозрачности находится в радиодиапазоне, и именно ему мы обязаны существованием столь многого достигнутой современной радиоастрономии. Но вот все остальное излучение Вселенной недоступно наблюдениям с Земли, и вторая революция в астрономии состоит в том, что благодаря освоению космического пространства человек вынес свои приборы за пределы земной атмосферы и сейчас измеряет сигналы, которые излучаются Вселенной практически во всем диапазоне электромагнитных волн. Теперь существуют не только оптическая и радиоастрономия, но и ультрафиолетовая, и рентгеновская, и γ -астрономия.

Человеком же, совершившим первую революцию в древнейшей из наук, был Галилео Галилей. Он был первым, кто навел на небо построенный им самим телескоп. Известно, что это произошло в декабре-январе 1609—1610 гг. Некоторые историки утверждают, что известна точная дата этого события — 7 января 1610 г.

История изобретения зрительной трубы, как ее называли, покрыта мраком. Во всяком случае, изобрел ее не Галилей, а кто-то из голландцев, чье имя достоверно не установлено. Произошло это в 1608 г. Откры-

тие быстро распространилось в Европе, и уже в 1609 г. о нем стало известно Галилею, который немедленно занялся изготовлением этого инструмента. Инструменты, изготовленные Галилеем, были много лучше голландской зрительной трубы. Требования, которые он предъявлял к этому прибору, были чрезвычайно высоки — известно, что из ста изготовленных им инструментов он использовал только семь. Наведя на небо первый в мире телескоп, Галилей сделал много важных открытий. В частности, наблюдая Юпитер, он обнаружил «юпитерианские луны» — спутники, обращающиеся вокруг этой планеты. В миниатюре Галилей увидел своими глазами устройство Солнечной системы (Юпитер и обращающиеся вокруг него спутники точно так же, как, согласно учению Коперника, Земля и другие планеты обращаются вокруг Солнца). Остановить развитие науки было невозможно.

Естественно, появление телескопа революционизировало астрономию, так как теперь человек стал изучать окружающую его Вселенную вооруженным глазом и видеть то, что раньше не мог бы увидеть ни при каких обстоятельствах (например, «юпитерианские луны»). И конечно же, кометы были в числе первых объектов, которые принялись изучать астрономы, используя телескоп, — ведь кометы всегда являли собой чрезвычайно эффектные, иногда и жутковатые зрелища. Разумеется, именно телескоп открыл человечеству Вселенную — от планет и их спутников до галактик и их скоплений, но когда-то на первом месте стояло изучение комет, так как это были самые нестационарные и, следовательно, самые интересные объекты на небе.

Описываемый период в развитии астрономии был революционным еще и потому, что шла ломка старых представлений о том, что научная истина может быть найдена чисто логическим путем, причем часто на основе совершенно нелепых построений. Если при этом экспериментальные факты и данные астрономических наблюдений противоречили «стройным логическим выкладкам», то «тем хуже» было для фактов. В науке давно отказались от этого метода — никому сейчас не приходит в голову опровергнуть какой-либо надежно установленный наблюдательный факт только потому, что он противоречит какой-нибудь «стройной теории». Но так было не всегда.

Противники Галилея отказывались даже взглянуть в телескоп на небо, потому что у Юпитера не должно было быть спутников! История сохранила возражение, которое выдвигал Галилею один из его ученых противников:

«В голове животных есть семь окон, через которые воздух вступает в хранину тела, дабы освещать, согревать и питать ее. Эти окна: две ноздри, два глаза, два уха и рот. Точно так же и в небе есть две благоприятные звезды — Юпитер и Венера, две неблагоприятные — Марс и Сатурн, две светлые — Солнце и Луна и одна неопределенная и посредственная звезда — Меркурий. Известно затем, что существует семь металлов. Из этих и многих других явлений природы, исчисление которых

было бы обременительно, мы заключаем, что и планет необходимо должно быть семь.

Кроме того, спутники Юпитера нельзя увидеть простым глазом; поэтому они не могут оказывать никакого влияния на Землю и, следовательно, как бесполезные не существуют. Еще заметим, что евреи и другие древние народы, равно как и новейшие европейцы, подразделяют неделю на семь дней и называют эти дни именами планет. Если мы увеличим теперь число планет, вся эта система разрушится...»

По этому поводу в одном из своих писем Галилей писал: «О, друг мой Кеплер! Зачем ты не здесь? Каким громким смехом посмеялись бы мы над глупостью, слушая, как профессор философии в Пизе в присутствии великого герцога приводит свои логические доводы, будто какие-нибудь магические заклинания, дабы заколдовать ими вновь открытые светила».

Галилей в этом письме обращается к другому великому своему современнику — Иоганну Кеплеру, которого называли «законодателем неба», ибо именно Кеплер завершил дело, начатое Коперником. Если Коперник установил, что центр — это Солнце, вокруг которого вращаются все планеты и Земля в том числе, то Кеплер установил законы, по которым происходит это движение. Более того, оказалось, что по этим же законам движутся и кометы. Кеплеру так и не привелось узнать об этом при жизни. Ему было жаль тратить время и силы на вычисление траекторий комет, так как он полагал (как и другие его современники), что кометы перемещаются по прямолинейным путям и, следовательно, возвращаться не могут.

Кеплер родился в 1571 г. в семье трактирщика. Когда Иоганну было шесть лет, отец его, нанявшись в солдаты, пропал без вести. В 1588 г. Кеплер поступил в Тюбингенский университет, где один из преподавателей математики и астрономии тайно познакомил его с учением Коперника. После окончания университета Кеплер занял место учителя математики и морали в гимназии в Граце, где, помимо основных обязанностей, он должен был еще составлять местный календарь и снабжать его астрологическими предсказаниями на каждый следующий год. Забавно, но этот великий человек начал свою жизнь как «великий астролог». Из-за гонений на протестантов Кеплер принял предложение известного астронома Тихо Браге и в 1600 г. стал его сотрудником в обсерватории в Праге. Тихо Браге был искуснейшим наблюдателем своего времени и по праву может считаться родоначальником кометной астрономии, о чем будет рассказано чуть позже. С Кеплером их отношения складывались плохо. Тихо Браге был весьма вспыльчивым, гордым и очень богатым человеком, но Кеплеру с трудом удавалось получать у него свое жалование. К этому добавлялись научные разногласия. Кеплер был убежденным приверженцем системы Коперника, но Тихо Браге придерживался «половинчатой позиции». Он принимал, что пять планет вращаются вокруг Солнца, но при этом считал, что Солнце вращается вокруг Земли, которая является центром мира. Разногласия осложняли отношения, тем более, что, уступая Тихо Браге в практических навыках астрономических наблюдений, Кеплер существенно лучше разбирался в теории. Неизвестно, чем закончились бы постоянные стычки, если бы не внезапная смерть Тихо Браге (1601 г.), оставившего Кеплеру бесценные много-

летние наблюдения положений неподвижных звезд и планет. Говорят, что умирающий Тихо Браге воскликнул: «Я жил не даром». И это действительно так, потому что, разбирая и анализируя именно наблюдения Тихо Браге, Кеплер установил свои законы движения планет.

Тихо Браге пытался опровергнуть систему Коперника, наблюдая движение Марса, и, умирая, завещал Кеплеру завершить за него это дело. Кеплер понимал, что в соответствии с идеями Коперника Марс движется вокруг Солнца, но как он движется, по какой траектории? Предполагалось, что он движется по кругу, но где центр этого круга? В Солнце ли? И Кеплер начинает свое исследование движения Марса, основываясь на наблюдениях Тихо Браге. Он пробует множество и множество вариантов, подбирая различные сложные комбинации круговых движений. Все тщетно! Найти линию, по которой движется планета, не удается. На эту работу ушло 8 долгих лет.

Историки считают усилия Кеплера невероятными. Каждое вычисление занимало 10 полных страниц, и каждое он повторял 70 раз, чтобы исключить ошибки. Итого, каждый отрицательный результат — это 700 страниц вычислений. Задумайтесь! Кеплер проанализировал все возможные варианты комбинаций круговых движений и отбросил их. Следующим за окружностью шел эллипс. Здесь его ждала победа. Первый закон Кеплера гласит (его словами): «орбита каждой планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце». Однако Кеплеру известно, что, двигаясь по эллипсам, планеты обладают в разных точках своей орбиты разными скоростями. Исследуя этот вопрос, Кеплер находит свой второй закон, согласно которому «...при движении вокруг Солнца радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает равные площади» (см. гл. 3, § 1).

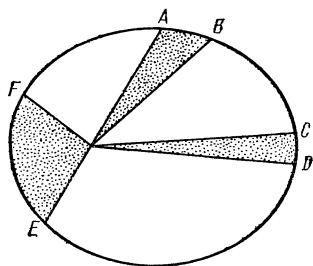


Рис. 3. Иллюстрация ко второму закону Кеплера: радиус-вектор планеты описывает равные площади за одинаковые промежутки времени. Заштрихованные площади равны между собой. Планета проходит отрезки AB , CD , EF за одно и то же время

Сущность этого закона видна из рис. 3. Скорость оказалась максимальной вблизи Солнца (в перигелии) и минимальной вдали от него (в афелии). Теперь можно было, следя за планетами, вычислять место каждой из них на небе на много лет вперед. Это был триумф, которого до того астрономия не знала.

Первый и второй законы были открыты Кеплером в 1609 г., т. е. накануне того, как Галилей впервые взглянул

на небо в телескоп. Однако на открытие третьего закона ушло еще 9 лет мучительных поисков. Не может быть, думал Кеплер, чтобы планеты в своем движении вокруг Солнца не были связаны какой-то закономерностью. И он нашел ее. Третий закон гласит, как известно, что «квадраты времен обращений планет вокруг Солнца относятся как кубы их средних расстояний до него». Этот закон показывал, что движение всех планет происходит не случайным образом — они объединены в одну систему.

Семнадцать лет невероятного, безмерного труда над бесконечными вычислениями завершились победой. «Ничто не удерживает меня,— пишет Кеплер, обращаясь к богу,— я увлечен священным восторгом! Если ты простишь мне — я возрадуюсь; если прогневишься — я вынесу это. Кости брошены. Книга написана. Прочтут ли ее теперь или прочтет ее потомство — мне все равно. Она может ждать читателя целое столетие».

Кеплер установил свои законы чисто опытным путем, но на вопрос, почему эти законы таковы, каковы они есть, он, конечно, не мог ответить. Ответит на него только Ньютон. Однако Ньютон еще не появился на свет. Это произойдет в год смерти Галилея (1642 г.) и через 12 лет после смерти Кеплера (1630 г.).

Итак, Коперник и Кеплер выяснили устройство планетной системы. Человечеству пришлось отказаться от той первоначальной примитивной формы антропоцентризма, которая соответствовала философским идеям Аристотеля и математическим построениям Птолемея (позднее «милые» человеческому сердцу антропоцентрические идеи в более сложных формах возрождались не раз). Полторы тысячи лет застоя, торжества астрологии сменились героической эпохой — человек начал открывать для себя Вселенную и ее истинные законы.

А что же кометы? Появление в 1543 г. «Шести книг о круговых движениях небесных светил Николая Коперника из Торуна» явилось сокрушительным ударом по общепринятой тогда системе взглядов Аристотеля. Второй удар был связан с появлением кометы 1577 г. Как считал Аристотель, кометы находятся вне ведения астрономии, так как это явление (комета) возникает в земной атмосфере: земные пары, поднимаясь вверх, загораются, соприкасаясь со «сферой огня», и хвост кометы — это пламя, которое гонит ветер (вполне естественная точка зрения, если Земля — центр мира, и в ней начало всех начал). Тихо Браге и его ученики одновременно наблюдали эту комету из разных точек земной

поверхности. Если бы она находилась в пределах атмосферы, т. е. сравнительно недалеко от поверхности Земли, то, наблюдая ее таким способом, Тихо Браге и его ученики видели бы ее рядом с различными звездами. Этого, однако, не произошло — комета в обоих пунктах проектировалась

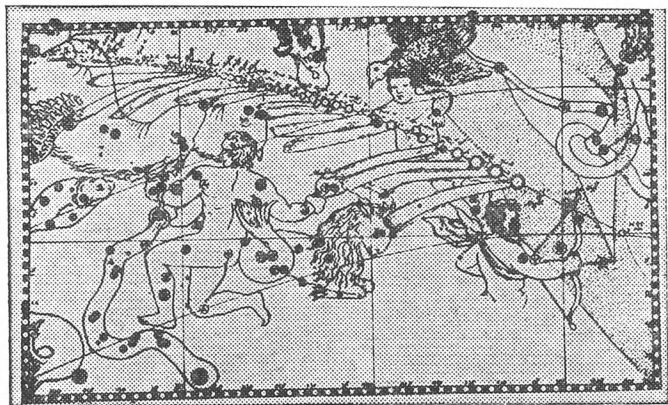


Рис. 4. Комета 1577 г. Рисунок из книги Станислава Любинецкого, изданной в Амстердаме в 1667 г.

на одну и ту же точку звездного неба, а это означало, что параллакс (угол «наблюдатель № 1 — комета — наблюдатель № 2») весьма мал, т. е. комета находится очень далеко от Земли (как показал Тихо Браге, — дальше Луны), и уж во всяком случае за пределами земной атмосферы. Таким образом, 1577 г. можно считать годом рождения кометной астрономии, так как после открытия Тихо Браге изучение комет окончательно перешло в ведение астрономов. На рис. 4 мы видим эту комету, изображенную в книге Станислава Любинецкого «Theatri cometici», изданной в 1667 г.

С кометами, однако, дело обстояло сложнее, чем с планетами, так как многолетние наблюдения последних помогли выявить чисто эмпирически закономерности их движения и установить для них законы Кеплера. Кометы же не зря называют «небесными гостями». Они появлялись и исчезали, так что отыскать закономерности в их движении было трудно. Поэтому в отличие от планет, для которых законы движения сначала были найдены эмпирически, а уже потом

объяснены на основе закона всемирного тяготения, для комет все было наоборот.

Только после того, как Ньютон установил универсальный (всемирный) характер закона тяготения, стало ясно, что кометы могут двигаться по эллипсам, так же, как планеты. Но тогда среди них должны быть периодические? Первой кометой, для которой это было показано, была большая комета 1682 г. Сделал это Эдмунд Галлей. Эта комета



Рис. 5. Тихо Браге

была названа его именем. На рис. 6 мы видим эту комету на титульном листе книги П. Апиана, профессора математики из г. Ингольштадта, «Practica auff des 1531 jar», вышедшей в 1531 г. На нем изображен путь Солнца и кометы Галлея в созвездии Льва.

Кеплер наблюдал эту комету еще в 1607 г. и даже издал небольшую брошюру, в которой старался развеять ужас, внушаемый ею. Кеплер же дал первый в истории научный чертеж видимого на небе пути этой кометы. Забавно, что, изобразив видимый путь этой кометы, Кеплер не стал вычислять ее истинное движение так же, как он вычислял истинные движения планет, «чтобы не терять времени на определение точного пути светила, которое никогда не вернется». Комета вернулась в 1682 г.



Рис. 6. Титульный лист книги П. Апиана, изданной в 1531 г. Изображен путь Солнца и кометы Галлея 1531 г. в созвездии Льва

Однако о комете Галлея мы еще успеем поговорить, и немало. Сейчас же рассмотрим место комет в Солнечной системе уже

§ 3. С современных научных позиций

Между прочим, если вы ищете хорошую проблему...

Р. Фейнман. Лекции по физике

После того как Галилей первым навел на небо построенный им телескоп, в астрономии появилась новая профессия — «ловцы комет». Дело в том, что слабая комета имеет вид маленького туманного пятнышка на небе. Но отнюдь не любое туманное пятнышко — это комета. Теперь мы знаем, что так выглядит целый ряд астрономических объектов: планетарные и диффузные туманности, шаровые и рассеянные скопления, галактики. Когда комета находится еще далеко от Солнца, кажется, что она почти не перемещается по небу от ночи к ночи, поэтому ее трудно

отличить от этих статичных пятнышек. Наблюдатель должен быть достаточно искусным, чтобы заметить это. Французский астроном Шарль Мессье (1730—1817) впервые в истории астрономии составил каталог таких туманностей (более ста объектов) именно для того, чтобы не путать их с кометами. Это и сейчас один из самых известных справочников, можно сказать, настольный каталог астрономов.

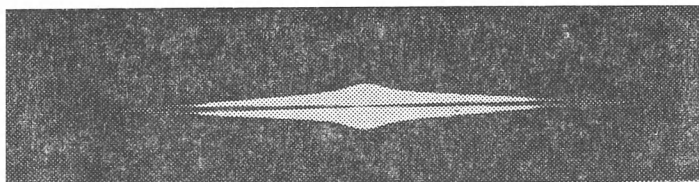


Рис. 7. «Компьютерная фотография» нашей Галактики. Поскольку мы, живя на Земле — одной из планет Солнечной системы, находимся внутри Галактики, то взглянуть на нашу звездную систему извне, естественно, не можем. Можно, однако, рассчитать теоретически, как должна представляться Галактика внешнему наблюдателю, например, «с ребра». Эта фотография снята с дисплея компьютера, на котором такой расчет произвели американские астрофизики Дж. Бакол и Р. Сонеира из Принстона

Объекты каталога Мессье обозначают буквой «М». Объект М1 — это знаменитая Крабовидная туманность, в центре которой, как мы теперь знаем, находится нейтронная звезда. Именно эту туманность Мессье принял сначала за новую комету и именно во избежание дальнейших ошибок составил свой знаменитый каталог. Ирония судьбы заключается в том, что по прошествии каких-нибудь 200—250 лет причины и следствия, так сказать, поменялись местами. Теперь мы знаем, что кометы — это, скорее всего, обитательницы только лишь нашей Солнечной системы, в которой они, по-видимому, возникли. Солнце — вполне заурядная звезда нашей Галактики (рис. 7), в которой насчитывается приблизительно 10^{11} звезд. Таких галактик, как наша, великое множество. Обычно они образуют скопления, в которых могут насчитываться сотни и даже тысячи галактик. И если во времена Мессье галактики и туманности были лишь досадными помехами на пути «вылавливания комет», то теперь объекты каталога Мессье (и других каталогов) являются важнейшим предметом исследования, так как именно они позволяют судить о структуре и эволюции Вселенной, видимые сегодня размеры которой исчисляются миллиардами световых лет (1 световой год $\approx 10^{16}$ м).

Казалось бы, на фоне таких грандиозных проблем могут ли кого-нибудь всерьез волновать такие частности, как Солнечная система (ее размеры вряд ли превышают сотни астрономических единиц, а 1 астрономическая единица (а.е.) $\approx 1,5 \cdot 10^{-5}$ световых лет), Солнце и совсем «частная частность» — кометы? Оказывается, могут. Дело в том, что вопрос о происхождении Солнечной системы тесно связан с проблемой происхождения жизни на Земле и вообще во Вселенной, с проблемой существования внеземных цивилизаций.

Проблемы эти не менее фундаментальны, чем проблемы эволюции Вселенной. Для их решения нужно знать начальные условия, при которых образовалась Солнечная система. И оказывается, именно кометы могут дать об этом необходимую информацию.

Все тела Солнечной системы (и, в частности, кометы), скорее всего, возникли в едином процессе эволюции досолнечного газопылевого облака. Единой, общепринятой точки зрения о том, как это произошло, в настоящее время не существует. Это связано с большой неопределенностью в начальных условиях возникновения и последующей эволюции досолнечного облака. Считается, например, что возникновение планетных систем вокруг звезд — явление заурядное, и в этом плане наша звезда — Солнце — не есть нечто исключительное. Однако в самое последнее время возникли сомнения в заурядности условий, в которых находится Солнечная система в нашей Галактике. Связано это с местоположением Солнца в Галактике.

Наша Галактика относится к спиральным. Согласно современным представлениям спиральные рукава галактик представляют собой волны уплотнения. Галактика вращается. При этом угловая скорость Ω зависит от расстояния r до ее центра, т. е. $\Omega = \Omega(r)$. Волны уплотнения вращаются с постоянной угловой скоростью $\Omega_{\text{в}}$. Существует, очевидно, такая окружность радиуса $r_{\text{к}}$ в диске галактики, угловая скорость вращения по которой совпадает с угловой скоростью волн уплотнения (т. е. выполняется равенство $\Omega(r_{\text{к}}) = \Omega_{\text{в}}$). Такую окружность называют коротационной. В каждой галактике (в том числе и в нашей) есть только одна коротационная окружность.

Оказывается, Солнце в нашей Галактике находится почти на коротационной окружности, и положение Солнечной системы в этом смысле исключительное. Вполне возможно, что из-за этой исключительности условия, в которых возникла Солнечная система, не являются зауряд-

ными *). Не исключено, что это имеет значение и для проблемы происхождения жизни. Вследствие того что Солнце вращается почти синхронно со спиральным узором Галактики; мы только один раз за время существования Солнечной системы успели пересечь спиральный рукав — место крайне опасное для всего живого, так как именно в спиральных рукавах вспыхивают сверхновые звезды, которые дают настолько мощные потоки космических лучей, что это может оказаться губительным для жизни.

Исключительность физических условий вблизи коротационной окружности позволила советскому планетологу Л. М. Мухину и автору этой книги выдвинуть гипотезу о том, где в нашей и других галактиках можно ожидать существования «братьев по разуму» — внеземных цивилизаций, похожих на нашу собственную. Эту зону исключительных физических условий мы называли «поясом жизни», имея в виду обстоятельства, отмеченные выше.

Уже из приведенного примера ясно, насколько важно знать начальные условия, при которых формировалась Солнечная система, насколько они были заурядны или незаурядны в Галактике, каков был химический состав досолнечного облака, физические условия в нем и т. п. Информацию об этих начальных условиях, во всяком случае о химическом составе и физических условиях, могут дать кометы. Масса комет очень мала по сравнению с массами планет Солнечной системы (по-видимому, она порядка 10^{-6} — 10^{-12} массы Земли). Это означает, что мала их собственная гравитация. Поэтому кометы почти не эволюционировали с эпохи своего рождения до сегодняшнего дня. Другими словами, физические условия в кометах, их химический состав остались такими же (или почти такими же), как в первичной газопылевой туманности, из которой образовались Солнце и планеты. Эволюция затронула большие тела — само Солнце; планеты, но почти не коснулась малых — комет, метеоритов.

Более того, одна из современных гипотез вообще связывает происхождение жизни в Галактике с кометами. Она принадлежит известному американскому физiku Ф. Дайсону. Его идея заключается в том, что жизнь сконцентрирована на поверхности Земли, в биосфере. Если считать, что жизнь всегда может возникнуть лишь в поверхностных слоях холодных небесных тел, то тогда кометы в Галактике — наи-

*) Конечно, это относится не только к Солнечной системе, но и к другим объектам, расположенным вблизи коротационной окружности.

более подходящее для этого место. Дело в том, что хотя масса комет намного меньше массы планет в Солнечной системе (или, соответственно, в Галактике, если феномен нашей Солнечной системы — явление не уникальное), однако число их велико ($>10^{15}$), так что суммарная площадь поверхности всех кометных ядер намного больше суммарной площади поверхности всех планет. Химический состав комет, определенный с помощью спектрального анализа, показывает, что в них есть органические молекулы, которые при определенных условиях способны к самоорганизации, т. е. возможно образование из них сложных органических молекул, которые могут послужить основой для возникновения простейших микроорганизмов.

Существует, например, небезосновательная гипотеза, принадлежащая английским ученым Ф. Хойлу и Ч. Викрамасингху, что некогда Земля была «заражена» органической материей, возникшей в кометах, и что жизнь на Земле возникла вследствие эволюции этой органики. Здесь конечно, есть свои «за» и «против». Например, И. С. Шкловский высказывал сомнения в справедливости такой гипотезы: так как кометы движутся по сильно вытянутым орбитам вокруг Солнца, в них в огромных пределах меняется температура; из-за малой массы комет в них почти нет силы тяжести, т. е. условия в кометах резко отличаются от земных. С другой стороны, появились и некоторые аргументы «за». В упавшем в Мексике метеорите Алленде был обнаружен избыток стабильного изотопа магния ^{26}Mg (избыток по сравнению с его средним содержанием в Солнечной системе). Исследования показали, что этот избыток является следствием распада радиоактивного изотопа ^{26}Al (стабильный изотоп — это ^{27}Al). Его период полураспада $T=7,2 \times 10^5$ лет. Откуда взялся в досолнечной туманности радиоактивный ^{26}Al ? Это — вопрос. Ясно, однако, что он должен был в нее попасть приблизительно за миллион лет до того, как начали затвердевать метеориты. Сейчас его появление связывают с вероятным взрывом близкой сверхновой. Если, однако, в досолнечной туманности присутствовал изотоп ^{26}Al , то он был и в том материале, из которого возникли кометы. А это значит, что простейшие органические молекулы, входящие в состав кометных ядер, находились под облучением распадающегося изотопа ^{26}Al . Лабораторные опыты показывают, что при облучении такие молекулы способны к самоорганизации, к образованию аминокислот и оснований нуклеиновых кислот, а отсюда совсем недалеко до возникновения жизни.

Эти идеи не бесспорны, быть может — даже сомнительны. Для их проверки, для ответа на множество интереснейших вопросов необходимы прямые эксперименты в космосе и, конкретно, «встречи» с кометами, непосредственное «прощупывание» их.

Кометы, как и остальные тела Солнечной системы, возникли, скорее всего, в едином процессе эволюции досолнечного газопылевого облака. Здесь не случайно употреблены слова «скорее всего». Дело в том, что вопрос — являются ли кометы телами, родившимися вместе с Солнечной системой, или они захвачены Солнцем из галактической окрестности — одна из старейших проблем астрономии. История этого вопроса насчитывает по крайней мере более 200 лет. Начиная с Канта, Лапласа, Скиапарелли, точки зрения меняются на противоположные со средним интервалом времени порядка 50 лет.

Коперник и Кеплер, как мы видели, выяснили строение Солнечной системы. Произошло это в XVII веке. Позднее выяснилось, что планет больше, чем было известно в те времена, что у части из них есть спутники и т. д. Однако лишь в 50-е годы нашего столетия стало ясно, что наши представления о строении Солнечной системы, восходящие к Копернику и Кеплеру, должны быть существенно дополнены. Как показал голландский астроном Ян Оорт в 1950 г., Солнечная система, по-видимому, окружена гигантским облаком комет, которое называют кометным банком или «облаком Оорта» (или «сейфом Оорта»). Оорт установил существование этого облака, анализируя распределение кометных орбит. По гипотезе Оорта, это облако есть гигантский «резервуар», наполненный кометами, из которого под действием тяготения близко проходящих звезд время от времени вырывается одна из них и устремляется к Солнцу. Ее мы и фиксируем с Земли как очередную комету. Буквально сейчас, когда пишутся эти строки, «сейф Оорта» стал предметом пристального внимания и бурных научных дискуссий во всем мире. С ним связывают периодические вымирания отдельных биологических видов на Земле. Анализ его поведения свидетельствует также о том, что наше Солнце является, возможно, двойной звездой, «компаньон» которой невидим. Им может быть черная дыра или так называемый черный карлик (см. гл. 4, § 3),

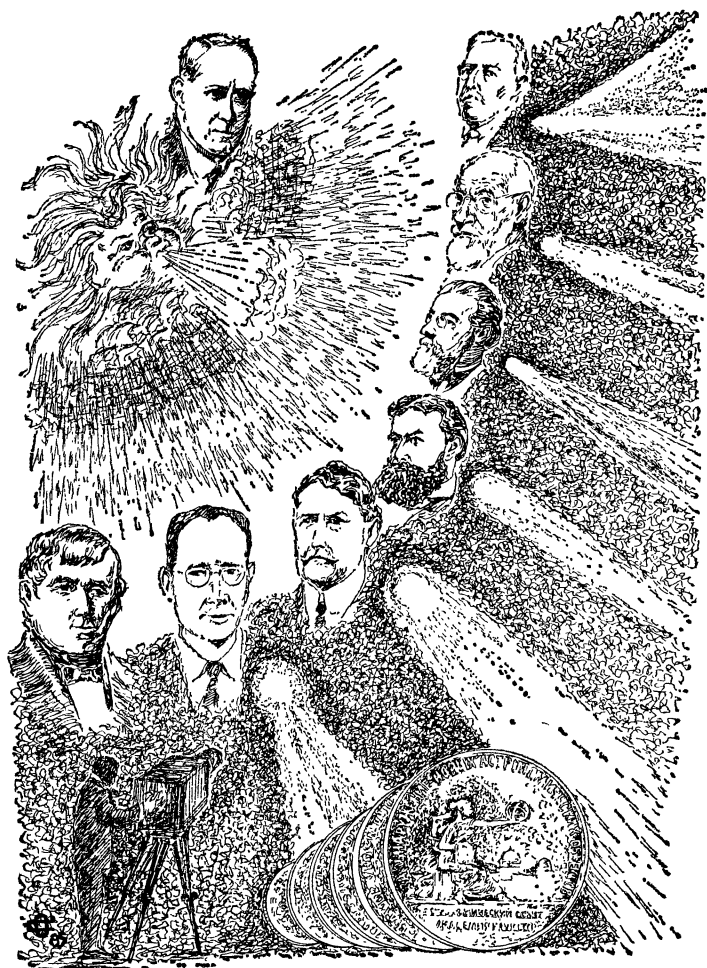
Раньше существовала красивая гипотеза, согласно которой кометное облако возникло из ледяных остатков десятой планеты Солнечной системы — Фаетона, некогда существовавшей между орбитами Марса и Юпитера и затем

погибшей. Позднее такое объяснение стало казаться далеко не бесспорным, хотя в последнее время снова появились соображения в его пользу.

Кометы могли возникнуть и как побочный продукт при формировании планет, и вследствие других процессов в досолнечном газопылевом облаке. Важно, однако, что они возникли, по всей вероятности, в Солнечной системе, мало эволюционировали и, следовательно, несут информацию о начальных условиях. Не говоря уже о до сих пор не решенных фундаментальных проблемах, таких как происхождение Солнечной системы, жизни в ней и т. п., на которые могут пролить свет кометные исследования, даже в самой физике явлений, наблюдаемых в кометах, очень много неясного.

Двигаясь по своим орбитам в космическом пространстве, кометы находятся под действием электромагнитного излучения Солнца и солнечного ветра (потоков заряженных частиц), «дующего» от Солнца. Здесь далеко не все и не до конца понятно, но об этом речь впереди.

Таким образом, экспедиции к кометам, помимо захватывающего психологического аспекта, имеют и огромное научное значение. Они нужны всем тем, кто интересуется физикой многих непонятных явлений, наблюдаемых в кометах, и тем, кто интересуется фундаментальными проблемами происхождения нашей Солнечной системы и систем, подобных ей в нашей Галактике, проблемами происхождения жизни на Земле и вообще во Вселенной.



НА ЗВЕЗДНОМ НЕБЕ

День, утомленный сонной ленью,
 Вдруг опускает поводья,
 Я снова пропустил мгновенье,
 Когда рождается звезда,
 И возникает в тихой дали
 Еще синеющих небес
 Та звездочка, нежней печали,
 И месяц, тонкий как порез.

§ 1. Кометы глазами наблюдателя

Я уже писал, что вначале, при своем появлении на небе, комета имеет вид слабого туманного пятнышка, внешне похожего на такие астрономические объекты, как шаровые скопления или туманности. Кометы — это малые тела Солнечной системы, их масса на порядки меньше массы Земли. Радиус ядра типичной кометы исчисляется километрами. Напомним, что средний радиус Земли $R_{\oplus} = 6371$ км, а радиус нашей звезды — Солнца — $R_{\odot} = 696000$ км *). Шаровые скопления содержат сотни и тысячи звезд, размеры шаровых скоплений порядка десятков парсеков **). В каталоге Мессье, содержащем объекты, похожие на кометы, есть и знаменитая туманность Андромеды, идущая под номером М31. Это — галактика, похожая на нашу, содержащая около $3 \cdot 10^{11}$ звезд; ее диаметр близок к 16 кпк (рис. 8).

*) В астрономии принято обозначать величины, относящиеся к Солнцу, значком \odot . Например, радиус Солнца — R_{\odot} , масса Солнца — M_{\odot} и т. д. Величины, относящиеся к Земле, обозначают значком \oplus , т. е. R_{\oplus} — радиус Земли, M_{\oplus} — масса Земли и т. д.

**) Единица измерения длины в астрономии 1 парсек (пк) — это то расстояние, которое свет проходит за 3,26 года: $1 \text{ пак} \approx 3 \cdot 10^{16}$ м. Соответственно килопарсеком называют единицу измерения длины, равную тысяче парсеков ($1 \text{ кпк} = 10^3 \text{ пак}$), а мегапарсеком — миллиону парсеков ($1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пак}$). Упомянутая выше астрономическая единица — среднее расстояние от Солнца до Земли — равна 1 а. е. $\approx 5 \cdot 10^{-6}$ пак. Эта единица используется для измерения расстояний в Солнечной системе. Парсеками измеряют расстояния до ближайших звезд. Килопарсеки — это расстояния, типичные для таких систем, как галактики. Мегапарсеки применяются для характеристики расстояний во Вселенной.

Почему же при своем появлении на звездном небе «микро-скопически малая» комета выглядит так же, как гиганты — шаровые скопления, галактики? Ответ прост: все дело в расстояниях. Комета становится заметной на небе, когда



Рис. 8. Туманность Андромеды (M31)

подходит к Солнцу на расстояние нескольких астрономических единиц, в то время как расстояние до туманности Андромеды, например, составляет 670 клк. По этой же причине далекие объекты — шаровые скопления, туманности — неподвижны относительно звезд, а кометы довольно быстро перемещаются. Собственно говоря, именно таким способом их и открывают. Когда знаменитая комета Галлея в 1910 г. должна была в очередной раз вернуться из окраин Солнечной системы к Солнцу, ее открыл в Германии М. Вольф.

Фотографируя ту область неба, где, как показали вычисления, должна была появиться комета Галлея, Вольф сумел на одном из снимков различить маленькое туманное пятнышко, которое на следующем снимке, сделанном приблизительно через сутки, заметно сместилось относительно окружающих его на фотопластинке звезд. Это отчетливо видно на рис. 9, где приведены одни из первых снимков кометы Галлея 1910 г. Комета была открыта Вольфом, когда она подошла к Солнцу на расстояние 3, 6 а. е.

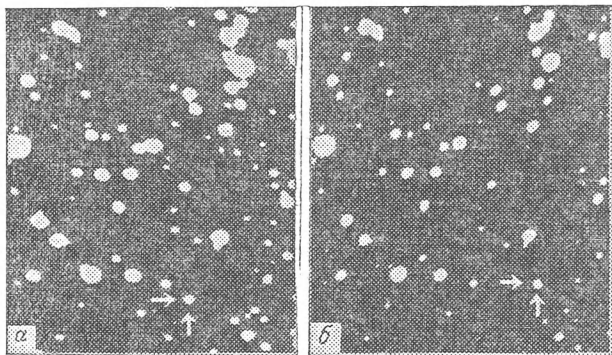


Рис. 9. Первые снимки кометы Галлея в 1910 г. Стрелками показаны положения кометы а) 16 и б) 17 сентября 1909 г.

В наши дни, когда к комете Галлея снаряжаются экспедиции, ее, конечно, стремились обнаружить как можно раньше. Наблюдения на мощных телескопах увенчались успехом уже в октябре 1982 г., когда комета находилась от Солнца на расстоянии 11 а. е.! Заблаговременное обнаружение кометы позволяет точнее рассчитать траекторию полета к ней космических аппаратов.

По мере приближения к Солнцу вид кометы начинает меняться. Если это большая комета, то видно, как с течением времени из первоначально слабого туманного пятнышка, называемого головой кометы или комой, появляется веерообразное истечение, напоминающее огненный фонтан, бьющий в направлении Солнца. Постепенно яркость кометы увеличивается. Истечения, расширяясь к вершине фонтана, заворачиваются назад от Солнца в виде отдельных струй, которые отходят все дальше и дальше, образуя колоссальные (если комета большая) хвосты, всегда направленные прочь от Солнца. На рис. 10 мы видим комету Донати

1858 г., зарисованную известным исследователем комет Барнардом, работавшим на Ликской обсерватории (США). На рис. 11 изображена эта же комета над парижским собором Нотр-Дам.

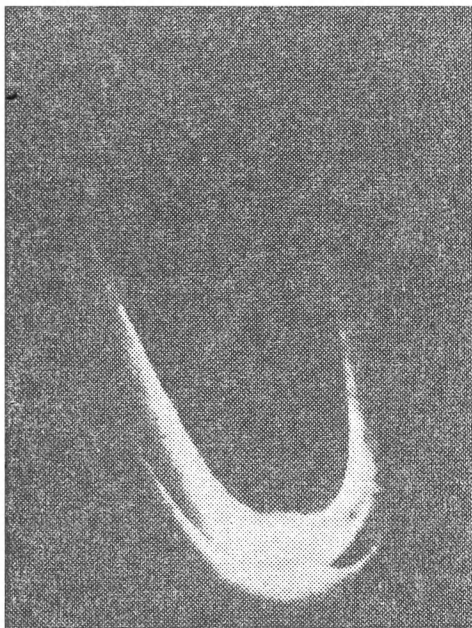


Рис. 10. Комета Донати 1858 г. (рисунок Барнарда). В голове ясно видны оболочки

Изобретение фотографии датируют 1839 г., когда француз Дагер придумал метод получения изображения предметов с помощью чувствительного к свету слоя иодистого серебра, нанесенного на специальную пластинку, получившую название дагерротипа. Первым, кто понял значение фотовозможностей для астрономии, был Араго, который сделал об этом доклад в Парижской академии. Первый снимок Луны на пластинке дагерротипа сделал американец Дрейпер уже в 1840 г. В 1850 г. Бонд, в то время директор Гарвардской обсерватории, сделал первый в истории снимок яркой звезды Веги в созвездии Лиры (α Лиры) — первой звезды, вокруг которой ИРАС (эта аббревиатура происходит от английской IRAS — Infrared Astronomical Satellite — инфракрасный астрономический спутник) впервые в истории астрономии обнаружил, по-видимому, в 1983 г. планетную систему, придав новую остроту дискуссии о проблеме внеземных цивилизаций.

Комета Донати 1858 г. была сфотографирована Бондом. На рис. 10 приводится рисунок Барнарда, а не фотография Бонда. Чувствитель-

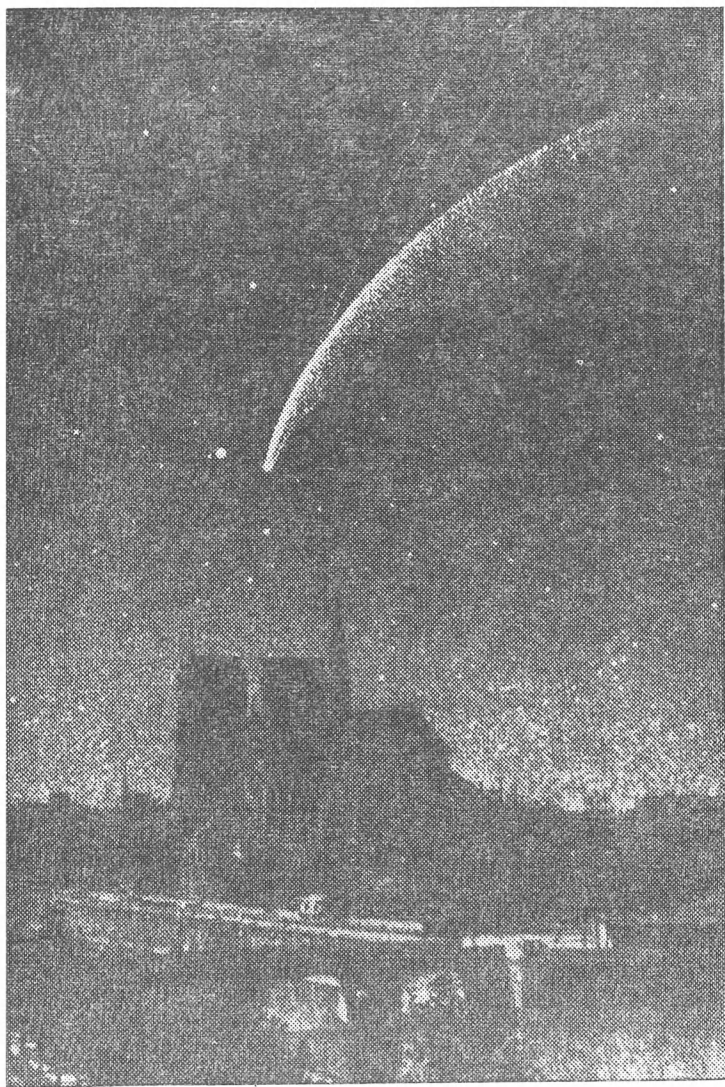


Рис. 11. Литография с рисунка, сделанного в 1858 г. в Париже неизвестным художником. Комета Донати над парижским собором Нотр-Дам

ность дагерротипа была очень низкой. Для того чтобы сделать фотоснимок предмета днем на открытой площадке, нужна была экспозиция около одного часа. К 1858 г. чувствительность удалось улучшить приблизительно в 100 раз.

Комета 1858 г. оставила на пластинке дагерротипа лишь слабый отпечаток. Но уже в 1882 г. Жансеном был получен первый хороший фотоснимок Большой кометы этого года (см. далее). Для этой же кометы тоже впервые была получена хорошая спектрограмма, из которой было видно, что в атмосфере кометы есть углеводороды. В ней же была обнаружена желтая линия натрия. Стало ясно, что при достаточно близком пролете возле Солнца (Большая сентябрьская комета 1882 г. относится к семейству комет, «царапающих Солнце», т. е. пролетающих возле него на очень малых перигелийных расстояниях) в атмосфере кометы могут появляться линии металлов, что свидетельствует о сильном прогреве кометного вещества.

Думаю, что эта первая информативная спектрограмма кометной атмосферы может считаться началом изучения физико-химических свойств кометных атмосфер.

В голове кометы Донати 1858 г. мы видим (рис. 10) структурные образования, называемые оболочками. Это довольно частое явление. Кроме оболочек в головах комет нередко наблюдаются галосы — структуры, которые в проекции на небесную сферу выглядят окружностями. Чаще всего центры галосов совпадают с центральным светящимся звездообразным уплотнением, которое называют фотометрическим (или видимым) *) ядром. Галосы расширяются с постоянной скоростью — другими словами, их радиусы увеличиваются пропорционально времени. Иногда в кометах наблюдаются галосы, центры которых не совпадают с видимым ядром. Во время прохождения кометы Галлея в 1910 г. в ней, например, наблюдалось одновременно несколько центров галосообразования. Собственно оболочки отличаются от галосов тем, что они более яркие, не бывают, подобно галосам, замкнутыми, а являются разомкнутыми сферами. Своей выпуклостью оболочки всегда обращены к Солнцу.

По мере приближения к Солнцу не только увеличивается яркость головы кометы, но и, как правило, развиваются один или несколько хвостов. По классификации русского ученого Ф. А. Бредихина, принятой сейчас в советской и зарубежной научной литературе, хвосты комет делятся на три типа. Хвост I типа у слабой кометы — это узкий длинный луч, почти совпадающий с прямой линией, соединяющей в момент наблюдения Солнце и комету. У ярких комет

*) Это название связано с необходимостью отличить видимое светящееся уплотнение в центре головы от истинного твердого ядра, которое очень мало.

это обычно пучок лучей, исходящих из видимого ядра, напоминающий по форме луковичу. Хвосты II и III типов более широкие и отклоняются от упомянутой прямой линии в сторону, противоположную движению кометы. Схематически хвосты всех трех типов изображены на рис. 12. Хвосты

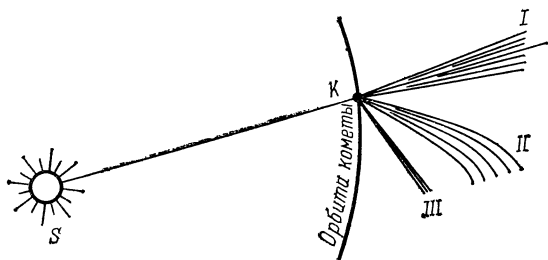


Рис. 12. Схематическое изображение трех типов хвостов. *S* — Солнце, *К* — комета, движущаяся по своей орбите

II и III типов состоят из пыли и нейтральных газов, а хвосты I типа — из плазмы (ионизованного газа). Явления в них имеют электромагнитную природу. По этой причине они не балуют своих исследователей однообразием и стандартным поведением. Здесь наблюдаются причудливые формы и до сих пор не до конца понятные явления. На рис. 13 мы видим фотографию кометы, обнаруженной в 1908 г. немецким студентом-практикантом Морхаузом. Эта комета вошла в историю под именем «кометы Морхауза». Она весьма необычна. Многие эффекты, которые наблюдались во время ее прохождения по небу, до сих пор непонятны.

Так, А. Эддингтон, наблюдая комету Морхауза, обнаружил удивительное явление: время от времени на некотором расстоянии от обращенной к Солнцу части головы кометы (иногда говорят о «дневной» стороне) возникала светящаяся точка, которая затем начинала двигаться к ядру. В процессе движения она растягивалась в небольшую дугу. По мере приближения к центру головы длина дуги росла, концы все больше и больше загибались, охватывая голову и уходя в хвост.

Наблюдателю казалось, что он видит оболочку, движущуюся от края головы к ядру и одновременно сжимающуюся к центру. «Усики» — концы оболочки, — охватывая голову, тянулись в хвост и по мере сжатия оболочки к центру как бы «захлопывались» к прямой линии, соединяющей Солнце и комету. Все это явление напоминало движение спиц закрываемого зонтика.

В хвосте этой кометы тоже наблюдались удивительные явления. Например, М. Вольф видел, как в нем время от времени распространялись волны, а сам хвост состоял как

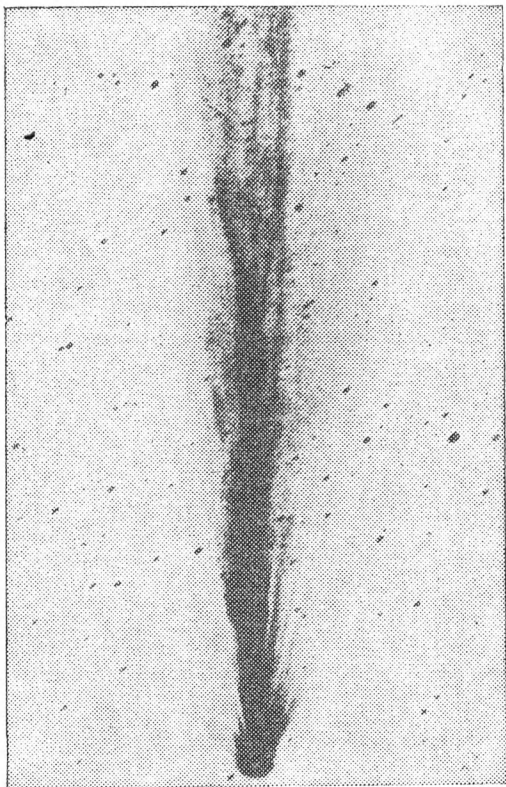


Рис. 13. Комета Морхауза 1908 г. В хвосте I типа видна волнообразная структура (вероятно, волновые движения). Снимок 25 ноября. Экспозиция 15 минут. Расстояние до Солнца 1,09 а. е., до Земли — 1,54 а. е.

бы из отдельных струек, вытекающих из головы и направленных в сторону, противоположную Солнцу (рис. 13). Такая струйчатая структура наблюдалась не только в хвосте кометы Морхауза, но в хвостах I типа ряда других комет.

Королевский астроном сэр Артур Стенли Эддингтон, наблюдавший «захлопывающиеся» оболочки в голове кометы Морхауза, пришел к единственно возможному заключению, позволившему объяснить это необычное явление. Вывод Эддингтона сводился к тому, что от Солнца должен «дуть» поток электрически заряженных частиц. Только при

этом условии явление захлопывающихся оболочек могло получить разумное физическое объяснение (мы еще вернемся к нему). По существу, это было первое научное предсказание наличия солнечного ветра — потока заряженных частиц, постоянно дующего от Солнца и заполняющего собой все межпланетное пространство.

Вместе с тем известно, что первым предсказал солнечный ветер немецкий астрофизик Л. Бирман в 1951 г., основываясь на поведении кометных хвостов I типа, а теорию солнечного ветра несколько позднее создал американец Паркер, показавший теоретически, что такое явление возникает в соответствии с физикой Солнца. Позднее солнечный ветер обнаружили экспериментально в прямых космических экспериментах, и сейчас в астрофизике Солнечной системы солнечный ветер — важнейший фактор, определяющий всю физику межпланетной среды. Именно обтекание солнечным ветром приводит, например, к тому, что планеты с собственным магнитным полем (такие, как Земля) имеют длинные шлейфы, тянущиеся на большие расстояния в направлении «антисолнца» (противоположном направлению на Солнце). Однако первую научно обоснованную идею о существовании солнечного ветра высказал все-таки сэр Артур.

Эддингтон вообще был замечательным человеком и гениальным ученым. Именно он впервые экспериментально доказал, что вблизи массивных тел пространство искривляется в точном соответствии с предсказанием теории относительности Эйнштейна. Он доказал это, измерив отклонение луча света от далекой звезды, проходящего вблизи диска Солнца (разумеется, это можно было сделать только во время солнечного затмения). Блестящий математик и физик, он еще в 20-х годах настолько прекрасно изложил в своей книге «Теория относительности» сущность сложнейшей математически и глубочайшей по своему физическому содержанию теории Эйнштейна, что она до сих пор остается одним из лучших руководств по этому предмету. Хорошо известна шутка Эйнштейна, который заметил: «Я лучше стал понимать собственную теорию, прочтя книгу Эддингтона». Конечно, это шутка, но все же...

Самой гениальной, по-видимому, догадкой Эддингтона было объяснение причины, по которой светят звезды! Ему возражали крупнейшие физики того времени — Дж. Томсон, открывший электрон, и Дж. Джинс, открывший чуть ли не главный процесс, действующий во Вселенной и приводящий к возникновению в ней обособленных структур (звезд, галактик и т. п.) — гравитационную конденсацию вещества. Эддингтон первым понял, что источником, непрерывно поддерживающим свечение Солнца и звезд, является энергия атомных ядер. Прямое доказательство этому было получено только в 1939 г. Нобелевским лауреатом Г. Бете.

Идеи Эддингтона были всегда нетривиальны и противников также всегда хватало. Одной из таких нетривиальных идей была идея о солнечном ветре.

Приближаясь к Солнцу, комета становится все ярче, размеры головы увеличиваются, появляется хвост (один или несколько). Наибольшего развития эти явления достигают, когда комета проходит перигелий — точку на ее орбите, самую близкую к Солнцу. Короче, можно сказать так: активность кометы возрастает по мере приближения к перигелию, где она максимальна.

Это явление неплохо описано в стихотворении К. Бальмонта (1908 г.), которое я привожу в сокращенном виде.

Вы сами можете судить, насколько точно поэт описал появление на звездном небе кометы:

По яйцевидному пути
Летит могучая комета.
О чем хлопочет пляской света?
Что нужно в мире ей найти?
Она встает уж много лет,
Свой путь уклончивый проводит,
Из неизвестного приходит,
И вновь ее надолго нет.
Как слабый лик туманных звезд,
Она в начале появления —
Всего лишь дымное виденье,
В ней нет ядра, чуть тлеет хвост.
Но ближе к Солнцу — и не та,
Уж лик горит, уж свет не дробен,
И миллионы верст способен
Тянуться грозный след хвоста.
Густеет яркое ядро,
И уменьшается орбита,
Комета светится сердито,
Сплошной пожар — ее нутро.

После прохождения перигелия активность кометы снова уменьшается (излияния слабеют, хвост уменьшается, яркость падает), постепенно она снова превращается в маленькое туманное пятнышко и затем теряется на фоне звездного неба.

§ 2. Их имена

— Разве имя должно что-то значить? — проговорила Алиса с сомнением.

— Конечно, должно, — ответил Шалтай-Болтай и фыркнул.

Л. Кэрролл. «Алиса в Зазеркалье»

Для координации исследований по астрономии и астрофизике существует организация, которая называется Международным астрономическим союзом (МАС). МАС состоит из ряда комиссий, координирующих и направляющих исследования по различным областям астрофизики в разных странах. При Информационном центре МАС имеется Центральное бюро астрономических телеграмм. В функции этого бюро входит рассылка в обсерватории всех стран мира телеграмм с сообщениями об обнаружении новых небесных тел. Телеграммы шифруются специальным цифровым кодом. Это делается для быстроты и точности передачи информации. Центральное бюро астрономических телеграмм сей-

час находится в США в Смитсоновской обсерватории при Гарвардском университете.

Во всех странах мира наблюдатели, обнаружившие на небе новую комету, сообщают об этом телеграммой в Центральное бюро. В СССР телеграмма посылается в Москву в Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга (ГАИШ), а оттуда уже об открытии новой кометы сообщается в Центральное бюро астрономических телеграмм.

Специальные научные названия комет можно разделить на две категории: временные и постоянные. В основу временных обозначений кладется последовательность поступления сообщений об открытых кометах в Центральное бюро астрономических телеграмм. При этом комета обозначается годом открытия и строчной буквой английского алфавита, соответствующей порядку поступления телеграмм о данной комете. Например, когда пишут «комета 1975*n*», то это означает, что сообщение об ее открытии поступило в Центральное бюро астрономических телеграмм в 1975 г. четырнадцатым по счету (буква *n* имеет 14-й порядковый номер в английском алфавите) — до нее, следовательно, было зарегистрировано 13 комет. В английском алфавите 26 букв. Если число комет, обнаруженных за год, превысит 26, то как поступать в этом случае, Центральное бюро пока не решило.

В основу постоянных обозначений кладется последовательность прохождения комет через перигелий. Постоянные обозначения даются кометам, как правило, через несколько лет после их появления, когда орбита кометы уже точно рассчитана и можно установить последовательность, в которой в данном году кометы проходили перигелии. В этом случае комета обозначается соответствующим годом и римской цифрой, указывающей, какой по счету в этом году данная комета прошла через свой перигелий. Например, обозначение «1910 II» показывает, что речь идет о комете, прошедшей в 1910 г. через перигелий второй по счету. Постоянные и временные обозначения не всегда совпадают. Это происходит потому, что временные названия характеризуют только порядок поступления сообщений о кометах в Центральное бюро астрономических телеграмм, которые иногда могут быть ошибочными, а иногда не отражают истинную хронологию появления комет.

Иногда комета носит имя своего первооткрывателя (первооткрывателей) или людей, посвятивших ее изучению большую часть своей жизни. В название кометы обычно не

включается больше трех фамилий. Так, уже упомянутую комету 1975 *n* (см. рис. 14) называют и кометой Веста. Она — одна из самых крупных комет XX века. Кстати, ее постоянное обозначение — 1976 VI. Вест — фамилия открывшего

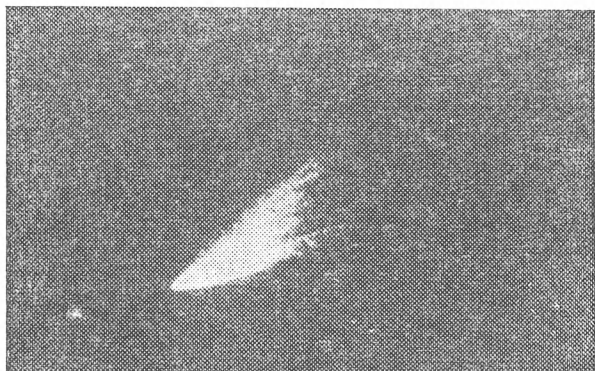


Рис. 14. Комета Веста 1976 г.

ее человека. Теперь мы знаем, о чем говорят такие обозначения (1975 *n* и 1976 VI): несмотря на то что комету Веста обнаружили еще в 1975 г. четырнадцатой по счету, через свой перигелий она прошла лишь в 1976 г. шестой.

Вот как пишет о комете Веста известный японский исследователь комет Коитиро Томита: «3 марта 1976 г. в восточной части неба наблюдалась комета с длинным хвостом, имевшая такую яркость, что ее можно было принять за небольшое облачко. Она имела форму штрихового иероглифа, написанного кисточкой с постепенным усилением нажима, размашисто и небрежно, да к тому же левой рукой. Голова кометы, кончик этого значка, светилась так же ярко, как «утренняя звезда» — планета Венера. Хвост кометы, несколько наклоненный к линии горизонта, был слегка изогнут. Средняя часть кометы, между головой и концом хвоста, или средняя часть этого, так сказать, «птичьего пера», имела бледно-розовый оттенок.

Комета была настолько внушительных размеров, что при фотографировании вполне могла заполнить весь кадр обычной 35-миллиметровой пленки. Поистине это была самая крупная комета XX века.

Получившая название кометы Веста 1975*n*, она была впервые обнаружена еще в октябре предыдущего года, но тогда астрономы весьма осторожно высказывались относительно ожидаемой ее максимальной яркости. И поскольку в газетах почти ничего не сообщалось о комете, число людей, которым посчастливилось увидеть это поистине великолепное зрелище (за исключением, естественно, тех, кто имел к этому непосредственное отношение), ограничилось, по сути дела, немногочисленными счастливыми, вроде всегда рано встающих доставщиков молока или разносчиков газет, да еще моряков, стоявших в эти утренние часы на вахте на кораблях, шедших тихоокеанскими трассами».

Комета 1910 II — это комета Галлея. Она носит имя Галлея (современника и друга Исаака Ньютона), посвятившего ее изучению всю свою жизнь. Эта комета сыграла и, вероятно, еще сыграет заметную роль в истории человечества.

При появлении на небе особенно ярких комет часто случается, что их обнаруживает сразу много людей. В таких случаях в Центральное бюро поступает одновременно до 10 телеграмм, так что выделить какого-либо одного первооткрывателя просто невозможно. Такие кометы носят особые названия, так как являются исключительными.

Одна из таких историй произошла 11 сентября 1882 г. в Рио-де-Жанейро, когда Крульс сообщил телеграммой в Европу об открытии им кометы. Эта комета успела несколько дней побыть «кометой Крульса». Потом выяснилось, что многие видели ее неделей раньше. В частности, ее видели перед рассветом 3 сентября железнодорожные рабочие в Аргентине (т. е. тоже в Южной Америке, где она была хорошо видна). Поскольку установить, кто же ее видел первым, не было никакой возможности, ее назвали «Большая сентябрьская комета 1882 г.».

Это было совершенно исключительное явление. Когда Большая сентябрьская комета 1882 г. проходила через перигелий, она была в 60 раз ярче, чем Луна в полнолуние. Если бы даже эта комета одна светила на ночном небе, то при ее освещении свободно можно было бы читать книгу. Перигелийное расстояние этой кометы (расстояние от точки перигелия до Солнца, обозначаемое обычно буквой q и измеряемое в астрономических единицах) было исключительно малым. Оно составляло всего лишь $q = 0,0077$ а. е. Если сравнить это значение q с радиусом Солнца $R_{\odot} = 696\,000$ км, то мы увидим, что комета прошла на расстоянии $0,65 R_{\odot}$ от поверхности нашего светила. От огненного моря, бушующего на поверхности Солнца, ее отделяло около 450 000 км. Это означает, что комета пролетала через солнечную корону. Из-за очень малого перигелийного расстояния Большая сентябрьская комета 1882 г., проходя через перигелий, набрала колоссальную скорость — 480 км/с (см. гл. 3, § 1). За 5—6 часов комета обогнула Солнце и стала уходить от него. За это время она пролетела более 5 млн. км. Эта комета так же, как знаменитая комета Галлея 1910 г., прошла по диску Солнца, и на это время наблюдатели потеряли ее из виду. Это неудивительно, так как расстояние до Земли в этот момент равнялось $\rho = 1$ а. е. $\approx 1,5 \cdot 10^8$ км, а твердое ядро кометы вряд ли могло иметь диаметр больше чем 20 км. Давайте вычислим угол α , под которым можно было бы увидеть твердое ядро, т. е. его угловой диаметр. Легко сообразить, построив простой чертежик, что если радиус ядра кометы есть $R_k = 10$ км, то

$$\operatorname{tg}(\alpha/2) = R_k/\rho = 10 \text{ км} / (1,5 \cdot 10^8) \text{ км} = 0,66 \cdot 10^{-7}. \quad (2.1)$$

Мы знаем, что если угол мал, то его тангенс приблизительно равен самому углу, измеренному в радианах. Таким образом, находим, что $\alpha \approx 1,32 \cdot 10^{-7}$ радиан. В одном радиане содержится 206264,8 угловых секунд (сокращенно: 1 рад = 206264,8"). Теперь можно найти угол α в секундах: $\alpha = 0,027''$.

Угловой диаметр самого маленького небесного тела, которое еще можно увидеть в данный телескоп, называют разрешающей способностью этого телескопа. Разрешающая способность даже современных мощных телескопов не позволяет увидеть твердое ядро кометы на таком расстоянии. Но может быть, в то время, когда эта комета проектировалась на солнечный диск, можно было видеть голову или гигантский хвост? Оказывается, и это невозможно, так как вещества в головах и хвостах комет ничтожно мало — они совершенно прозрачны на просвет, когда проектируются на солнечный диск. Французский астроном Бабинэ остроумно назвал кометы «видимым ничто».

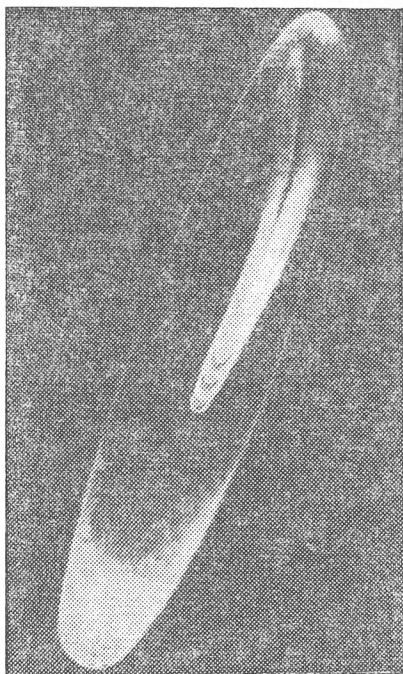


Рис. 15. Большая сентябрьская комета 1882 г. (рисунок Уилиса)

Как эта комета располагалась во время прохождения вблизи перигелия по отношению к Солнцу и Земле, можно сообразить, глядя на рис. 15. Очевидно, голова кометы проектировалась на удаленные части хвоста. Уилис зарисовал ее 9 октября с палубы корабля, который находился в 100 км к востоку от Гибралтара.

В 1786 г. Мешен во Франции открыл довольно слабую комету. Позднее, как выяснилось, она оказалась периодической. Приблизительно через каждые 3,3 года эта комета вновь и вновь возвращается к Солнцу. Она имеет рекордно

короткий период, равный 1207 дням, который был установлен в 1918 г. немецким астрономом Энке. Энке же, наблюдая систематически эту комету, обнаружил, что период ее неуклонно уменьшается с течением времени, т. е. комета постепенно ускоряется (по-видимому, из-за потери твердым ядром части своей массы вблизи перигелия, который она так часто проходит). Эта комета получила название кометы Энке по имени ученого, много лет изучавшего ее. Такого рода периодические кометы обозначаются годом прохождения через перигелий, номером по постоянной шкале и именем ученого, чье имя ей присвоено. Когда имеют в виду прохождение кометы Энке через перигелий в 1819 г., например, то пишут: «комета 1819 I (Энке)».

Существует мнение, что Тунгусский метеорит является осколком ядра этой кометы. Если скорость потери массы кометой Энке не уменьшится, то к 2000 г. она, по-видимому, перестанет существовать.

§ 3. Рекордсмены и чемпионы

Простоты ради мы ограничимся рассмотрением только охоты на львов (*Felis leo*), живущих в пустыне Сахара.

Г. Петард. «К математической теории охоты»

Я уже писал, что после того как Галилей навел на небо первый в мире телескоп, появилась новая профессия — «ловцов» или «охотников» за кометами. Занятие это было во все времена крайне увлекательным, как любое спортивное соревнование — кто раньше, кто быстрее... Это с одной стороны. С другой стороны, успех в охоте за кометами приносил и приносит заслуженную славу — ведь обнаруженные кометы носят имена своих первооткрывателей. Существуют и награды за открытие комет.

Рекордсменом мира по числу открытых комет является Ж. Понс (Франция), который за 26 лет (1801—1827 гг.) открыл 33 кометы. Сначала Понс служил в Марселе сторожем на обсерватории. Затем он самостоятельно изучил астрономию, собственноручно построил телескоп и стал работать ассистентом там же, в Марсельской обсерватории. За то, что Понс как бы «притягивал» к себе кометы, его называли «кометным магнитом».

Мировой рекорд по числу комет, открытых за короткий промежуток времени, принадлежит американскому астроному Перрайну, который за 1 год и 3 месяца (1896—1898 гг.) «поймал» подряд 6 комет.

Как и всякие мировые рекорды, эти рекорды побить очень трудно. Главным образом, конечно, потому, что резко увеличилось число конкурентов. Если во времена Понса охотой за кометами занималось 15 астрономов, то позднее число охотников выросло до сотни (а может быть, и более). Пользуясь той же спортивной терминологией, можно сказать, что современная таблица личного мирового первенства выглядит следующим образом.

На первом месте идет японец Минору Хонда, открывший в период с 1940 по 1968 гг. 12 новых комет.

Имя Хонды широко известно в Японии. Начав поиски комет в 1938 г., первое свое открытие он сделал уже в 1940 г. Во время второй мировой войны он был призван в армию и служил в Сингапуре. На свалке лома он случайно нашел 7-сантиметровую линзу, с ее помощью соорудил самодельный телескоп и начал поиски комет. По законам, действовавшим в японской армии, Хонда не имел права писать письма домой, так как, по мнению командования, это раскрывало дислокацию войск. Он очень надеялся открыть комету, так как в этом случае сообщение об открытии, несомненно, попало бы в газеты, и родные хотя бы узнали, что он жив. Ему повезло. В июне 1942 г. он открыл комету, и в Японии об этом стало известно из газет. Правда, впоследствии оказалось, что это — уже открытая ранее комета Грига и Скелерупа и что на самом деле она была открыта американцем Ван Бисбруком еще 11 апреля того же года. Но страстное желание Хонды исполнилось. Кроме того, не известно больше ни одного случая открытия комет во время военных действий.

Открыв в общей сложности 12 комет (столько же в нашем XX столетии открыл только Ван Бисбрук в период до 1941 г.), Хонда стал «чемпионом мира». Имя его популярно в Японии. К старости он стал детским воспитателем в своем родном городе.

Второе, третье и четвертое места за Хондой делят А. Мркос из Чехословакии, Л. Пелтье из США и В. Бредфилд из Австралии, открывшие каждый по 11 комет. Из всех перечисленных любителей астрономии активно продолжает охоту за кометами только В. Бредфилд. В своей повседневной жизни он — специалист по ракетным топливам, и в поисках комет использует собственноручно изготовленный им 15-сантиметровый телескоп с фотокамерой.

Подавляющее большинство комет и в XIX, и в XX веках было открыто не астрономами-профессионалами, а астрономами-любителями. Э. Эверхарт, профессор физики из университета в Денвере (США), заинтересовавшись этой статистикой, провел исследование на компьютере и установил, что любители астрономии с помощью маломощных оптических приборов (биноклей, маленьких телескопов и т. д.) и даже невооруженным глазом открыли 98% долгопериодических комет в XIX веке и 74% в XX веке. С чем это связано?

этих телескопах, ведут исследования далеко не так интенсивно, как им хотелось бы, из-за того, что интересных проблем и объектов много, а телескопов мало, и каждый день сменяется только одной ночью. На каждую программу отводится ограниченное число часов работы телескопа, так что тут уж не до поиска комет. Конечно, в процессе наблюдений по своим программам специалисты часто обнаруживают кометы на фотопластинках, когда видят, что какой-либо звездообразный или туманный объект заметно смещается от ночи к ночи. Именно так была обнаружена в 1975 г. комета Веста, о которой я уже писал выше. Так же была открыта комета Когоутека в 1973 г. Обе они были открыты с помощью мощных оптических систем случайно, когда велись наблюдения совсем по другим программам.

Но поскольку телескопы были мощными, то обе кометы были открыты, когда находились еще на очень больших расстояниях от Солнца и были весьма слабыми.

Вы, наверное, помните почти поэтическое описание кометы Веста, данное Коитиро Томитой. Оно приводилось раньше. Если вы обратили внимание, он пишет о том, что в газетах почти ничего не сообщалось об этой комете. Почему же падкая на сенсации пресса не разрекламировала ожидавшееся эффектное событие? Виной тому была комета Когоутека 1973 XII. Открыта она была в марте 1973 г., когда находилась еще далеко, приблизительно на расстоянии 6 а. е. от Солнца. Ожидалось, что она будет чуть ли не самой яркой кометой XX столетия. «Кометой века» пресса назвала ее задолго до того, как она приблизилась к Солнцу и стала видна в слабые инструменты. Поскольку ее обнаружили далеко, а исключительно яркой она должна была стать (по прогнозам) только после октября 1973 г., то было время, чтобы успеть подготовиться к ее встрече и организовать наблюдения. Эту комету наблюдали даже по специальной программе американские астронавты на космической станции «Скайлэб» («Небесная лаборатория»). Пожалуй, ни одна комета из наблюдавшихся человечеством не изучалась так тщательно (и из космоса, и с Земли) и всесторонне, как комета Когоутека. Именно благодаря ей стало известно, что кометы окружены гигантским гало, состоящим из водорода, диаметр которого в десятки раз больше диаметра видимой с Земли ее головы. Это открытие было сделано путем наблюдений из космоса.

Таким образом, эта комета действительно стала «кометой века», но с точки зрения ученых, получивших при ее изучении уникальную информацию о строении кометных атмосфер. Что же касается рекламной шумихи, поднятой прессой, то здесь произошла «осечка». Комета обманула ожидания публики, так и не став исключительной.

По этой причине пресса была осторожна с кометой Веста. Но здесь произошел, как я уже писал, обратный просчет.

Но, конечно, иногда предпринимаются специальные поиски какой-либо кометы большими инструментами, когда «цель оправдывает средства», как в случае ныне ожидаемого прихода кометы Галлея, например.

Любители же, если они достаточно темпераментные и страстные «охотники», ищут кометы на небе специально из ночи в ночь. Здесь есть свои маленькие хитрости.

Мы уже знаем, что кометы тем ярче светятся, чем ближе они подходят к Солнцу. Поэтому, очевидно, лучше всего их искать в тех местах неба, которые ближе к Солнцу. «Садится» Солнце вечером за горизонт на западе. Восходит оно на востоке. Поэтому опытный «охотник» за кометами никогда не выйдет со своим «ружьем» — подозрной трубой или биноклем — не на ту «тропу». «Отстрел» комет ведут либо на западе, после захода Солнца за горизонт, либо в утренние предрассветные часы — на востоке (часа за три до восхода Солнца).

Другая маленькая хитрость заключается в том, что для «охоты» за кометами выбирают обычно какие-либо возвышенности (холмы, горы), вышки, крыши зданий. Однако «охотники», живущие в больших городах, вынуждены выезжать далеко за город, где им не мешает электрический свет. Мешает искать кометы также и Луна. Поэтому за неделю до полнолуния поиски комет прекращаются. Возобновляются они неделей позже полнолуния.

Сколько часов должен просидеть в «засаде» «охотник» за кометами до первого удачного «выстрела»? Это уж как кому повезет. Но есть, конечно, и статистика — в наш просвещенный век без нее не обойтись. Считается, что опытному «охотнику» нужно 200—250 часов тщательных наблюдений, чтобы, наконец, повезло. Но это статистика, а есть еще и теория вероятности, и это уже, в каком-то смысле, лотерея. Японец Секи начал заниматься поиском комет в августе 1950 г., а первую свою комету открыл в октябре 1961 г., затратив на это 993 часа чистого времени. Англичанин Олкок открыл уже четыре кометы. Однако с момента начала поисков и до открытия им первой кометы прошло 6 лет; на поиски он затратил 683 часа чистого времени. В то же время австралиец Бредфилд, о котором я уже писал, затратил всего 260 часов на то, чтобы открыть свою первую комету, занимаясь поисками чуть больше года. Японец Икейя потратил на охоту всего 135 часов до первой удачи. Мировой же рекорд принадлежит американцу Уитеккеру, поймавшему комету на третьи сутки после начала поисков. Он же является мировым рекордсменом и еще в том, что свое первое открытие он совершил, когда ему было всего 16 лет. Вторым за ним идет Икейя, открывший свою первую комету в 19 лет.

Как мы узнаем в следующей главе, подавляющее большинство комет движется по эллипсам различной вытянутости, в одном из фокусов которых находится Солнце. Это — периодические кометы. На рис. 16 показаны орбиты некоторых таких комет. Разумеется, орбиты не лежат в одной плоскости — здесь они спроецированы на плоскость рисунка. Кометы с небольшими периодами, что-нибудь до пятнадцати лет, называют короткопериодическими (иногда это название распространяют и на кометы с более длинными периодами). Я уже писал, что самой короткопериодической из «функционирующих» на сегодняшний день является комета Энке. Была и еще более короткопериодическая, с рекордно малым периодом в 2,3 года, комета Вилсона — Харрингтона (1949 IV). Однако с 1949 г. она уже не наблюдалась.

На движение комет оказывают влияние планеты благодаря своему гравитационному притяжению. Поэтому движение комет рассчитать не просто — нужно учитывать возмущающее действие планет. Когда-то это было большой проблемой. С появлением быстродействующих компьютеров проблема упростилась, но требует изрядного количества машинного времени. Тем не менее, на сегодняшний день расчеты траекторий комет с учетом возмущающего действия планет делаются, причем особенно в тех случаях, когда это для чего-либо «нужно», как, например, в случае кометы Галлея. Располагая расчетными данными для траектории кометы, можно вычислить ее путь на небесной сфере среди созвездий. Туда можно навести телескоп и «подстрелить» комету. Однако в отличие от ситуации, когда комету открывают в результате наблюдений, такое открытие называют переоткрытием, т. е. открытием в результате расчетов.

Информация о переоткрытых кометах также поступает в Центральное бюро астрономических телеграмм, но увы... им не присваиваются имена нашедших их людей, хотя и временные и постоянные обозначения для них существуют так же, как для комет, открытых в результате наблюдений.

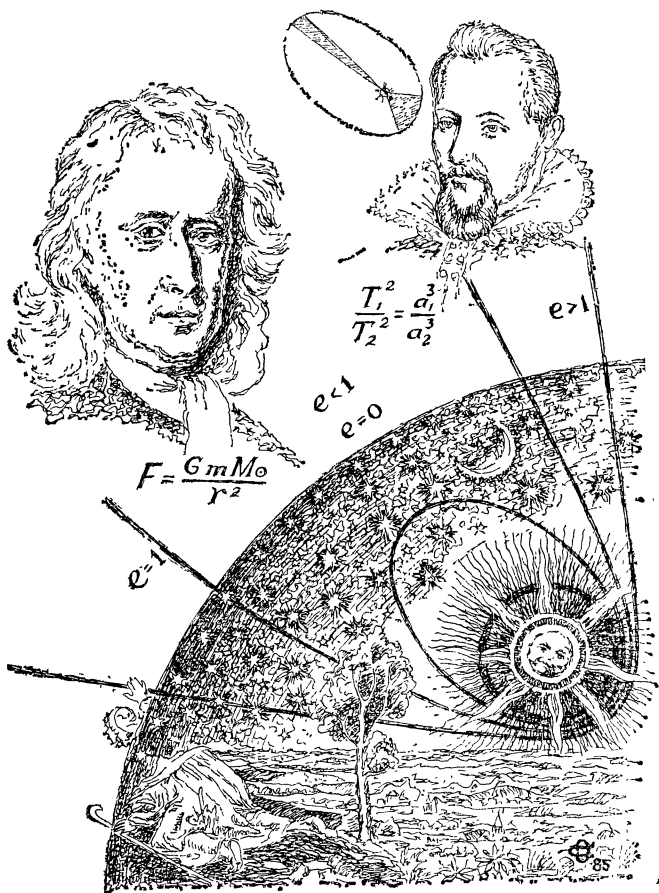
Как вы поняли, удачливый охотник «рискует» войти в историю — ведь его именем называют открытую им комету. Однако были времена, когда успешная охота давала и заметный профит. Начало «наградной деятельности» положил в 1835 г. датский король Фредерик VI, по-королевски наградивший астронома, который открыл в телескоп новую комету. Позднее, в 1880 г., американский промышленник Ванер учредил премию в 200 долларов (в те времена — весьма солидная сумма) за каждое открытие кометы в США и Канаде. Я уже писал о знаменитом американском «ловце комет» Барнарде, который жил именно в это время. После учреждения премии Ванера он, как по заказу, начиная с 1881 г. в течение 10 лет ежегодно открывал от одной до нескольких комет. Злые языки утверждали, что его дом «сложен из комет». Существовали и другие виды денежных премий, но до сегодняшнего дня, насколько мне известно, ни одна из них не «дожила». Однако как всякий спорт, охота (пусть даже за кометами) имеет, как мы видели, своих чемпионов и рекордсменов — значит, дело не может обойтись без медалей, и, конечно, они существуют.

В принципе, медали, так или иначе связанные с кометами, известны давно. Этим особенно увлекались в XVII веке. Тогда чеканились четырехугольные золотые медали (их и сейчас можно найти в редких частных коллекциях).

Например, в честь кометы 1618 г. была изготовлена медаль, на которой изображено Солнце, окруженное лучами, внизу — приморский город и надпись: «Гуляйте благоразумно — как при Солнце». На другой медали, выбитой в честь той же кометы, — носилки с гробом; к носилкам приклонена книга, на гробу меч и шлем, над шлемом — комета. Надпись по кругу: «Угроза кометы». На обороте: «Бог посылает комету, чтобы исправить нашу жизнь».

Однако это, конечно, не спортивные медали. По-видимому, первые «спортивные медали» за открытие комет начали присуждать в Венском университете в 1880 г., и первые эти медали были из чистого золота. Позднее, в 1890 г., Тихоокеанское астрономическое общество, объединявшее многие обсерватории на Западном побережье США, финансировавшееся богатыми бизнесменами, учредило бронзовую медаль Донохью за открытие комет. Первоначально к медали полагались и доллары, но уже в 50-х годах нашего столетия денежные вознаграждения прекратились. Теперь этой медалью ежегодно награждается лишь один астроном-любитель не за открытие какой-либо конкретной кометы, а «за существенный вклад в кометную астрономию».

В СССР также существует медаль «За обнаружение новых астрономических объектов». Ее присуждает Астрономический совет АН СССР.



ОРБИТЫ КОМЕТ

Как трудно дается нам эта парабола!..
А. Вознесенский.
«Параболическая баллада»

По мере возможности я попытался в гл. 1 рассказать об эволюции идей в астрономии, приведших в конечном счете к системе мира Коперника. Мы видели, как ценой невероятных усилий и мужества Кеплер чисто эмпирическим путем вывел свои законы, анализируя движение планет. Там же упоминалось о том, что позднее Ньютон доказал справедливость этих законов теоретически. Исторический «аромат» эпохи и драматические коллизии, которые сопутствовали созданию Ньютоном его знаменитых «Принципов», я попытался, насколько мог, воссоздать в гл. 6, посвященной комете Галлея. Это сделано именно там, так как следствия закона всемирного тяготения, открытого Ньютоном, косвенным образом были связаны с вопросом, занимавшим и Галлея, и самого Ньютона, — движением комет по орбитам.

После того как Ньютон установил универсальность закона всемирного тяготения, стало ясно (правда, не всем и не сразу), что закон, которому подчиняется движение комет, тот же, что и закон, управляющий планетными движениями. Это — закон всемирного тяготения. Поэтому нам неизбежно придется попытаться понять, как могут двигаться тела под действием их взаимного тяготения. В общем случае такая задача крайне сложна, но, к счастью, нам ее решать не нужно. Это связано с тем, что нас интересует движение тела малой массы в гравитационном поле тела большой массы, когда влиянием первого на движение второго вполне можно пренебречь *). Действительно, мы гово-

*) На самом деле главное упрощение не в том, что масса одного из тел мала — это облегчает задачу, но не принципиально. Главное же заключается в том, что мы намерены рассмотреть так называемую задачу двух тел — определить их движение в создаваемом ими же гравитационном поле. Если тел не два, а три, например, то усложнение настолько радикально, что решение задачи в общем случае вообще не может быть выражено в виде известных элементарных или специальных функций. В общем же случае такая задача называется задачей n тел и не имеет общего решения.

рили о планетах и кометах. Напомню, что масса даже самой большой планеты Солнечной системы — Юпитера — составляет приблизительно лишь $1/318$ массы Солнца, в гравитационном поле которого движется эта планета. Ну, а масса комет вообще на 10—20 порядков меньше массы Солнца, так что здесь просто бессмысленно говорить о их влиянии на движение последнего. Это сильно упрощает дело, и мы можем говорить о движении материальной точки в заданном гравитационном поле большого тела, в данном случае — Солнца.

С происхождением комет, которым мы намерены заняться в следующей главе, вообще, как будет видно из дальнейшего, не все ясно, но к этому вопросу нам и близко не подойти, если предварительно мы не рассмотрим их

§ 1. Движение по орбитам

Ставится вопрос о движении материальной точки в гравитационном поле большой массы — Солнца. Что это значит? Во-первых, мы хотим знать, по каким траекториям может двигаться точка в поле этой массы, во-вторых, по какому закону при этом должна меняться ее скорость в зависимости от времени или в зависимости от ее положения на орбите. Я не буду приводить множества аргументов, доказывающих, как важно иметь ответы на эти вопросы. Достаточно одного простого соображения: если, например, окажется, что орбиты комет суть замкнутые траектории, то, значит, они, скорее всего, «родились» в Солнечной системе. Если же их траектории — незамкнутые кривые, то это, скорее всего, не так. На самом деле все не так просто, как мы увидим далее, но не имея ответа даже на такой несложный вопрос, просто невозможно двигаться дальше.

Согласно закону всемирного тяготения материальная точка массы m притягивается к Солнцу, масса которого M_{\odot} , с силой

$$F = \frac{GmM_{\odot}}{r^2}, \quad (3.1)$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ — гравитационная постоянная, r — расстояние между телами. Потенциальная энергия тела m^*) в поле массы M_{\odot} выражается известной

*) Для простоты в дальнейшем буквой m обозначается не только масса материальной точки, но и она сама. Например, мы говорим «тело

формулой

$$E_n = - \frac{GmM_\odot}{r}. \quad (3.2)$$

Такое гравитационное поле называют центральным, поскольку в нем и сила, действующая на тело m , и его потенциальная энергия зависят только от расстояния этого тела до некоторой неподвижной точки (центра). В данном случае центр — это точка, в которой расположено Солнце. В этой же точке выберем начало координат. Тогда r будет расстоянием материальной точки от начала координат.

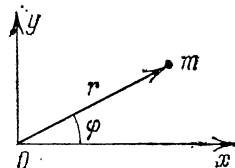


Рис. 17. Прямоугольные и полярные координаты

Существует теорема о том, что при движении в центральном поле траектория тела всегда лежит в одной плоскости, которой принадлежит и центр поля. Таким образом, для наших целей достаточно ограничиться двумерной системой координат, показанной на рис. 17. Начало координат O совпадает, как говорилось, с центром поля, и положение точки m на плоскости характеризуется двумя ее координатами: либо прямоугольными x, y , либо полярными r, φ .

Вы, конечно, хорошо себе представляете, что такое закон сохранения энергии: если энергия в систему не поступает и из нее не уходит, то она в этой системе сохраняется. Очевидно, в нашей задаче двух тел закон сохранения энергии должен иметь место, так как ничего, кроме этих двух тел — Солнца и кометы, — в системе нет (мы не включаем пока в рассмотрение влияние планет и других факторов). Этот закон мы можем записать сразу из простых физических соображений. Действительно, пробное тело m обладает кинетической энергией $E_k = mv^2/2$, где v — его скорость, и потенциальной энергией E_n в гравитационном поле массы M_\odot . Поэтому можно написать следующее равенство:

$$E_k + E_n = \frac{mv^2}{2} - \frac{GmM_\odot}{r} = E, \quad (3.3)$$

где E — полная энергия тела m . Она сохраняется. Короткая m , подразумевая «материальная точка массы m ». Эта же буква обозначает дальше и положение этой точки на плоскости — мы говорим «точка m », подразумевая слова «точка на плоскости, в которой находится материальная точка массы m ». Кроме того, вместо термина «материальная точка» мы иногда употребляем термин «пробное тело». Пробным телом называют такое тело, которое не оказывает влияния на окружающие его тела (как кометы на Солнце).

запись этого утверждения есть

$$E = \text{const.}$$

Закон сохранения энергий (3.3) записан, как видим, в полярных координатах. Этот закон, однако, является лишь одним из целого класса законов такого рода, которые носят общее название «законов сохранения». Читателю, знакомому со школьным курсом физики, известен еще один представитель этого класса — закон сохранения импульса, или количества движения. Если бы точка m двигалась по прямой линии, соединяющей m и M_\odot , то действовал бы как раз закон сохранения импульса. Однако в общем случае, когда пробное тело m в гравитационном поле тела M_\odot может двигаться по какой-либо криволинейной траектории, сохраняется другая величина, которую называют моментом импульса (или моментом количества движения) точки m . Закон сохранения момента импульса также относится к общему классу законов сохранения. В случае центрального поля его математическая запись (в полярных координатах) выглядит так:

$$mr^2 \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = mrv_\varphi \equiv M = \text{const}, \quad (3.4)$$

где v_φ — проекция вектора скорости \mathbf{v} точки m на направление касательной к окружности радиуса r ; проекцию \mathbf{v} на направление радиус-вектора \mathbf{r} обозначают через v_r . Величина M называется моментом импульса частицы массы m . Что выражает формула (3.4) с физической точки зрения? Давайте для простоты рассмотрим случай, когда точка m движется вокруг M_\odot по окружности. В этом случае $v_r = 0$ и $v = v_\varphi$. Таким образом, v_φ в нашем примере есть просто круговая скорость точки m , т. е. ее линейная скорость вращения. Мы видим из формулы (3.4), что из-за постоянства величины M чем меньше r , тем больше v , и наоборот.

Вы можете легко проверить действие этого закона вполне элементарными средствами. Встаньте на кресло или табурет, сидения которых могут свободно вращаться относительно своих стоящих на полу оснований (табурет пианиста, например), разведите в стороны руки с гантелями потяжелее, и пусть ваш ассистент раскрутит ваш табурет. Если быстро прижать руки к телу, то скорость вращения возрастет — вы это сразу почувствуете *). Действие этого

*) Это — не совсем «чистый» пример, так как на самом деле он демонстрирует действие закона сохранения момента импульса для доволь-

закона можно увидеть и в балете, когда танцовщик, выполняя фуэте, прижимает разведенные сначала руки к телу и за счет этого быстро раскручивается.

Вернемся, однако, к движению комет. Оказывается, закон сохранения момента импульса, выражаемый формулой (3.4), имеет наглядный геометрический смысл. Действительно, рассмотрим очень короткий отрезок траектории, по которой движется точка m (рис. 18). Мы видим, что если угол $\Delta\varphi$ бесконечно мал, то площадь сектора, образованного двумя бесконечно близкими радиус-векторами и элементом дуги траектории, равна $\Delta S = \frac{1}{2} r \cdot r \Delta\varphi$. Тогда момент импульса точки m , выражаемый формулой (3.4), можно записать так:

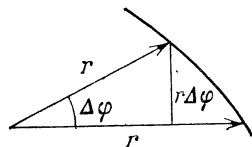


Рис. 18. К закону сохранения момента импульса

$$M = 2m \frac{\Delta S}{\Delta t}. \quad (3.5)$$

Величину $\Delta S/\Delta t$ называют секториальной скоростью. Она равна

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{1}{2} r^2 \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

Если бы движение происходило по окружности, то, очевидно, величина $\Delta\varphi/\Delta t$ была бы просто угловой скоростью вращения точки m . Таким образом, закон сохранения импульса выражает собой постоянство секториальной скорости: за равные промежутки времени, следовательно, радиус-вектор точки m описывает равные площади. Это второй закон Кеплера (см. рис. 3).

Теперь имеется все необходимое для решения поставленной задачи (определения движения точки в гравитационном поле большой массы M_\odot). Нужно лишь сделать некоторые алгебраические преобразования и выполнить одно простое интегрирование. Не буду утомлять читателя недлинными, но скучными выкладками, которые можно найти в любом учебнике механики, и приведу сразу результат. Математическое уравнение траектории, по которой должна двигаться наша материальная точка m , имеет, оказывается, следующий

но сложной системы «вы+табурет», а не для материальной точки, вращающейся около центра притяжения. Кроме того, здесь действует трение, которое быстро замедлит вращение табурета. Однако качественно здесь все верно: вращающиеся гантели в ваших вытянутых сначала руках — это некоторый аналог вращающихся материальных точек, расстояние которых до оси вращения вы резко уменьшаете, прижав руки к телу.

вид (в полярных координатах r и φ):

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \varphi}, \quad (3.6)$$

где

$$p = \frac{M^2}{Gm^2 M_{\odot}}, \quad (3.7)$$

$$e = \sqrt{1 + \frac{2EM^2}{G^2 m^3 M_{\odot}^2}}. \quad (3.8)$$

Величина p называется параметром орбиты, e — ее эксцентриситетом. Геометрический смысл этих величин будет ясен из дальнейшего. Простенькая формула (3.6) есть «сухой остаток», из которого следуют все законы Кеплера, потратившего на их открытие всю свою жизнь. Именно над поиском этого простенького, казалось бы, закона бился Ньютон, «подогретый» вопросами Галлея. Впрочем, речь об этом дальше (см. гл. 6). А сейчас попытаемся выяснить, какие же линии описывает формула (3.6) или, другими словами, по каким траекториям могут двигаться тела в поле тяготения Солнца.

Оказывается, линии, которые описывает формула (3.6), получаются при сечении кругового конуса плоскостью — это окружность, эллипс, парабола и гипербола. Все зависит от значения эксцентриситета e . Из формулы (3.8) видно, что всегда (при действительных значениях корня) $e \geq 0$. Остальное определяется значением полной энергии тела m , т. е. величиной E . Мы видим, что если

$$E = 0, \quad \text{то } e = 1; \quad (3.9)$$

$$E < 0, \quad \text{то } e < 1; \quad (3.10)$$

$$E > 0, \quad \text{то } e > 1; \quad (3.11)$$

$$E = -\frac{G^2 m^3 M_{\odot}^2}{2M^2}, \quad \text{то } e = 0. \quad (3.12)$$

Забегая вперед, отметим, что (3.9) соответствует параболе, (3.10) — эллипсу, (3.11) — гиперболе и (3.12) — окружности.

Коротко рассмотрим геометрические свойства каждой из этих кривых.

а) **Парабола.** Параболой называется геометрическое место точек плоскости, равноудаленных от некоторой фиксированной точки (фокуса параболы) и некоторой фиксированной прямой (директрисы параболы). Эта кривая изображена на рис. 19. Точка F называется фокусом параболы, p — ее параметр. Начало координат (прямоугольных и полярных) помещено в фокус, на расстоянии $x = -p$ от которого проведена прямая d , параллельная Fy , — директриса.

б) **Эллипс.** Эллипсом называется геометрическое место точек плоскости, сумма расстояний которых от двух данных точек F_1 и F_2 (рис. 20) есть постоянное число. Обозначим его через $2a$. Точки F_1 и F_2 называют

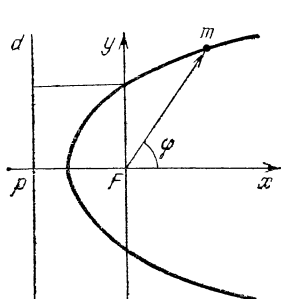


Рис. 19. Парабола. Прямоугольные и полярные координаты. F — фокус, d — директриса

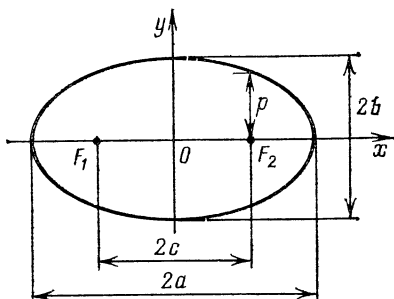


Рис. 20. Эллипс. F_1 и F_2 — фокусы, O — центр эллипса

фокусами эллипса. Расстояние между ними обычно обозначают через $2c$ и называют фокусным расстоянием. Величина a называется большой полуосью эллипса, $b = \sqrt{a^2 - c^2}$ — его малая полуось, точка O — центр эллипса. Параметр эллипса p связан с a и b равенством

$$p = b^2/a. \quad (3.13)$$

Эксцентриситет e равен

$$e = c/a. \quad (3.14)$$

Очевидно, он всегда удовлетворяет условию $e < 1$. Ясно также, что эксцентриситет эллипса равен нулю тогда, когда $c = 0$, т. е. когда фокусы эллипса совпадают: $F_1 = F_2$. В этом случае мы, очевидно, получаем окружность. Из (3.13) и (3.14) следуют другие важные формулы:

$$a = \frac{p}{1 - e^2}, \quad b = \frac{p}{\sqrt{1 - e^2}}. \quad (3.15)$$

Геометрический смысл величин a , b , c и p виден из рис. 20. Из него видно также, что наименьшее (r_{\min}) и наибольшее (r_{\max}) расстояния от фокуса эллипса равны соответственно

$$r_{\min} = a(1 - e), \quad r_{\max} = a(1 + e). \quad (3.16)$$

Их называют перигелием и апоцентром, а при движении тела вокруг Солнца — перигелием и афелием соответственно и обозначают через q и Q .

в) **Гипербола.** Гиперболой называется геометрическое место точек плоскости, модуль разности расстояний каждой из которых до двух фиксированных точек F_1 и F_2 (рис. 21), называемых ее фокусами, есть положительное постоянное число (обозначаемое обычно через $2a$). Величина a называется большой полуосью гиперболы. Так же, как в случае эллипса, точка O — центр гиперболы, а расстояние между точками F_1 и F_2 называется фокусным расстоянием и обозначается через $2c$. Эксцентриситет гиперболы есть также величина $e = c/a$, однако, как видно из рис. 21, в отличие от эллипса у гиперболы $e > 1$.

Гипербола имеет еще одно важное свойство. Каждая из ее ветвей на бесконечности касается прямой, которая называется асимптотой. Из рис. 21 видно, что асимптоты у гиперболы две, причем они пересекаются в центре, т. е. в точке O .

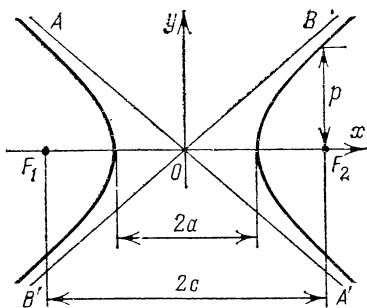


Рис. 21. Гипербола. F_1 и F_2 — фокусы, O — центр, AA' и BB' — асимптоты гиперболы

Эксцентриситет e и параметр p гиперболы равны соответственно

$$e = \sqrt{1 + b^2/a^2}, \quad p = b^2/a. \quad (3.17)$$

Отсюда получаем

$$a = \frac{p}{e^2 - 1}. \quad (3.18)$$

Геометрический смысл параметра p виден из рис. 21. Из него же видно, что минимальное расстояние до фокуса гиперболы равно

$$r_{\min} = a(e - 1). \quad (3.19)$$

Если в фокусе гиперболы расположено Солнце, то $r_{\min} = q$ называется перигелием.

На рис. 22 показаны гипербола, парабола, эллипс и окружность.

Все они построены так, что имеют общую фокальную ось и одинаковый параметр p . Поэтому ясно проступают их отличия друг от друга: они отличаются значением эксцентриситета e , уменьшающимся от гиперболического случая, когда $e > 1$, к параболическому ($e = 1$), далее к эллиптическому ($e < 1$) и, наконец, к окружности ($e = 0$).

Из рис. 22 видно, что вблизи перигелия (или перигелия, если речь идет о движении в поле тяготения Солнца) гипербола, парабола и эллипс практически не отличаются

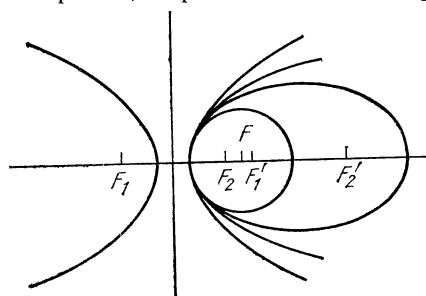


Рис. 22. Гипербола, парабола, эллипс, окружность. F_1 и F_2 — фокусы гиперболы; F_1' и F_2' — фокусы эллипса; F — центр окружности и фокус параболы

друг от друга. Поэтому, когда кометы находятся вблизи перигелия, их орбиты с хорошей точностью можно считать параболическими. Это удобно, так как для описания движения по параболе нужно определять из наблюдений меньшее количество параметров (например, как мы видели, у параболы $e = 1$, и, следовательно, эксцентриситет уже не нужно

определять). Идея о том, что орбиты комет вблизи перигелия можно считать параболическими, определяя их из наблюдений, принадлежит Ньютону, который именно таким

способом впервые в истории астрономии определил орбиту кометы 1680 г. (подробнее см. гл. 6, § 1).

Мы уже отмечали, что все эти кривые получаются при сечении прямого кругового конуса плоскостью, однако доказательство этого обстоятельства выходит за рамки данной книжки. Как видно из рис. 23, окружность получается при сечении конуса плоскостью, перпендикулярной его оси; сечение плоскостью под некоторым углом к оси конуса дает эллипс; сечение плоскостью, параллельной образующей конуса, дает параболу; сечение плоскостью, параллельной оси конуса, дает гиперболу.

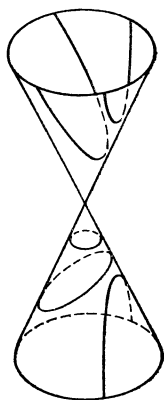


Рис. 23. Конические сечения

Одно короткое замечание. То обстоятельство, что все эти кривые являются коническими сечениями, было известно еще в Древней Греции. Древнегреческие геометры прекрасно знали и все свойства этих кривых, которые мы только что установили. Правда, в своих построениях они действовали другим способом, не прибегая к методу координатных систем. Собственно, и сами слова «парабола», «гипербола», «эллипс» — греческого происхождения. Парабола в переводе с греческого означает расположение чего-либо именно там, где нужно, т. е. что-то вроде русского «как раз». Гипербола и эллипс означают соответственно «избыток» и «недостаток». На «языке эксцентриситетов» эта терминология понятна: у параболы $e=1$ («как раз»), у гиперболы $e>1$ («избыток»), у эллипса $e<1$ («недостаток»). На самом деле древнегреческие геометры исходили из других соображений, давая этим кривым такие названия, но в конечном итоге дело сводится к величине e .

Из геометрии древних греков эти слова перекочевали и в риторику. Именно отсюда следует риторическое значение слова «гипербола», что означает преувеличение. Эллипсис — риторический прием, который означает пропуск какого-либо члена предложения. Например:

Стоял однажды на скале я.
Летит комета. Чья? Галлея.
Я оглядел простор небес
И со скалы тихонько слез.

Во второй строке мы имеем сразу два примера эллипсиса.

Вопрос: «Чья?» на самом деле подразумевает прочтение «Чья летит комета?» Аналогично следует расшифровать ответ: «Галлея», т. е. «Летит комета Галлея».

§ 2. Кометы в гравитационном поле Солнца

— Слушаю и повинуюсь, о Солнце Вселенной,— сказала Шехерезада.

«Тысяча и одна ночь»

Теперь мы во всеоружии и можем заняться физикой, точнее, механикой движения комет в гравитационном поле Солнца. Прежде всего из формулы (3.6) следует, что материальная точка массы m должна двигаться по какому-либо из конических сечений, в одном из фокусов которого находится Солнце. Мы это видели выше. Но это есть не что иное, как первый закон Кеплера.

Далее, из формул (3.9) — (3.12) следует, что вид кривой, по которой должна двигаться комета, полностью определяется значением ее полной энергии E . В то же время энергия сохраняется, т. е. $E = \text{const}$. Значит, в любой момент времени она равна своему начальному значению. Другими словами, физические условия, в которых образовались кометы, определяют значение их полной энергии и, следовательно, орбиты, по которым они движутся. Об этом мы поговорим несколько позднее. Сейчас же рассмотрим свойства движения кометы в зависимости от значения ее энергии E . Как видно из формул (3.9) — (3.12), случаи параболы и окружности являются специальными в том смысле, что им соответствуют конкретные выделенные значения эксцентриситета $e=1$ и $e=0$, которые могут реализоваться в природе лишь при специальных значениях энергии E . Условия, при которых возникли кометы, были, по-видимому, не столь специальными, как показывает анализ наблюдений.

Можно сказать и иначе. Значения эксцентриситета $e=1$ и $e=0$ являются двумя конкретными числами из всего бесконечного множества его значений, так как область изменения значений e , как мы видели выше, есть $0 \leq e < \infty$. Таким образом, вероятность того, что в природе могут реализоваться одно или другое число из всего бесконечного множества возможных значений, практически равна нулю. Другими словами, в природе естественным путем не должны возникать движения по параболам или окружностям, хотя эксцентриситеты реальных движений могут быть как угодно близки к значениям $e=0$ и $e=1$.

По этой причине в дальнейшем мы рассмотрим движение по эллипсу и гиперболе. Движение по окружности есть частный случай движения по эллипсу, а движение по пара-

боле примыкает, в каком-то смысле, к гиперболическому (в обоих последних случаях траектории незамкнутые).

Итак, при $E < 0$ комета должна двигаться по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. Из формулы (3.3) видно, что при $E < 0$ абсолютная величина гравитационной (потенциальной) энергии притяжения кометы массы m к Солнцу больше, чем ее кинетическая энергия. Поэтому физически ясно, что комета не может улететь от Солнца в глубины Вселенной (на языке математики — на бесконечно далекое расстояние). Действительно, если в формуле (3.3) расстояние от кометы до Солнца бесконечно велико ($r \rightarrow \infty$), то при этом $E \rightarrow mv^2/2 > 0$, что противоречит нашему условию $E < 0$.

Каковы свойства движения тела по эллипсу?

Подставим в формулы (3.15) значения параметра p и эксцентриситета e эллипса, выраженные через момент импульса кометы массы m и ее энергию E , согласно формулам (3.7) и (3.8). Убедимся после простых преобразований, что

$$a = \frac{GmM_{\odot}}{2|E|}, \quad b = \frac{M}{\sqrt{2m|E|}}. \quad (3.20)$$

Выражение для энергии при этом примет вид

$$E = -\frac{GmM_{\odot}}{2a}. \quad (3.21)$$

Таким образом, первый важный вывод заключается в том, что большая полуось a орбиты кометы зависит только от ее энергии. Поэтому если из наблюдений известно распределение комет по величинам больших полуосей их орбит, то тем самым известно их распределение по энергиям (т. е. известно, сколько комет обладает энергией $E = E_1$, сколько обладает энергией $E = E_2$ и т. д.).

Попробуем найти период обращения кометы, движущейся по эллиптической траектории вокруг Солнца. Для этого перепишем формулу (3.5) в таком виде:

$$\Delta t = \frac{2m}{M} \Delta S.$$

Радиус-вектор кометы опишет полный эллипс как раз за период T , так что нужно положить $\Delta t = T$ и $\Delta S = S$, где $S = \pi ab$ — площадь эллипса. Отсюда получаем

$$T = \frac{2m}{M} \pi ab.$$

Подставив значения a и b из формул (3.20) и упростив выражение, мы увидим, что период обращения кометы по

эллипсу равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_{\odot}}}. \quad (3.22)$$

Периоды обращения комет вокруг Солнца (T) исчисляются годами, а большие полуоси (a) — астрономическими единицами. Оказывается, величины T и a при этом связаны простой формулой, следующей из (3.22), если в нее подставить числовые значения G и M_{\odot} ($M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг),

$$T = \sqrt[3]{a^3}. \quad (3.23)$$

Например, комета Галлея, обращающаяся с периодом T , близким к 76 годам, имеет, следовательно, согласно формуле (3.23), большую полуось орбиты, равную

$$a = \sqrt[3]{T^2} = \sqrt[3]{76^2} = 18 \text{ а. е.}$$

Если есть два каких-либо тела, обращающихся вокруг Солнца по эллипсам с большими полуосями a_1 и a_2 , то из формулы (3.22) находим отношение квадратов их периодов:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (3.24)$$

Мы вывели, между прочим, третий закон Кеплера, согласно которому отношение квадратов периодов планет (или комет), обращающихся вокруг Солнца по эллипсам, равно отношению кубов их больших полуосей. Заметим, что, в силу формул (3.21) и (3.22), период обращения зависит только от энергии.

С какой скоростью движется комета по эллипсу? Для ответа на этот вопрос снова воспользуемся законом сохранения энергии (3.3), подставив в его правую часть выражение для E из формулы (3.21). Результат таков:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GmM_{\odot}}{r} = -\frac{GmM_{\odot}}{2a}.$$

Отсюда находим v^2 :

$$v^2 = GM_{\odot} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right). \quad (3.25)$$

Видно, что скорость движения по эллипсу ни в какой из его точек не обращается в нуль. Где же она минимальна и где максимальна?

Довольно очевидно, что максимальной она должна быть в той точке орбиты, где притяжение Солнца также максимально, т. е. в перигелии, и, наоборот, минимальной она

должна быть в афелии. Чтобы убедиться в этом, нужно подставить в формулу (3.25) вместо r его значения в перигелии и афелии соответственно, т. е. $r_{\min} = q$ и $r_{\max} = Q$ из формул (3.16). В результате этих подстановок получим следующие ответы:

$$v_{\max}^2 = v_q^2 = \frac{GM_{\odot}}{a} \cdot \frac{1+e}{1-e}, \quad (3.26)$$

$$v_{\min}^2 = v_Q^2 = \frac{GM_{\odot}}{a} \cdot \frac{1-e}{1+e}. \quad (3.27)$$

Эти формулы нам еще понадобятся, когда мы будем рассматривать движение кометы Галлея.

Заметьте, что при движении по окружности $e=0$ и в этом случае $v_q^2 = v_Q^2 = GM_{\odot}/a$, где a — радиус окружности, т. е. v есть просто линейная скорость вращения тела m вокруг Солнца. Это же следует и из формулы (3.25), если в ней положить $r=a$, т. е. если тело движется по окружности радиуса a .

Рассмотрим случай, когда $E > 0$. Из формулы (3.11) следует, что движение при этом происходит по гиперболе. Гипербола — незамкнутая кривая, концы которой «теряются на бесконечности» (см. рис. 21). Это означает, что движущаяся по гиперболе комета (или иное тело) только один раз проходит через перигелий, т. е. вблизи Солнца, приходя из бесконечности и затем уходя в нее. Согласно формуле (3.3) условие $E > 0$ означает, что кинетическая энергия тела в любой точке его траектории больше потенциальной энергии связи с Солнцем, так что последнее не в состоянии удерживать это тело возле себя.

Проделав совершенно аналогичные предыдущим вычисления, вы легко установите, что формулы, описывающие движение тела по гиперболе, в точности такие же, как при движении по эллипсу, если в последних заменить a на $-a$.

Разумеется, в этом случае траектория кометы не имеет афелия, поэтому формула (3.27) не имеет «гиперболического аналога». Заметим также, что даже на бесконечности тело при движении по гиперболе имеет ненулевую скорость, так как при $r \rightarrow \infty$ (см. формулу (3.25) с учетом замены a на $-a$)

$$v_{\infty}^2 = GM_{\odot}/a. \quad (3.28)$$

Короткое замечание о движении по параболе. Поскольку в этом случае $E=0$, то из формулы (3.3) следует, что скорость движения по параболе определяется из соотношения

$$v^2 = 2GM_{\odot}/r. \quad (3.29)$$

В этом случае на бесконечности тело имеет нулевую скорость. Мы уже видели, что на круговой орбите радиуса r тело имеет линейную скорость

$$v = \sqrt{GM_{\odot}/r}.$$

Таким образом, если телу, вращающемуся по кругу вокруг Солнца, сообщить скорость в $\sqrt{2}$ раз большую, чем оно имеет, то, согласно формуле (3.29), это тело перейдет на параболическую траекторию и начнет удаляться в бесконечность, где его скорость обратится в нуль. Следовательно, минимальную скорость, которую нужно придать телу, чтобы оно улетело в бесконечность, можно вычислить по формуле (3.29). Поэтому ее называют параболической, или скоростью освобождения, или скоростью отрыва. Мы видим также, что чем больше радиус круговой орбиты, тем меньше скорость отрыва.

Теперь мы знаем траектории, по которым могут двигаться кометы. Они описываются формулами (3.6). Знаем мы, и по каким законам изменяется скорость при движении по эллипсу, гиперболе, параболе в зависимости от расстояния r между кометой и Солнцем. Но это лишь часть той информации, которую на самом деле нужно иметь для полного описания движения кометы. Например, я говорил о том, что орбита тела в центральном гравитационном поле есть плоская кривая, и мы убедились, что это действительно так. Но мы ничего не говорили об ориентации плоскости этой орбиты в пространстве относительно внешнего наблюдателя, ничего не говорили о нахождении положения кометы на орбите в разные моменты времени и т. д.

Полное описание движения пробного тела в заданном силовом поле (в данном случае — движения кометы в гравитационном поле Солнца) достигается заданием шести величин. С физической точки зрения это просто означает, что нужно задать начальные условия движения, т. е. начальную скорость тела и его начальное положение. Скорость, как мы знаем, есть вектор, поэтому задание начальной скорости означает задание трех его компонент. Положение точки в трехмерном пространстве также, очевидно, определяется заданием трех величин — ее начальных координат. Итого имеется шесть величин.

В астрономии, однако, эти шесть начальных условий задают не в виде начальных координат кометы и компонент ее начальной скорости. Здесь используются так называемые элементы орбиты, которых, естественно, тоже шесть. Так же как начальные координаты и скорости, элементы ор-

биты полностью определяют положение и скорость кометы в любой момент времени в любой точке ее орбиты. Об элементах орбиты кометы (см. гл. 6, § 4).

Итак, мы теперь знаем, как двигались бы кометы в гравитационном поле Солнца, если бы никакие другие силы на них не действовали. Однако реальные движения комет в Солнечной системе, увы, сложнее, поскольку на них могут оказывать возмущающее влияние большие планеты, если комета пролетает не достаточно далеко от них. Нам, как вы помните, нужно еще поговорить о происхождении комет, но для того чтобы обсудить это, необходимо, очевидно, знать, какими были их первичные орбиты, до того как они исказились под влиянием больших планет. Если нам удастся это выяснить, то, возможно, удастся понять, кто же они такие: аборигены или пришельцы, «чужие» или «свои» в Солнечной системе.



АБОРИГЕНЫ ИЛИ ПРИШЕЛЬЦЫ?

Загадок неразгаданных не счесть,
Хоть на догадки разум наш и падок,
И вот она, загадка из загадок...

Л. Камознс. Сонет

§ 1. Происхождение комет

Мы с вами пока рассмотрели идеальную ситуацию, когда движение кометы определяется только тяготением Солнца. Это классическая задача двух тел, и мы довольно-таки детально с ней ознакомились. Однако вокруг Солнца вращаются девять планет, и необходимо выяснить, какое влияние их тяготение может оказывать на орбиту кометы. Последняя из известных нам планет — Плутон — вращается по орбите, радиус которой близок к 40 а. е. Поэтому даже интуитивно ясно, что если комета летит к Солнцу «издалека», т. е. с расстояний, существенно больших, чем расстояние до последней планеты Солнечной системы, то там, далеко, влияние планет на ее орбиту мало — в таких условиях поведение кометы вполне можно рассчитывать по формулам задачи двух тел: одно тело — комета, второе — Солнце (точнее, Солнце плюс планеты).

Кометы, однако, наблюдаются астрономами, как мы видели, внутри Солнечной системы, на относительно небольших расстояниях от Солнца и Земли (порядка нескольких астрономических единиц). Здесь их орбиты могут искажаться под влиянием планет, и задача состоит в том, чтобы по этим искаженным орбитам восстановить движение комет до попадания в область влияния планет. Только в этом случае можно попытаться понять, откуда во внутренние области Солнечной системы прилетают кометы, т. е. попытаться подступить к вопросу об их происхождении.

Прежде всего попробуем ввести какую-либо количественную характеристику искажающего влияния планет. В небесной механике используют так называемую сферу действия. С физической точки зрения смысл этого понятия можно уяснить из простого соображения. Пусть комета, движущаяся в поле тяготения Солнца, оказывается на некотором минимальном расстоянии от какой-либо планеты.

Если при этом все еще можно считать, что определяющим фактором в ее движении является тяготение Солнца, т. е. орбита продолжает оставаться гелиоцентрической (приближенно можно считать, что центр поля продолжает находиться в центре Солнца), то говорят, что комета проходит вне сферы действия данной планеты. Наоборот, если при этом оказывается, что комета подошла к планете настолько близко, что определяющим становится тяготение планеты, т. е. орбита становится планетоцентрической (т. е. приближенно можно считать, что центр поля для кометы, подошедшей к планете настолько близко, переместился в точку нахождения планеты), то говорят, что комета вошла в сферу действия данной планеты. Мы с вами знаем, что ускорение тел в поле тяжести не зависит от их массы. Поэтому заранее ясно, что размеры сферы действия не должны зависеть от массы кометы или какого-либо другого пробного тела. Они могут зависеть только от масс Солнца и данной планеты. Математический анализ вопроса о размере сферы действия выходит за рамки этой книжки. Мы просто приведем результат. Радиус сферы действия определяется формулой

$$r_d = \left(\frac{M_{пл}}{M_{\odot}} \right)^{2/5} r_{пл}, \quad (4.1)$$

где $M_{пл}$ — масса планеты, $r_{пл}$ — средний радиус орбиты планеты при ее обращении вокруг Солнца. В табл. 1 приводятся радиусы сфер действия всех планет Солнечной системы. Вы их можете вычислить сами, подставляя в

Т а б л и ц а 1

Планета	Радиус сферы действия		
	млн. км	в долях средних расстояний планет от Солнца	а. е.
Меркурий	0,112	0,00193	0,000747
Венера	0,615	0,00569	0,00411
Земля	0,925	0,00619	0,00619
Марс	0,579	0,00254	0,00387
Юпитер	48,1	0,0619	0,322
Сатурн	54,6	0,0382	0,365
Уран	52,0	0,0181	0,348
Нептун	86,9	0,0193	0,581
Плутон	34,0	0,00574	0,227

формулу (4.1) массы планет и средние радиусы их орбит. Мы видим, что самой большой сферой действия в абсолютных единицах (в млн. км или астрономических единицах) обладает Нептун, хотя его масса составляет только $17,2 M_{\oplus}$, а масса Юпитера, например, $\sim 317,8 M_{\oplus}$. Странно? Нисколько. Ведь Нептун находится почти в 6 раз дальше от Солнца, чем Юпитер.

Планеты, однако, движутся по своим орбитам вокруг Солнца. Поэтому, когда комета пересекает орбиту данной планеты (или проходит поблизости от нее), то важна еще вероятность, с которой комета может оказаться в сфере действия планеты,— ведь в момент прохождения кометы планета может оказаться, например, на противоположном конце диаметра своей гелиоцентрической орбиты, и тогда ее влияние на комету будет ничтожным. Очевидно, вероятность попадания в сферу действия данной планеты зависит от отношения радиуса сферы действия к среднему радиусу орбиты. Поэтому именно данная величина является, вообще говоря, определяющей для ответа на интересующий нас вопрос. Эта величина приводится во втором столбце табл. 1 (эксцентриситеты орбит всех планет, кроме Меркурия и Плутона, очень малы, поэтому их большие и малые полуоси мало отличаются друг от друга и, следовательно, мало отличаются от срединных радиусов орбит). Мы видим, что самое сильное влияние на проходящие кометы должен оказывать Юпитер. На втором месте стоит Сатурн. Эти простые физические соображения, конечно, подтверждаются точными математическими расчетами.

Нетрудно понять, глядя в табл. 1 (второй столбец), что кометы редко должны попадаться в сферы действия планет — слишком мала вероятность. Однако если комета периодическая, то даже при прохождении на расстояниях порядка 1—2 а. е. от сферы действия малые возмущения ее орбиты накапливаются от оборота к обороту и за длительное время могут заметно трансформировать орбиту. Важной задачей небесной механики комет является тщательный математический учет таких накапливающихся изменений, потому что это позволяет, во-первых, устанавливать тождественность комет (т. е. устанавливать, одна ли и та же комета регистрировалась в различных появлениях) и, во-вторых, подойти к вопросу о происхождении комет. Остановимся на втором моменте.

Очевидно, основной вопрос заключается в том, по замкнутым или незамкнутым траекториям движутся кометы в Солнечной системе. Как это можно установить? Когда име-

ется несколько достаточно точных определений положения кометы на небе в разные моменты времени, можно определить ее орбиту, предполагая «на минутку», что комета движется

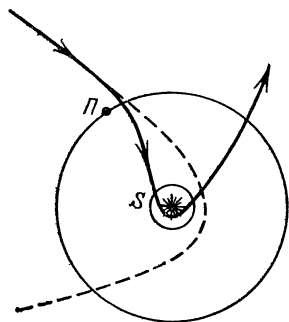


Рис. 24. Оскулирующая орбита. S — Солнце, P — возмущающая планета, штриховая линия — первичная орбита кометы

по одному из конических сечений в поле тяготения Солнца. На самом деле это, как мы видим, не так. Истинная траектория кометы, пролетающей в той части Солнечной системы, которая занята планетами, искажается под влиянием их возмущающего действия и перестает быть одной из классических кривых — эллипсом или гиперболой. Поэтому, когда мы принимаем, что определенная по наблюдениям орбита кометы есть одно из конических сечений, мы на самом деле находим орбиту некоторой «условной» кометы, которая в данной точке совпадает с орбитой истинной

кометы, но на которую не действует тяготение планет. Такая орбита называется оскулирующей. Наблюдения позволяют определять именно оскулирующие орбиты, однако ясно, что оскулирующая орбита может весьма существенно отличаться от истинной—все зависит от того, насколько велико возмущающее действие планет в каждом конкретном случае.

Допустим, мы вычислили оскулирующую орбиту и нашли ее гиперболической. Гипербола — кривая незамкнутая. Значит ли это, что такая комета попала в Солнечную систему из галактического пространства? Конечно, нет. Это было бы так, если бы гиперболической оказалась первичная орбита, по которой комета вошла в зону действия планет. На рис. 24 показано, как первичная орбита может искажаться под влиянием, например, Юпитера. Мы видим, что оскулирующая и первичная орбиты могут отличаться друг от друга весьма радикально. Поэтому необходимо уметь восстанавливать первичные орбиты комет, имея в наличии их оскулирующие орбиты.

Как это делается? Нужно мысленно отодвигать комету по ее орбите назад в прошлое, все время учитывая возмущающее действие планет, и делать это нужно до тех пор, пока комета не окажется за пределами их влияния. Полученная таким способом орбита и будет первичной.

Впервые такой метод применил еще в прошлом веке Трен для кометы Брукса 1886 III, которая имела ги-

перболическую оскулирующую орбиту. Учитывая возмущения от Юпитера и Сатурна, он рассчитал ее движение в прошлом и убедился, что первичной орбитой этой кометы был эллипс. С тех пор вопрос о первичных орбитах был детально

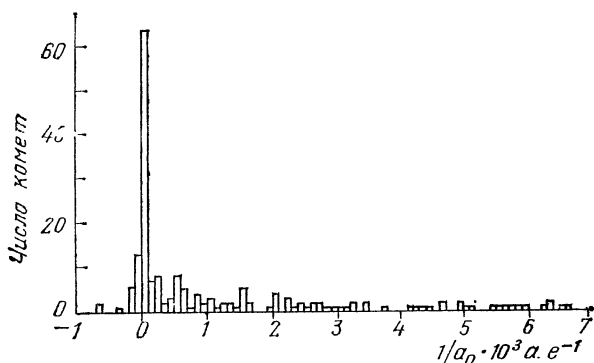


Рис. 25. Распределение долгопериодических комет по обратным величинам начальных больших полуосей

исследован для подавляющего большинства комет, чьи оскулирующие орбиты известны с хорошей точностью. Каков же результат? Мы с вами можем его увидеть на рис. 25. Этот рисунок взят прямо из научной статьи американских астрофизиков Б. Марсдена, З. Секанины и Э. Эверхарта и представляет собой наблюдательные данные. Такие картинки называют гистограммами. Высота каждого прямоугольника показывает количество комет, обратные величины больших полуосей которых заключены в интервале $1/a_0$, равном ширине этого прямоугольника. В данном случае ширина каждого прямоугольника равна $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ (а. е.)}^{-1}$.

Давайте посмотрим на него повнимательнее. Итак, по оси абсцисс отложены обратные величины больших полуосей первичных орбит комет ($1/a_0$). По оси ординат — количество комет с данными значениями $1/a_0$. Обычно рассматривают распределение комет как функцию от $1/a$, потому что величина $1/a$ пропорциональна полной энергии кометы независимо от того, по эллиптической или гиперболической орбите она движется. Таким образом, на рис. 25, по существу, изображено распределение комет по их начальным энергиям. Мы видим, что имеется небольшое количество комет, которым соответствуют отрицательные зна-

чения $1/a_0$ *). Это — кометы с гиперболическими орбитами. Подавляющее же большинство комет, как видим, имеет первичными орбитами эллипсы. Такие кометы принадлежат Солнечной системе, а не попадают в нее из просторов Галактики.

Ну, а как быть с небольшим числом «гиперболических комет»? Может быть, пусть небольшое, но все же некоторое число комет попало к нам из межзвездного пространства? Оказывается, это не так, в чем мы можем убедиться и без сложных математических расчетов. Давайте рассуждать.

Из рис. 25 следует, что для гиперболических комет наибольшее абсолютное значение $1/a_0$ соответствует $1/a_0 \approx -0,727 \cdot 10^{-3} \text{ (а.е.)}^{-1}$. Если мы подставим в формулу (3.28) значения G , M_\odot и $1/a_0 = -0,727 \cdot 10^{-3} \text{ (а.е.)}^{-1}$, то найдем, что скорость входа в Солнечную систему у таких комет приблизительно равна $v_\infty \approx 800 \text{ м/с}$ (меньшим абсолютным значениям отрицательных $1/a_0$ соответствуют еще меньшие скорости v_∞). Однако хорошо известно, что Солнце относительно ближайших звезд движется со скоростью, близкой к 20 км/с . Значит, если бы кометы, летящие по гиперболам, попадали в Солнечную систему из межзвездного пространства, то их скорости v_∞ должны были быть раз в 25 больше. Следовательно, все эти гиперболические кометы не галактического происхождения, они возникли внутри Солнечной системы. Еще одно обстоятельство заключается в том, что эксцентриситеты всех гиперболических комет крайне мало отличаются от единицы (на тысячные доли после запятой). Мы уже знаем, что случай, когда $e=1$, является критическим: он отделяет класс эллиптических движений от гиперболических. Поэтому близость e к единице означает, скорее всего, что эти кометы все же перешли на гиперболические орбиты вследствие возмущений от планет. Если бы они прилетали по гиперболам из галактического пространства, то ничто не мешало бы им иметь произвольный набор эксцентриситетов e (2, 3, ...).

Итак, достаточно уверенный вывод заключается в том, что первичными орбитами комет являются эллипсы. Следовательно, кометы принадлежат Солнечной системе. Это — аборигены.

*) Полная энергия кометы при движении по эллиптической или гиперболической орбите, согласно формуле (3.21), равна $E = \pm GmM_\odot/2a$, причем знак «минус» соответствует движению по эллипсу, а знак «плюс» — движению по гиперболе. В астрономической практике, однако, поступают наоборот и приписывают (условно) знак «плюс» величине $1/a$ при движении по эллипсу, а знак «минус» — при движении по гиперболе.

Осталось ответить на два коротких, но немаловажных, связанных друг с другом, вопроса: из какой области Солнечной системы приходят кометы и каково их происхождение?

Ответить на эти вопросы нам поможет открытый голландским астрономом Яном Оортом кометный банк, или

§ 2. Кометное облако

Вращается денно,
Вращается ночью,
Вращается вечно.

*Федерико
Гарсиа Лорка*

Разумеется, на рис. 25 представлены не все кометы. Воспользовавшись формулой (3.23), можно легко вычислить периоды обращения комет, чьи обратные величины больших полуосей начальных орбит расположены в положительной части оси абсцисс (отрицательная часть, как мы видели, соответствует слабогиперболическим орбитам, т. е. непериодическим движениям). Например, для $1/a_0 = 0,1 \times 10^{-3} \text{ (а.е.)}^{-1}$ находим из формулы (3.23) период $T = 1$ млн. лет, а для $1/a_0 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ (а.е.)}^{-1}$ период равен $T = 2152$ года. Кометы, обращающиеся вокруг Солнца с такими периодами, называются долгопериодическими. Имеется, конечно, большое число короткопериодических комет с периодами до 15 лет и комет, так сказать, «среднепериодических» с периодами, близкими к сотне лет. К последним, кстати, относится и комета Галлея ($T \approx 76$ лет).

Короткопериодические и «среднепериодические» кометы демонстрируют нам ряд интересных закономерностей. Оказывается, например, что афелии орбит комет, периоды которых заключены в пределах $3,3 \leq T \leq 15$ лет, концентрируются вблизи орбиты Юпитера. Интересным, но до сих пор не очень понятным обстоятельством является и то, что все они имеют орбиты, плоскости которых близки к плоскости эклиптики; кроме того, все они имеют прямое, а не ретроградное вращение, т. е. вращаются в том же направлении, что и все планеты Солнечной системы — против часовой стрелки, если смотреть со стороны северного полюса эклиптики (см. гл. 6, § 4). Эти кометы называют семейством Юпитера, так как они явно имеют с ним некую связь. Юпитер достаточно могуществен (самая большая планета Солнечной системы) и «содержит» весьма большое семейство: 87 комет.

Есть еще семейства Сатурна, Урана и Нептуна (к последнему относят и комету Галлея), но они малочисленны: у Сатурна — 13 комет, у Нептуна — 10, у Урана — всего 3. Вообще, принадлежность комет к этим последним семействам признается не всеми астрономами, так как, во-первых, не всегда можно четко отнести ту или иную комету к орбите данной планеты; во-вторых, здесь нет четко связывающих эти кометы закономерностей (плоскости орбит ориентированы произвольно, движения — и прямые, и обратные), позволяющих, как в случае Юпитера, объединить их в одну семью.

Короткопериодические кометы часто проходят вблизи Солнца, истекают, их ядра иногда дробятся, в конечном итоге комета вообще может исчезнуть, породив вместо себя какой-либо метеорный поток. Комета Галлея — чуть ли не уникальный пример кометы с относительно небольшим периодом, яркость которой, по-видимому, почти не уменьшилась за время ее жизни. Вместе с тем короткопериодические кометы не иссякают, а значит, откуда-то появляются — ведь время жизни Солнечной системы оценивают значением 4,6 млрд. лет. За такое время, как показывают оценки, короткопериодические кометы должны были бы давно исчезнуть. Где же находится источник комет?

Ответить на этот вопрос не просто даже сегодня! История же проблемы происхождения комет никогда не страдала от недостатка предлагавшихся гипотез. Если говорить о научно обоснованных предположениях, то начать следовало бы с 1796 г., когда Лаплас в своей книге «Изложение системы мира» предложил теорию межзвездного происхождения комет, которые захватываются планетами-гигантами. За истекшие 190 лет эта точка зрения не слишком модифицировалась, хотя и обросла новыми деталями. Несмотря на то, что, как мы видели в предыдущем параграфе, наблюдательные данные говорят об отсутствии комет с резко выраженными гиперболическими орбитами, в самое последнее время вновь появились сторонники «гипотезы захвата».

Точка зрения, диаметрально противоположная «гипотезе захвата», восходит к Лагранжу, предложившему в 1812 г. так называемую эруптивную гипотезу, согласно которой кометы выбрасываются из недр планет-гигантов и их спутников путем вулканических извержений. За истекшие сто семьдесят лет и эта гипотеза не слишком радикально изменилась, хотя также пополнялась новыми деталями. Она имеет своих немногочисленных сторонников, среди которых наиболее известен киевский астроном С. К. Всех-

святский. Логика здесь приблизительно такая: поскольку у Юпитера имеется «недвусмысленно» связанное с ним многочисленное семейство, то предполагается, что кометы возникли вследствие вулканических извержений на нем и на его спутниках. То же самое относится и к другим планетам-гигантам. Когда американские «Вояджеры» обнаружили вулканическую деятельность на Ио — одном из главных спутников Юпитера, — эруптивная гипотеза обрела «второе дыхание». Но даже столь эффектное, казалось бы, подтверждение «вулканических идей» не изменило скептического отношения большинства специалистов к этой гипотезе. Здесь есть слишком много различных «но». Например, скорость отрыва кометного ядра от Юпитера (при извержении вулкана) должна быть порядка $v \approx 60$ км/с. В этом легко убедиться, подставив в формулу (3.29) массу Юпитера и его радиус ($M_{\text{Ю}} = 317,83 M_{\oplus}$, $R_{\text{Ю}} = 71300$ км)*). Скорость отрыва ядра от спутников Юпитера порядка нескольких километров в секунду. Попробуйте оценить энергию, которую нужно сообщить телу массой в 4 млрд. тонн (масса ядра кометы радиусом 1 км и плотностью 1 г/см³), чтобы оторвать его от Юпитера или даже от Ио. Боюсь, что сделать это с помощью самых мощных вулканов нереально. Кроме того, суммарная масса всех комет в Солнечной системе составляет заметную долю от полной массы планет-гигантов, не говоря уже об их спутниках. Полная масса всех планет $\sum M_{\text{пл}} = 447,8 M_{\oplus}$, а полная масса всех спутников планет равна $0,12 M_{\oplus}$. Суммарное число комет в Солнечной системе не меньше, по видимому, чем 10^{11} (см. далее). Отсюда масса, приходящаяся на их долю: $\sum M_{\text{ц}} = 4 \cdot 10^{15} \text{ г} \cdot 10^{11} = 4 \cdot 10^{26} \text{ г} \approx 0,07 M_{\oplus}$. Трудно представить себе, например, чтобы половина массы спутников планет выбрасывалась в космос путем вулканических извержений. Скорее всего, семейство Юпитера образовалось вследствие захвата этим гигантом проходящих мимо него комет, которые он перевел на соответствующие орбиты.

Откуда же все-таки берутся кометы?

Большинство специалистов считает, что получить ответ на этот вопрос удалось выдающемуся голландскому астроному Яну Оорту в 1950 г. Конечно, в науке — правильна или неправильна та или иная идея, решают не большинством

*) В астрономии приняты следующие символы, обозначающие планеты Солнечной системы: Меркурий — ☿, Венера — ♀, Земля — ⊕, Марс — ♂, Юпитер — ♃, Сатурн — ♄, Уран — ♅, Нептун — ♆, Плутон — ♇. Кометы обычно обозначают символом ☄.

голосов. Наблюдательные факты — они и только они являются единственными объективными свидетельствами в пользу какой-либо точки зрения. Обилие гипотез возникает как раз тогда, когда фактов недостаточно, и тут уж начинаются взвешивания различных «за» и «против», поскольку

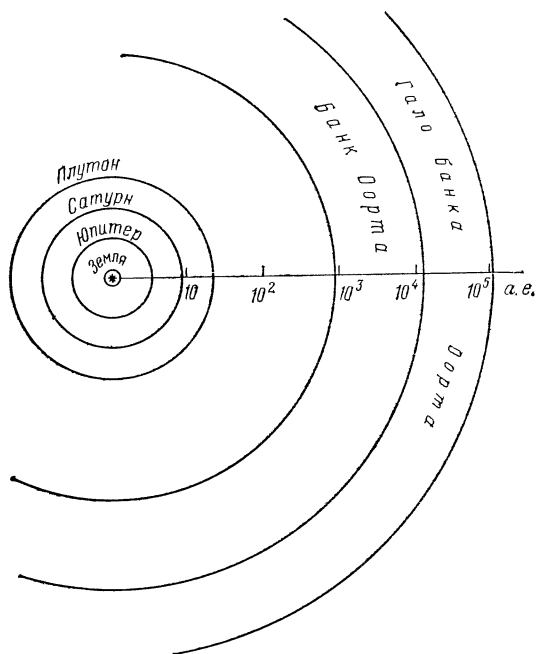


Рис. 26. Схематическое изображение облака Оорта

лучшего выхода нет. Однако гипотеза, предложенная Оортом, практически не имеет изъянов, и именно поэтому ее считают правильной подавляющее большинство специалистов.

К 1950 г. были вычислены только 19 первичных орбит долгопериодических комет, которыми и воспользовался Оорт. Анализируя распределение этих 19 долгопериодических комет по большим полуосьям их первичных орбит, он обратил внимание, что все они группируются к области $a_0 \geq 20\,000$ а.е. Оорт предположил, что Солнечная система окружена гигантским облаком комет, простирающимся на расстояния от $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ а.е. от Солнца (рис. 26). Это облако и является резервуаром (или банком, или сейфом), в котором «хранятся» кометы. Оно является источником, из

которого время от времени они вырываются. Те из них, которые попадают во внутреннюю область планетной системы, мы и регистрируем как новые кометы.

Внешняя граница банка определена из простого соображения: расстояние до ближайших звезд около двух парсеков. Если резервуар принадлежит Солнечной системе (сильно гиперболических комет нет), то он не может простираться дальше половины расстояния до ближайших звезд, т. е. дальше одного парсека, а $1 \text{ пк} = 2 \cdot 10^5 \text{ а.е.}$

Конечно, анализа данных о 19 кометах, использованных Оортом в 1950 г., маловато для уверенных выводов. Я бы сказал, что не всякому дано по такому небольшому намеку угадать истину. Тем не менее интуиция не подвела знаменитого голландского астронома.

Шли годы, увеличивалось число рассчитанных первичных орбит долгопериодических комет, но ничто не противоречило гипотезе Оорта. Наоборот, новые факты ее только подтверждали. Мы и сами можем в этом убедиться, если вернемся к рис. 25. Мы видим, что больше всего долгопериодических комет приходится на интервал $0 < 1/a_0 < 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ (а.е.)}^{-1}$. Если перейти от обратных величин к самим большим полуосям первичных орбит, то из этого неравенства следует, что для большинства долгопериодических комет, действительно, $a_0 > 10^4 \text{ а.е.}$ Но этот результат вытекает из анализа уже не 19, а 190 первичных кометных орбит!

Итак, устоявшиеся представления об устройстве Солнечной системы, состоящей из Солнца, девяти планет и их спутников, пришлось существенно дополнить: на границах Солнечной системы размещено гигантское облако комет. По оценке Оорта, их число близко к $N \approx 10^{11}$, поэтому я называю его гигантским.

Именно этот кометный банк и является источником вновь появляющихся комет, которые мы регистрируем при наблюдениях. Вот откуда они к нам приходят.

Что заставляет кометы покидать банк Оорта и приходить во внутренние области Солнечной системы? Попробуем прикинуть, не могут ли к этому привести их взаимные столкновения в облаке. Для этого найдем число взаимных столкновений кометных ядер за какой-либо промежуток времени t . Для того чтобы столкновения вообще могли происходить, нужно, чтобы кометные ядра в облаке Оорта имели некие случайные скорости, накладывающиеся на их движения по эллипсам с фокусом в Солнце. Самое большое значение случайной скорости должно быть меньше скорости отрыва комет от облака, в противном случае оно бы просто не сохра-

нилось. Если число комет в единице объема облака Оорта n_k , площадь поперечного сечения ядра (для простоты полагаем, что все ядра одинакового размера) πR_k^2 , случайная скорость $\tilde{v} = v_{\text{отрыва}}$, то за время t произойдет число столкновений, равное ν_k :

$$\nu_k = \pi R_k^2 n_k \tilde{v} t. \quad (4.2)$$

Смысл этой формулы, кажется, ясен, но все же необходимо короткое пояснение. Произведение $n_k \tilde{v} t$ есть, очевидно, поток кометных ядер, который пройдет за время t через площадку единичного сечения, ориентированную перпендикулярно вектору скорости. Соответственно, $\pi R_k^2 \times n_k \tilde{v} t$ даст число комет, проходящих за то же время через сечение πR_k^2 , т. е. число столкновений с данным ядром. А поскольку все ядра одинаковы, как было принято, то ν_k есть число столкновений, которое испытывает произвольное ядро с остальными «коллегами». Если число комет в облаке $N \approx 10^{11}$ и внешняя граница кометного облака $R_{\text{внеш}} \approx 2 \cdot 10^5$ а.е., то нетрудно вычислить

$$n_k \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ ядер/ (а. е.)}^3. \quad (4.3)$$

Пусть $R_k = 1$ км — мы видели, что это типичное кометное ядро (хотя, возможно, есть и ядра с радиусами до 10—20 км). В качестве t возьмем все время жизни Солнечной системы, т. е. $t = 4,6 \cdot 10^9$ лет, так как кометный банк, по-видимому, образовался в процессе ее формирования (см. дальше). Попробуйте сами произвести вычисления, используя для величины \tilde{v} формулу (3.29). Если вы сделаете их правильно, то получите такой результат: $\nu_k = 3,6 \cdot 10^{-14}$. Что это значит? Означает это весьма прискорбную вещь, а именно то, что наша гипотеза неверна: столкновения ядер друг с другом не могут выбрасывать их из банка Оорта, потому что время, которое потребуется для того, чтобы произошло хотя бы одно столкновение, на четырнадцать порядков больше времени существования Солнечной системы. Вы сейчас столкнулись с совершенно типичным случаем: предлагается гипотеза, вроде бы вполне разумная, но до первой же количественной проверки. Так и происходит обычно в астрофизике: проверяется довольно много гипотез, но остается лишь та, которая выдерживает проверку числами.

Вернемся, однако, к поставленному вопросу: что заставляет кометы покидать резервуар? Не буду вас больше занимать проверкой других возможных, в принципе, предположений и сразу сообщу правильный ответ: ответственные за

этот эффект близко проходящие звезды. Это утверждение можно доказать, и сделал это впервые сам Оорт. Однако доказательство (математическое, разумеется) потребовало бы чересчур много места. Поэтому я ограничусь тем, что попробую это продемонстрировать с помощью простых качественных соображений.

Оценим сначала, сколько звезд может пройти сквозь банк Оорта за время жизни Солнечной системы. Для этого нужно снова воспользоваться формулой (4.2), но заменить в ней R_k на $R_{\text{внеш}}$, n_k на n_* (n_* — число звезд в единице объема околосолнечной окрестности нашей Галактики) и \tilde{v} на v_* (v_* — случайные скорости звезд в этой же окрестности). В результате формулу (4.2) следует переписать в таком виде:

$$v_* = \pi R_{\text{внеш}}^2 \cdot n_* v_* t. \quad (4.4)$$

Из наблюдений известно, что $n_* \approx 0,1$ звезд/пк³ и $v_* \approx 20$ км/с. Подставляя эти числа в формулу (4.4), находим v_* — число прохождений звезд через кометный банк за время жизни Солнечной системы. Результат таков: $v_* \approx 30\,000$. Немало! Однако нужно еще посмотреть, к чему это может привести. Для этого необходимо рассчитать, насколько изменится скорость Солнца и какой-либо кометы в банке Оорта при прохождении близкой звезды. Не буду утомлять читателя громоздкими вычислениями и сразу сообщу результат:

$$\Delta v_{\text{кс}} \approx \frac{2GM_*}{v_* P_{\odot}} \cdot \frac{r}{P_{\odot}}, \quad (4.5)$$

где $\Delta v_{\text{кс}}$ — скорость, которую получит кометное ядро относительно Солнца под влиянием пролетевшей звезды массы M_* , r — расстояние кометы от Солнца, P_{\odot} — расстояние максимального сближения звезды с Солнцем.

Подставим числа в формулу (4.5) и посмотрим, какое приращение скорости относительно Солнца получит типичное кометное ядро из банка Оорта вследствие прохождения близкой звезды. Пусть проходящая звезда имеет скорость порядка $v_* \approx 20$ км/с и $M_* = M_{\odot}$. Примем также, что $P_{\odot} = r = R_{\text{внеш}}$. Тогда по формуле (4.5) найдем $\Delta v_{\text{кс}} = 45$ см/с. Много это или мало? Давайте сравним $\Delta v_{\text{кс}}$ со скоростью вращения кометы вокруг Солнца, например, по круговой орбите радиуса $r = R_{\text{внеш}}$. Мы уже знаем, что при этом $v = \sqrt{GM_{\odot}/R_{\text{внеш}}}$, подставляя числа, найдем $v \approx 66$ м/с. Отношение $\Delta v_{\text{кс}}/v = 0,68 \cdot 10^{-2}$. Значит, прохождение звезды на расстоянии $P_{\odot} = R_{\text{внеш}}$ изменит скорость кометы в банке, находящейся примерно на таком же расстоянии

от Солнца, всего на 0,68%. Следовательно, влияние звезд ничтожно, т. е. снова неудача? На этот раз нет. Мы забыли, что через банк Оорта за время существования Солнечной системы должно было пройти около 30 000 звезд! Ясно, что суммарный эффект от прохождения такого огромного числа звезд будет большим. Однако это не значит, что $\Delta v_{\text{кс}}$ нужно просто умножить на 30 000. Звезды пролетают случайным образом в различных направлениях, их влияние иногда складывается, иногда вычитается. Поэтому здесь требуется аккуратный математический подсчет накапливающихся среднеквадратических приращений, т. е. подсчет суммы $\sum (\Delta v_{\text{кс}})^2$.

Такой подсчет уведет нас слишком далеко в дебри теории вероятностей и математической статистики. Вам придется поверить мне на слово. Из расчетов следует, во-первых, что прохождения близких звезд заметно хаотизируют скорости кометных ядер в банке Оорта, и, во-вторых, их влияние достаточно, чтобы время от времени выбрасывать кометы из банка, направляя их и в межзвездное пространство за пределы Солнечной системы и внутрь нее, где мы их регистрируем как новые долгопериодические кометы.

Не приведет ли процесс выбрасывания комет из банка проходящими звездами к полному истощению резервуара за 4,6 млрд. лет? Если бы резервуар должен был иссякнуть, то гипотеза Оорта, конечно, не выдерживала бы критики. Для ответа на этот важнейший вопрос были предприняты так называемые численные эксперименты. В мощные компьютеры «запускались» кометные ядра таким способом, чтобы осуществлялась полная имитация условий в банке Оорта. Датчик случайных чисел имитировал влияние случайных прохождений звезд. Подсчитывалось число комет, улетающих из Солнечной системы в Галактику, попадающих во внутренние области Солнечной системы, и число и траектории остающихся в резервуаре комет. Все оказалось в порядке. Большая часть кометного облака (до 60%) должна была, как оказалось, выжить.

Что происходит с кометами, выброшенными внутрь Солнечной системы? По мысли Оорта, те из них, которые попали в сферы действия больших планет, могли быть захвачены ими и образовать уже упоминавшиеся семейства короткопериодических и «среднепериодических» комет или под действием тех же больших планет перейти на гиперболические орбиты и покинуть Солнечную систему. Вероятно, слабогиперболические кометные орбиты, о которых уже говорилось, возникают как раз вследствие такого процесса.

Каковы физические условия, в которых находятся кометные ядра в резервуаре? Главным вопросом, конечно, является их температура. Здесь нужно знать, имеются ли внутренние источники нагрева. Таким внутренним источником тепла может, в принципе, служить естественный радиоактивный распад каких-либо нуклидов. Если исходить из земных аналогий, то источником нагрева может служить радиоактивный распад урана, тория, калия — это долгоживущие изотопы с периодами полураспада, сравнимыми с возрастом Солнечной системы. Если считать, что вся выделяющаяся при распаде этих элементов энергия идет на нагрев ядра, которое полностью переизлучает ее, то, как показывает расчет, температура ядер размерами $R_k \approx 1$ км должна быть очень низкой — $T \approx 2,3$ К.

Намного более мощным источником нагрева может быть радиоактивный алюминий (^{26}Al), о котором уже упоминалось в гл. 1. Но если он попал в материал, из которого сформировалась Солнечная система за 1 млн. лет до этого момента (см. гл. 1, § 3), то из-за короткого периода полураспада (720 000 лет), все порожденное им тепло должно было уйти из вещества в виде теплового излучения практически за время его жизни. В современном тепловом балансе, как видим, ^{26}Al не участвует. Однако роль его в прошлом может быть немалой. Я уже писал (гл. 1, § 3) о том, что радиоактивный распад этого элемента мог стимулировать самоорганизацию органических молекул и образование аминокислот и оснований нуклеиновых кислот. Это может иметь существенное значение для проблемы происхождения жизни на Земле и в космосе. Но пока, конечно, об этом говорить всерьез рано.

Остается рассмотреть нагрев солнечными лучами. Полная энергия, излучаемая Солнцем в единицу времени, известна. Ее называют светимостью L_\odot . Она равна $L_\odot = 3,86 \cdot 10^{26}$ Дж/с. Если кометные ядра переизлучают все поглощенное ими солнечное тепло, т. е. ведут себя как абсолютно черное тело, то их температура при этом выражается очень простой формулой:

$$T = \frac{278 \text{ К}}{\sqrt{r}}, \quad (4.6)$$

где расстояние до Солнца r выражено в астрономических единицах. Из формулы (4.6), в частности, следует, что абсолютно черное тело, находящееся на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля, должно иметь по шкале Кельвина температуру 278 К, т. е. 5°C .

Вернемся к банку Оорта. Его внутренняя граница, как вы помните, удалена от Солнца на расстояние порядка $r \approx 2 \cdot 10^4$ а.е. Подставляя это значение r в формулу (4.6), находят температуру, которую могут приобретать ядра на таком расстоянии под действием солнечного облучения: $T = 2 \text{ К} = -271^\circ \text{С}$. На самом деле температура ядер должна быть чуть выше, так как суммарное излучение окружающих звезд, как показывают расчеты, может нагреть ядра до температуры $T \approx 3 \text{ К} = -270^\circ \text{С}$. При таких температурах, конечно, невозможны химические реакции. Поэтому вещество, из которого состоят кометные ядра в банке Оорта, находится как бы в гигантском холодильнике и прекрасно сохраняется в первозданном виде. Лишь когда кометы выбрасываются из резервуара внутрь Солнечной системы и подлетают к Солнцу, температура ядер повышается в соответствии с формулой (4.6), начинается интенсивное испарение льдов летучих соединений; газы увлекают за собой пыль, ядро обрастает атмосферой. Уходя от Солнца, ядро остывает, испарение прекращается, и снова «косматая звезда» превращается в огромную глыбу льда и камня, летящую уже без «прически» по своей орбите.

Кометные ядра в банке Оорта являются хранилищем бесценной информации о первых мгновениях — начальных условиях, в которых формировалась Солнечная система. Мы уже знаем, что они хранятся в «холодильнике» в замороженном виде. Но это не все. Из-за их малой, по сравнению с планетами, массы мала их собственная гравитация. Это еще одна причина, по которой их вещество не подверглось какой-либо эволюции с того момента, как они образовались. Информация эта бесценна, так как на сегодняшний день представления о том, как возникла Солнечная система, имеют лишь самый общий характер и далеки от полной ясности. Однако извлечь эту информацию пока невозможно.

Важнейшим достижением космических исследований является уже то, что мы на сегодняшний день имеем научную информацию о Юпитере и Сатурне, полученную с космических аппаратов, исследовавших эти планеты. Однако до Сатурна — 10 а. е., а до облака Оорта — 20 000 а.е. Может быть, попытаться измерить тепловое излучение ядер, заполняющих этот резервуар? Оказывается, и это пока невозможно. Интенсивность этого теплового излучения лежит далеко за порогом чувствительности современной аппаратуры. Впрочем, к этому вопросу мы еще вернемся в следующем параграфе.

Следует заметить, что вообще гипотезу Оорта называют гипотезой, несмотря на убедительные подтверждения, потому, что эти подтверждения косвенные. Она перестанет быть, по-видимому, гипотезой лишь тогда, когда облако Оорта удастся непосредственно обнаружить. Об этом еще пойдет речь дальше.

Итак, на один из поставленных в конце предыдущего параграфа вопросов мы как будто получили ответ: источником, поставляющим кометы во внутреннюю (планетную) область Солнечной системы, является, по-видимому, кометный банк, расположенный на ее внешних границах. Остался второй вопрос: каково его происхождение? С ответом на него дело обстоит значительно хуже, потому что, как уже отмечалось, до сих пор остается открытым вопрос о происхождении Солнечной системы, частью которого является проблема происхождения кометного банка. Здесь слишком мало научно доказанных фактов, чтобы можно было делать однозначные выводы.

Поскольку однозначно ответить на этот вопрос я не могу, то придется просто коротко перечислить те точки зрения, которые кажутся в какой-то степени научно обоснованными. Их можно разделить на две немногочисленные группы. К первой можно отнести предположения, согласно которым облако Оорта возникло в Солнечной системе тем или иным способом. Ко второй — гипотезу о захвате облака из межзвездной среды. Таким образом, слабогиперболические орбиты действительно не свидетельствуют о том, что эти кометы имеют галактическое происхождение, однако теперь вопрос — аборигены или пришельцы? — получает новое звучание: не имеет ли галактическое происхождение вообще банк Оорта? Основанием для такого предположения является гипотеза о том, что за время своего существования Солнце могло несколько раз пройти через гигантские облака молекулярного водорода (в которых может быть и пыль, а могут быть и готовые кометные ядра) с массой $M \approx (10^4 - 10^6) M_{\odot}$. Вообще говоря, таких облаков довольно много в Галактике, но концентрируются они в основном в кольце с внутренним радиусом $r_1 = 4$ кпк от центра нашей звездной системы и внешним радиусом $r_2 \approx 8$ кпк. Это кольцо так и называют «галактическим кольцом молекулярного водорода» или коротко — «молекулярным галактическим кольцом». Расстояние от центра Галактики, на котором расположено Солнце, по различным определениям колеблется от 8,5 до 10 кпк. Международным астрономическим союзом рекомендовано (как более обоснованное)

значение $r_{\odot}=10$ кпк. На таком расстоянии гигантских молекулярных комплексов (так называют самые большие облака с массой $(5 \cdot 10^5 - 10^6)M_{\odot}$) почти нет.

Мы уже вполне вооружены для того, чтобы самостоятельно вычислить вероятное число прохождений через молекулярные комплексы, которые могла бы совершить Солнечная система за время своего существования. Гигантские молекулярные комплексы (назовем их коротко ГМК) имеют типичные размеры около 20 пк и случайные скорости по каждой из координат около 3—4 км/с. Число их в молекулярном галактическом кольце близко к $N_{\text{ГМК}} \approx 1000$. Толщина кольца (по высоте), занятого ГМК, около $h_{\text{ГМК}}=50$ пк.

Число прохождений Солнца через ГМК ($v_{\text{ГМК}}$) следует, как мы теперь знаем, определять либо из формулы (4.2), либо из формулы (4.4), но только заменив соответствующие параметры. Очевидно,

$$v_{\text{ГМК}} = n_{\text{ГМК}} \cdot \pi R_{\text{ГМК}}^2 \cdot v_{\odot} t, \quad (4.7)$$

где $n_{\text{ГМК}}$ — концентрация ГМК, т. е. число их в единице объема, $R_{\text{ГМК}}$ — радиус типичного ГМК (считаем для простоты ГМК сферическими — нас ведь интересуют не точные числа, а лишь оценки по порядку величины), v_{\odot} — относительная скорость ГМК и Солнца, t — как и раньше, время жизни Солнечной системы, так как мы желаем оценить, сколько прохождений через ГМК она могла совершить за время своего существования. Почти все необходимые данные у нас уже есть. Действительно, $R_{\text{ГМК}} \approx 20$ пк, $t = 4,6 \cdot 10^9$ лет; так как скорость Солнца относительно ближайших звезд ~ 20 км/с, а скорость ГМК ниже, то примем приближенно, что $v_{\odot} \approx 20$ км/с. Остается только узнать $n_{\text{ГМК}}$. В молекулярном галактическом кольце она известна: $n_{\text{ГМК}} \approx 10^{-7}$ пк $^{-3}$. Однако какова их концентрация в околосолнечной окрестности Галактики на сегодняшний день, сказать очень трудно, известно только, что она существенно меньше. Примем для определенности, что в околосолнечной окрестности Галактики концентрация ГМК на порядок меньше, т. е. $n_{\text{ГМК}} \approx 10^{-8}$ пк $^{-3}$.

Теперь есть все необходимое для подсчета $v_{\text{ГМК}}$. Подставляя в формулу (4.7) числа, находим ответ: $v_{\text{ГМК}} \approx 1$. Значит, за все время своего существования Солнечная система, возможно, один раз пролетела сквозь ГМК. Однако точность, с которой мы получили этот вывод, совершенно неудовлетворительна из-за неопределенности использованных нами чисел. Число прохождений могло быть и в несколько раз меньше — следовательно, их вообще могло не быть,—

и в несколько раз больше. Я специально привел здесь метод, которым делаются подобные числовые оценки, чтобы вы могли почувствовать и порядки получающихся величин, и степень их неопределенности. Раньше уже говорилось о том, что на всем протяжении истории научного изучения комет альтернативные точки зрения на их происхождение без устали сменяли друг друга. После работы Оорта 1950 г., о которой я уже писал, идея о галактическом происхождении комет практически растеряла своих приверженцев, и лишь буквально в последние два-три года она обрела новую жизнь. На чем основываются сейчас ее сторонники, вы видели, но мне лично кажется, что здесь еще очень далеко до какой-либо ясности и уж тем более, до утверждения о том, что кометные ядра были захвачены Солнцем при пролете через молекулярные комплексы*).

Если даже Солнце и прошло один (или несколько) раз через гигантский молекулярный комплекс, то нужно еще ответить на множество неясных вопросов: должно ли оно при этом полностью потерять первоначально существовавший (предположительно) кометный резервуар или лишь частично? Может ли при таком прохождении Солнце захватить из ГМК готовые кометные ядра, причем так, чтобы возник банк Оорта с наблюдаемыми его свойствами? Если да, то откуда эти кометные ядра взялись в ГМК? Или они образовались из газа и пыли позднее, уже в Солнечной системе? Это далеко не полный список вопросов, ответы на которые сегодня отсутствуют. В следующем параграфе мы увидим, что есть довольно серьезный аргумент в пользу того, что банк Оорта, если он существовал изначально, должен был, по-видимому, сохраниться. Но не будем забегать вперед.

Альтернативные точки зрения состоят, как вы помните, в том, что банк Оорта образовался при формировании Солнечной системы в ней самой (не был ниоткуда захвачен), но произойти это могло различными способами. Один такой механизм мог состоять в том, что кометные ядра сформировались в далеких (следовательно, холодных) частях Солнечной системы, точнее, протосолнечной туманности, а затем уже под влиянием возмущающего действия планет —

* Уже после сдачи в набор этой книги я получил препринт американских астрофизиков П. Хата и С. Тримейна под названием: «Разрушают ли межзвездные облака кометное облако Оорта?». Этот препринт представляет собой довольно объемную, насыщенную математикой статью, открывая которую невольно ожидаешь увидеть большое резюме с изложением различных «за» и «против». Резюме, однако, состоит только из трех слов: «Почти определенно нет».

Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна — были выброшены за пределы области, занятой планетами. Другой механизм состоит в том, что кометные ядра могли сформироваться в протосолнечной туманности, прямо там, где они сейчас и находятся, т. е. в области, занятой банком Оорта.

Не вдаваясь в детали, отметим только, что Солнечная система образовалась, по-видимому, вследствие сжатия под действием собственной гравитации (такой процесс называют гравитационным коллапсом) протосолнечного газопылевого облака. Оно должно было вращаться. Момент количества движения сохраняется, как мы знаем, поэтому вращение планет вокруг Солнца свидетельствует о том, что и вначале облако имело вращение. Сжатие в плоскости, перпендикулярной оси вращения, было затруднено из-за действия центробежных сил, зато вдоль оси вращения оно происходило свободно. В результате первоначальное газопылевое облако стало уплотняться и постепенно приобретать форму диска. В процессе коллапса происходило формирование структурных деталей в туманности. В центре образовывалась протозвезда, точнее, протоСолнце, на разных расстояниях от центра диска формировались планеты, еще дальше, по-видимому, — кометные ядра.

Из банка Оорта кометы приходят во внутренние части Солнечной системы по орбитам, плоскости которых наклонены к плоскости эклиптики под самыми различными углами, причем движения среди них наблюдаются как прямые, так и обратные. Все это говорит о том, что либо они могли сформироваться во внешних частях еще неуплощенной протосолнечной туманности, имевшей какую-то сфероподобную форму, либо во внешних частях уже уплотненной протосолнечной туманности, а разброс по углам наклона приобрести под действием возмущений от звезд. Мы могли убедиться, что этот механизм весьма эффективно хаотизирует скорости кометных ядер в банке Оорта.

Вот, пожалуй, и все, что можно сказать о вероятном происхождении кометного резервуара. Однако рассказ о банке Оорта будет неполным, если к нему не добавить кое-что о сенсационных результатах, полученных американскими учеными совсем недавно, в апреле 1984 г.

Это сделано в следующем параграфе, который можно было бы назвать

§ 3. Столкновения комет с Землей («записи» о катастрофах в геологической истории нашей планеты)

- Этой ужасной минуты я не забуду никогда в жизни!
- сказал Король.
- Забудешь,— заметила Королева,— если не запишешь в записную книжку.

Л. Кэрролл. «Алиса в Стране Чудес»

Вы не забыли, о панике, охватившей Париж в 1773 г., когда Ж. Лаланд собирался прочитать лекцию в Академии о последствиях, к которым должно привести столкновение кометы с Землей? Один из его современников, некто Бошмон, в своих «Секретных мемуарах» описал события тех дней так (см. *Воронцов-Вельяминов Б. А. Очерки о Вселенной.*— М.: Наука, 1980):

«Кабинет господина Лаланда был переполнен толпой любопытных, которые горели нетерпением узнать что-либо о его докладе. Волнение дошло до того, что набожные люди, ничего не смыслящие в этом вопросе, домогались у архиепископа разрешения совершить службу в течение сорока часов, чтобы предотвратить ожидаемый страшный потоп, и архиепископ уже готов был дать нужные распоряжения, но академики убедили его в странности подобных мероприятий».

Известная «язва» — великий Вольтер — не «жалел желчи» по этому поводу. Он писал:

«Некоторые парижане... сообщили мне, что приближается конец мира и что мир непременно кончится 20 мая этого года. Они ожидают в этот день комету, которая, подкравшись сзади, перевернет наш земной шар и превратит его в неосязаемую пыль, как гласит якобы предупреждение Академии наук, которое, впрочем, никогда не было сделано. Нет ничего вероятнее этого события, потому что Иоганн Бернулли в своем «Рассуждении о комете» предсказал, что комета 1680 г. возвратится, произведя страшный погром на Земле 17 мая 1719 г. Если Иоганн Бернулли ошибся, предсказав конец мира, то всего лишь на пятьдесят четыре года и три дня. Отсюда ясно, что благоразумие велит ждать конца мира или 20 числа этого месяца 1773 г., или еще через несколько лет, в каком-нибудь месяце какого-нибудь года. Если же конец света и в этот день не наступит, то все-таки можно надеяться, что если что отложено, то оно еще не потеряно...»

Ну что же, пора, наконец, выяснить, кто же был прав — взволнованные парижане или Вольтер. Это вполне в наших

силах. Прежде всего замечу, что число комет, подходящих к Солнцу на перигелийные расстояния $q < 1$ а.е., меньше чем $\dot{N}_1 = 5$ в год. Значит, именно столько комет и пересекает орбиту Земли, поскольку ее радиус как раз равен 1 а.е. Какова вероятность столкновения такой кометы с Землей? Вероятность того, что одна из комет, пересекающих орбиту Земли, с ней столкнется, равна, очевидно, отношению $\pi R_{\oplus}^2 / \pi r_{\oplus}^2$, где r_{\oplus} — радиус земной орбиты ($r_{\oplus} = 1$ а.е.). Поскольку орбиту Земли в единицу времени пересекает \dot{N}_1 комет, то за время t ее пересечет $\dot{N}_1 \cdot t$ комет. Значит, полная вероятность столкновения кометы с Землей за время t равна

$$W = \frac{\pi R_{\oplus}^2}{\pi r_{\oplus}^2} \dot{N}_1 t. \quad (4.8)$$

Подставляя в эту формулу $\dot{N}_1 = 5$ год⁻¹, $R_{\oplus} = 6371$ км и $t = 1$ год, найдем очень малую величину: $W = 8 \cdot 10^{-9}$. Это значит, что вероятность столкновения кометы с Землей в течение года составляет 8 шансов на миллиард. Прямо скажем, немного! Даже за время жизни одного поколения, примерно за 75 лет, вероятность встречи Земли с кометой составляет 6 шансов из 10 миллионов, как легко вычислить из формулы (4.8), т. е. тоже ничтожно мала. Однако и в лотерею люди выигрывают автомобили, хотя с математической точки зрения вероятность такого события вряд ли выше, чем вероятность встречи Земли с кометой в течение жизни одного поколения людей. Такой «выигрышный билет» земляне вытащили, по-видимому, в 1908 г., когда в Сибири в бассейне реки Подкаменной Тунгуски упало гигантское тело, которое называют с тех пор «Тунгусский метеорит». Существует вполне основательная гипотеза о том, что это была комета. К сожалению, у нас нет возможности остановиться на этой гипотезе детально.

Что же случилось? Дело происходило в 900 км к северу от Иркутска и до какой-либо «цивилизации» было далеко. Поэтому сохранилось мало свидетельств очевидцев. По свидетельству крестьянина С. Б. Семенова, сидевшего на крыльце за работой в фактории Вановара на расстоянии 65 км от места падения, событие это произошло в 8 часов утра. Над лесом, по его словам, вспыхнуло исполинское пламя, жар от которого был так силен, что на нем чуть не загорелась рубашка. Пламя быстро исчезло, но затем последовал сильнейший толчок, отбросивший Семенова на сажень от

крыльца, так что он потерял сознание. Очнулся он среди гула; видел, как тряслись избы, лопались стекла и рамы. На площади между избами была вырвана земля. Из-за отдаленности места происшествия от «центров цивилизации» слухи о катастрофе стали доходить только через несколько лет от местных тунгусов-оленоводоов.

Первая экспедиция на место происшествия была организована Академией наук СССР только через 19 лет после падения метеорита. Оказалось, что на несколько десятков километров от места падения метеорита деревья были повалены вершинами от центра, причем на расстоянии в несколько километров все стволы и ветки были обуглены.

Как теперь считают, ядро кометы (или метеорит) влетело в земную атмосферу с громадной скоростью. В результате возник сильнейший взрыв.

Можно сделать грубую прикидку количества энергии, которая выделилась при столкновении «тунгусского тела» с Землей. Верхний предел энергии взрыва мы получим, если предположим, что вся кинетическая энергия движения тела полностью перешла в энергию взрыва. Если это было ядро небольшой кометы, то его массу можно принять близкой, например, к $M_k \approx 10^8$ т. Тогда при скорости падения $v \approx 1$ км/с находим $M_k v^2 / 2 = 5 \cdot 10^{16}$ Дж. При взрыве одной килотонны тротила выделяется $4,2 \cdot 10^{12}$ Дж энергии. Следовательно, взрыв, который возник при столкновении «тунгусского тела» с Землей, был приблизительно эквивалентен взрыву, скажем, водородной бомбы с тротильным эквивалентом порядка нескольких мегатонн. Немало, конечно, но все же далеко недостаточно для того, чтобы говорить о гибели Земли в целом и, тем более, о «конце света».

Часто при столкновении больших тел с Землей возникают кратеры. Такие кратеры — явление не единичное. Например, в Аризоне (США) имеется кратер, диаметр воронки которого 1200 м, а глубина 200 м. Возраст этого кратера — около 5 000 лет. Более древние кратеры, естественно, разрушаются с течением времени, но сейчас их известно много. Остается прикинуть количество вероятных встреч Земли с кометами за всю историю существования нашей планеты. Подставляя в формулу (4.8) $t = 4,6$ млрд. лет, находим: $W = 37$.

Итак, мало того, что встреча Земли с кометой — событие крайне маловероятное, но даже когда такая встреча и происходит, о «конце света» говорить не приходится, так что вроде бы прав был Вольтер, смеявшийся над волнениями парижан? Оказывается, что ответ на этот вопрос не

так тривиален, как кажется, но выяснилось это лишь в самое последнее время.

В 1981 г. американский астрофизик Дж. Хиллс показал, что дело с банком Оорта обстоит не совсем так, как думали раньше, и что на самом деле этот банк является, скорее всего, лишь слабеньким ореолом (обычно его называют термином «гало»), окружающим намного более мощное хранилище комет (где их число может быть в 100, а может быть, и в 1000 раз больше), которое располагается существенно ближе к Солнцу. Этот внутренний банк комет невозможно обнаружить, потому что, в отличие от гало, кометы из него не вырываются и, следовательно, не приходят во внутренние области Солнечной системы, т. е. не обнаруживаются при наблюдениях.

Собственно говоря, еще Оорт в своей классической работе 1950 г., где он высказал гипотезу о существовании кометного резервуара на границе Солнечной системы, писал, что нельзя исключить предположения о том, что имеется еще внутренняя, более плотная часть резервуара, которую мы не регистрируем по приходу комет. Позднее американский астрофизик Ф. Уиппл показал, что некоторые необъяснимые возмущения в движении Нептуна также можно понять, если предположить, что где-то за границей орбиты Плутона имеется довольно мощный пояс комет. Однако Хиллсу удалось показать, что внутренний банк действительно может существовать и, более того, может быть источником, поставляющим кометные ядра в гало, откуда они уже приходят во внутренние области Солнечной системы и регистрируются при наблюдениях.

Количество комет во внутреннем резервуаре можно оценить лишь из различных косвенных соображений — ведь они нами не наблюдаются. Кроме того, совершенно неясен вопрос о внутренней границе «внутреннего банка», т. е. на каком расстоянии от Солнца он находится. Здесь также возможны лишь косвенные соображения. По-видимому, число комет во внутреннем банке около 10^{13} — 10^{14} , а его внутренняя граница ближе чем $a=2 \cdot 10^3$ а.е.

Если внутренний кометный банк существует (а это, по-видимому, так), то, во-первых, его наличие, оказывается, приводит к тому, что гигантские молекулярные комплексы не могут полностью «сорвать» все облако Оорта, включая его внутреннюю часть, — она слишком хорошо «прикреплена» к Солнцу вследствие своей относительной близости к нему. Поэтому наличие внутреннего сейфа заметно склоняет чашу весов в пользу точки зрения о происхождении

облака Оорта в самой Солнечной системе. Тем более, что даже потеряв, например, гало, окружающее внутренний резервуар при прохождении через молекулярный комплекс, Солнечная система вновь должна окружить себя им за счет ресурсов внутренних частей сейфа.

Во-вторых, если внутренний банк достаточно мощный и его внутренняя граница достаточно близка к Солнцу, то на пределе чувствительности современной аппаратуры можно, оказывается, пытаться наблюдать тепловое излучение заключенных в нем кометных ядер. По-видимому, не за горами тот день, когда будут получены какие-либо результаты и в этом направлении (собственно, кое-что есть и сейчас — имеются в виду результаты, полученные на спутнике ИРАС, но они пока слишком неопределенны).

К каким еще последствиям должно приводить наличие мощного внутреннего кометного банка? На этот вопрос мы с вами теперь в состоянии ответить и сами. Случайные прохождения звезд через гало, как мы знаем, дают слабый, но постоянный поток (5 комет в год) долгопериодических комет во внутренние области Солнечной системы. Спрашивается: как часто могут проходить звезды через внутренний кометный банк и к чему это должно приводить? Для ответа воспользуемся формулой (4.4), но теперь вместо $R_{\text{внешн}}$ в нее нужно подставить P_{\odot} . Предположим, нас интересуют звезды, проходящие от Солнца на расстояниях $P_{\odot} = 4 \times 10^3$ а.е. Частота их прохождений за время t равна, согласно формуле (4.4), $\nu_* = \pi P_{\odot}^2 n_* v_* t$. Значит, время между последовательными прохождениями таких звезд можно найти из этой формулы, положив в ней $\nu_* = 1$. Таким образом, находим

$$t = \frac{1}{\pi P_{\odot}^2 n_* v_*} = 4 \cdot 10^8 \text{ лет}, \quad (4.9)$$

где принято, как и прежде, $n_* = 0,1$ звезд/пк³, $v_* = 20$ км/с. Значит, звезды проходят через внутренний банк на расстоянии $4 \cdot 10^3$ а.е. от Солнца приблизительно каждые 400 млн. лет. За время существования Солнечной системы, следовательно, должно было произойти около десяти таких событий. Сколько времени должно длиться каждое событие? Мы легко получим ответ и на этот вопрос, если для приближенной оценки примем, что время прохождения звезды через внутренний банк на расстоянии P_{\odot} от Солнца равно $\Delta t \approx P_{\odot} / v_* \approx 400$ тыс. лет.

Как показал Хиллс, из сейфа «высыпаются» те кометы, большие полуоси которых $a > P_{\odot}$. Поскольку в данном слу-

чае $P_{\odot} < 2 \cdot 10^4$ а.е., то высыпание комет должно происходить из внутреннего банка, где их намного больше, чем в гало. Поток комет из внутреннего банка резервуара при прохождении через него звезд, как показали расчеты, порядка $\dot{N}_2 \approx 10^4 - 10^5$ комет/год. Какое количество из них столкнется с Землей?

Для ответа воспользуемся снова формулой (4.8), в которую теперь нужно подставить \dot{N}_2 (вместо \dot{N}_1) и Δt (вместо t). Подставляя соответствующие числовые значения, находим $W \approx 6 - 64$. Но это совершенно меняет ситуацию. Если раньше, не зная о существовании плотной внутренней части кометного резервуара, мы нашли, что за все время жизни Солнечной системы (4,6 млрд. лет) на Землю могло выпасть около 37 комет, то теперь получается другая картина.

Бомбардировка Земли кометами происходит не непрерывно, а короткими (относительно, конечно) порциями. Действительно, за все время жизни Солнечной системы могло произойти около десяти бомбардировок. Длительность каждой такой бомбардировки в $t/\Delta t$ раз короче, чем промежуток времени между ними, т. е. короче в 1000 раз. Они, действительно, относительно кратковременны. Такие массовые высыпания комет из внутренней части резервуара Хиллс назвал «кометными ливнями». Кометные ливни могут быть и более мощными, чем мы с вами прикинули. По некоторым оценкам во время такого ливня на Землю может выпасть до 200 комет!

Насколько это катастрофично? Несмотря на то, что мы говорим о кратковременности кометных ливней, нужно все-таки помнить, что кратковременность — понятие относительное. Ливни кратковременны по сравнению с промежутками времени между ними. Однако если даже на Землю в период ливня и выпадает 200 комет за 400 тыс. лет, то это значит, что частота, с которой в среднем кометы бомбардируют Землю в этот период, порядка одной кометы в 2000 лет. Конечно, для жизни больших популяций высокоорганизованных видов это не может представлять особой опасности — разве что катастрофы, подобные Тунгусской, произойдут не в малонаселенной местности. Но и в этом случае гибель всего живого, предположим, может произойти в радиусе в несколько километров примерно один раз в несколько тысяч лет, так что и речи не может быть, скажем, о вымирании человечества. Правда, Хиллс замечает, что, возможно, именно кометные ливни привели к хорошо известному факту — быстрому вымиранию динозавров на

Земле в далеком прошлом. Но это, конечно, не может быть связано непосредственно с локальной катастрофой — в противном случае динозаврам, если уж им так хотелось исчезнуть с лица Земли, нужно было бы раз в несколько тысяч лет всем сразу бросаться именно в то место, куда собирается упасть очередная комета. Таким образом, даже кометные ливни вряд ли могли привести к «концу света», если, конечно, под «концом света» понимать вымирание, скажем, всего живого на Земле или хотя бы высокоорганизованных животных и человека.

Помните, я говорил вначале о «кометной гипотезе» происхождения жизни? Может быть, наоборот, кометные ливни, высыпаящие на Землю большое количество вещества, вместо «конца света» доставляют на нее споры, которые способны дать начало органической жизни? На первый взгляд это кажется маловероятным — ведь при ударе о Землю возникает мощный взрыв, катастрофически повышается температура, так что трудно себе представить, как в таких условиях может выжить даже «низкоорганизованная биология». Но кто знает? Ведь факт доставки на Землю кометного материала остается, а проблема происхождения жизни на Земле на сегодняшний день полностью открыта.

Пусть лучше скажет поэт — только не понимайте его слишком буквально:

Я мерой был мирам,
Вмещались
В меня и облака и горы.
Я Солнцем был и был я Миром,
Я был звездой и метеором.
И я летел крошечной тьмой,
И я упал на вашу Землю,
И суждено лежать века мне
В Земле обыкновенным камнем.
И где-то вне меня осталось
Все то, что в жизнь мою вмещалось,
Сжилось, срослось, сроднилось с нею
И стало сущностью моею.
И я тоски отравлен ядом —
Как доказать, что был я Миром...
Застыли горы, где-то рядом,
И облака проходят мимо.

Вернемся, однако, к теме «конца света». Он вполне мог наступить для низкоорганизованных биологических видов, жизнедеятельность которых существенно зависит от поглощения ими солнечных лучей. Например, мощные кометные ливни могли временно уменьшать прозрачность атмосферы, а это в свою очередь могло приводить к вымиранию простейших.

Но тогда могли вымереть и травоядные ящеры, а затем, следовательно, и нетравоядные, так как после недолгой эпохи каннибализма им также станет нечего есть. К сожалению, однозначный ответ на этот вопрос на сегодняшний день отсутствует, хотя существуют геологические свидетельства того, что подобные катастрофы (сильнейшее помутнение земной атмосферы) на самом деле происходили.

Сейчас, в 1984 г., в научной печати появились сенсационные сообщения о том, что такое вымирание отдельных видов действительно обнаружено. Однако самое поразительное заключалось в том, что американские ученые Д. Рауп и Дж. Сепкоски обнаружили не просто вымирание отдельных видов, а вымирание периодическое! Как показали их исследования, оно происходило приблизительно каждые 26 млн. лет. Этот факт сам по себе ни о чем не говорит до тех пор, пока не выяснена причина этого явления. Однако эту причину удалось как будто бы обнаружить двум другим американским ученым — В. Альваресу и Р. Мюллеру из Калифорнийского университета в Беркли. Они изучили, как распределяются, согласно геологическим данным, кратеры на поверхности Земли в зависимости от их возраста, и получили поразительный результат: в течение последних 250 млн. лет кратеры возникали на Земле приблизительно с той же периодичностью! Другими словами, и вымирание отдельных биологических видов, и возникновение кратеров на Земле, по-видимому, связано с одной причиной — периодической бомбардировкой поверхности Земли каждые 26 млн. лет какими-то космическими телами.

Какими? Но ведь их не нужно даже искать — ничто так не подходит для объяснения этого явления, как кометные ливни из внутреннего банка Оорта. Ответ на этот вопрос ни у кого не вызывал сомнений. Неясно было другое: чем обусловлена периодичность в 26 млн. лет?

Было ясно, что промежутки времени в десятки миллионов лет нужно искать в астрономии — или в самой Солнечной системе, или в Галактике. В Галактике, например, Солнце пересекает галактическую плоскость приблизительно каждые 30 млн. лет. Поэтому одна из гипотез связывает периодическое вымирание видов с периодическим прохождением Солнца через галактическую плоскость. Предполагается, что в галактической плоскости могут находиться массивные облака пыли и газа, которые сильно возмущают кометный банк и вызывают кометные ливни.

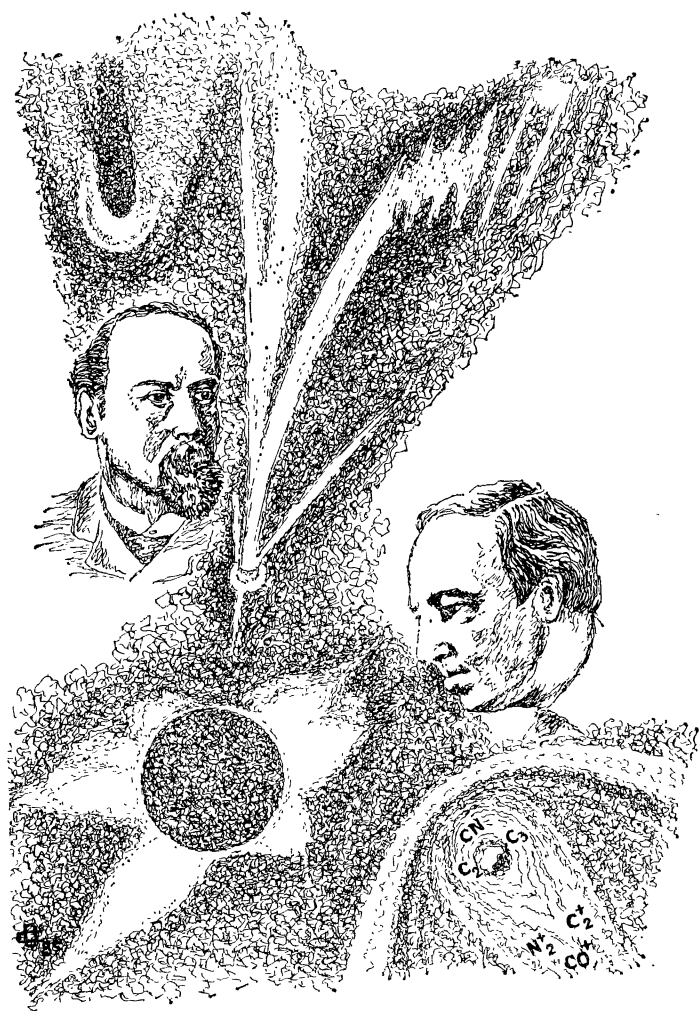
Однако значительно более привлекательной кажется другая гипотеза. Ее высказали независимо друг от друга

две группы американских ученых. Они показали, что описанное явление можно вполне естественно объяснить, если предположить, что наше Солнце является не одиночной звездой, как до сих пор думали, а компонентой двойной звезды. «Компаньонкой» Солнца должна быть небольшая невидимая звездочка с массой в несколько сотых долей (или еще меньше) массы Солнца, которая обращается вокруг Солнца по сильно вытянутой эллиптической орбите. В перигелии своей орбиты она подходит настолько близко к Солнцу, что пересекает внутренние части сейфа Оорта, порождая обильные кометные ливни со всеми вытекающими отсюда последствиями. Поскольку период, с которым «компаньонка» пролетает через кометный банк, известен ($T = 26$ млн. лет), то по формуле (3.23) элементарно вычисляем большую полуось ее орбиты: $a = 8,7 \cdot 10^4$ а. е. Последнее вымирание видов произошло около 11 млн. лет назад. Это — почти половина периода, так что сейчас напарница Солнца должна быть где-то вблизи афелия ее орбиты, т. е. почти на максимальном удалении от внутреннего кометного банка.

Итак, гипотетическое облако Оорта теперь, как видим, почти материализовалось. Но не это, конечно, главное. Если подтвердится гипотеза о том, что наше Солнце является компонентой двойной звезды, то это радикально изменит существующие представления о происхождении Солнечной системы (и, возможно, многое другое).

Вместе с тем и смешно, и грустно оттого, что мы успешно изучаем другие далекие звезды, Галактику и даже всю Вселенную, но пока не в состоянии навести порядок в собственном доме — Солнечной системе.

Американские ученые, выдвинувшие гипотезу о невидимой напарнице Солнца, предложили назвать ее Немезидой. Как вы знаете, Немезида — это древнегреческая богиня возмездия, неумолимо карающая чересчур самодовольных людей за проступки. Правда, эти же ученые пишут, что если напарница у Солнца все же не будет обнаружена, то их Немезидой будет их собственная статья. Боюсь, что в этом случае и автору, не пожалевшему места для рассказа об этих идеях, не избежать ее карающего меча.



ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОМЕТАХ

...— Столько наблюдений
И мало основательных идей.
Д. Самойлов.
«Пестель, поэт и Анна»

В гл. 6, посвященной комете Галлея, упоминается о первой удачной попытке дать физическое объяснение явлениям, наблюдаемым в кометах. Эту попытку предпринял выдающийся немецкий математик и астроном Фридрих Бессель на основе собственных наблюдений кометы Галлея во время прохождения ею перигелия в 1835 г. Теория Бесселя была чисто механической, т. е. объясняла различные структурные формы (оболочки, абрис головы кометы) на основе механики движения отдельных частиц, выделяющихся из твердого ядра. Несмотря на то, что с современной точки зрения теория Бесселя является упрощенной, она тем не менее дает качественно правильные результаты, поскольку в основу ее были заложены правильные предположения (Бессель считал, что частички в голове кометы движутся под действием двух сил: притяжения к Солнцу и отталкивания от него). Позднее (конец XIX века) механическую теорию Бесселя детально развил Ф. А. Бредихин — я уже упоминал о его классификации кометных хвостов.

Однако качественно новый шаг в понимании физических явлений в кометах был сделан лишь в конце 50-х — начале 60-х годов нашего столетия, когда стало ясно, что важнейшую, чуть ли не определяющую роль в физике кометных явлений играет солнечный ветер. Это означало, что одной механики недостаточно для понимания физики процессов, протекающих в кометах, необходимо привлечь электромагнетизм. Этим шагом вперед мы обязаны Нобелевскому лауреату Ханнесу Альфвену.

В настоящей главе я попытаюсь рассказать о сложных и многообразных физических явлениях, наблюдаемых в кометах, многие из которых до сих пор не поняты до конца.

§ 1. Голова кометы

Голова кота начала медленно таять в воздухе.

Л. Кэрролл. «Алиса в Стране Чудес»

Мы уже знаем, что вдали от Солнца кометы не имеют атмосфер. Со скоростью, в десятки раз превышающей скорость пушечного снаряда, в космическом пространстве несутся голые ядра. При приближении к Солнцу у кометы появляется атмосфера — сначала кома, а затем один или несколько хвостов. Причиной появления атмосфер у комет является Солнце.

Его влияние на кометы сказывается двояким образом. С одной стороны, кометы находятся под воздействием электромагнитного излучения Солнца, с другой — под воздействием дующего от него солнечного ветра, заполняющего все межпланетное пространство. В этом параграфе мы рассмотрим первый фактор.

По современным представлениям ядра комет — это конгломераты льдов различных химических соединений метана, аммиака, воды и многих других веществ, в которые вмерзли каменные, может быть, значительно раздробленные породы. Приближаясь к Солнцу, ядро прогревается, льды испаряются *), одновременно освобождая замороженную в них пыль, — комета обрастает атмосферой.

То, что такая картина соответствует действительности, следует из простых рассуждений. В самом деле, яркость кометы зависит от числа светящихся в ее атмосфере молекул, излучающих свет, который затем воспринимает глаз земного наблюдателя или фотопластинка. Поскольку по мере приближения к Солнцу яркость кометы растет, то это может произойти лишь за счет увеличения количества излучающих молекул, т. е. при усилении испарения с поверхности твердого ядра. Чтобы убедиться в правильности таких рассуждений, нужно произвести количественную проверку нашей гипотезы, т. е. рассчитать теоретически закон, по которому должна меняться яркость кометы по мере ее приближения к Солнцу, а затем результат сравнить с наблюдениями различных комет.

Согласие таких расчетов с наблюдениями получается вполне удовлетворительным. Значит, гипотеза об увеличении яркости кометы с приближением к Солнцу вследствие усиления испарения также верна.

*) Такое испарение прямо из твердого состояния без перехода в жидкую фазу называют возгонкой.

Итак, под влиянием прогрева солнечными лучами льды различных химических соединений испаряются, увлекая с собой пылинки. Если ядро не вращается (или вращается медленно), то на дневной стороне возникает «фонтан», бьющий в направлении Солнца (иногда механическую теорию кометных атмосфер так и называют — фонтанной). Если ядро вращается быстро, то оно прогревается более или менее равномерно со всех сторон и картина будет несколько сложнее. Нас сейчас не интересуют тонкости этого процесса, и мы рассмотрим простой случай прогрева солнечными лучами обращенной к Солнцу части поверхности ядра.

Поставим перед собой два вопроса: 1) по каким траекториям должны двигаться частички, покинувшие ядро? и 2) каковы при этом должны быть видимые очертания головы кометы? Сначала попробуем ответить на первый из них.

Для этого нужно знать силы, действующие на частицу кометной атмосферы, — независимо от того, пылинка это или газовая молекула. Прежде всего, очевидно, на частичку массы m действуют гравитационные притяжения к Солнцу и к ядру кометы. Эти силы вычисляются по закону всемирного тяготения Ньютона. Ускорения, приобретаемые частичкой под действием этих сил:

$$a_{\odot} = \frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}^2}, \quad (5.1)$$

$$a_{\text{к}} = \frac{GM_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^2}, \quad (5.2)$$

где r_{\odot} — расстояние частицы до Солнца, $r_{\text{к}}$ — ее расстояние до ядра кометы.

Поперечник головы даже большой кометы порядка сотен тысяч километров, а расстояние, на которое кометы подходят к Солнцу, в сотни и тысячи раз больше. Поэтому в пределах комы сила притяжения к Солнцу практически не меняется, т. е. ускорение a_{\odot} вполне можно считать постоянной величиной. Однако $a_{\text{к}}$, как видно из формулы (5.2), есть величина переменная, зависящая от расстояния до ядра. Поэтому в разных областях комы она будет разной. Оценим сначала влияние притяжения к ядру.

Прежде всего нужно прикинуть, хотя бы грубо, каковы начальные скорости, с которыми молекулы газов покидают поверхность ядра при возгонке. Поскольку пылинки увлекаются испаряющимися газами, то можно считать, что скорости пылинок и молекул одного порядка. Рассмотрим, например, кометное ядро на гелиоцентрическом расстоянии

$r_{\odot}=1$ а. е. Предположим, что ядро излучает все поглощаемое им солнечное тепло. Тогда температура его, согласно формуле (4.6), будет равна $T=278$ К. Мы не очень ошибемся, если примем для грубой оценки, что начальные скорости испаряющихся молекул близки к средней скорости молекул в газе с температурой T , т. е.

$$v_0 \approx \sqrt{8kT/\pi m}, \quad (5.3)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Таким образом, начальные скорости молекул воды, например, должны быть, согласно формуле (5.3), порядка $v_{H_2O} \approx 0,6$ км/с. Скорости других испаряющихся молекул не должны сильно отличаться от этого значения — они также составляют сотни метров в секунду (незначительная разница в массах молекул слабо влияет на результат, так как масса входит под знак корня).

Для того чтобы рассчитать уменьшение скорости вылетающих частиц за счет притяжения ядра, нужно, вообще говоря, решить дифференциальные уравнения их движения, что потребует операций интегрирования, так как замедление, обусловленное тяготением ядра, уменьшается с расстоянием (не постоянно). Наша цель, однако, не в том, чтобы найти эти точные решения — ведь мы хотим лишь «почувствовать» числа, характеризующие это физическое явление. Попросту говоря, мы хотим знать: влияет или не влияет тяготение ядра на движение испаряющихся частиц. Займемся поэтому простой арифметикой.

Найдем скорость отрыва (параболическую скорость) частицы от кометного ядра. Мы уже знаем, что она выражается формулой (3.29). Плотность вещества ядра порядка $\rho_K \approx 1$ г/см³, радиус ядра кометы средних размеров $R_K \approx 1$ км. Значит, масса такого ядра $M_K = \frac{4}{3}\pi R_K^3 \cdot \rho_K \approx 4 \cdot 10^{15}$ г = 4 млн. т. Подставляя эти значения M_K и R_K в формулу (3.29), находим скорость, которую нужно сообщить частичке для того, чтобы ядро не могло ее удержать. Вычисляя, убеждаемся, что $v \approx 0,07$ км/с. Сравните это значение с v_0 . Ясно, что частицы покидают ядро практически свободно. По мере удаления от ядра сила притяжения к нему уменьшается как квадрат расстояния, так что в дальнейшем его влиянием тем более можно пренебречь. Поэтому из гравитационных сил, действующих на кометные частицы, остается лишь притяжение к Солнцу.

Однако, кроме силы притяжения к Солнцу, на частицы действуют и силы отталкивания, обусловленные лучевым давлением солнечного света. Сила, обусловленная дейст-

нием лучевого давления, зависит от мощности излучателя и выражается формулой

$$p = W/c,$$

где c — скорость света. Здесь W есть количество энергии, излучаемое источником в единицу времени. Например, в системе единиц СИ это ватты. Светимость нашего светила — Солнца — хорошо известна, т. е. известна величина W . Как показывает расчет, на расстоянии в 1 а. е. лучи Солнца давят на 1 см^2 перпендикулярной к ним поверхности с силой, равной $4,5 \cdot 10^{-5}$ дин. Сила лучевого давления убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Поэтому на расстоянии r_{\odot} на сферическое тело радиуса R действует сила

$$F_{\text{л}} = 4,5 \cdot 10^{-5} \frac{4\pi R^2}{r_{\odot}^2},$$

где расстояние r_{\odot} выражено в а. е. С другой стороны, сила притяжения к Солнцу, согласно формуле (5.1), на том же расстоянии равна $F_{\text{т}} = ma_{\odot} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho a_{\odot}$, где ρ — плотность тела. Отсюда находим отношение силы лучевого давления к силе притяжения к Солнцу, которое, по принятой в кометной астрономии традиции, обычно обозначают как $1 + \mu$. После подстановки числовых значений G и M_{\odot} найдем

$$1 + \mu = F_{\text{л}}/F_{\text{т}} = 6 \cdot 10^{-5}/R. \quad (5.4)$$

Обратите внимание на крайне существенное обстоятельство: отношение $F_{\text{л}}/F_{\text{т}}$ не зависит от расстояния до Солнца r_{\odot} — эта величина сокращается. Отношение сил зависит лишь от плотности ρ и размера тела R . В формуле (5.4) принято $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ и R выражается в сантиметрах.

Из формулы (5.4) следует важный вывод: пылинки размерами $R < 6 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ отталкиваются Солнцем. Вылетев из ядра и пролетев по инерции какое-то расстояние по направлению к Солнцу, они должны в конце концов повернуть назад под действием лучевого давления. Именно вследствие этого эффекта и образуются пылевые хвосты комет. На ядро кометы и крупные частицы лучевое давление оказывает настолько слабое влияние, что им смело можно пренебречь. Что же касается молекул газов, то к ним, разумеется, формула (5.4) неприменима. Почему это так, я поясню дальше. Кроме того, если пылинки имеют размеры, сравнимые с длиной волны падающего на них света, то возникает явление дифракции — огибание частицы световой волной, что

приводит к существенному уменьшению отталкивательной силы. Мы этот эффект обсуждать не будем.

Теперь можно попытаться определить траектории выброшенных из ядра частичек, т. е. ответить на первый из поставленных выше вопросов. Поместим начало координат O в точку нахождения кометы на ее орбите (рис. 27), ось Ox направим по продолженному радиус-вектору, т. е. по прямой, соединяющей Солнце и комету, в направлении, противоположном направлению на Солнце. Ось Oy направим

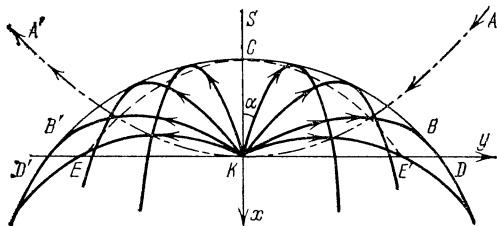


Рис. 27. Фонтан, бьющий из ядра. Огибающая струек $D'B'CBD$ и сами струйки — параболы. S — Солнце, K — кометное ядро; AA' — орбита кометы; ECE' — цепная линия. Начало прямоугольных координат (O) — в точке нахождения кометного ядра (K)

в сторону, противоположную направлению движения кометы на орбите. Система наших прямоугольных координат совпадает с плоскостью орбиты кометы.

Пусть частица покидает ядро с начальной скоростью v_0 , вектор которой направлен под углом α к оси Ox (см. рис. 27). Проекция этого вектора на ось Ox есть, следовательно, $v_{0x} = -v_0 \cos \alpha$, а проекция на ось Oy равна $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$. Поскольку в направлении оси Oy на частицу не действуют никакие силы, то, очевидно, путь, пройденный ею в этом направлении за время t , есть:

$$y = v_0 t \sin \alpha. \quad (5.5)$$

Вдоль оси Ox действуют две силы: притяжение к Солнцу и отталкивание от него вследствие лучевого давления. Обозначим результирующее ускорение, которое приобретают частицы в этом направлении через $a_{рез}$. Тогда по определению

$$a_{рез} = a_{л} - a_{г} = a_{\odot} \left(\frac{a_{л}}{a_{\odot}} - 1 \right) = a_{\odot} \mu. \quad (5.6)$$

Мы учли также, что, согласно формуле (5.1), $a_{г} = a_{\odot}$.

Выше я уже объяснил, почему в пределах головы кометы ускорение можно считать практически постоянным. Из формулы пути, пройденного телом при равномерноускоренном движении, находим, что через время t частица окажется на расстоянии

$$x = -v_0 t \cos \alpha + a_{\odot} t^2 / 2. \quad (5.7)$$

Чтобы найти математическое уравнение траекторий, по которым летят частицы, нужно из формул (5.6) и (5.7) исключить время. Находим t из формулы (5.6) и подставляем его в формулу (5.7). Результат таков:

$$x = -y \operatorname{ctg} \alpha + \frac{a_{\odot} y^2}{2v_0^2 \sin^2 \alpha}. \quad (5.8)$$

Уравнение (5.8) описывает параболу — уже знакомую нам по гл. 3 кривую. Итак, показанные на рис. 27 траектории выброшенных из ядра частиц являются параболой. Внешне картина, изображенная на рис. 27, действительно похожа на бьющий из ядра фонтан.

Для того чтобы ответить на второй вопрос, нужно найти форму кривой, огибающей параболы, по которым летят частицы в голове кометы. На рис. 27 это кривая $B'SB$. Она, оказывается, тоже является параболой с фокусом в кометном ядре.

До сих пор мы рассматривали ситуацию в плоскости орбиты кометы. Однако ясно, что вылетающие из ядра частицы образуют «пространственный фонтан». Поскольку приведенные выше рассуждения можно повторить для любой другой плоскости, содержащей прямую SK , то, очевидно, вся картина должна быть симметрична относительно этой прямой. Значит, очертания комы (или оболочки) мы получим, если найдем поверхность, образованную вращением огибающей $B'SB$ вокруг оси симметрии — прямой SK . Пространственная фигура, которая при этом получается, носит название параболоида вращения; она показана на рис. 28.

Соответствует ли эта картина наблюдаемой? Качественно — да, количественно — нет.

Абрис комы и оболочек, как правило, не параболический, а более крутой. Скорее, он близок не к параболоиду вращения, а к фигуре, образованной вращением цепной линии вокруг оси симметрии — прямой SK (рис. 27, 28). Этот факт установил еще Бонд, измеряя очертания оболочек кометы Донати в 1858 г. (см. рис. 10). Цепная линия — это кривая, форму которой принимает тяжелая цепь или

нить, подвешенная на двух опорах и провисающая под действием собственного веса (штриховая кривая ECE' на рис. 27).

Кроме того, геометрия комы или оболочек меняется со временем и зависит от расстояния кометы до Солнца.

Напомню также о явлении «захлопывающихся» оболочек, наблюдавшемся Эддингтоном у кометы Морхауза в 1908 г. (см. гл. 2, § 1), а позднее и у других комет.

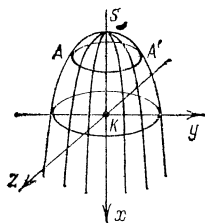


Рис. 28. Параболоид вращения

Все это говорит о том, что на самом деле явления, протекающие в голове кометы, сложнее, и таким простым способом, каким мы пытались их объяснить, это сделать невозможно, хотя основные качественные закономерности нам все же удалось уловить.

Кое-что можно учесть и в рамках самой механической теории. Например, исходные формулы (5.6) и (5.7), из которых в дальнейшем мы получали геометрические очертания комы, основаны на неявно сделанном предположении, что все частицы покидают ядро одновременно в момент времени $t=0$ (положите в этих формулах $t=0$ и вы получите: $x=y=0$, т. е. точку нахождения ядра), хотя достаточно очевидно, конечно, что на самом деле этот процесс растянут по времени. Кроме того, мы считали μ одинаковым для всех частиц, а это не так, если имеется набор пылинок различных размеров, что со всей очевидностью следует из формулы (5.4). Поэтому полученная нами геометрия может хорошо описывать какую-либо одну оболочку, которая, например, образована почти одновременно выброшенными из ядра (скажем, в момент вспышки) пылинками примерно одинаковых размеров. Когда же речь идет об очертаниях комы или более сложных случаях образования оболочек, все перечисленные факторы нужно учитывать, а это может заметно нарушить стройность сделанных нами выше теоретических построений.

Однако более существенным моментом является, скорее, не уточнение деталей механики движения частиц, а учет электромагнитных явлений, возникающих при обтекании комет солнечным ветром.

Обсудим теперь

§ 2. Хвосты комет

...если тело кометы не служит видимым признаком гнева божьего, то хвост ее очень может им служить.

Д. Бернулли. «Система комет»

Приближаясь к Солнцу, ядро прогревается, льды испаряются, одновременно освобождая замороженную в них пыль,— комета обрастает атмосферой. Под действием лучевого давления возникают хвосты (II и III типов).

По яркости кометы можно судить о плотности материи головы и хвоста, которая очень мала. Например, в хвостах I типа плотность не превышает 1000 частиц в 1 см^3 . Такая же плотность наблюдается в периферических частях головы. По мере приближения к ядру плотность возрастает и у ядра достигает иногда 10^{12} — 10^{14} частиц в 1 см^3 .

Посмотрим, как механическая теория представляет себе образование хвостов. Если бы не отталкивательные силы Солнца, то хвост кометы вообще бы не развивался. Ведь для этого необходимо, чтобы материя головы начала двигаться относительно твердого ядра, а это возможно лишь, если на материю головы будут действовать силы, не действующие на ядро.

Пылинки имеют размер порядка $0,00001 \text{ см}$, и поэтому лучевое давление может придать им достаточно большое ускорение относительно ядра. Например, если плотность вещества пылинки порядка 1 г/см^3 , то ускорение пылинки размером $0,00001 \text{ см}$ под действием лучевого давления составит 4 см/с^2 (если пылинка отражает весь падающий на нее свет). Чем меньше и легче пылинка, тем сильнее она ускоряется, чем тяжелее и больше — тем медленнее.

Таким образом, пылинки различных размеров по-разному отталкиваются Солнцем и поэтому движутся с различными ускорениями.

С молекулами дело обстоит сложнее. Чтобы вычислить ускорение, которое получает молекула под действием падающего на нее солнечного света, нужно рассуждать так.

Когда молекула поглощает квант солнечного света, она получает толчок в сторону, противоположную Солнцу, и переходит в возбужденное неустойчивое состояние с избытком энергии. От полученной порции энергии молекула избавляется, излучая ее и вновь переходя в прежнее устойчивое состояние.

Однако выброс излишка энергии происходит каждый раз в различных, совершенно случайных направлениях. По-

этому толчки при отдаче, которые испытывает молекула в момент излучения, происходят в самых разнообразных направлениях и в среднем компенсируют друг друга.

Неуравновешенным остается лишь толчок, полученный при поглощении солнечного кванта. Значит, под действием таких толчков молекулы постепенно ускоряются и летят в сторону от Солнца, образуя хвост. Самое большое ускорение, которое может получить молекула, не превышает $56a_{\odot}$.

Обычно ускорения кометных частиц (пылинок или молекул) принято характеризовать величиной $1+\mu$, о которой выше уже говорилось. Это есть ускорение отталкивания $a_{\text{л}}$, выраженное в долях ускорения, с которым частицы притягиваются к Солнцу, a_{\odot} .

Наблюдения кометных хвостов показывают, что значение $1+\mu$ заключено обычно в пределах от 0,1 до 1000.

При движении кометы по орбите молекулы и пылинки различных размеров, двигаясь с различными ускорениями, в неодинаковой степени отклоняются от прямой Солнце — комета *SK* (см. рис. 12), образуя несколько типов хвостов.

Первая классификация хвостов по величинам отталкивательных ускорений, действующих в них, и, следовательно, по степени искривленности была, как упоминалось в гл. 2, проведена Ф. А. Бредихиным и сохраняет свое значение и сейчас.

Все виды хвостов, по Бредихину, можно разделить на три типа (рис. 12). Первый тип — прямые, часто струйчатые, волнистые, почти не отклоняющиеся от направления Солнце — комета, узкие хвосты, в которых действуют очень большие ускорения (рис. 13). В хвостах I типа значение $1+\mu$ достигает 200, а в некоторых случаях — даже нескольких тысяч (т. е. отталкивание в сотни или тысячи раз превышает притяжение к Солнцу).

II тип — широкие, искривляющиеся против движения, значительно отклоненные от прямой Солнце — комета хвосты. Им соответствует значение $1+\mu \approx 1-20$, т. е. отталкивание приблизительно равно притяжению к Солнцу.

III тип — короткие, сильно искривленные и отклоненные, широкие, слабые хвосты с $1+\mu \approx 0,1-0,3$. Здесь частички движутся главным образом под действием солнечного притяжения, лишь слегка ослабленного отталкиванием.

Однако сейчас же возникают вопросы. Почему наблюдается такая разница в ускорениях? Из чего состоят хвосты различных типов?

Малые ускорения хвостов III типа обусловлены скорее всего тем, что хвосты этого типа состоят, по-видимому, из тяжелых, относительно крупных пылевых частиц, на которые лучевое давление оказывает сравнительно слабое влияние.

Иначе обстоит дело с хвостами II типа. В зависимости от физических свойств и размеров частиц, образующих эти хвосты, у них будут различные значения $1+\mu$.

Если пылинки по своим свойствам близки к металлам, то падающий свет будет почти полностью отражаться от них и значение $1+\mu$ может быть велико. Если же пылинки диэлектрические, то максимальное значение $1+\mu$ не может превышать 2,5. Это связано с тем, что, отражая свет, пылинка испытывает отдачу и ускоряется подобно тому, как вратарь, отбив сильный удар футбольного мяча, сам может оказаться в сетке ворот.

В расчетах учитывалась также дифракция, ибо с уменьшением размеров пылинки сильнее сказывается огибание ее световой волной, и давление на пылинку уменьшается. Так как диэлектрическое строение пылинок более вероятно, то нужно думать, что хвосты II типа состоят главным образом из газовых молекул. Имеется и другая точка зрения, согласно которой хвосты II типа имеют смешанную (газ и пыль) природу.

Труднее объяснить ускорения хвостов I типа. Действительно, пылинки могут приобрести ускорение под действием лучевого давления самое большое — $(2-3)a_{\odot}$ (если они диэлектрические), газовые молекулы — $56a_{\odot}$. Но как в таком случае понять происхождение ускорений порядка $(200-1000)a_{\odot}$, наблюдаемых в хвостах I типа?

Для этого необходимо было выяснить природу вещества, образующего тот или иной тип хвоста. На помощь пришел спектральный анализ.

Раскаленные газы, жидкие и твердые тела испускают непрерывный спектр излучения. Более холодные газы, если они состоят из атомов, излучают линейчатый спектр, а если из молекул, то полосатый, состоящий из целых наборов линий — полос.

Каждая молекула обладает особым, свойственным лишь ей одной набором полос. Так что, взглянув на спектрограмму (фотографию спектра) данного объекта, всегда можно сказать, из каких составных частей — молекул и атомов — состоит исследуемое вещество.

Выяснилось, что спектры комет чрезвычайно похожи друг на друга. В голове на фоне слабого непрерывного

спектра наблюдаются почти всегда одни и те же группы полос. Это говорит о том, что в головах комет, кроме небольшого количества пыли, имеются газы, состоящие в большинстве случаев из одних и тех же молекул. Это чаще всего молекулярный углерод (C_2), циан (CN), трехатомный углерод (C_3) и другие молекулы.

Сравнение кометных спектров со спектрами таких же химических соединений, полученными в лабораторных условиях, показывает, что газ головы должен находиться в весьма разреженном состоянии. По интенсивности полос той или иной молекулы можно судить об ее относительной распространенности, т. е. о том, в каких пропорциях по отношению к остальным компонентам данная молекула содержится в исследуемом веществе. Наиболее обильны в головах комет CN и C_2 .

Хвосты III типа имеют непрерывный спектр — это подтверждает правильность предположений об их пылевой природе.

С природой хвостов II типа пока не совсем ясно. Хотя имеющиеся спектры таких хвостов непрерывны, все же сделать вывод об их газовой или пылевой природе не представляется возможным. Неясно, что является причиной непрерывного спектра в этом случае — пылевая природа хвостов II типа или многократные наложения молекулярных полос, излучаемых газовыми молекулами, которые не удастся обнаружить из-за несовершенства оптических инструментов.

Спектры хвостов I типа не непрерывные, как в случае хвостов II и III типов, а полосатые. Оказалось, что в них присутствуют только ионизованные молекулы, главным образом ионы молекулярного азота (N_2^+), окиси углерода (CO^+) и, реже, углекислого газа (CO_2^+).

Можно было предположить, что причина аномально больших, необъяснимых лучевым давлением ускорений в этих хвостах кроется в их особой природе — ведь они состоят из ионизованных молекул, которых нет ни во II, ни в III типах хвостов. Так оно и оказалось.

Кроме того, в хвостах I типа наблюдаются и многие другие явления, необъяснимые с точки зрения механической теории. Здесь часто можно видеть спиралевидные и волновые движения, явление «захлопывания» лучей к оси симметрии хвоста, струи, выходящие из видимого ядра, и т. п. Поскольку хвосты I типа состоят из ионизованных молекул, то довольно очевидно, что объяснение этим явлениям следует искать не в механике, а в электромагнетизме — так

же, впрочем, как и в случае ряда неясных эффектов, наблюдаемых в головах комет.

Все эти сложные процессы возникают при взаимодействии комет с солнечным ветром, и хотя в принципе глобальная картина такого взаимодействия ясна, но происхождение ряда конкретных эффектов до сих пор не имеет общепризнанного объяснения. Поэтому следующий параграф можно назвать и так:

§ 3. Кометы и солнечный ветер. Нерешенные проблемы

И неясно проходим
В этот день непогожий,
Почему...

Наша звезда — Солнце — устроена так, что от нее во все стороны дует ветер заряженных частиц — в основном протонов и электронов. Концентрация частиц в этом потоке очень низка, порядка $n \approx 5$ частиц/см³ в окрестности орбиты Земли, т. е. на расстоянии 1 а. е. от Солнца, скорость его здесь же порядка $v_v \approx 350$ км/с.

Солнечный ветер возникает вследствие расширения горячей короны, окружающей фотосферу и хромосферу нашего светила. Он является совокупностью потоков плазмы, вырывающихся из различных областей Солнца и заполняющих затем все межпланетное пространство. В зависимости от того, из какой области выбрасываются потоки, они могут обладать большими или меньшими скоростями и концентрациями частиц. Поэтому солнечный ветер неоднороден. С точки зрения покоящегося наблюдателя, обтекаемого солнечным ветром, последний состоит из нерегулярно сменяющих друг друга неоднородностей: более быстрых и менее быстрых, более плотных и менее плотных.

Несмотря на то что ветер состоит из заряженных частиц, в целом он квазинейтрален. Этот термин означает, что в достаточно большом объеме суммарный электрический заряд плазмы солнечного ветра равен нулю, т. е. число положительно и отрицательно заряженных частиц приблизительно равно друг другу. Разумеется, это не так в маленьких объемах, где случайные флуктуации могут приводить к отклонению от нейтральности, но этот эффект нас интересовать не будет. Рассматривая процесс обтекания кометы солнечным ветром, этим эффектом можно пренебречь.

Конечно, понятия «большой» и «маленький» есть, как всегда, понятия относительные. Не имея возможности входить в подробности, для интересующихся приведем без доказательства лишь результат. Квазинейтральность нарушается в областях, линейные размеры которых $l \leq D$, где величина D называется радиусом Дебая. Иногда величину D называют радиусом экранирования. Это название отражает ее физический смысл.

Действительно, каждый заряд в плазме притягивает к себе заряды противоположного знака, окружая себя чем-то вроде «шубы»: протон окружает себя электронами, а электрон — протонами. Поэтому возникает эффект экранирования: сила, с которой по закону Кулона протон, например, притягивает к себе электрон, на больших расстояниях ослабляется из-за компенсирующего действия «электронной шубы», окружающей протон. На расстояниях, меньших D , эффект экранирования почти не сказывается, на расстояниях, больших, чем D , — наоборот. Именно по этой причине и получается, что квазинейтральность плазмы может нарушаться лишь в масштабах $l \leq D$.

Дебаевский радиус, как можно доказать, равен

$$D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi e^2 n}},$$

где k — постоянная Больцмана, e — заряд электрона, T — температура плазмы солнечного ветра. На самом деле из-за большой разреженности ветра температуры электронов и протонов в нем разные: температура электронов на расстоянии 1 а. е. от Солнца порядка $T_e \approx 10^6$ К, протонов — $T_p \approx 5 \cdot 10^4$ К. Подставляя в формулу для D $n \approx 5 \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 10^6$ К, находим электронный радиус Дебая $D_e \approx 31$ м (протонный дебаевский радиус меньше, так как $T_p < T_e$). Вместе с тем поперечник головы типичной кометы порядка сотен тысяч километров, так что условие $l \gg D$ выполняется с огромным запасом.

Высокоскоростные потоки, формирующие солнечный ветер, мы будем в дальнейшем для краткости называть потоками плазмы или просто «потоками». Когда Земля сталкивается с ними, возникают полярные сияния и магнитные бури. Эти потоки несут магнитное поле порядка 10^{-8} — 10^{-9} Тл, которое «вморожено» в газ потока. Электропроводность потока плазмы очень велика, так что он является хорошим проводником.

Всякое движение проводника (твердого или газообразного) через силовые линии магнитного поля индуцирует в этом проводнике ток. При достаточно большой электропроводности магнитное поле индуцированного тока складывается с начальным магнитным полем, так что силовые линии результирующего поля движутся вместе с потоком плазмы, будучи как бы приклеены или вморожены в проводящую среду.

Этот «принцип вмороженности» имеет место не только в потоках солнечного ветра, но вообще в хорошо проводящей электричество плазме, движущейся в магнитном поле.

Приблизительно через сутки после вспышки на Солнце обнаруживается резкое увеличение земного магнитного поля. Это явление называют внезапным началом магнитной бури. Подходя к Земле, поток не может проникнуть через силовые линии геомагнитного поля, так как из-за большой электропроводности в нем индуцируются сильные токи, на которые со стороны земного поля действуют силы, тормозящие движение потока.

Я уже упоминал о вспышках блеска, которые накладываются на регулярное увеличение яркости кометы, приближающейся к Солнцу (или регулярное уменьшение яркости при удалении от Солнца). Оказалось, что вспышки блеска комет хорошо коррелируют с солнечной активностью, обуславливающей структуру солнечного ветра. Например, сопоставляя вспышки комет с магнитными бурями, всегда можно проверить, совпадал ли момент прохождения кометы через поток, вызывающий бурю, с моментом вспышки. Такие сопоставления были проделаны. Исследования дали положительные результаты — земные магнитные бури и вспышки блеска комет вызываются одними и теми же потоками частиц.

Казалось бы, это естественно. Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что причины такой корреляции не очень понятны. Действительно, вспышки обусловлены выбросом материи из кометного ядра. Однако потоки плазмы солнечного ветра до ядра не доходят, потому что концентрация молекул вблизи него очень высока и солнечный ветер, как показывают простые числовые оценки, «застревает» приблизительно на расстоянии 1 000 км (иногда на расстоянии 100 км) от кометного ядра.

Масса выброшенной из ядра материи при вспышке яркости оценивается приблизительно значением $M \approx 5 \cdot 10^7$ кг, скорость расширения пылевой оболочки порядка $v \approx 0,2$ км/с. Значит, энергия, выделяющаяся при вспышке, близка к $E = Mv^2/2 \approx 10^{12}$ Дж. Следовательно, если бы ветер даже дошел до ядра (не «застрял» бы раньше в кометной атмосфере), то он смог бы отдать ядру энергию

$$E = \frac{1}{2} m_p n v_v^2 \pi R_K^2 v_v t, \quad (5.9)$$

где m_p — масса протона, t — время, в течение которого данная неоднородность ветра взаимодействует с ядром. Примем $n = 5$ см⁻³, $v_v = 350$ км/с, $R_K = 1$ км и $t = 1$ ч. Подставляя все эти значения в формулу (5.9), найдем $E \approx 1,9 \cdot 10^6$ Дж. Этой энергии, как видим, недостаточно, чтобы вызвать вспышку.

Однако я уже писал, что солнечный ветер «застревает» на расстоянии около 1000 км от ядра. Сколько же энергии при этом может он передать кометной атмосфере? Очевидно, снова нужно использовать формулу (5.9), но πR_K^2 следует заменить на πR_1^2 , где $R_1=1000$ км. Тогда из формулы (5.9) находим $E=1,9 \cdot 10^{12}$ Дж. Такой энергии как раз хватает на то, чтобы обеспечить вспышку яркости. Однако вопрос состоит в том, каким образом энергия передается ядру. Мы этого не знаем. Вот вам первая из нерешенных на сегодня проблем физики комет.

Молекулы в атмосфере кометы распределены неравномерно — их концентрация максимальна у ядра, где она порядка 10^{12} — 10^{14} см $^{-3}$. На периферии комы концентрация молекул на десять порядков ниже, т. е. здесь она близка к 10^2 — 10^3 см $^{-3}$.

Для сравнения напомним, что в 1 см 3 идеального газа при нормальных условиях содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Таким образом, выражение французского астронома Бабинье «кометы — это видимое ничто» теперь становится понятным и на языке цифр. Поскольку концентрация молекул довольно быстро уменьшается с увеличением расстояния до ядра, то, значит, в разных частях головы кометы длина свободного пробега молекул разная.

Оказывается, на расстояниях, меньших 1000 км от ядра, атмосфера комы представляет собой, как говорят, столкновительный газ, а при $r > 1000$ км — это газ бесстолкновительный, в котором молекулы летят свободно, без столкновений друг с другом.

Хорошо известно, что когда тело движется в воздухе, например, со сверхзвуковой скоростью, то перед ним возникает ударная волна. Ее называют отошедшей или головной ударной волной. Мы часто бываем свидетелями такого явления, когда реактивный самолет переходит через звуковой барьер (т. е. набирает скорость, большую скорости звука в воздухе), — мы слышим резкий звук, похожий на взрыв. Если это происходит близко от жилых строений, то иногда могут даже вылететь стекла из окон под влиянием ударной волны. Скорость звука в газе с точностью до малосущественного коэффициента, близкого к единице, приблизительно равна (численно) тепловой скорости молекул в данном газе. Например, все знают, что скорость звука в воздухе при нормальных условиях ($t=0^\circ\text{C}$, $P=1$ атм) близка к 330 м/с. Вычисляя тепловые скорости молекул (скажем, CO_2) при температуре $t=0^\circ\text{C}$, найдем из формулы (5.3) $v_0 \approx 470$ м/с.

Итак, скорость звука в кометной атмосфере должна быть близка к v_0 , т. е. к сотням метров в секунду, а относительная скорость кометы и солнечного ветра — сотни километров в секунду. Значит, при движении кометы в солнечном ветре в нем должна возникать головная ударная волна? Двадцать пять лет назад на этот вопрос следовало бы ответить отрицательно! Дело в том, что солнечный ветер является такой же бесстолкновительной средой, как и внешние части комы, а ударные волны возникают в достаточно плотном газе (в воздухе, например), где столкновения молекул часты.

Для того чтобы в газе могла распространяться звуковая или ударная волна, он должен обладать упругостью — соседние слои газа должны передавать друг другу импульс, а это возможно лишь тогда, когда молекулы сталкиваются. В противном случае соседние слои газа проходят друг сквозь друга без какого-либо взаимодействия. Поэтому, несмотря на то, что комета летит в солнечном ветре со сверхзвуковой скоростью, ударная волна возникать, казалось бы, не должна.

В действительности ударная волна возникает, и это происходит потому, что и ветер, и кома являются не просто газами, а газами ионизованными, т. е. обе среды имеют плазменную природу. То, что солнечный ветер является плазмой, известно из прямых космических экспериментов. О химическом составе комы мы судим, как уже говорилось, по ее спектрограммам. Они показывают, что вблизи ядра (в радиусе все тех же 1000 км) имеется много ионизованных молекул (CO^+ , N_2^+ , CO_2^+), эти же ионы наблюдаются и в хвостах I типа. В более внешних частях комы ионов обыкновенно не видно — по-видимому, их полосы «забиваются» более интенсивными излучениями нейтральных молекул. Впрочем, известны примеры, когда вся кома светилась только в полосах ионов CO^+ (излучения нейтральных молекул вообще отсутствовали). Так было в случае уже не раз упоминавшейся кометы Морхауза 1908 г., у которой Эддингтон наблюдал захлопывающиеся оболочки, так было и в случае кометы Хьюмасаона 1962 VIII.

Поэтому взаимодействие солнечного ветра с кометой — это не просто взаимодействие двух бесстолкновительных газов, а взаимодействие двух плазменных сред, причем крайне важным обстоятельством является то, что солнечный ветер несет с собой магнитное поле.

Рассмотрим физику возникающих при этом явлений. Прежде всего напомним, что силовые линии магнитного поля «вморожены» или «приклеены» к веществу потока. Сами

силовые линии аналогичны упругим нитям (натянутая нить или резинка стремится выпрямиться при насильственном отклонении ее от прямолинейной формы).

Так же ведет себя и силовая линия. Пока комета еще не вошла в поток, имеет место картина, приведенная на

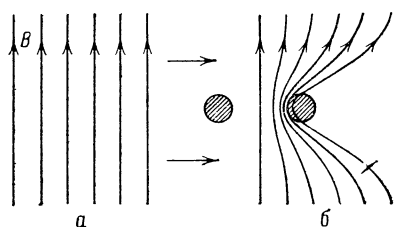


Рис. 29. Схематическое изображение изгиба силовых линий магнитного поля при вхождении кометы в поток солнечного ветра (согласно Х. Альфвену): а) положение до столкновения; б) деформация силовых линий под давлением кометы

рис. 29, а. При вхождении в поток газ головы, если он хоть частично ионизован, вытесняет силовые линии поля, «вмерзшего» в поток (рис. 29, б).

Почему голова кометы вытесняет силовые линии потока? Дело в том, что силовые линии магнитного поля, будучи «приклеены» к веществу потока, в то же время никак не связаны с газом головы. Поэтому ионизованная часть кометного газа, состоящая из

электронов и ионов, влетает с огромной скоростью порядка 350 км/с в поток и, не имея возможности просочиться через силовые линии, давит на них, заставляет изгибаться. В результате возникает картина, показанная на рис. 29, б. Эти идеи были развиты Х. Альфвеном.

В конечном итоге очертания головы совпадут с формой, которую примет силовая линия под давлением кометы. Эта нагрузка распределена по длине силовой линии так же, как, например, распределена нагрузка по длине тяжелой и упругой нити, провисающей между двумя опорами под действием собственного веса. Такая нить принимает форму цепной линии, и, следовательно, такую же форму примет магнитная силовая линия под давлением кометного газа. Но в таком случае очертания головы также должны быть цепной линией. Помните, я уже писал об этом в гл. 4, § 1. Так, по-видимому, разрешается одна из загадок, с которой не могла справиться механическая теория.

Когда заряд влетает в магнитное поле, на него начинает действовать сила, направленная перпендикулярно к скорости. Поэтому работы она не совершает, но изменяет первоначальное движение заряда так, что он начинает вращаться вокруг магнитной силовой линии.

Вращение происходит по окружности, если начальная скорость перпендикулярна магнитному полю, если же она

составляет с полем некоторый угол, отличный от 90° , то заряд движется по спирали, навивающейся на эту силовую линию. Такое вращение называется ларморовым (по имени ученого, исследовавшего этот процесс). Радиус окружности, по которой вращается заряд в поле, носит название ларморова радиуса, а частота вращения — ларморовой частоты.

Когда поток солнечного ветра налетает на голову кометы, его магнитное поле с нейтральными частицами не взаимодействует, а ионизованные частицы закручиваются в поле потока. Так как поле приклеено к потоку и движется вместе с ним, то и закрученные полем частицы увлекаются потоком, несмотря на то, что с частицами потока они не сталкиваются.

Ширина потока средней мощности в 100—1000 раз превышает диаметр головы кометы и примерно в 100 тысяч раз — ларморов радиус ионизованной кометной молекулы. Это означает, что кометный ион может проникнуть в поток всего лишь на 0,00001 его ширины, или, грубо говоря, он туда вообще не проникает. Значит, магнитное поле потока — это как бы двужущаяся магнитная стенка, прозрачная для нейтрального газа и начисто выметающая ионизованный газ из головы.

По мере продвижения к ядру «магнитная стенка» «сгребает» все больше ионов, так что плотность «налипшего» на нее газа все увеличивается; это приводит к усилению блеска в районе «стенки», и земной наблюдатель видит появление оболочки. Толщина оболочки определяется слоем, в котором задерживается «сгребаемый» газ, т. е. радиусом ларморового вращения иона. Чем больше газа оседает в этом слое, тем ярче и резче выглядит оболочка.

Из многочисленных наблюдений Эддингтона известно, что с приближением к центру головы яркость и резкость оболочек возрастала. Это вызывалось тем, что возрастала плотность осевшего на «стенке» газа. Увеличение плотности (сжатие) приводит к повышению температуры и разогреву кометного газа. Одновременно с повышением температуры растет давление.

Таким образом, по первоначально «холодному», невзмущенному кометному газу, в результате столкновения с потоком, будут распространяться скачки плотности, давления и температуры (возмущение), причем из-за непрерывного увеличения количества «сгребаемого» газа фронт возмущения будет опережать границу раздела.

Возникновение и распространение по первоначально спокойному газу таких скачков называется ударной волной.

Однако в отличие от обычной ударной волны, распространяющейся в обычном столкновительном газе (воздухе, например), такая ударная волна называется бесстолкновительной. Явление бесстолкновительной ударной волны есть явление глубоко нетривиальное. Оно наблюдалось в геофизике, а также в установках для экспериментов с горячей плазмой, используемых в проблеме управляемого термоядерного синтеза, и долгое время ставило в тупик исследователей.

Среди тех, кто впервые доказал, что в бесстолкновительной плазме в отличие от бесстолкновительного нейтрального газа могут формироваться ударные волны благодаря упругости магнитного поля, был советский физик Р. З. Сагдеев. С этим открытием связана новая эра в физике ионизованного газа.

Когда стало ясно, что, несмотря на крайнюю разреженность атмосферы кометы и солнечного ветра, при их взаимодействии могут возникать ударные волны, автор этой книжки и американский астрофизик Я. Аксфорд независимо друг от друга рассмотрели процесс обтекания комет солнечным ветром уже с новых позиций. Сейчас, конечно, слова «с новых позиций» звучат немного нелепо, так как дело происходило более двадцати лет тому назад. Тем не менее основные физические черты картины обтекания ветром атмосферы кометы остались с тех пор неизменными, хотя наши знания об этом процессе стали, конечно, намного глубже.

Эти основные черты таковы. Существует граница раздела, отделяющая плазму ветра от плазмы кометной атмосферы, которую иногда называют ионосферой кометы, эту границу раздела называют контактной поверхностью. Перед контактной поверхностью в солнечном ветре бежит головная ударная волна. Между контактной поверхностью и ядром может возникать внутренняя ударная волна в самой кометной атмосфере. Физическую картину, возникающую при обтекании кометы солнечным ветром, можно увидеть на рис. 30.

Один из до сих пор неясных вопросов, ответ на который мы получим, возможно, после миссии к комете Галлея, заключается в том, что неизвестно, проникает ли магнитное поле солнечного ветра через контактную поверхность внутрь кометной ионосферы. Другой открытый на сегодняшний день вопрос состоит в том, что совершенно неясны причины ионизации молекул в кометах. Об этом стоит, пожалуй, рассказать чуть подробнее.

Для того чтобы ионизовать молекулу (или атом), нужно лишить ее хотя бы одного из электронов. Такой процесс может произойти либо при столкновении молекулы со световым квантом — фотоном, — либо при столкновении с электроном или ионом.

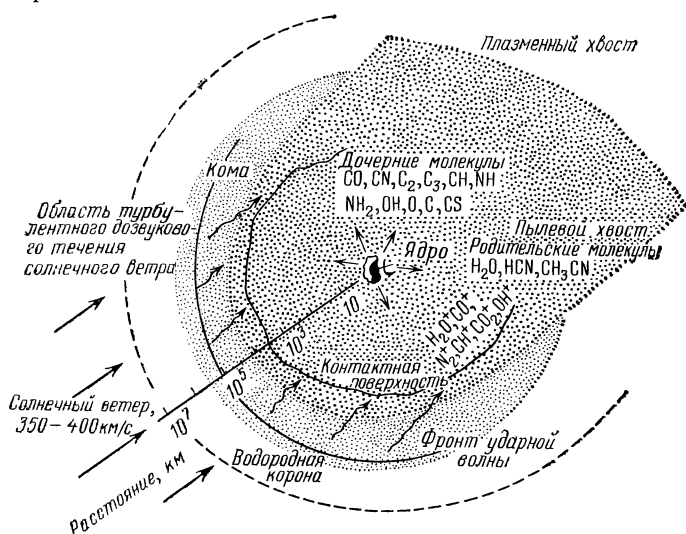


Рис. 30. Схема физико-химической структуры головы кометы и обтекания ее солнечным ветром

Электрон может покинуть молекулу, если он получит извне энергию, достаточную для преодоления притяжения к положительно заряженному ядру. Это энергия ионизации. Обычно употребляется термин «потенциал ионизации». По существу это та же энергия, но выраженная в других единицах измерения.

У различных атомов и молекул потенциалы ионизации могут сильно отличаться. Кроме того, различают еще потенциалы первой ионизации, второй ионизации и т. д. Это вызвано тем, что сорвать с орбиты самый внешний электрон (наиболее удаленный от ядра и, следовательно, слабее остальных к нему притягиваемый) легче, чем внутренний. Отрыв внешнего электрона называют первой ионизацией, следующего — второй и т. д. Аналогично различают и потенциалы. Ясно, что потенциал первой ионизации всегда меньше, чем второй, и т. д.

В дальнейшем речь будет идти лишь о первой ионизации, так как из спектральных данных следует, что в коме

тах наблюдаются лишь однократно ионизованные молекулы (для упрощения слово «первый» будет опущено).

Энергия светового кванта, или фотона, $E = h\nu = hc/\lambda$, где h — постоянная Планка, c — скорость света, ν — частота, λ — длина волны. Фотон может ионизовать данную молекулу только в том случае, когда его энергия E больше или, в крайнем случае, равна потенциалу ионизации этой молекулы. Энергия фотона зависит от его частоты или длины волны. В частности, коротковолновые фотоны более энергичны.

Молекулы CO, N₂ могут ионизоваться фотонами с длиной волны, меньшей 78 нм (1 нм = 10⁻⁹ м). Попадание таких фотонов в комету весьма вероятно. Излучение Солнца не ограничивается диапазоном видимого спектра (300—600 нм). Оно простирается далеко в область значительно более коротких волн. В частности, Солнце излучает достаточно интенсивное рентгеновское излучение ($\lambda = 30,4$ нм), энергии которого с избытком могло бы хватить для ионизации кометных молекул.

Однако процесс ионизации, помимо потенциала ионизации, характеризуется еще двумя важными параметрами: 1) интенсивностью ионизирующего излучения, т. е. числом частиц, вызывающих ионизацию, проходящих за 1 с через 1 см² площади на данном расстоянии от источника, и 2) вероятностью ионизации. Если первый из них не зависит от индивидуальности молекул, то второй существенно зависит.

Расчеты показали, что интенсивности солнечного электромагнитного излучения недостаточно, чтобы обеспечить наблюдаемую в кометах ионизацию.

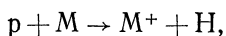
Может быть, кометные молекулы ионизируются при столкновении с электронами и протонами солнечного ветра?

При скорости 350—400 км/с, с которой движется поток солнечного ветра, энергии электрона не хватает (из-за малой массы) для ионизации характерных кометных молекул, например, C₂, CN, CO, N₂ и др. Эта энергия меньше потенциалов ионизации молекул *). Масса протона в 1838 раз больше массы электрона, поэтому его энергия, вообще говоря, достаточно велика — она превышает потенциал ионизации. Однако нужно еще учесть вероятность процесса, а она существенно зависит от сорта ионизирующих частиц.

*) Тепловой энергии солнечного ветра достаточно для ионизации.

Например, вероятность ионизации электронами максимальна при энергии последних, превышающих потенциал ионизации (примерно в 7—8 раз). При бомбардировке протонами вероятность максимальна при чрезвычайно высоких энергиях, примерно в 1000—10 000 раз превышающих потенциал ионизации. Энергия протона в потоке ветра значительно меньше, поэтому вероятность ионизации и в этом случае мала.

Существует еще один процесс, который мог, казалось бы, обеспечить ионизацию молекул в кометах. Это — так называемая перезарядка. Процесс перезарядки идет по следующей схеме:



где p — протон, M — кометная молекула.

В результате протон захватывает у молекулы электрон и становится нейтральным атомом водорода (H), а потерявшая электрон молекула становится ионом (M^+).

Процесс перезарядки требует значительно меньше энергии, чем ионизация простым ударом. Наиболее эффективно перезарядка идет при близких потенциалах ионизации реагирующих молекул, т. е. является резонансным процессом.

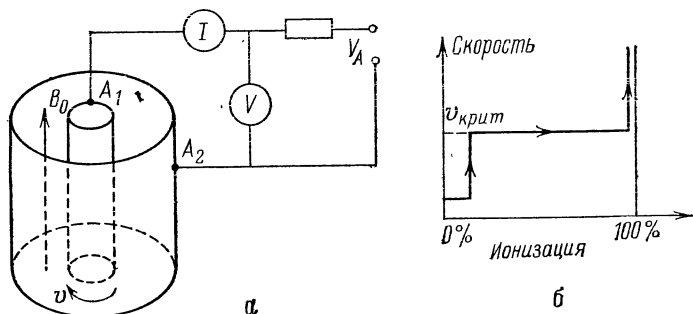


Рис. 31. а) Плазма между цилиндрами A_1 и A_2 вращается под влиянием магнитного поля B_0 и разрядного тока. б) Изменение степени ионизации и скорости вращения в зависимости от роста приложенной разности потенциалов

Однако перезарядка (как и ионизация ударом) способна образовать наблюдаемое количество ионов лишь при наличии достаточно мощного потока солнечного ветра, когда в 1 см^3 его содержится 1 000 и более частиц. Такие потоки бывают редко, чаще встречаются более слабые потоки с плотностью (1—10 частиц в 1 см^3).

Таким образом, каким-либо простым способом объяснить явление ионизации молекул в кометах не удастся. С этой точки зрения интересна работа Х. Альфвена, в которой рассказывается о результатах опытов по столкновению быстро движущейся замагниченной плазмы с нейтральным газом.

Между двумя коаксиальными цилиндрами, расположенными в магнитном поле, как показано на рис. 31, а, помещалась смесь нейтрального и ионизованного газов. Под действием приложенной к цилиндрам разности потенциалов возникал электрический разряд. На ток в магнитном поле действует сила Ампера, которая в данном случае заставляет ионизованный газ вращаться между цилиндрами. Возникает относительное движение ионизованного и неионизованного газов — ведь на последний сила Ампера не действует, и он не приходит во вращение, а покоится, как прежде, до включения тока.

Результаты эксперимента очень интересны. С увеличением разности потенциалов, приложенной к цилиндрам, сначала увеличивалась скорость вращения плазмы. Когда же скорость достигала некоторого критического значения, рост ее прекращался, и вся энергия, которая прежде шла на увеличение скорости, начинала расходоваться на ионизацию нейтрального газа (рис. 31, б).

Самое интересное заключалось в том, что критической скорости, при которой начиналась ионизация (скорость оставалась равной критической, пока нейтральный газ полностью не ионизовался, лишь после этого она снова начинала расти, как на рис. 31, б), соответствовала кинетическая энергия движения иона, равная потенциалу ионизации нейтрального атома.

Но известно, что вероятность ионизации при такой скорости очень мала. В чем же дело? По-видимому, кинетическая энергия движения ионов каким-то образом передается электронам, а электроны с такой энергией могут ионизовать атомы. Сам механизм передачи энергии пока еще не ясен.

Когда замагниченный поток солнечного ветра «продирается» через нейтральный газ кометной головы, критическая скорость превышает потенциал ионизации, так что условия опыта выполняются. Поэтому можно думать, что и в случае комет ионизация также обязана своим происхождением описанному эффекту.

Однако так ли это в действительности, мы пока не знаем, хотя и существуют теоретические указания на возможность подобного процесса. Может быть, и эта загадка физи-

ки комет получит, наконец, объяснение при встрече с кометой Галлея.

Обсудим еще вероятные причины аномально высоких ускорений в плазменных хвостах I типа, которые нельзя объяснить лучевым давлением.

Ускорения в этих хвостах обычно определяют по движению облачных образований. Заставить облако ускоренно двигаться может лишь постоянно действующая на него сила. Не является ли такой силой солнечный ветер? В настоящее время на этот вопрос можно ответить положительно, хотя и здесь пока много неясного. Прежде всего, конечно, нужно знать, как возникают облака, по которым измеряют ускорения. По-видимому, они образуются на фронте бесстолкновительной ударной волны вследствие возникающей здесь неустойчивости. Небольшое местное увеличение плотности вещества, вызванное случайными причинами (флуктуация плотности), может продавить магнитное поле на фронте волны.

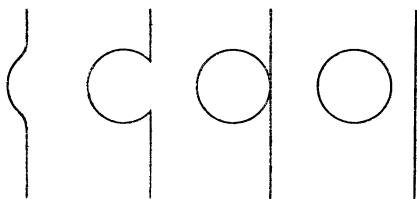


Рис. 32. Схематическое изображение образования облаков. Случайно возникшее уплотнение «продавливает» магнитное поле

Образующаяся впадина поля (рис. 32) постепенно углубляется, так что в конце концов ее края могут сомкнуться — возникнет облако со своим собственным магнитным полем. В этом же кроется причина и того, что облака расплываются очень медленно. Если бы в них не было поля, они существовали бы в хвостах меньше суток, в то время как из наблюдений следует, что время их жизни в хвостах I типа превышает неделю.

Наличие внутри облака магнитного поля приводит к тому, что электроны и ионы, закручиваясь вокруг магнитных силовых линий, медленно увеличивают радиус своего вращения по мере уменьшения поля в облаке. Поле уменьшается, так как его энергия расходуется на нагрев плазмы. Этот расход невелик, поэтому и расширение облака происходит медленно.

Можно сказать, что чрезвычайно высокие, необъяснимые лучевым давлением ускорения в хвостах I типа обусловлены передачей импульса от протонов потока к кометным ионам через магнитное поле.

Если бы поле отсутствовало, то из-за крайней разреженности плазмы солнечного ветра и кометного газа передача импульса (ускорение) в среднем была бы очень мала, так как столкновения частиц при этом практически отсутствуют.

При наличии магнитного поля ситуация коренным образом меняется. Шарики на рис. 33 изображают слева частицы потока, справа — кометные молекулы. Тех и других слишком мало, поэтому когда поля нет, они проходят, не задевая друг друга (рис. 33, а). Присутствующее магнитное поле можно схематически изобразить пластинкой (рис. 33, б), так как заряженные частицы не могут сквозь него проникнуть. В этом случае частицы потока (левые) давят на пластину (непосредственно не сталкиваясь с кометными молекулами), а уже пластина-поле передает их давление на кометные молекулы (правые) и ускоряет их.

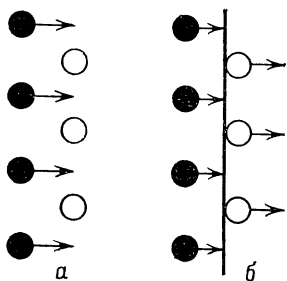
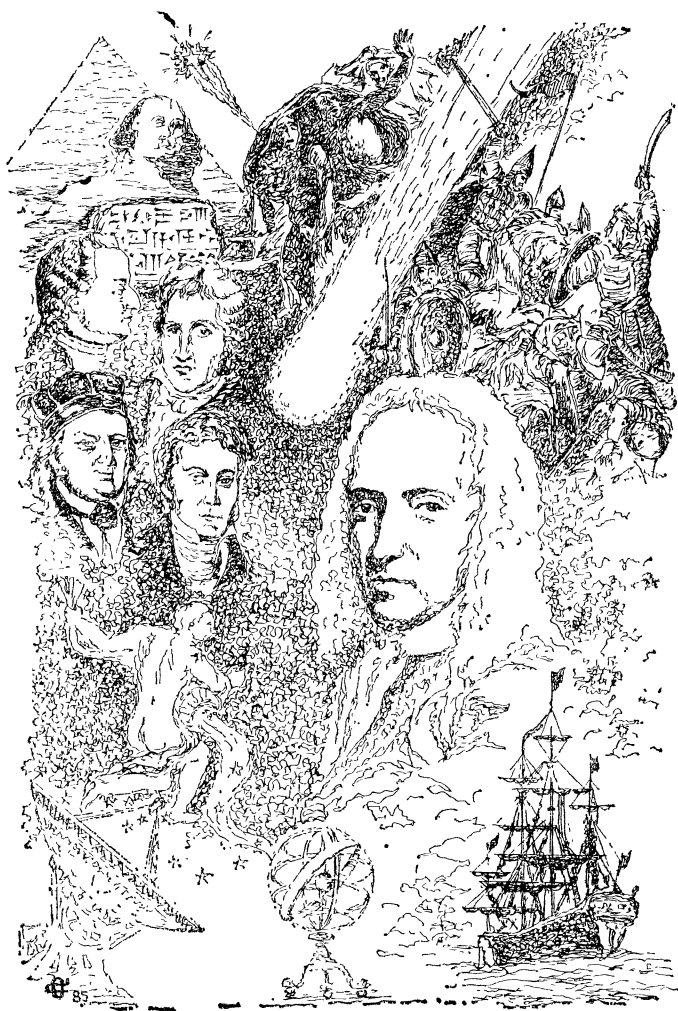


Рис. 33. Схематическое изображение передачи импульса протонами солнечного ветра кометным ионам через магнитное поле

В хвостах I типа, кроме аномально высоких ускорений, видны струи, лучи, волнообразные движения. Иногда наблюдается явление отрыва хвоста, когда он отделяется от головы и улетает прочь. Затем с противоположной Солнцу стороны головы кометы вырастает новый плазменный хвост. Все эти явления обусловлены сложными электродинамическими процессами, возникающими при взаимном проникновении друг в друга на огромной скорости плазм солнечного ветра и кометы. Сейчас процесс такого взаимодействия моделируют на компьютерах, так как физика яв-

лений здесь очень сложна и «вручную» не все можно понять даже качественно.

Я достаточно подробно описал трудности, возникающие при попытках понять причины вспышек яркости комет, причины ионизации молекул в коме; рассказал о явлениях, не имеющих пока общепринятого объяснения. Конечно, это далеко не полный перечень неясных на сегодняшний день вопросов. Надеюсь, однако, что читатель по этим примерам сумеет составить хоть какое-то представление о проблемах, ждущих своего решения в физике комет.



КОМЕТА ГАЛЛЕЯ

Где ты была? Ответа
Не слышу на вопрос.

А. Тарковский

§ 1. «По эллипсу нестись гигантскому в эфире...» *)

Сейчас, в 1984 г., к комете Галлея снаряжаются экспедиции, а когда книга увидит свет, космические аппараты уже будут в пути. Почему экспедиции отправлены именно к комете Галлея, а не к какой-либо другой комете **)? В первую очередь, конечно, здесь существенны научные соображения, о которых я расскажу позднее. Но так уж получилось, причем не совсем по воле случая, что первые в истории миссии человечества к «небесным гостям» направляются к самой, пожалуй, знаменитой в истории астрономии комете — комете Галлея. Сейчас я попытаюсь показать, что это действительно так.

Путешествуя по Франции и Италии в 1680 г., 24-летний английский астроном Эдмунд Галлей наблюдал странное явление: комета, которую он некоторое время назад видел приближающейся к Солнцу, теперь от него удалялась. Хочу напомнить, что хотя законы Кеплера для планет уже были установлены, но кометы считались небесными телами, летящими прямолинейно. И Кеплер, и Галилей полагали, что кометы влетают в область планетной системы по прямолинейной траектории и по ней же навсегда удаляются прочь. Поэтому поведение кометы показалось Эдмунду Галлею странным ***). Галлей пытался определить путь этой

*) Вольтер, из эпиграфа к мемуару А. Клеро.

**) О миссии к комете Джакобини — Циннера см. гл. 7, § 2.

***) Справедливости ради нужно отметить, что в 1660 г. Я. Гевелий сделал совершенно правильное предположение о траекториях, по которым движутся кометы. Его гипотеза заключалась в том, что кометы вблизи Солнца движутся по параболе, а само Солнце является центром сил и фокусом орбиты. Гевелий основывается на аналогиях вполне земных: ему было известно, что брошенный камень или струя воды на Земле падают по параболе. Его, выражаясь современным языком, экстраполяция этих земных явлений на «явления небесные» была по тем временам необычайно смелой.

кометы, но сделать это ему не удалось. Можно лишь строить предположения о причинах, по которым у Галлея возникла мысль (в связи со странным поведением этой кометы?) начать внимательнейшим образом анализировать законы Кеплера — возможно, молодой английский астроном допускал, что кометы, как и планеты, подчиняются по каким-то причинам этим законам. Изучая вопрос, Галлей понял, что центростремительная сила, действующая на планеты, уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Но, во-первых, он не мог этого доказать, а во-вторых, оставался изначальный вопрос: если это так, то по какой кривой должно двигаться тело под действием такой силы? Галлей поехал в Лондон в Королевское общество и обратился к знаменитому Роберту Гуку. Это было в 1682 г. Гук намекнул, что кое-что знает, но тем не менее ответа на вопрос не дал.

Вообще говоря, у Гука были основания для намеков. За 12 лет до выхода в свет основного труда Ньютона, где были сформулированы все его законы, Гук писал:

«Для объяснения системы мира я ввожу три предположения:

1) Все тела тяготеют к их общему центру, притягивающему частицы тела, мешая им рассыпаться и привлекая к себе другие тела, которые находятся в области их влияния. Следовательно, не только Солнце и Луна влияют на движение Земли, но также и все остальные планеты.

2) Все тела, получившие некогда прямое и простое движение, продолжают двигаться прямолинейно, пока на них не подействует другая сила, изменив их путь.

3) Силы притяжения влияют тем сильнее, чем ближе тело находится к центру сил. Что касается отношения, в котором уменьшается сила с увеличением расстояния, то я не проверял этого на опыте, но когда оно будет исследовано, это окажется весьма полезным...

С их помощью астрономы приведут все движения к известным правилам, и я даю эти указания тем, кто захочет работать в этом направлении, так как сам я занят другими работами».

Легко увидеть, насколько близки положения, высказанные Гуком, к законам Ньютона. Недаром говорят, что когда в науке ситуация складывается так, что открытия должны вот-вот произойти (проблема зреет, экспериментальные факты накапливаются), то «идеи носятся в воздухе». Но все-таки гипотезы Гука не были доказаны, не были выражены в количественной форме и, вообще, не были точными законами.

В 1682 г., когда происходил разговор Галлея с Гуком, много говорили о тяготении, о важности его роли в Солнечной системе, догадывались, что именно сила тяготения заставляет планеты лететь по кеплеровым эллипсам. Но доказать этого не мог никто.

Не получив у Гука ответа на волновавшие его вопросы, Галлей поехал в Кембридж к Ньютону. Тогда в Лондоне много говорили о его выдающихся исследованиях по физике.

Галлей задал Ньютону свой вопрос: «Какую кривую должно описывать тело под действием центростремительной силы, которая уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния?» Ответ Ньютона последовал незамедлительно: «Эллипс».

«Как Вы узнали об этом?» — воскликнул изумленный Галлей.

Ньютон ответил просто: «Я вычислил».

Эта встреча положила начало дружбе этих людей, которая продолжалась всю оставшуюся жизнь *). Галлей был под большим впечатлением от встречи и просил Ньютона сообщить о своем открытии Королевскому обществу. Ньютон обещал, но не сразу исполнил обещание, так как при проверке в вычисления вкрались ошибки. Ньютон еще раз повторил вычисления и получил прежний результат, который в процессе работы дополнился многими новыми. Так возник знаменитый ньютоновский трактат «О движении», содержащий полный анализ движения по эллипсу под действием силы тяготения центрального тела. Сам Ньютон вряд ли подозревал, куда увлечет его эта работа, когда в январе 1685 г. отправил Галлею свой трактат. Получив трактат, Галлей снова поехал в Кембридж, чтобы убедить Ньютона разрешить напечатать его. Ньютон дал согласие и даже обещал прислать продолжение. Он закончил первые две книги главного труда своей жизни «Математические принципы натуральной философии» к середине 1686 г. и по просьбе Галлея прислал «Принципы» в Королевское общество, где Галлей доложил о них на первом же заседании.

Разразился скандал, так как выступил Гук и заявил, что «честь открытия всемирного тяготения» принадлежит ему. Несмотря на то, что на этом заседании Королевского общества председательствовал личный друг Гука, он при-

*) Ньютон умер в 1727 г. Галлей пережил его на 15 лет. Величие Ньютона состоит не в том, конечно, что он установил закон, по которому тела притягиваются друг к другу, хотя и это было огромным достижением. Его величие в том, что именно Ньютон провозгласил великий принцип: «Gravity is Universal», т. е. что закон всемирного тяготения есть универсальный закон, которому подчиняются абсолютно все тела, существующие во Вселенной. Английский поэт XVIII века Александр Поп посвятил Ньютону такие стихи:

Nature and Nature's laws lay hid in night:
God said: Let Newton be! and all was light.

(«Был этот мир глубокой тьмой окутан. Да будет свет! И вот явился Ньютон.») В Вестминстерском аббатстве, где захоронен Ньютон, на его надгробии можно прочесть слова: «Радуйтесь, смертные, что на Земле существовало такое украшение рода человеческого».

нял сторону Ньютона. Когда известие о происшедшем дошло до Ньютона, он настолько обиделся, что отказался печатать третью часть «Принципов», и только Галлей, с присущими ему тактом и благородством, сумел переубедить Ньютона.

Галлей предложил издать «Принципы» на собственные средства, хотя сам был не слишком богат. «Принципы» вышли в свет в мае 1687 г. тиражом 120 экземпляров. Это первое издание «Математических принципов натуральной философии» сопровождали стихи Галлея, потрясенного этим великим творением человеческого ума. Вот последние строки этой «Оды Ньютону»:

Ньютон, дверь отворивший в храм, закрытый на сто замков,
Ньютон, чье сердце чисто, постигший язык богов.
Начертанное богами прочитавший нам по слогам.
Никто из смертных не может быть ближе, чем он к богам.

Когда Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения, он поставил перед собой вопрос, ответа на который с таким нетерпением ждал Галлей, а именно: «Каковы свойства линии, которую опишет какое-либо тело при своем обращении вокруг неподвижного центра, если оно притягивается к нему с силой, прямо пропорциональной его массе и обратно пропорциональной квадрату расстояния?» Ответ был неожиданным. Эллипс, о котором говорилось в трактате «О движении», оказался лишь частным случаем линий, обладающих указанным свойством. Эти линии были открыты еще греческими математиками (см. гл. 3, § 1). Ньютон был поражен, когда увидел, что полученное им алгебраическое уравнение описывает известные еще древним грекам конические сечения — линии, получающиеся при сечении кругового конуса плоскостью, — т. е. окружность, эллипс, параболу, гиперболу (см. рис. 23).

Это был колоссальный результат! «Возможно ли, чтобы под влиянием тяготения небесные тела могли лететь в мировом пространстве по каждой из этих кривых?» — задавал себе вопрос Ньютон. Наблюдения отвечали на этот вопрос утвердительно. Планеты обращаются по эллипсам, некоторые спутники Юпитера — по окружностям. Кометы же, следовательно, могли двигаться по любой из этих линий.

Законы Кеплера получили, наконец, объяснение, правда, в несколько расширенном виде. В первом законе теперь следовало заменить слова «небесные тела движутся по эллипсам» на слова «небесные тела движутся по коническим сечениям». Второй закон остался без изменения — он применим к движению по любой из этих кривых. Третий закон

можно было распространить и на спутники планет, и на кометы (нужно только еще было учитывать поправку на массы сравниваемых тел).

Получив ответ на вопрос, Ньютон в третьей книге «Принципов» дает первую, по существу, научно обоснованную теорию комет. Он показывает, что они движутся в областях планет (т. е. дальше Луны) и становятся видимыми, когда, приближаясь к Солнцу, достигают орбит Юпитера. В перигелии же они могут достигать орбит Венеры и даже Меркурия. То, что кометы приближаются к Земле, следует из увеличения их яркости. Ньютон также оценивает расстояния до них, так как полагает, что светят они отраженным солнечным светом. Движение комет не испытывает сопротивления, считает Ньютон и пишет: «Я очень ошибаюсь, если они не обращаются вечно вокруг Солнца по таким же орбитам, как и планеты». Читатель сам может оценить это гениальное предвидение.

Однако вблизи перигелия эллипс, парабола и гипербола почти не отличаются друг от друга (см. рис. 22), поэтому орбиту кометы вблизи перигелия всегда можно считать параболической. Как мы видели (см. гл. 3, § 1), эксцентриситет параболы $e=1$, так что для определения движения в этом случае нужно меньше данных. Чтобы проверить свои выводы на основе наблюдений, Ньютон ставит перед собой задачу: определить орбиту кометы, движущейся по параболе, по трем ее наблюдениям. На самом деле Ньютон полагал, как упоминалось, что кометы движутся вокруг Солнца по гигантским эллипсам, поэтому ему заранее было ясно, что в рамках поставленной им задачи периоды обращений комет (если, конечно, они действительно движутся по эллипсам) определить нельзя. Проверить свою теорию Ньютон решил именно на комете 1680 г., которую как раз и наблюдал Галлей.

Ньютон пишет: «Решив задачу теоретически, я приложил ее к комете 1680 года: я определил геометрически и графически ее орбиту, а арифметически то же самое вычисление выполнил Галлей... Я нашел полное подтверждение теории... Наблюденные и вычисленные пути сходились так же хорошо, как сходятся обычно с наблюдениями вычисленные пути планет. Периоды обращения комет из подобных вычислений определить нельзя: их можно найти, только сравнивая пути комет, появлявшихся в различные эпохи...

Если окажется, что некоторые из них, появляясь через равные промежутки времени, описывают одинаковые кри-

вые, то надо будет заключить, что это суть последовательные появления одной и той же кометы (курсив наш — Л. М.).

Тогда мы определим ее параметр из периода обращения и найдем уже эллиптическую орбиту...

Чтобы достигнуть этого, надо вычислить пути многих комет, предполагая их орбиты параболическими, и затем сравнивать их между собой...

Именно этим путем и пошел Эдмунд Галлей. Совершив огромную работу, он собрал все имевшиеся к тому времени данные по наблюдениям 24 комет в таблицу, в которой привел вычисленные им элементы их орбит. Этот труд Галлея вышел в свет в 1704 г. Он назывался «Обзор кометной астрономии». В предисловии Галлей говорит, что свою обширную работу он предпринял для того, чтобы подтвердить правильность закона всемирного тяготения Ньютона, а также для проверки гипотезы Ньютона о том, что кометы движутся по очень вытянутым эллипсам.

Галлей пишет: «...работая над «Принципами», знаменитый Ньютон показал, что законы движения планет, открытые Кеплером, необходимо должны иметь место и для движения комет, подтвердив это на примере кометы 1680 года...

Задачу эту, достойную Эдипа, он разрешил к великому удивлению всех ученых...

Следуя по стопам великого ума, я приступил к приспособлению его геометрического метода *) к арифметическим вычислениям орбит комет, и труды мои были не напрасны...

Стремясь проверить гипотезу Ньютона, Галлей тщательнейшим образом рассчитывает и сравнивает между собой вычисленные им элементы орбит 24 комет, и здесь его ждет открытие, увековечившее его имя. Он обнаруживает, что одна из комет, а именно комета 1682 г., которую он сам наблюдал, очень похожа на комету 1607 г., которую наблюдал Кеплер, и на комету, которую наблюдал Апиан в 1531 г. Есть, правда, небольшая разница в периодах — в одном случае период равен 76 годам и 2 месяцам, во втором — 74 годам и 10,5 месяцам. Но Галлей, справедливо полагая, что эта небольшая разница может быть обусловлена воз-

*) Биографы Ньютона справедливо отмечают, что человек, знакомый с современной математикой, не в состоянии даже постигнуть степень гениальности Ньютона, который в своих исследованиях пользовался методами древней геометрии. Один из биографов Ньютона приводит совершенно замечательное сравнение: «С изумлением и любопытством созерцаем мы, потомки, это тяжеловесное оружие; оно подобно огромным ратным доспехам, которые праздно лежат среди трофеев старых дней и заставляют изумленно спрашивать, какие люди могли свободно размахивать таким оружием, когда у нас едва хватает сил поднять его».

мущающим влиянием больших планет, смело предсказывает возвращение этой кометы в 1758 г., т. е. через 76 лет.

Это была смелая гипотеза, которая могла и не подтвердиться, если бы был неправ Ньютон в своих выводах. Поэтому вопрос о том, вернется ли эта комета в 1758 г., приобрел необычайную остроту.

Комета вернулась. С тех пор она носит имя Галлея — человека, предсказавшего ее возвращение и тем самым доказавшего, что кометы так же, как и планеты, подчиняются закону всемирного тяготения и, следовательно, могут быть периодическими. Именно с этого момента наука о кометах стала наукой.



Рис. 34. Эдмунд Галлей (фотография с портрета работы Томаса Мюррея, принадлежащего Королевскому обществу)

Несколько слов об Эдмунде Галлее. Это был выдающийся человек своего времени. Родился он в 1656 г. в Хаггерстоне (предмесье Лондона) в семье разбогатевшего мыловара. Получил блестящее образование, изучив латинский, греческий, древнееврейский языки, математику, астрономию, навигацию еще до Оксфорда, куда он поступил 17-летним юношей. Известность в ученом мире ему принес первый же его труд «Прямой и геометрический способ нахождения афелия и эксцентриситета планетных орбит», опубликованный, когда ему было 19 лет. Еще не

окончив университета, он загорелся идеей создания каталога точных положений звезд для неба южного полушария (положения звезд северного полушария были известны), что было крайне важно не только для астрономических, но и навигационных целей. Отец дал ему денег (300 фунтов стерлингов — большую по тем временам сумму), а король Карл II одобрил план Галлея. Для своих наблюдений Галлей выбрал остров Святой Елены (15°55' южной широты). После трехмесячного путешествия на корабле ост-индской компании Галлей прибыл к цели. На этом диком бесплодном скалистом участке суши он провел долгих 18 месяцев, наблюдая звезды южного неба. Карту неизвестных ранее созвездий Галлей подарил королю, назвав одно из них в честь него «Дуб Карла II». Галлей вернулся в Англию в 1678 г., и в том же году Оксфордский университет присудил ему ученую степень «Master of Arts», а через месяц Королевское общество избрало его своим членом (в возрасте 22 лет). Еще до знакомства с Ньютоном Галлей успел сделать в науке очень много, в частности, он вычислил на 200 лет вперед все моменты прохождения Меркурия и Венеры по диску Солнца, приглашая потомков заняться тщательными наблюдениями этих явлений. Галлей был настолько известным ученым, что Петр I, приехавший в Англию, пригласил его к себе и вел с ним нескончаемые беседы о науках, искусстве, флоте. Он был восхищен ответами Галлея, пригласил его к столу и с тех пор называл его своим другом.

О кометных исследованиях Галлея, о его бескорыстной помощи Ньютону я уже писал выше. Даже простой перечень всего того, что сделал Галлей за свою долгую и славную жизнь, занял бы слишком много места в этой книге. Но кое о чем все же стоит упомянуть, хотя бы кратко. В 1683 г. Галлей опубликовал новую теорию склонения магнитной стрелки. Англия была морской державой, и для моряков крайне важно было иметь точную карту отклонений стрелки компаса в различных географических точках. Для уточнения и проверки своей теории Галлей убедил короля Вильгельма III снарядить в 1698 г. экспедицию, в задачи которой, кроме измерений отклонений магнитной стрелки в различных точках земного шара, входило «определение широт и долгот в королевских владениях Америки» и ряд других исследований. Первая экспедиция закончилась неудачно, так как при переходе экватора корабельная команда взбунтовалась и Галлею пришлось вернуться в Англию. Вторая экспедиция под командой Галлея была удачной, она прошла далеко на юг (до 70° южной широты) и повернула назад, только дойдя до полярных льдов. Галлей вернулся в Англию в 1700 г. со славой и опубликовал «Генеральную карту вариаций компаса для всех пунктов земли, известных английским морякам». Это была основа будущей теории земного магнетизма.

Галлей был выдающимся инженером, фортификатором (строил фортификационные сооружения Триеста), капитаном королевского флота Англии (он стал им в 41 год), геофизиком, астрономом. Он даже был дипломатом — по поручению королевы Анны ездил в Вену во главе особого посольства.

По поручению декана Оксфордского университета, где он стал профессором геометрии в 1703 г., Галлей перевел с арабского на латинский язык трактат Аполлония Пергамского. Не зная арабского, он быстро выучил его и блестяще справился с переводом. С 1719 г. Георг I назначил Галлея королевским астрономом Англии, т. е. директором Гринвичской обсерватории.

В 65-летнем возрасте Галлей начал большую работу по наблюдению и точному измерению движения Луны, чтобы подтвердить теорию Ньютона. Эта работа требовала тщательнейших систематических наблю-

дений в течение 18 лет, и Галлей выполнил ее один, без ассистентов, окончив свой труд за три года до смерти. В 84 года его разбил паралич, отнялась правая рука, и тогда он стал диктовать свои вычисления помощнику. До конца своих дней он продолжал ездить в Лондон на заседания Королевского общества (от почетнейшей должности старшего секретаря общества он отказался еще в 1721 г., потому что это мешало его наблюдениям) и сохранял до конца своих дней необыкновенное мужество и работоспособность. Он умер 86 лет от роду в 1742 г. — почувствовал себя плохо, попросил стакан вина и умер, сидя в кресле.

В одной из биографий Эдмунда Галлея мы читаем: «За свою долгую жизнь Галлей приобрел всеобщую любовь и уважение не только своими знаниями и заслугами, но еще своей необыкновенной добротой и приветливостью. Его все любили, потому что он всех любил...»

И далее: «...у него было много важных работ и в других областях знания (не только в области кометной астрономии.— Л. М.). Они находили своих последователей, его идеи развивались, а сам Галлей забывался так же, как теперь постепенно забывается даже Ньютон, потому что его больше знают по имени, чем по его бессмертной книге, которую можно читать, как песни Гомера или рассказы Библии: изучают обыкновенно не ее, а книги бесчисленных его последователей, развивающих его идеи.

В еще большей мере и гораздо скорее эта участь постигла Галлея. Только комета его имени, появляясь раз в три четверти века, напоминает все новым и новым поколениям об Эдмунде Галлее, и это напоминание есть достойная награда за его плодотворную жизнь!»

К этому можно добавить только одно: история рассудила так, что человечество свои первые миссии направляет именно к комете Галлея. Я бы сказал, в этом есть некая высшая справедливость!

О том, как развивались события дальше, можно узнать из следующего параграфа, который, следуя по стопам Дюма-отца, назовем

§ 2. 76 лет спустя

Близился 1758 год, в котором, по предсказанию Галлея, должна была вновь появиться его комета и тем самым подтвердить правильность законов Ньютона. Скептиков, которые в этом сомневались, в те времена хватало. Для подтверждения правильности теории Ньютона и идей Галлея необходимо было рассчитать орбиту кометы с учетом влияния на нее притяжения Юпитера и Сатурна — больших планет Солнечной системы — и предсказать до-

статочно точно дату ее появления. Такая задача решается с помощью дифференциальных уравнений теоретической механики. Но эти уравнения вывел Лагранж только в 1788 г., а «Небесная механика» Лапласа появилась еще позднее (1799—1824 гг.). В действительности речь шла о решении классической задачи трех тел, когда нужно определить движение каждого из них, если все они взаимодействуют между собой по закону Ньютона. Нужно заметить, что и в настоящее время, за исключением отдельных частных случаев, решение этой задачи в общем виде отсутствует (точнее, представляется в виде бесконечных рядов). Сейчас такие задачи решают на мощных быстродействующих компьютерах. Именно так и была рассчитана траектория и момент прохождения перигелия кометой Галлея в 1986 г.

В 50-е годы XVIII столетия решением задачи трех тел занимался знаменитый А. Клеро (1713—1765), который известен тем, что в 12 лет уже докладывал в Парижской академии свои работы, а в 18 лет был избран академиком. Наступил 1758 год. Комета опаздывала, и Клеро взялся рассчитать ее орбиту, понимая, что причиной задержки являются, вероятно, Юпитер и Сатурн.

В своем мемуаре, представленном Академии, Клеро писал: «Решение, которое я дал несколько лет назад для задачи трех тел (приближенное, конечно.— Л. М.), есть основа для моей работы, но это новое приложение задачи есть самое трудное... Для планет можно найти несложные аналитические выражения, потому что радиусы их орбит почти не изменяются и наклоны (орбит к плоскости эклиптики.— Л. М.) малы, для комет это не так...»

Труд, который предстояло выполнить Клеро, можно назвать только титаническим. В том же мемуаре он пишет: «...Работа была огромной, и я не мог сказать ничего определенного раньше августа 1758 г., когда комета, которую ожидали уже больше года, стала предметом всеобщего интереса, гораздо большего, чем обычно возбуждают астрономические вопросы. Истинные любители науки ожидали ее с нетерпением; потому что она должна была своим появлением подтвердить законы Ньютона, другие же надеялись увидеть философов осмеянными, а их теории поколебленными и утверждали, что она не вернется, а открытия Ньютона и его последователей не подтвердятся. Многие из них уже ликовали и смотрели на год задержки в появлении кометы как на доказательство несостоятельности теории. Я хочу показать здесь, что эта задержка не может повредить системе "всемирного тяготения", а наоборот состав-

ляет необходимое следствие ее, и что комета опоздает более чем на один год».

Выполнить этот невероятно большой объем вычислений вручную и в одиночку было невозможно. Клеро помогали известный астроном Ж. Лаланд и математик мадам Лепот — жена парижского часовщика. Позднее Лаланд писал: «Шесть месяцев мы вычисляли с утра до ночи, иногда даже не отрываясь для еды, и следствием этого было то, что я расстроил свое здоровье на все остальные дни своей жизни. Помощь госпожи Лепот была такова, что без нее мы никогда не осмелились бы предпринять этот громадный труд, состоявший из вычислений расстояния кометы от двух планет — Юпитера и Сатурна — *для каждого градуса небесной сферы в течение 150 лет* (курсив наш.— Л. М.)».

Клеро и его помощники успели закончить вычисления вовремя. Результаты были доложены Академии. Оказалось, что под влиянием притяжения Юпитера комета должна опоздать на 518 суток и под влиянием Сатурна — еще на 100. Клеро предсказал дату прохождения кометой перигелия — 13 апреля 1759 г. и указал, что точность вычислений такова, что ошибка может составить 1 месяц. Комета прошла перигелий 13 марта. Это был полный триумф. Галлей оказался прав: комета вернулась.

Мемуар Клеро вышел в свет за два месяца до появления кометы (очень важно было предсказать точную дату ее появления до того, как она появится) и был снабжен стихотворным эпиграфом Вольтера:

Кометы — тьмы и зла ужасные знамения,
Довольно приводить народы вам в смятенье.
По эллипсу нестись гигантскому в эфире,
Всходить и заходить не лучше ль в нашем мире,
И став естественным явлением природы,
Являться в должный срок и пробуждать народы.

Существует красивая легенда о том, что через 10 лет после описанных событий возвратившийся из Индии французский астроном Лежантиль вывез оттуда невиданный в Европе цветок, который Парижская академия в честь мадам Лепот назвала Гортензией. На самом деле в этой истории не все ясно, так как по другим источникам имя мадам Лепот было другим: Николь Рен Этабль. Это намного прозаичнее. Хочется, конечно, верить, что красивая история о цветке из Индии, названном в честь самоотверженной женщины — Гортензии Лепот, не совсем уж беспочвенна.

Вернемся, однако, к комете Галлея. После 1758 г. она возвращалась еще два раза: в 1835 и 1910 гг. В третий раз

она появится (точнее, пройдет перигелий) уже на глазах наших современников — в 1835 г. К 1835 г. комету Галлея ждали, заранее вычислив ее орбиту. Однако в 1781 г. Вильям Гершель открыл планету Уран, и вычисления нужно было проделать заново. За предсказание даты прохождения кометой перигелия были объявлены две премии. Одну из них получил барон М. Дамуазо, который рассчитал орбиту с учетом возмущений всех планет, кроме Меркурия, и предсказал дату прохождения через перигелий — 4 ноября 1835 г. Другую премию получил Ф. Понтекулан, дважды повторивший вычисления с учетом уточненной массы Юпитера и указавший дату 15 ноября. Комета прошла перигелий 16 ноября 1835 г., опоздав лишь на сутки.

Впервые в истории астрономии заранее был вычислен не только момент прохождения кометы через перигелий, но и эфемерида, т. е. ее путь на небе среди звезд. Это произвело огромное впечатление, и уже с декабря 1834 г. телескопы были направлены на небо, туда, где должна была появиться комета. Однако она была слишком слаба, и нашли ее лишь 6 августа 1835 г. Особенно долго и тщательно ее наблюдали В. Я. Струве, ставший впоследствии директором Пулковской обсерватории, Джон Гершель (сын Вильяма Гершеля) на мысе Доброй Надежды и Фридрих Бессель — знаменитый математик и астроном.

Струве и Бессель наблюдали тогда уникальное явление — покрытие звезды кометой. Казалось бы, слабая звездочка, закрытая проходящей кометой (затмение звезды), должна была или вообще исчезнуть, или по крайней мере существенно ослабить свой свет, или ее световые лучи должны были бы как-то отклониться вследствие преломления. Ничего этого не произошло — ни на мгновение звезда не ослабила своего света, и лучи его нисколько не отклонились. Струве был первым, кто сделал вывод о том, что или комета Галлея вообще не имеет твердого ядра, или оно слишком мало. Последнее его предположение оказалось правильным.

В это же появление кометы в 1835 г. было сделано много ее зарисовок, причем в последовательных стадиях приближения к Солнцу. Струве и Бессель наблюдали быстро меняющиеся истечения из видимого ядра, причудливые формы, сменявшие друг друга. На основе этих наблюдений Бессель дал первую механическую теорию кометных форм, основанную на совершенно правильном предположении о том, что из ядра кометы вырываются материальные частицы, которые затем движутся под действием гравитацион-

ного притяжения к Солнцу и неких отталкивательных сил (также обусловленных Солнцем!), причем и сила притяжения, и сила отталкивания убывают обратно пропорционально квадрату расстояния (теперь мы знаем, что отталкивание обусловлено световым давлением). Отсюда Бессель рассчитал форму хвоста и увидел, что теория достаточно хороша, чтобы объяснить наблюдения.

Что можно сказать о последнем (1910 г.) появлении этой знаменитой кометы? Прежде всего оно дало очень много информации, которая совершенно необходима для проведения предстоящих космических экспериментов, но хватало и экзотики. К этому времени был уже известен Нептун, история открытия которого сама по себе достаточно интересна и носит совершенно детективный характер.

Он был открыт, как сказал Ф. Энгельс, «на кончике пера», независимо друг от друга и почти одновременно англичанином Д. Адамсом и французом У. Леверье. В движении Урана наблюдались аномалии, которые удалось объяснить, лишь предположив, что за Ураном находится еще одна вращающаяся вокруг Солнца большая планета, оказывающая на движение Урана гравитационное воздействие. Существование Нептуна было предсказано теоретически и даже было указано, в какой части неба следует его искать. Остросюжетный аспект этой истории был в том, что Адамс показал, что за Ураном должна находиться восьмая планета и рассчитал ее орбиту за 10 месяцев до того, как это сделал Леверье. Будучи истым хладнокровным англичанином, Адамс не стал публиковать своих результатов, так как астрономы-наблюдатели в Гринвиче им не поверили и не стали искать восьмую планету. Леверье же немедленно сообщил о своем результате в Берлин астроному Галле с просьбой поискать планету. Он обратился в Берлин, а не в Парижскую обсерваторию, поскольку только там в то время была достаточно полная карта той части неба, где следовало организовать поиски. Галле сразу же нашел планету. Англичане, узнав о расчетах Леверье, которые дали тот же результат, что и у Адамса, тоже стали искать новую планету, но опоздали.

То, что восьмая планета Солнечной системы была открыта путем вычислений, произвело, конечно, огромное впечатление на широкую публику. Началась борьба за приоритет. Англичане считали, что планету открыл Адамс, французы — что Леверье (сами — Адамс и Леверье несколько не спорили об этом, они подружились и были затем друзьями всю жизнь). Конфликт продолжался много лет. Французы предлагали новую планету называть «Леверье», но победила традиция, и она стала Нептуном. Предыдущую планету — Уран — открыл Вильям Гершель и хотел в честь короля Англии назвать ее «Георг III», но тогда тоже победила традиция называть планеты именами римских богов.

Самое забавное в этой истории то, что позднее сам Адамс показал, что на самом деле открытие Нептуна в «назначенном месте» было чистой случайностью, так как его реальная орбита отличается от предвычисленной. Теперь было ясно, чем можно объяснить и это, и часть других аномалий в движении Урана. Следуя Адамсу и Леверье, П. Ловелл вычислил орбиту, как тогда говорили, планеты X (Икс). Ее искали 15 лет и нашли лишь в 1930 г. Это был Плутон — последняя, девятая планета Солнечной системы.

С учетом возмущений Нептуна астрономы Ф. Коуэлл и А. Кроммелин из Гринвичской обсерватории рассчитали дату прохождения кометы Галлея ее перигелия с небывалой до того точностью (3 часа), указав, что это произойдет 17 апреля 1910 г. Комета прошла через перигелий 20 апреля, опоздав на трое суток. Это было неприятно, но особого внимания тогда на это не обратили.

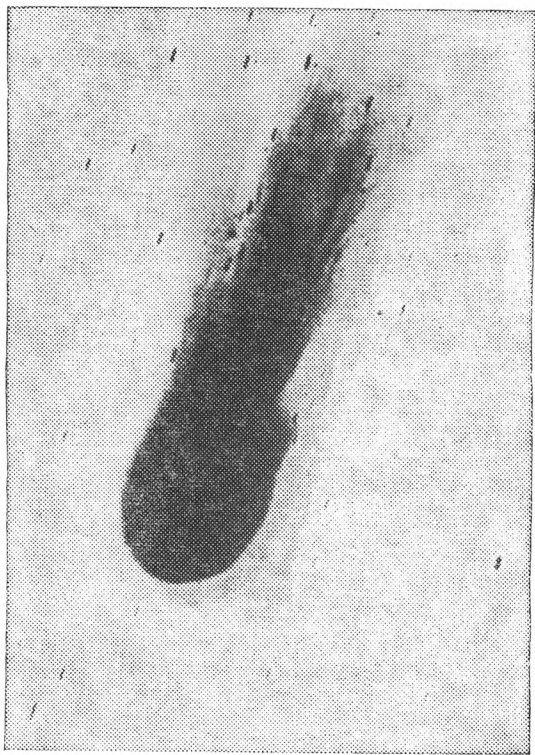


Рис. 35. Снимок кометы Галлея 1910 г. (Хелуан, Египет)

Вообще говоря, такие расхождения с расчетами были известны и для других комет. Приходилось предполагать наличие каких-то сил негравитационной природы, хотя и очень слабых, но действующих на некоторые кометы. То, что такие силы существуют, предполагал еще Бессель в 1836 г. и даже дал по существу правильное объяснение это-

го феномена. В чем здесь дело, стало ясно, однако, только в 1950 г., когда американский астрофизик Ф. Уиппл высказал гипотезу, основанную как раз на анализе вековых ускорений некоторых комет, согласно которой силы негравитационной природы — это реактивные силы, связанные с испарением вещества из кометных ядер. Отсюда с необходимостью следовал вывод о том, что ядра комет должны содержать много льда. Но в 1910 г. до такого вывода было еще далеко.

В отличие от всех прошлых прохождений кометы Галлея в этот раз ее наблюдали не только визуально, но и фотографическим методом. Как уже было сказано в гл. 2, обнаружил ее М. Вольф в Германии, сравнивая последовательно отснятые фотопластины (см. рис. 9). В действительности позднее оказалось, что она была зафиксирована на две недели раньше на фотопластинках, снятых в Египте в Хелуане. Тогда она находилась на расстоянии 3,6 а. е. от Солнца, т. е. довольно далеко. В это время яркость кометы была очень низкой, так что фотографический метод блистательно продемонстрировал свои возможности (рис. 35).

Мы должны быть благодарны поколению людей, живших на Земле в начале века. Они сделали очень многое для того, чтобы нынешние экспедиции к этой знаменитой комете увенчались успехом. Комету наблюдали с 16 сентября 1909 г. до 16 июня 1911 г., когда наблюдения стали уже невозможны (в это время комета Галлея уже удалилась от Солнца на 5,4 а. е.). В различных обсерваториях мира было сделано до 500 фотографий кометы и до 100 спектрограмм, позволяющих судить о химическом составе ее атмосферы. В тот период, когда в северном полушарии условия видимости были неблагоприятны, специально организовались экспедиции в южное полушарие (на Гавайские острова и др.). Было сделано большое количество рисунков и определений положения кометы относительно звезд на небе в различные эпохи. Все это дает неоценимый материал для планирования космических экспериментов.

Во время прошлого появления кометы Галлея произошло несколько любопытнейших событий.

Во-первых, комета прошла по диску Солнца. Это явление наблюдали в Москве В. К. Цераский и П. К. Штернберг (именем последнего назван Государственный астрономический институт при МГУ) в рефрактор с диаметром объектива 38 см, в Афинах — Эгинитис в 40-сантиметровый рефрактор и в Медоне — Антониади в 83-сантиметровый рефрактор. Во время прохождения по диску Солнца

комета исчезла — никто из перечисленных наблюдателей не видел ее, т. е. она оказалась совершенно прозрачной. Отсюда можно оценить диаметр ее твердого ядра, зная, на каком расстоянии от Земли в этот момент она находилась (см. гл. 2, § 2). Это расстояние известно — оно равно 23 млн. км. Угловое разрешение использованных телескопов было порядка $0,2—0,3''$. Пользуясь формулой (2.1), можно оценить пороговое значение поперечника ядра кометы Галлея. Очевидно, поперечник ядра ее был заведомо меньше 20—30 км. Конечно, «исчезновения» кометы при прохождении по солнечному диску можно было ожидать — вспомним наблюдения Бесселя и Струве в 1835 г., когда произошло затмение звезды все той же кометой Галлея.

Во-вторых, во время прохождения в 1910 г. многие наблюдатели отметили явления, вероятно, свидетельствующие о дроблении ядра. Эти наблюдения говорят о том, что от ядра вблизи перигелия, по-видимому, откалывались не слишком большие, но и не очень малые куски материала. Наблюдатели отмечали «множественность» ядра кометы Галлея, состоящего из нескольких ярких образований, довольно быстро исчезающих. Затем ядро снова оказывалось «в одиночестве», а затем снова дробилось. Это крайне важные наблюдательные данные, которые, естественно, необходимо учитывать, планируя и снаряжая экспедиции к этой комете. В какой степени пострадало ядро кометы Галлея в 1910 г., остается неизвестным, но вскоре мы, вероятно, об этом узнаем.

В-третьих, в мае 1910 г. комета Галлея, Венера и Земля так располагались на своих орбитах, что обе планеты прошли через кометный хвост — сначала Венера, потом Земля. Поскольку хвосты комет всегда направлены в сторону, противоположную Солнцу, то последнее событие произошло тогда, когда Солнце, комета и Земля находились приблизительно на прямой линии. Земля находилась внутри хвоста несколько часов, в течение которых в атмосферу нашей планеты со скоростью порядка десятков километров в секунду врывались кометные газы и пыль.

Как и в прежние времена, публика была заморожена этим событием. Витали зловещие слухи. Конечно, к тому времени о кометах знали многое. Науке уже был известен даже приблизительный химический состав кометной атмосферы. Но, как оказалось, избыточная информация обернулась обратной стороной: спектрограммы обнаружили в голове кометы Галлея циан (CN) и угарный газ (CO), поэтому бурно обсуждалась опасность всеобщего отравле-

ния. Известный советский исследователь комет С. В. Орлов рассказывает о забавном, но, в принципе, типичном эпизоде. В день прохождения Земли через хвост кометы, 19 мая 1910 г. пассажиры одного из волжских пароходов обратили внимание на желтый порошок, покрывший палубу. Капитан решил, что это — шуточки пассажиров и влез на ванты, чтобы посмотреть есть ли и там порошок. Оказалось, что ванты тоже им обсыпаны. Капитан решил, что это вещество кометного хвоста и прислал пузырек с порошком в обсерваторию Московского университета. Ответ у загадки был вполне прозаическим — это были споры от цветения сосны. Такое явление происходит всегда в мае, но на него мало кто обращает внимание. Ну, а в мае 1910 г. все, что казалось необычным, записывалось, конечно, «на счет» кометы, хотя кометы для науки уже были не более, чем одним из интересных (но отнюдь не мистических!) астрономических объектов. Вернемся, однако, к комете Галлея и поговорим

§ 3. О ее прошлом

— А ваши кто родители?
Чем вы занимались
д о 17-го года?

В. Маяковский. «Юбилейное»

Итак, Галлей доказал периодичность этой кометы, что и было блестяще подтверждено ее последующими появлениями. Вспомним, что сам Галлей вполне доказательно проследил ее появления вплоть до 1531 г. Конечно, он понимал, что если эта комета периодическая, с периодом около 75—76 лет, то можно постараться проследить и более ранние ее появления. Однако рассчитать орбиты в далеком прошлом Галлей, естественно, не мог, пользуясь примитивными математическими методами своего времени; довольно и того, что он сумел математически показать близость элементов орбит комет 1531, 1607 и 1682 гг. Основываясь в анализе лишь на одних исторических документах, легко было ошибиться. Например, Галлей был убежден, что большая комета 530 г. была той же кометой, которую видели в 1680 г. Однако впоследствии выяснилось, что это была комета Галлея.

Тем не менее увлекательнейшим занятием — поиском по историческим документам (древним рукописям, летописям, хроникам) прошлых появлений кометы Галлея — занялись, и успешно, уже в конце XVIII века. Пингре,

каноник Парижского университета, в сочинении «Кометография» (1784 г.) указал на возможные появления кометы Галлея в 837 и 1456 гг.

Французский математик И. Буркхардт первым сумел доказать, что комету Галлея видели в Европе и в Китае в 989 г. Позднее П. Ложье нашел свидетельства ее появлений в 451, 760 гг. В XIX веке англичанин Дж. Хинд специально изучил китайские хроники (в Англии всегда увлекались Востоком) и привел указания на 15 ее появлений вплоть до 12 г. до н. э. Крайне полезны были данные, взятые из древнекитайских наблюдений комет. Их собрали различные французские миссионеры. Полное собрание этих данных в 1871 г. опубликовал Вильямс в книге «Китайские наблюдения комет». Однако наиболее подробное исследование прошлых прохождений кометы Галлея дали все те же Ф. Коуэлл и А. Кроммелин только в XX веке. Сравнивая результаты вычислений ее траектории в прошлом с историческими документами, они проследили появления кометы Галлея до 240 г. до н. э. В табл. 2 приведены даты прохождения перигелия кометой Галлея.

Т а б л и ц а 2

Даты прохождения перигелия кометой Галлея

1. 240 г. до н. э., 25 мая	16. 912 г., 9 июля
2. 164 г. до н. э., 13 октября	17. 989 г., 6 сентября
3. 87 г. до н. э., 6 августа	18. 1066 г., 21 марта
4. 12 г. до н. э., 11 октября	19. 1145 г., 19 апреля
5. 66 г., 26 января	20. 1222 г., 29 сентября
6. 141 г., 22 марта	21. 1301 г., 26 октября
7. 218 г., 18 мая	22. 1378 г., 11 ноября
8. 295 г., 20 апреля	23. 1456 г., 10 июня
9. 374 г., 16 февраля	24. 1531 г., 26 августа
10. 451 г., 28 июня	25. 1607 г., 27 октября
11. 530 г., 27 сентября	26. 1682 г., 15 сентября
12. 607 г., 15 марта	27. 1759 г., 13 марта
13. 684 г., 3 октября	28. 1835 г., 16 ноября
14. 760 г., 21 мая	29. 1910 г., 20 апреля
15. 837 г., 28 февраля	30. 1986 г., 9 февраля

Как видно из этой таблицы, имеется 29 уверенных, зарегистрированных в истории появлений, в 1986 г. будет тридцатое.

Вы понимаете, конечно, что если уж какая-либо комета попадала в хроники или летописи, то «хроникеры» и летописцы связывали ее появление с крупными событиями своей

эпохи. Я не имею возможности в этой книжке прокомментировать все, что связывалось с кометой Галлея в истории человечества. Специально для любителей истории расскажу лишь о наиболее интересных, с моей точки зрения, конечно, событиях, которые сопутствовали появлениям этой знаменитой кометы. Будем следовать хронологии.

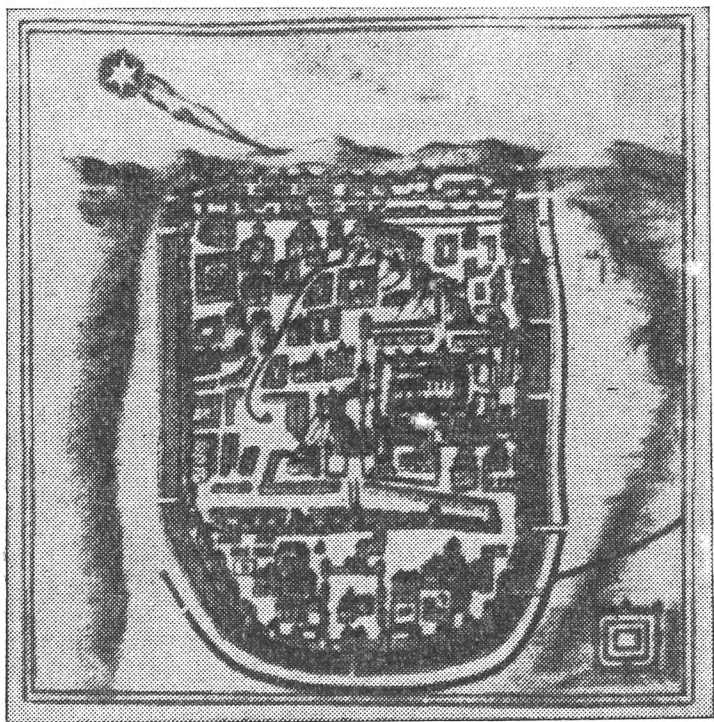


Рис. 36. Комета Галлея 66 г. (из книги Станислава Любинецкого, Амстердам, 1667 г.)

В 66 г. н. э. комета появилась над Римом. Считалось, что она предрекла восстание евреев в Древней Иудее (против владычества Рима) и разрушение города Иерусалима. Она же «предопределила» гибель Геркуланума и Помпеи. На рис. 36 мы видим гравюру из старинной книги Станислава Любенецкого, на которой изображена комета Галлея 66 г., пронзающая иудейское царство и возвещающая его скорую гибель. Гибель Помпеи «можно увидеть» на знаме-

нитой картине Брюллова, которая находится в Третьяковской галерее в Москве.

Самой яркой за всю историю своих появлений комета Галлея была в 837 г. В этот раз она проходила на самом минимальном расстоянии от Земли (около 0,04 а. е.). Ее видимая звездная величина 11 апреля 837 г. была —3,5. Это значит, что она была приблизительно в 6,5 раз ярче самой яркой звезды ночного неба — Сириуса (α Большого Пса). Нетрудно себе представить переживания наших предков. Французский король Людовик Кроткий был необычайно напуган этой кометой. Его придворный астролог пишет: «Король Людовик Кроткий, убежденный, что комета предвещает смерть великих людей, призвал меня в Аахен и спрашивал о значении этого ужасного знамения... Я пытался разуверить его, указывая на слова писания: «Не бойтесь знамений неба». «Я не боюсь их», — возразил мне этот благочестивый монарх. — «Я боюсь всемогущего создателя их, создавшего также и меня. Без сомнения, Господь указывает мне, что я должен готовиться к смерти».

Заметим, что комета Галлея 912 г. «предрекла» смерть «Вещего Олега» (событие, до сих пор волнующее поэтов). Комета Галлея 989 г. «возвестила» миру о крещении Руси.

Самое раннее из известных изображение кометы Галлея относится к ее появлению в 1066 г. В это время герцог Нормандский Вильгельм Завоеватель готовил вторжение в Англию. Комета 1066 г., по преданию, явила дурное знамение последнему англо-саксонскому королю Гарольду II, который действительно вскоре погиб в битве при Гастингсе. Англия была завоевана норманнами. В одной из хроник говорится: «Норманны, предводительствуемые кометой, завоевали Англию». В Байе (Франция) хранится гобелен, вышитый, по преданию, женой Вильгельма Завоевателя королевой Матильдой. Этот ковер считался бесценным у многих поколений английских королей. На ковре выткана латинская фраза «Удивляются звезде».

По поводу этой же кометы 1066 г. русский летописец Нестор пишет: «В си же времена бысть знамение на западе, звезда превелика, луче имуща аки кровавы, восходяща с вечера по заходе солнечнем и пребысть за 7 дней; се же проявляша не на добро: посем бо быша усобице много и нашествие поганых на Русьскую землю, си бо звезда бе аки кровава, проявляющи кровипролитие». Поганые — это половцы. Понятно, что русский народ волновали в те времена другие, нежели англичан и норманнов, проблемы.

Появление кометы Галлея в 1301 г. запечатлел на своей

фреске «Поклонение волхвов» итальянский художник Джотто ди Бондоне. Волхвы увидели на небе необычную звезду и пошли за ней. Она остановилась над городом Вифлеемом. Здесь они встретили деву Марию с только что родившимся младенцем Христом. Джотто считал, что знаменитая вифлеемская звезда, сиявшая над яслями Христа, — это комета Галлея. Экспедиция, направляемая к комете Галлея 1986 г. Европейским космическим агентством, носит кодовое название «Джотто».

Для русских и татар комета Галлея 1378 г. была провозвестницей Куликовской битвы.

Стоит, пожалуй, упомянуть еще об одном явлении кометы Галлея, в 1456 г. Незадолго до того турки захватили Константинополь, превратили христианские церкви в мечети, вырезали почти все христианское население. Появление кометы, по мнению просвещенных лиц того времени, предвещало новые беды и, в частности, не исключалось, что это знамение говорит об угрозе христианству в Европе. Комета 1456 г. была, как писали историки того времени, «ужасной»: ее хвост напоминал бушующее пламя и занимал почти треть звездного неба.

Сначала, до захвата Константинополя, папе Калликсту III она казалась имеющей форму креста — комета имела длинный, слегка изогнутый хвост. Поэтому поначалу, благославляя крестовый поход на ближний Восток, он провозгласил: «Комета сия имеет форму креста. Она благославляет поход христиан, пусть трепещут неверные!» Однако после военных успехов турок, захвативших в 1456 г. Константинополь, римский папа проклял комету, так как стало известно, что «неверные» считают ее больше похожей на ятаган! Было чего испугаться. С тех пор и по сей день в католических церквях сохранилась соответствующая молитва под названием «Ангелус» с заклинаниями против кометы.

Этот параграф главы о комете Галлея называется, как вы помните, «О ее прошлом». Разумеется, прошлые прохождения этой кометы не могут исчерпываться приведенными в табл. 2 исторически доказанными ее появлениями — ведь она периодическая, и на основании небесно-механических расчетов можно пытаться проследить в далеком прошлом ее перигелийные прохождения и положения Земли на орбите в эти моменты, т. е. условия, при которых должна была наблюдаться комета Галлея с Земли. Здесь открывается интереснейшее поле деятельности для любителей истории, но нужно помнить, что, во-первых, расчеты движения коме-

ты на тысячи лет в прошлое технически трудны даже с использованием мощных компьютеров и, во-вторых, чем дальше в прошлое — тем меньше сохранившихся исторических документов, так что сопоставление расчетов и наблюдений крайне осложнено. Поэтому когда речь идет о появлениях кометы Галлея до 240 г. до н. э., то имеются в виду лишь более или менее достоверные, но всегда интересные гипотезы.

Почему же именно до 240 г. до н. э.? Дело в том, что, как упоминалось, наиболее полные данные о древних явлениях кометы Галлея содержатся в китайских хрониках. Однако хроник, датированных более ранними годами, почти не сохранилось, потому что император, правивший тогда в Китае, казнил всех ученых и приказал в 40-дневный срок (под страхом смертной казни за утайку) сжечь все книги. Он хотел, чтобы история Китая начиналась с его имени.

Это очень затрудняет попытки отождествления появлений кометы Галлея с историческими документами. Тем не менее о некоторых из них, наиболее интересных, как мне кажется, я немного расскажу.

Пожалуй, самое раннее из зафиксированных в истории прохождений кометы Галлея относится, по-видимому, к 1057 г. до н. э. Движение кометы Галлея в течение последних 3000 лет рассчитал китайский астроном И. Чанг. У него получилось, что в 1057 г. до н. э. она прошла перигелий 7 марта. Чанг приводит описание из случайно сохранившейся китайской хроники, где говорится, что комета появилась на востоке, когда император Ву выступил против Джоу.

Китайских источников, относящихся к этим древним временам, как говорилось, сохранилось мало. Но можно пытаться отыскать следы кометы Галлея в Библии, Талмуде и других древних религиозных книгах — ведь они писались, как прекрасно понимаем мы, атеисты, обыкновенными, но образованными для своего времени людьми по следам реальных исторических событий, природных катаклизмов и т. п. Расшифровать информацию, заключенную в этих древних источниках, трудно, а иногда и невозможно — ведь это литературные произведения, написанные языком образов, и не всегда ясно, с чем тот или иной образ следует сопоставить.

Не исключено, что появление кометы Галлея в 619 г. до н. э. отражено в Библии в книге пророка Иеремии. На это обратил внимание один из первых исследователей истории древних появлений этой кометы каноник Парижского университета Пингре. В тексте говорится, что Бог спраши-

вает Иеремию о том, что тот видит. Иеремия отвечает: «Я вижу жезл, поднимающийся и готовый разить».

«Что ты видишь, Иеремия?» — снова спрашивает Бог.

«Я вижу теперь как бы котел воспламененный, он обращен в сторону Аквилона», — отвечает пророк Иеремия.

Пророчества Иеремии датируются 628 г. до н. э. Поэтому многие историки считают, что в Библии говорится о комете, у которой сначала показался над горизонтом хвост в виде жезла (мы уже видели, что наши, даже не очень далекие, предки не слишком сдерживали свою фантазию и видели кометы и в виде отрубленных голов, и в виде мечей и кинжалов, так что вполне можно было усмотреть, по-видимому, и жезл), а потом поднялась и голова, похожая на раскаленный котел, окутанный густым дымом.

Интересная гипотеза принадлежит Н. А. Морозову, который в 1910 г. разобрал отрывок из книги пророка Даниила. Н. В. Успенская в журнале «Природа» (1982, № 8) прекрасно рассказала об этой гипотезе. В отрывке «... речь идет о пире вавилонского царя Валтасара, на котором Валтасар кощунственно пил из священных сосудов Иерусалимского храма и славил богов серебряных, медных и деревянных. Тогда на стене чертога властелина (читаем: на небе) появилась озаренная светом рука (комета), которая написала слова «мани факел фарес». Призванный для истолкования этих слов Даниил дал чисто астрологическую расшифровку: «Мани» (так называли вавилоняне созвездие Скорпиона) — ты приговорен к смерти, «Факел» (созвездие Весов) — ты взвешен и оказался легким, «Фарес» (созвездие Персея) — твое царство перейдет к мидянам и персам. Приняв все это за описание вида и пути кометы, Н. А. Морозов пытался сопоставлять ее с китайскими хрониками, но аналогов не находил, пока искал их до рождения Христа. И, наконец, нашел такую комету (комету Галлея) в 838 г. н. э., на основании чего предположил, что старозаветная книга пророка Даниила — апокриф. Но это еще потребовало бы других доказательств».

Напомню, что пророческие книги Библии датируются VIII—VI веками до н. э., а отнюдь не 838 г. н. э. Поэтому Морозов и предполагает, что книга Даниила была написана приблизительно на 1000 лет позже книг других пророков, т. е. является апокрифом*). Если эта гипотеза когда-нибудь подтвердится, то на счету кометы Галлея появится очередной «гол» в ворота истории!

*) Апокрифами по церковной терминологии называют тексты, не вошедшие в канонический набор книг, составляющий Библию.

И, наконец, еще одна интереснейшая гипотеза. В ожидании прошлого прихода кометы Галлея было предпринято много исторических изысканий. В частности, в 1910 г. в Петербурге вышла книга Д. Святского «Галлеева комета в Библии и Талмуде». Он приводит в ней поразительные строчки из Талмуда, которые позволяют предполагать, что древние евреи не только знали о периодичности кометы Галлея, но им даже был известен ее приблизительный период. В Талмуде говорится: «Раз в 70 лет комета появляется и сбивает с толку корабельщиков».

Конечно, в III—V веках, когда был написан Талмуд, вполне могли высказываться мысли о периодичности комет. О том, что это возможно, как мы знаем, писал еще в I веке н. э. Сенека. Но на основании чего названа цифра 70 лет?! В ответ остается только развести руками...

Все, что вы прочитали в этом параграфе, я бы назвал «исторической историей» кометы Галлея. Но вот чтобы обсудить ее динамическую и физическую историю, а также ее будущее, надо выяснить, какова

§ 4. Ее орбита

Ах, как кружит ее орбита!

*А. Вознесенский. «Мотогонки
по вертикальной стене»*

В гл. 3 мы видели, что орбита кометы, как и любого другого тела, движущегося в заданном поле сил, полностью определяется шестью начальными условиями: тремя координатами, задающими ее местоположение в момент времени $t=0$, и тремя компонентами вектора начальной скорости. Однако в астрономии, в отличие от физики, для определения орбиты тела в гравитационном поле Солнца, если речь идет о планетах или кометах, например, в качестве этих шести условий выбирают другие величины, о которых уже упоминалось (см. гл. 3, § 1). Это так называемые элементы орбиты: a , e , i , ω , Ω и T . Здесь a — большая полуось орбиты, e — эксцентриситет, i — ее наклонение — угол между плоскостями эклиптики (плоскость орбиты Земли) и орбиты тела, ω — аргумент перигелия (иногда вводят долготу перигелия $\pi = \omega + \Omega$), Ω — долгота восходящего узла, T — время прохождения телом перигелия. Однако для того чтобы понять геометрический смысл элементов орбиты, придется совершить небольшую экскурсию по астрономическим дефинициям.

Небесной сферой называется воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в произвольной точке пространства, на поверхности которой расположены светила так, как они видны на небе в некоторый момент времени из данной точки пространства. Это значит, что некий воображаемый наблюдатель, находящийся в центре небесной сферы, видит светила на ее поверхности точно в тех же взаимных расположениях, что и реальный, находящийся на поверхности Земли наблюдатель видит реальные светила на небе.

Обратимся к рис. 37. Прямая ZZ' на нем, проходящая через центр небесной сферы и совпадающая с линией отвеса в точке наблюдения, называется вертикальной линией, а точки ее пересечения с небесной сферой Z и Z' называются зенитом и надиром соответственно. Большой круг небесной сферы $SWNE$, чья плоскость перпендикулярна ZZ' , называется математическим горизонтом. Он делит поверхность небесной сферы на видимую для наблюдателя (вершина в зените) и невидимую (вершина в надире). Вращение небесной сферы повторяет вращение небесного свода и происходит вокруг оси PP' , которая называется осью мира. Соответственно ось мира пересекает небесную сферу в Северном полюсе мира (P) и Южном (P'). Если смотреть извне на Северный полюс мира, это вращение небесной сферы происходит по часовой стрелке (см. рис. 37). Так, собственно, и определяется то, что этот полюс — Северный.

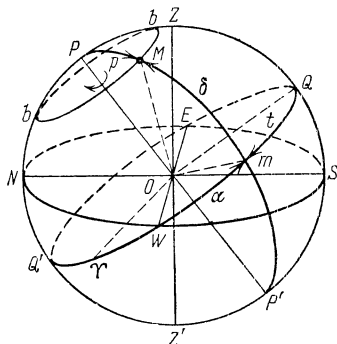


Рис. 37. Небесная сфера

Большой круг небесной сферы $QWQ'E$ на рис. 37, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется небесным экватором. Небесный экватор делит поверхность небесной сферы на два полушария: северное и южное с полюсами P и P' соответственно. Небесный экватор пересекается с математическим горизонтом в точках востока (E) и запада (W). Большой круг небесной сферы $PMmP'$, проходящий через полюса мира и данное светило M , называется часовым кругом или кругом склонения светила. Большой круг небесной сферы, чья плоскость проходит через вертикальную линию (ZZ') и ось мира (PP'), называется небесным меридианом. Небесный меридиан пересекает математический горизонт в точках севера (N) и юга (S).

Для определения положения какого-либо светила (и кометы в том числе) на небе используются различные системы так называемых небесных координат. Наиболее употребительной является экваториальная система координат α и δ . Величина α называется прямым восхождением светила. Она является дугой γm (рис. 37), отсчитываемой от точки весеннего равноденствия γ (см. далее), до часового круга $PMmP'$. Иначе говоря, это центральный угол γOm , дающий угловое расстояние до часового круга от точки γ . Прямое восхождение α исчисляется обычно или в градусной мере ($0-360^\circ$), или в часовой мере ($0-24^h$). Значок «h» означает часы.

Другой координатой является δ , называемая склонением. Склонение в северном полушарии меняется в пределах $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$, в южном — в пределах между 0° и -90° . Из рис. 37 видно, что δ есть длина дуги mM часового круга или центральный угол OmM .

При движении вокруг Солнца Земля имеет еще и собственное (суточное) вращение. Оба вращения направлены в одну сторону, но ось суточного вращения Земли наклонена к плоскости ее орбиты под углом $66^{\circ}34'$. Поэтому по небесной сфере Солнце кажется перемещающимся среди звезд по окружности, плоскость которой наклонена к плоскости небесного экватора под углом $90^{\circ}-66^{\circ}34'=23^{\circ}26'$. Большой круг небесной сферы, который получается сечением ее плоскостью, наклоненной к плоскости небесного экватора под углом $23^{\circ}26'$, называется эклиптикой. С точки зрения внешнего наблюдателя (смотрящего на систему Солнце — Земля откуда-то со стороны) плоскость эклиптики есть просто плоскость земной орбиты при движении Земли вокруг Солнца. Эклиптика пересекается с небесным экватором в точках весеннего равноденствия Υ и осеннего равноденствия ϖ . В точке Υ Солнце пересекает небесный экватор, переходя из южного в северное полушарие небесной сферы, в точке ϖ — наоборот. Когда Солнце находится в точке весеннего равноденствия, оно восходит в точке востока E и заходит в точке запада W на всех (кроме полюсов) географических широтах, при этом его склонение $\delta=0$. Это значит, что ровно половину своего суточного пути оно проводит под горизонтом, а половину — над ним, т. е. длительность дня равна длительности ночи. Этот день — 21 марта — считается началом весны в северном полушарии Земли и началом осени — в южном.

Чтобы не загромождать чертеж, на рис. 37 показан лишь большой эклиптический круг. На нем есть только точка весеннего равноденствия Υ . Отрывочные сведения об астрономических дефинициях, системе координат и т. п. заимствованы из книги: Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И. Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1983, почтав которую можно получить о всех этих вещах намного более полное представление.

Вернемся к элементам орбиты кометы. Будем полагать ее эллиптической. Элементы орбиты показаны на чертеже рис. 38. Понятия большой полуоси орбиты (a) и эксцентриситета (e) не требуют пояснений — о них говорилось в гл. 3. Они полностью определяют размеры и форму орбиты. Однако орбита кометы — пространственная кривая, поэтому необходимо еще иметь и ее ориентацию в пространстве. Для этого и вводятся ω и Ω . Величина T определяет положение кометы на орбите в любой момент времени.

Наклонение i может пробегать значения от 0 до 180° , причем $0^{\circ} \leq i \leq 90^{\circ}$, если комета и Земля движутся по своим орбитам в одном направлении (так называемое прямое движение). Если $90^{\circ} \leq i < 180^{\circ}$, то комета движется в направлении, противоположном движению Земли (обратное, или ретроградное, движение).

Напомним еще раз, что P — точка, ближайшая к фокусу орбиты (в данном случае к Солнцу), называется перигелием, противоположная ей точка A — афелием. Прямая PA называется линией апсид. Величины $SP=q$ и $SA=Q$ называются перигелийным и афелийным расстояниями соответственно. Линия пересечения плоскости орбиты с плос-

костью эклиптики называется линией узлов $\Omega\Upsilon$. Восходящим узлом называется точка Ω , в которой комета, пересекая плоскость эклиптики при движении по орбите, начинает подниматься над ней. Точка Υ называется нисходящим узлом, в ней комета переходит под плоскость эклиптики.

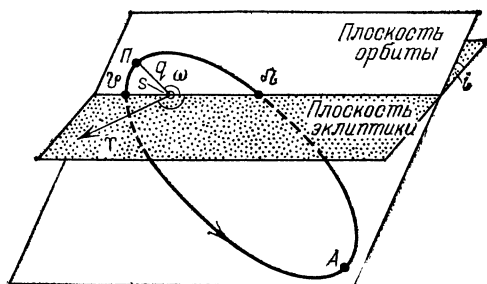


Рис. 38. Элементы орбиты

Аргумент перигелия ω , как видно из рис. 38, есть угол $PS\Omega$. Он характеризует собой взаимную ориентацию линии узлов орбиты $\Omega\Upsilon$ и линии апсид PA и может иметь любые значения между 0 и 360° . Долгота восходящего узла Ω есть угол $\Omega S\Upsilon$, который также пробегает все значения между 0 и 360° . Иногда вместо названных элементов орбиты используют другие величины. Например, вместо большой полуоси a можно использовать перигелийное расстояние q или афелийное Q , так как они связаны, как вы помните, простыми формулами

$$q = a(1 - e), \quad Q = a(1 + e)$$

и поэтому не являются независимыми характеристиками орбиты. Итак, важно лишь то, что для полного задания формы и размеров орбиты, ее пространственной ориентации необходимо задать пять величин, если же мы хотим знать еще и положение кометы на орбите в каждый интересующий нас момент времени, то нужна и шестая величина T .

Теперь можно заняться орбитой кометы Галлея. Прежде всего вспомним, что элементы орбиты были бы постоянными величинами (константами), если бы не возмущающее действие планет, которое на каждом витке и в каждой точке орбиты кометы всегда немного разное из-за различного взаимного расположения кометы и планет. Поэтому элементы орбиты слегка меняются во времени — они не постоянны.

Вследствие этого немного отличаются и периоды на каждом витке.

Именно по этой причине, как вы помните, и бушевали страсти в 1758 г. Однако элементы орбиты «плавают» около своих средних значений не слишком сильно. Разумеется, понятия «не слишком сильно» или «сильно» есть понятия относительные. Когда я пишу «не слишком сильно», то имею в виду, что за все время существования кометы Галлея в виде периодической кометы или хотя бы в течение последних 2000 лет отклонения элементов ее орбиты на каждом витке от их средних (за большое время) значений не слишком велики. Например, среднее значение периода этой кометы близко к 75 годам, а максимальное и минимальное значения периода — 74 и 79 лет соответственно среди всех отмеченных в истории появлений. Поэтому даже максимальное отклонение от среднего периода составляет приблизительно 5%, а обычно оно еще меньше.

Таким образом, отвлекаясь от небольших (порядка 2—3%) вариаций значений элементов орбиты кометы Галлея, посмотрим, каковы ее размер и форма, какова ориентация орбиты в пространстве. Большая полуось орбиты кометы Галлея $a \approx 18$ а. е., а ее эксцентриситет $e \approx 0,97$. Отсюда вычисляем афелийное расстояние, т. е. расстояние от Солнца до наиболее удаленной точки орбиты $Q = a(1+e) \approx 35,5$ а. е. Это означает, что в афелии комета Галлея пролетает между орбитами Нептуна и Плутона, так как среднее расстояние Нептуна от Солнца 30,1 а. е., а Плутона — 39,5 а. е. Перигелийное расстояние вычисляем из формулы $q = a(1-e) \approx 0,54$ а. е. Это значит, что перигелий орбиты кометы Галлея расположен между орбитами Меркурия и Венеры, так как среднее расстояние Меркурия от Солнца равно 0,39 а. е., а Венеры — 0,72 а. е. Эксцентриситет велик, т. е. орбита кометы Галлея является сильно вытянутым эллипсом. Зная эксцентриситет и большую полуось, вычисляем длину малой полуоси орбиты по формулам (3.15): $b \approx 4,4$ а. е. Таким образом, отношение полуосей орбиты кометы Галлея $b/a \approx 0,24$.

Как ориентирована орбита в пространстве? Наклонение $i \approx 162^\circ$. Мы уже знаем, что если $i > 90^\circ$, то движение кометы обратное, т. е. комета и Земля движутся по своим орбитам навстречу друг другу. Это обстоятельство сильно осложняет свидание космических экспедиций с кометой Галлея (см. далее), но зато облегчает ей «личную жизнь». Дело в том, что все планеты вращаются в ту же сторону, что и Земля, в своем движении вокруг Солнца. Поэтому комета и планеты пролетают мимо друг друга на «встречных

курсах». Таким образом, относительные скорости, с которыми встречается комета Галлея с большими планетами Солнечной системы (особенно сильно возмущающими ее движение), велики, и, следовательно, их влияние ослаблено. Аргумент перигелия орбиты кометы Галлея $\omega \approx 110^\circ$ и долгота восходящего узла $\Omega = 58^\circ$, т. е. линия апсид и линия узлов почти взаимно перпендикулярны.

Найдем высоту h , на которую приподнят перигелий над плоскостью эклиптики, и глубину H , на которую опущен афелий. Читатель сам может убедиться, внимательно рассмотрев рис. 38, что

$$\begin{aligned} h &= q \sin i \approx 0,15 \text{ а. е.}, \\ H &= Q \sin i \approx 10 \text{ а. е.} \end{aligned}$$

Другими словами, перигелий кометы Галлея лишь чуть-чуть приподнят над плоскостью эклиптики, но вот афелий опущен глубоко вниз: 10 а.е.— это приблизительно то расстояние, на которое удалена от Солнца орбита Сатурна. То, что комета Галлея большую часть своей жизни на орбите проводит далеко (внизу) от плоскости эклиптики, в сочетании с ее ретроградным движением приводит к тому, что она редко сближается с большими планетами Солнечной системы (а если и сближается, то на больших скоростях). Поэтому орбита и ядро кометы эволюционируют мало. Вероятно, именно по этим причинам мы до сих пор имеем удовольствие встречать ее каждые три четверти века. Напомню, что нет ни одной другой кометы, кроме кометы Галлея, которая наблюдалась бы в течение более 2000 лет. Если бы орбита этой кометы не была расположена столь благоприятно, то сближения с планетами-гигантами либо разрушили ее ядро, либо перевели ее с эллиптической на гиперболическую орбиту; она бы неузнаваемо изменила свою траекторию и вообще могла бы давно покинуть Солнечную систему.

На рис. 39 показана проекция орбиты кометы Галлея на плоскость эклиптики. Это виток, который она совершает между ее прошлым перигелийным прохождением в 1910 г. и предстоящим в 1986 г. Точками показаны положения кометы на орбите в разные годы. Звездочкой — положение в момент ее обнаружения в 1982 г. Из рис. 39 видно, что афелий комета проходила где-то около 1950 г., тогда она находилась между Нептуном и Плутоном.

Мы уже знаем из законов Кеплера, что в афелии эллиптической орбиты комета движется с минимальной скоростью, а в перигелии — с максимальной. Интересно, однако, знать, каковы эти числа. Мы видели в гл. 3, что их можно найти по

формулам (3.26) и (3.27). Осталось в эти выражения подставить числа: $M_{\odot}=2 \cdot 10^{30}$ кг, $G=6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², $a=18$ а. е. $=2,7 \cdot 10^{12}$ м, $e_i=0,97$. Производя вычисления,

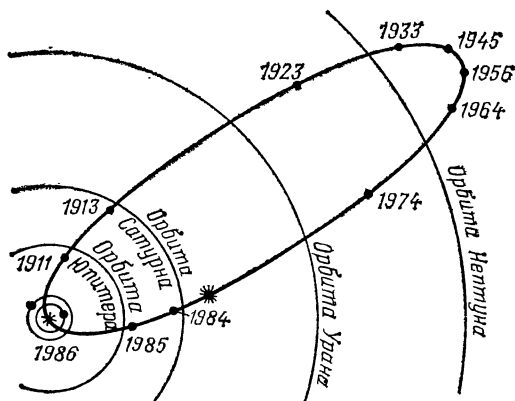


Рис. 39. Орбита кометы Галлея в проекции на плоскость эклиптики. Точки — положения кометы в разные периоды времени. Звездочка — ее положение в момент обнаружения в 1982 г.

найдем $v_q \approx 57$ км/с и $v_Q \approx 900$ м/с. Вблизи перигелия, как видим, комета Галлея несется с «жуткой» скоростью, почти в два раза большей, чем скорость, с которой летит Земля

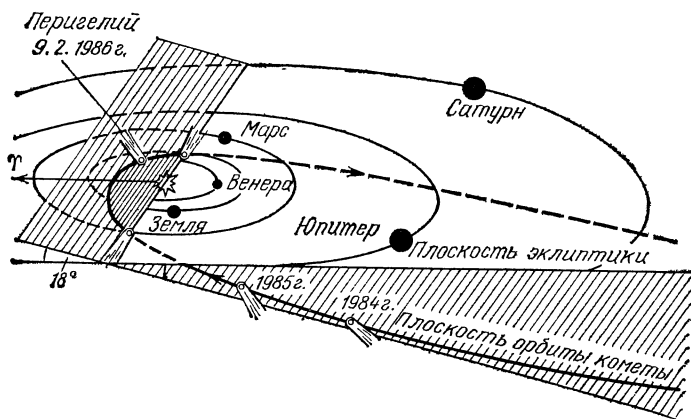


Рис. 40. Орбита кометы Галлея в пространстве

по своей орбите ($v_{\oplus} \approx 29,8$ км/с), а вот вблизи афелия комета «ползет», можно сказать, со скоростью, всего лишь близкой к скорости пушечного снаряда.

На рис. 40 показана орбита кометы Галлея в пространстве. Точками отмечены положения планет на момент прохождения кометой перигелия.

Видимый путь кометы Галлея по звездному небу изображен на рис. 41. По оси ординат отложено склонение δ в градусной мере, по оси абсцисс — прямое восхождение

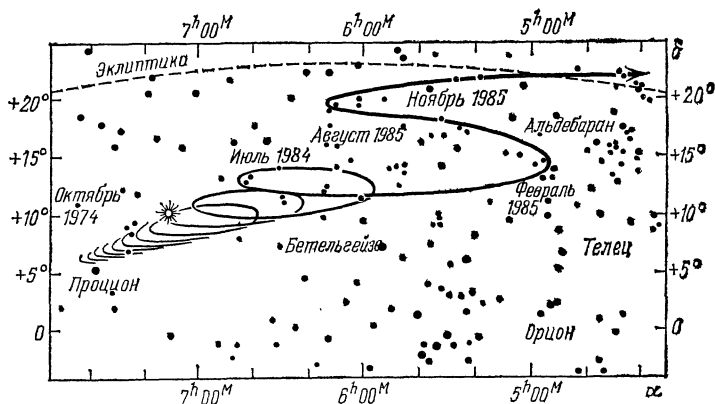


Рис. 41. Путь кометы Галлея среди звезд в период 1974—1985 гг.

α в часовой мере. Показаны созвездия и даты, в которые комета Галлея должна их проходить по начерченному на рис. 41 пути. Петли возникают из-за годичного движения Земли вокруг Солнца. Чем ближе комета Галлея, тем больше становятся петли.

Остается ответить на «жизненно важный» вопрос: как ведет себя ее орбита в течение больших промежутков времени, скажем, тысяч и более оборотов. Вспомним, что кроме силы притяжения к Солнцу, которая в соответствии с законами Кеплера приводила бы к движению по неизменно-му в пространстве и во времени эллипсу, на комету действуют силы со стороны планет Солнечной системы. Из-за этого ее движение является возмущенным. Отклонения кометы от законов Кеплера называются возмущениями, а соответствующие изменения элементов орбиты — возмущениями этих элементов. Такие возмущения элементов делятся на две категории: периодические и вековые.

Вековые возмущения зависят от взаимного расположения орбит кометы и планет, которое в течение очень больших промежутков времени меняется мало. Вековые возмущения элементов орбит накапливаются со временем (приблизительно пропорционально времени), так как они действуют

всегда в одну сторону. Под влиянием вековых возмущений меняются два элемента орбиты — долгота восходящего узла Ω и долгота перигелия P .

Периодические возмущения зависят от относительного расположения кометы и планет на их орбитах. Так как движение происходит по замкнутым траекториям, то данное расположение всех тел время от времени повторяется. Поэтому периодические возмущения действуют то в одну, то в другую сторону, и им подвергаются все элементы орбиты. Если, таким образом, мы интересуемся эволюцией орбиты кометы Галлея в течение больших промежутков времени (тысяч или десятков тысяч оборотов), то достаточно рассмотреть влияние лишь вековых возмущений.

Короткое отступление. Разумеется, «разговоры» о возмущениях орбит относятся и к планетам. Действительно, планеты движутся по слабо эллиптическим орбитам и оказывают друг на друга гравитационное влияние, приводящее и к периодическим, и к вековым возмущениям элементов. Помните, именно так Адамсом и Леверье был открыт Нептун — по вековым возмущениям в движении Урана. Большие планеты Солнечной системы движутся по эллипсам, а вековые возмущения испытывают только величины Ω и P . Отсюда следует важный вывод о том, что наша планетная система в течение ближайшего будущего существенно не изменится. Однако это отступление сделано с другой целью. Возникает естественный вопрос: что будет с планетной системой в течение космогонических промежутков времен и, скажем, миллиардов лет? Останется ли она приблизительно такой, как сейчас, или нынешняя ее конструкция неустойчива? Ответ на сегодняшний день отсутствует.

Комета, движущаяся по эллиптической орбите вокруг Солнца, сходна с волчком или гироскопом. Под действием вековых возмущений орбита ведет себя как гироскоп или волчок, к которому приложена сила, — она начинает прецессировать. Другими словами, ось вращения (или, что то же самое, плоскость орбиты) должна сама вращаться. Поскольку вековые возмущения малы, то плоскость орбиты должна вращаться медленно, затрачивая на один оборот несколько тысяч лет. Однако когда японский астроном И. Козаи сделал точные математические расчеты влияния вековых возмущений на орбиту кометы Галлея, то оказалось, что прецессия в данном случае весьма специфическая — ось вращения не совершает полных круговых движений, а только покачивается, так что аргумент перигелия ω всегда заключен между крайними значениями $47^\circ \leq \omega \leq 133^\circ$. Полный цикл качания орбита совершает за 20 000 лет. Наклонение орбиты при этом меняется незначительно. Например, 2000 лет назад оно составляло $i = 164^\circ$ вместо современного значения 162° . Существенным, однако, является то, что в

крайних положениях во время цикла качания орбита кометы Галлея проходит близко от орбиты Юпитера — всего на расстоянии 0,24 а. е. от нее. Это означает, что возмущения от этой огромной планеты могут в такие моменты радикально изменить орбиту кометы Галлея, которая по сравнению с гигантским Юпитером выглядит всего лишь микроскопической песчинкой — ведь масса кометы Галлея порядка $M_{\text{Г}} \approx 3 \cdot 10^{-14} M_{\text{J}}$. Анализ, выполненный канадским ученым Б. Макинтошем и чехословацким А. Гайдуком показал, что эта комета уже совершила около 1500 оборотов вокруг Солнца, т. е. по своей нынешней гелиоцентрической орбите она движется уже более 100 000 лет, и, значит, ее орбита успела совершить 5 циклов — качаний. Что было до того, сказать трудно. Нельзя исключить предположение, согласно которому комета Галлея попала на свою современную орбиту более 100 000 лет назад с какой-то другой орбиты (установить которую сегодня невозможно) пролетая вблизи Юпитера.

Каково будущее этой замечательной кометы? Мы видели, что при прохождении через перигелий кометы разрушаются — происходит интенсивное испарение льдов, дробление ядер. Комета Галлея на каждом витке теряет около 300 млн. тонн своего материала. Если ее масса близка к 60 млрд. тонн, то ей осталось совершить около 200 оборотов, т. е. к Солнцу она будет возвращаться неоднократно. Зачанчивая параграф, посвященный орбите кометы Галлея, нужно упомянуть, пожалуй, о том, что дважды в год Земля при своем движении вокруг Солнца пролетает в непосредственной близости от орбиты этой кометы. Очевидно, это происходит вблизи ее узлов. Нисходящий узел Ω орбиты кометы Галлея расположен всего на расстоянии 0,064 а. е. от орбиты Земли, а восходящий ω — на расстоянии около 0,16 а. е. Казалось бы, ну и что же? Ведь орбита кометы — лишь некая геометрическая линия в пространстве, которая приобретает некий интерес для нас в тех редких случаях, когда «случайно» Земля подходит к одному из узлов как раз в тот момент, когда через него проходит комета. Оказывается, однако, это не так. Орбита кометы Галлея, как, впрочем, и орбиты многих других комет, материализована. В каком смысле?

Мы знаем, что при перигелийных прохождении ядра комет разрушаются, и, в частности, испаряющиеся с их поверхности газы увлекают за собой пылинки различных размеров. Самые маленькие из них (субмикрометровые) под действием светового давления «выметаются» в хвост, но на

крупные сила светового давления практически не оказывает никакого влияния. В потоках испаряющихся газов эти пылинки приобретают скорости порядка десятков метров в секунду. Примем для оценки, что масса ядра кометы Галлея порядка $6 \cdot 10^{13}$ кг, а его радиус — около 2 км. Тогда параболическая скорость для ядра этой кометы из формулы (3.29) равна $v=2$ м/с. Значит, пылинки, увлеченные с поверхности ядра испаряющимися газами, гравитационно с ним не связаны и должны, вообще говоря, двигаться, как и само ядро, просто по его орбите. Однако теперь ядро и пылинки имеют небольшие относительные скорости, и, следовательно, с течением времени последние должны растягиваться по орбите кометы. Давайте прикинем, сколько времени потребуется пылинкам на то, чтобы рой, образованный ими, все больше растягиваясь по орбите, образовал в конце концов замкнутую «нить». Примем для конкретности, что скорость типичной пылинки относительно ядра $v_{отн}=10$ м/с. Орбита кометы Галлея — эллипс. Периметр эллипса не выражается формулами элементарной математики. Он равен $L=4aE(e)$, где $E(e)$ — так называемый полный эллиптический интеграл 2-го рода. Не будем вдаваться в тонкости и приведем его приближенное выражение для периметра эллипса:

$$L \approx \pi a [1,5 (1 + \sqrt{1-e^2}) - \sqrt[4]{(1-e^2)}].$$

Подставляя в эту формулу $a=18$ а. е. и $e=0,97$, найдем $L=77,6$ а. е. Теперь можно найти время, за которое пылинка отойдет от ядра на расстояние $L/2$:

$$t = L/2v_{отн} = 77,6 \text{ а. е.} / 2 \cdot 10 \text{ м/с} = 19400 \text{ лет.}$$

Мы взяли в расчете $L/2$, а не L , потому что от ядра отходят и более быстрые, и более медленные, чем само ядро, пылинки, т. е. растяжение роя происходит в обе стороны вдоль гелиоцентрической орбиты ядра. На самом деле время замыкания роя, видимо, меньше, так как относительные скорости, как уже было сказано, составляют несколько десятков метров в секунду, так что реально на замыкание требуется несколько тысяч лет. Поскольку комета Галлея движется по своей нынешней орбите свыше сотни тысяч лет, то, значит, рой пылинок на ней давным-давно замкнулся.

Но это не все. Рой пылинок растягивается не только вдоль орбиты кометы, но и поперек нее, правда, этот про-

цесс происходит медленнее и по другой причине. Он обусловлен возмущающим действием планет и напоминает процесс диффузии. С физической точки зрения это происходит потому, что пылинки и ядро расположены геометрически по-разному по отношению к той или иной проходящей планете, так что пылинки в результате гравитационного воздействия планеты получают небольшой импульс относительно ядра. Их случайные скорости относительно ядра накапливаются пропорционально \sqrt{t} , и в конце концов рой становится довольно «толстым».

Вот почему, когда Земля проходит вблизи узлов орбиты кометы Галлея, в атмосферу врываются пылинки ее роя, вспыхивают, и мы видим на небе звездный дождь или, как говорят, метеорный поток. Относительная скорость Земли и метеорных частиц близка к 70 км/с. Влетая с такой скоростью в земную атмосферу, они сильно нагреваются и испаряются. Эти пары светятся вследствие столкновений с атомами и молекулами атмосферы: тысячные доли кинетической энергии пылинки переходят в световую энергию. Читатель сам может убедиться, проделав несложный расчет, что даже пылинки массой $m \approx 0,001$ г светят так, что порождают явление метеора.

Поскольку метеорные частицы, растянутые вдоль орбиты кометы, движутся по траекториям, близким к параллельным, то земной наблюдатель видит их как бы высыпавшимися из одной и той же области неба. Если мысленно продолжить назад видимые траектории вспыхивающих в земной атмосфере метеоров, то они сойдутся в точке, которую называют радиантом данного метеорного потока.

Земля, как уже отмечалось, дважды в год проходит вблизи узлов орбиты кометы Галлея: в начале мая рядом с нисходящим узлом, в конце октября — рядом с восходящим. В это время на Земле наблюдаются метеорные потоки, связанные с кометой Галлея. Радиант майского потока расположен на небе в созвездии Водолея, которое по-латыни называют Aqualius. Отсюда этот майский поток метеоров получил название Акварид. Радиант второго потока расположен в созвездии Ориона и носит название Орионид. Мы уже знаем, что нисходящий узел орбиты кометы Галлея находится в 2,5 раза ближе к орбите Земли, чем восходящий. Ясно поэтому, что Аквариды должны быть более обильными и красочными. Так оно и есть. Каждый год с 1 по 10 мая перед рассветом, когда из-за горизонта восходит созвездие Водолея, небо начинают бороздить большие

и яркие метеоры. Ближе всего Земля подходит к восходящему узлу орбиты кометы Галлея 21 октября, а к нисходящему — 5 мая.

А теперь перейдем к предстоящему перигелийному прохождению кометы Галлея и попробуем представить себе,

§ 5. Что нас ожидает в 1986 году

Что предвещает нам гаданье ?

Большие хлопоты. Свиданье

С одной особой очень странной,

Всего скорее иностранной,

Которая должна принести

Нам неожиданную весть.

Мы уже знаем о комете Галлея немало, во всяком случае, достаточно для того, чтобы представить себе, каким должно быть предстоящее возвращение, как она будет располагаться по отношению к Земле, к Солнцу, каковы возможности ее наблюдения и, главное, чего можно ждать от нее как от партнерши при встрече с космическими экспедициями.

Орбита кометы Галлея, как мы знаем, не является жесткой, она «дрожит» под влиянием планетных возмущений, слегка меняется и, строго говоря, ни в какой момент времени не является чистым эллипсом. Однако для «счастливого свидания» нужно как можно точнее рассчитать ее траекторию и как можно точнее указать ее координаты на момент встречи — затратив «бешеные деньги» на «стрельбу» по этой космической мишени, обидно будет попасть «в молоко». Чтобы точно рассчитать ее движение, нужно как можно раньше ее обнаружить. Но где искать и, главное, как искать? Ведь на большом расстоянии от Солнца кометное ядро — это просто кусок грязного льда без атмосферы, который может лишь отражать солнечные лучи, причем светиться он должен крайне слабо из-за того, что очень мал.

Следовательно, прежде всего необходимы расчеты траектории, на основании которых можно было бы получить эфемериду и пытаться искать комету на небе.

Найдя комету на небе, нужно непрерывно вести позиционные наблюдения, уточняя каждый раз ее движение, чтобы все время вносить коррективы в ее расчетную орбиту. В этом случае можно постараться свести к минимуму ошибки в расчетах «космических стрельб».

Расчеты были выполнены в СССР и США. Они показали, что перигелий комета Галлея пройдет 9 февраля 1986 г.

Элементы ее орбиты, рассчитанные на 9 февраля 1986 г. по мировому времени, таковы:

$$q = 0,5871023 \text{ а. е.}$$

$$e = 0,9672709$$

$$\omega = 111,8474^\circ$$

$$\Omega = 58,1455^\circ$$

$$i = 162,2394^\circ$$

$$T = 9,5132 \text{ февраля } 1986 \text{ г. (время мировое).}$$

Комету обнаружили 16 октября 1982 г. в созвездии Малого Пса. Она оказалась именно там, где и должна была быть согласно рассчитанной эфемериде. Отклонение от расчетной точки составляло всего несколько угловых секунд — такая точность ранее никогда не достигалась. Комету обнаружили на Паломарской обсерватории в США Д. Джевитт и Э. Даниельсон из Калифорнийского технологического института. Телескоп на горе Паломар имеет диаметр объектива 5 метров и является крупнейшим в мире после 6-метрового БТА (Большого телескопа АН СССР в станице Зеленчукской). Однако даже в этот крупнейший телескоп комету Галлея в октябре 1982 г. обнаружить было бы невозможно без новейших достижений электроники.

Для поиска кометы использовали так называемые ПЗС-матрицы. ПЗС расшифровывается как прибор с зарядовой связью. Такие матрицы используют для регистрации крайне слабых источников света, так как ПЗС способны детектировать отдельные кванты. Обычно ПЗС-матрицы используют в астрофизике, когда пытаются наблюдать удаленные объекты, находящиеся за пределами нашей Галактики, и притом крайне слабые. Конечно, столь «тяжелая артиллерия» никогда еще не использовалась для «стрельбы по воробьям» — для поиска слабых комет. Ведь я писал в гл. 1, если помните, об иронии судьбы, которая через 200 лет после того, как Шарль Мессье составил свой знаменитый каталог внегалактических туманностей (чтобы не путать их с «вожделенными» кометами), поменяла местами причины и следствия. Далекие объекты Вселенной говорят нам о ее структуре и эволюции, позволяют продвигаться вперед в понимании глобальных проблем устройства мира. Естественно, им отдается предпочтение в наблюдательных программах. Но в данном случае в связи с подготовкой космических миссий комету Галлея необходимо было обнаружить как можно раньше, чтобы скорректировать траектории полета аппаратов.

Ее обнаружили на колоссальном расстоянии (рис. 42), когда она была удалена от Земли на 10,94 а. е. и от Солнца — на 11,05 а. е., т. е. находилась за орбитой Сатурна (см. рис. 39). Такого ещё не бывало. На таком расстоянии кометы не имеют атмосфер. Поэтому ядро кометы Галлея светило просто отраженным солнечным светом. Его блеск был ниже 25-й звездной величины. Напомню, что самые слабые, еще различимые невооруженным глазом звезды имеют 6-ю звездную величину. Это означает, что отношение освещенностей равно:

$$E_{\text{Галлея}} : E_{6^m} = 2,512^{25-6} = 1:40 \cdot 10^6.$$

Значит, в момент обнаружения ядро кометы Галлея светило в 40 млн. раз слабее самых слабых звезд. Задумайтесь!

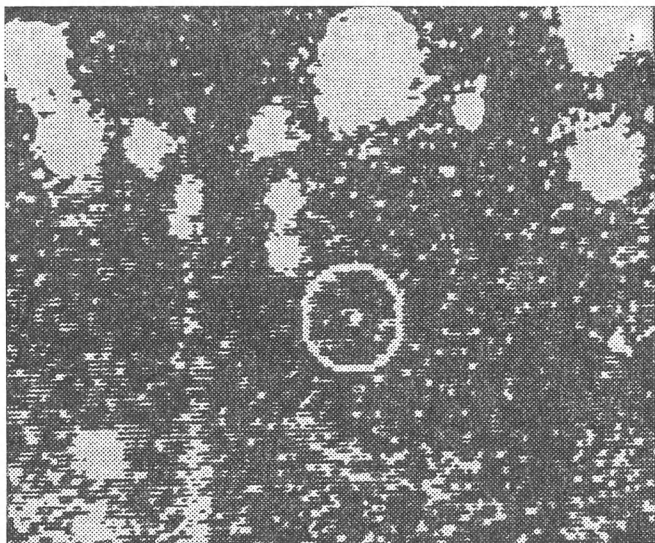


Рис. 42. Фотография кометы Галлея, полученная 16 октября 1982 г. с помощью ПЗС-матриц на Паломарской обсерватории

Зная расстояние до Земли и Солнца, понимая, что ядро светит отраженным солнечным светом, сделав предположения об альбедо, шаровой форме ядра, можно оценить его размеры. Они оказываются близки к 3—4 км. Но здесь большая неопределенность создается незнанием альбедо. Ясно, что чистый лед очень хорошо отражает солнечные

лучи, а темная каменистая поверхность — плохо. Поэтому в действительности радиус ядра кометы Галлея может быть и больше, и меньше в 2—3 раза.

Скорость, с которой комета Галлея приближается к Солнцу, иллюстрирует рис. 39. Видно, что в начале 1985 г. она пересечет орбиту Юпитера (разумеется, ее проекцию на плоскость кометной орбиты, так как узлы последней расположены, как вы помните, вблизи орбиты Земли, т. е. на расстоянии около 1 а. е. от Солнца). Мы с вами теперь во всеоружии (после знакомства с гл. 3) и сами в состоянии вычислить, с какой скоростью она летит в космосе, когда находится на таком расстоянии от Солнца. Воспользуемся формулой (3.25).

Принимая $a=18$ а. е. и $r=5,2$ а. е. (расстояние орбиты Юпитера от Солнца), находим $v \approx 17$ км/с. Конечно, это приближенная оценка — ведь мы считали орбиту кометы строго эллиптической и не учитывали возмущающего действия планет. Приблизительно через год она долетит до орбиты Марса (1,52 а. е.). Здесь ее скорость уже будет близка к 33 км/с. По мере приближения к Солнцу ее движение ускоряется. Чтобы долететь до орбиты Земли (1 а. е.), ей понадобится еще около месяца, комета пересечет ее уже со скоростью порядка 41 км/с. И еще через месяц с небольшим комета Галлея пройдет перигелий со скоростью около 55 км/с и начнет удаляться от Солнца. Восходящий узел комета пройдет 9 ноября 1985 г., а нисходящий — 10 марта 1986 г., в перигелии, как уже упоминалось, она будет 9 февраля 1986 г.

Предстоящее появление кометы Галлея будет самым неблагоприятным для наблюдений с Земли за последние 2000 лет. Нам с вами немного не повезло. Может быть, дело будет обстоять лучше во время ее следующего появления в 2061 г., но, боюсь, что из наших современников наблюдать его смогут лишь новорожденные почитатели астрономии. Неблагоприятность условий наблюдения кометы Галлея в 1986 г. хорошо видна из рис. 40: когда комета будет находиться на перигелийном отрезке своей орбиты, Земля (и мы вместе с ней) будет располагаться за Солнцем. Напомню, что в 1910 г. ситуация была обратной и Земля даже прошла через гигантский хвост кометы Галлея. К сожалению, в 1986 г. во время прохождения перигелия комета будет проецироваться на дневное небо вблизи Солнца, и наблюдать ее будет сложно. Расстояние от Земли, на котором она будет при этом находиться, составит около 1,5 а. е. Тем не менее специалисты пытаются рассчитать заранее

ее ожидаемое поведение — в смысле условий видимости из различных географических точек земного шара, изменений ее блеска в различные периоды времени наземных наблюдений и т. д. Все это, конечно, может оказаться напрасным: вспомним комету Когоутека 1973 г., которой предрекали судьбу «кометы века», но которая так ею и не стала. Тем не менее ожидается, что к концу 1984 г. комету Галлея можно будет наблюдать в крупные телескопы. Согласно расчетам на минимальном расстоянии от Земли, равном 0,6 а. е., она окажется 27 ноября 1985 г., почти сразу после прохождения ею восходящего узла орбиты. Считается, что в этот период любители смогут наблюдать ее даже в бинокли. После 27 ноября 1985 г. комета начнет удаляться от Земли, но зато приближаться к Солнцу (перигелий ей еще предстоит пройти), поэтому блеск ее будет нарастать. Ожидается, что в декабре 1985 г. комету Галлея можно будет увидеть невооруженным глазом.

Если снова взглянуть на рис. 40, то станет ясно, что после прохождения перигелия, во время движения к нисходящему узлу орбиты, условия проектирования кометы на небо станут улучшаться, так как начнет увеличиваться угловое расстояние между ней и Солнцем при наблюдениях с Земли. Комета будет всходить перед рассветом, но будет слабой из-за относительно большого расстояния до Земли. Предполагают, что в этот период она хорошо будет видна в южном полушарии и особенно в Австралии, где будет наблюдаться в зените и, следовательно, являть собой вполне интересное зрелище (хвост ее, как ожидают, должен простираться на 30—40°). В северном полушарии, по-видимому, будет виден в это время лишь ее хвост.

10 марта 1986 г. комета Галлея пройдет, как уже говорилось, нисходящий узел и уйдет вниз, под плоскость эклиптики. В этот момент ее и намерено подстеречь человечество. Все «свидания» назначены именно в этом месте.

Затем снова начнется сближение с Землей, которое произойдет 11 апреля 1986 г., так что расстояние между Землей и кометой достигнет 0,4 а. е. К этому моменту она уже будет довольно далеко от Солнца, на расстоянии 1,3 а. е., поэтому активность ее станет относительно слабой. В конце апреля комету будет удобно наблюдать в северных широтах из-за ранних ее восходов, но она уже станет слабой, с маленьким «хвостиком» около 5°. Если считать, что за нею можно будет следить до тех же расстояний, на которых она была обнаружена (11 а. е.), то она будет находиться в поле зрения до августа 1990 г.

Странное чувство испытываешь, когда пишешь эти строчки. Я могу писать о предстоящем появлении кометы Галлея лишь в неопределенном, так сказать, наклонении, употребляя слова «ожидается», «предполагается» и т. д. Читатель, который возьмет в руки эту книгу в 1986 г., возможно, улыбнется: уж он-то точно будет знать, где и как наблюдали комету Галлея (и наблюдали ли вообще — ведь неизвестно, насколько пострадало ее ядро при неоднократном дроблении в 1910 г.), состоялись ли назначенные ей свидания и если состоялись, то насколько они были удачны.

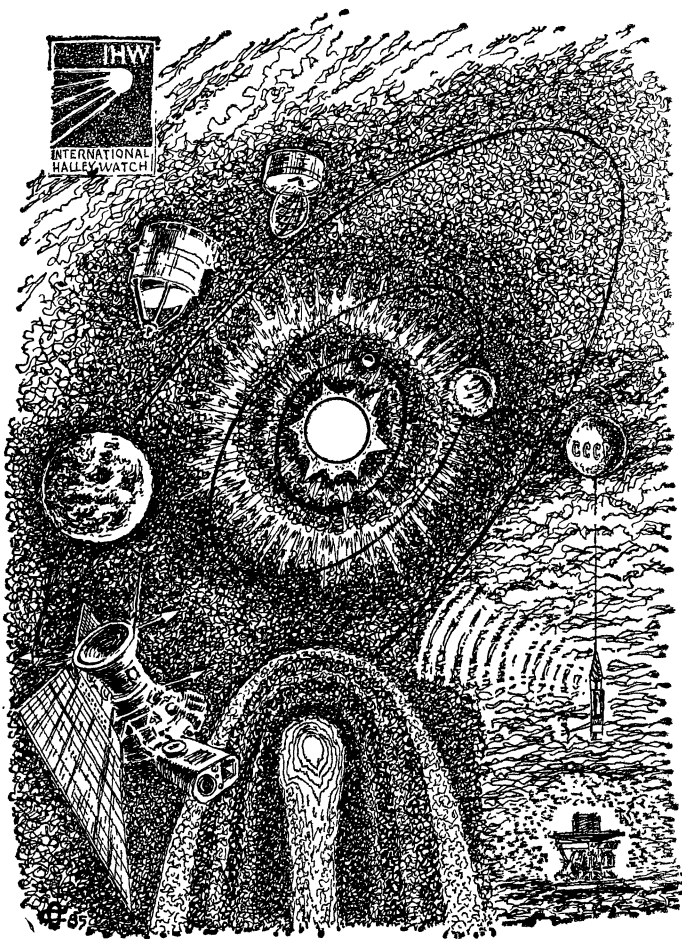
Будьте снисходительны, если я в чем-то не оправдаю ваших надежд. «...Беззаконная комета в кругу расчисленных светил» (А. С. Пушкин) всегда может оказаться «шка тулкой с сюрпризом».

§ 6. Наблюдения в унисон

Наука всегда была интернациональна и едина. Законы Ньютона и в Англии, и в России одинаковы. Сама наука и интерес к ней объединяют множество людей во всех странах, служа делу мира и прогресса, и комета Галлея в истории человечества была и будет, вероятно, ярким тому примером. Когда после появления кометы в 1759 г. стало ясно, что она действительно периодическая с периодом около 76 лет, возникла идея о международном сотрудничестве астрономов разных стран с целью изучения этой кометы. Впервые международная программа наблюдений и исследований кометы Галлея к ее появлению в 1835 г. была предложена В. Я. Струве, призвавшим всех астрономов объединить усилия по ее наблюдениям и сформулировавшим основные научные задачи.

Еще более значительные усилия были предприняты целым рядом русских и зарубежных ученых перед появлением этой кометы в 1910 г. Астрономы многих стран попытались объединиться и создать международную службу кометы Галлея в 1910 г. Это принесло ощутимые результаты. Я уже писал о том, что был накоплен богатейший материал во многих обсерваториях мира, без которого вряд ли можно было разработать более или менее успешную инженерную модель кометы, необходимую при проектировании нынешних космических миссий к ней. Однако Международного астрономического союза (МАС) тогда не существовало (он возник в 1919 г.), поэтому скоординировать в централизованном порядке наблюдения и исследования кометы Галлея было весьма затруднительно.

Пожалуй, еще никогда в истории астрономии не планировалось столь широкое международное сотрудничество, как сейчас, в ожидании нынешнего прихода кометы Галлея. Решение об этом принято на XVIII Генеральной ассамблее МАС. Эта международная программа коротко называется INW (International Halley Watch). В СССР создана своя программа наземных наблюдений кометы Галлея, которая является частью INW. Трудно переоценить значение одновременных наблюдений кометы Галлея обсерваториями всего земного шара, тем более по единым программам. Но главная цель, конечно, получить, так сказать, стереоскопическое изображение кометы, комбинируя данные наземных наблюдений с одновременными пробами, «взятыми изнутри» экспедиционными аппаратами. Пожелаем удачи всем участникам этой международной программы!



СВИДАНИЕ С КОМЕТОЙ

Пусть происходит то, во что не верят,
И верят в то, чего не происходит...

Л. Камюэнс. Сонет

§ 1. «Лирическое отступление»

В гл. 1 уже упоминалось о том, что кометной миссией, стартующей под флагом Советского Союза, руководит Роальд Зиннурович Сагдеев. Чрезвычайно талантливый физик-теоретик Р. З. Сагдеев в 29 лет был уже доктором физико-математических наук, а в 35 лет — академиком. Из глубоких работ по физике плазмы особенно известна его теория бесстолкновительных ударных волн — о них уже говорилось в гл. 5. Это было фундаментальное открытие, без которого немыслима ни современная космическая физика, ни решение проблемы управляемого термоядерного синтеза, ни многое другое.

Конечно, это не единственное из того, что за ним «записано» в науке, и бесстолкновительные ударные волны здесь упомянуты лишь потому, что можно усмотреть некий «перст судьбы» в том, что и сейчас утвержденные во всех инстанциях маршруты космических экспедиций к комете Галлея неизбежно должны пройти через гигантскую бесстолкновительную ударную волну, возникающую при обтекании головы кометы солнечным ветром.

В процессе подготовки кометной экспедиции крупному физику-теоретику Р. З. Сагдееву не раз приходилось «переквалифицироваться» в инженера, конструктора, проектировщика и даже изобретателя.

Чтобы попытаться понять причины подобной метаморфозы, придется немного отвлечься от темы и сказать несколько слов об особенностях этого замечательного эксперимента. Космические корабли еще никогда не летали к кометам, поэтому опыта общения с небесными гостями пока ни у кого нет. Имеется не так уж много стандартных приборов, применявшихся в прежних исследовательских планетных программах, которые можно использовать в

экспедициях к кометам, ничего не меняя в их конструкции. Многое, очень многое нужно придумывать и конструировать с нуля. Понятно, что это не серийное производство, налаженное промышленностью. Каждый или почти каждый прибор уникален — от идеи до исполнения.

Каждый прибор нужно не только придумать, но и создать: сначала идея, потом чертеж, потом макет, затем образцы для испытания в лаборатории, затем летные образцы, которые испытываются в «кошмарных условиях» перед тем, как попасть на борт космического корабля. Эта книга пишется для школьников, многие из которых часто бывают с экскурсиями в стенах Института космических исследований АН СССР. Попросите провести и показать вам, например, так называемый КИС — контрольно-испытательный стенд, на котором научную аппаратуру, предназначенную к размещению на борту исследовательского космического корабля, подвергают крайне не деликатному обращению: трясут, нагревают, охлаждают и т. п.

Можно было бы долго рассказывать о трудностях и проблемах, которые возникают при придумывании, проектировании, конструировании и испытаниях такой уникальной научной аппаратуры, но мы поступим иначе.

В сборнике зарубежного «физико-математического юмора» с интересным названием «A Stress Analysis of a Strapless Evening Gown» («Анализ напряжений в вечернем платье без бретелек») была когда-то напечатана юмористическая статья американского физика Ф. Чизхолма. Чизхолм пишет о том, что основные законы срывов, затяжек и неудач в процессе научных экспериментов можно описать четко формулируемыми «законами», которые, как мне кажется, вполне характеризуют подготовку такого сложного космического эксперимента, как комплексная экспедиция к комете Галлея.

Свой первый закон Чизхолм формулирует так:

«Все, что может испортиться, — портится».

Имеется, как пишет Чизхолм, и вполне очевидное следствие из этого закона:

«Все, что не может испортиться, — портится тоже».

Вы, конечно, понимаете, что в сжатые сроки подготовки уникального космического эксперимента — запуск к Венере может быть осуществлен только в так называемое «окно» (см. далее) в конце декабря 1984 г. — действует не только и не столько первый закон Чизхолма, сколько следствие из него. Можете себе представить, сколько труда и разнообразных талантов потребовалось команде «Веги», чтобы преодолеть неумолимое действие первого закона.

Вернемся, однако, к метаморфозам.

Экспедиция к комете Галлея сложная, комплексная. Комплексная не только потому, что на борту аппарата должен быть размещен большой и сложный набор дополняющих друг друга и взаимодействующих приборов, но еще и потому, что сначала аппарат летит к Венере и там выполняет обширную научную программу, а затем уже, «оттолкнувшись» с помощью гравитационного маневра от этой планеты, летит к конечной и основной цели — комете Галлея. Это во-первых. Во-вторых, экспедиция «Вега», снаряжаемая под флагом Советского Союза, осуществляется в рамках широкого международного сотрудничества. В проекте «Вега» участвуют Австрия, Народная Республика Болгария, Германская Демократическая Республика, Венгерская Народная Республика, Польская Народная Республика, Франция, СССР, Чехословацкая Социалистическая Республика, Общество им. Макса Планка (ФРГ).

Над разработкой аппаратуры для проекта трудятся многие советские и зарубежные фирмы, большие коллективы научных работников, инженеров, техников, конструкторов, большие производственные коллективы — множество талантливых, преданных своему делу людей. При таких условиях, казалось бы, научному руководителю проекта достаточно ограничиться лишь идейным руководством экспедиции, в детали можно бы и не входить. Вот мы и подошли вплотную к вопросу о том, зачем физику-теоретику вдаваться в «аппаратурные подробности» экспедиционных экспериментов? Боюсь, здесь не обошлось без первого следствия из третьего закона Чизхолма!

Вот как выглядит третий закон:

«Любую цель люди понимают иначе, чем человек ее указующий».

А вот его первое следствие:

«Если ясность вашего объяснения исключает ложное толкование, все равно кто-то поймет вас неправильно».

Конечно, это шутка, такая же, впрочем, как и сами законы Чизхолма. Но ведь в каждой шутке, как известно, есть доля правды.

Я пишу обо всем этом потому, что хочется хоть немного, в меру возможностей, дать почувствовать читателю, какой гигантский труд, напряжение, творческий поиск, ежедневная борьба, преодоление неудач, часто сменяющих творческие удачи, стоят за словами «экспедиция к комете Галлея».

Первоначально проект экспедиции разрабатывался совместно Американским и Европейским космическими агент-

ствами. Старт предполагался в 1985 г. Рассчитано было все — от траектории запускаемого автомата до массы (с точностью до граммов) научной аппаратуры. Вот идея этого эксперимента.

После ухода автомата за пределы земного тяготения включается небольшой двигатель, который переводит аппарат на спиралевидную траекторию, раскручивающуюся вокруг Солнца. На втором витке спирали аппарат должен пролететь мимо кометы Галлея на расстоянии в 130 000 км. В этот момент с основного аппарата должен стартовать маленький субавтомат (массой около 100 кг) и направиться к комете. По расчетам он должен был пролететь всего в нескольких сотнях километров от ядра. Основной автомат делает еще один виток по спирали и в 1988 г. встречается с другой периодической кометой — Темпель-2. Подстроившись в хвост этой комете, автомат, медленно подтягиваясь, добирается почти до ядра, летя внутри кометной атмосферы.

Стоимость этого проекта составляла 250 млн. долларов, и американцы от него отказались.

Европейцы получили финансирование на часть проекта: встречу только с кометой Галлея. Этот проект стоит 100—150 млн. долларов и носит условное название «Джотто».

Проект «Вега» возник потому, что его автор обратил внимание на удачное расположение Венеры во время прохождения кометой Галлея ее перигелия. Положение Венеры случайно оказалось таким, что появилась возможность совместить, как говорится, «приятное с полезным». В декабре 1984 г. в СССР планируется запуск автоматов (типа «Венера-11» и «Венера-12») в сторону Венеры. Предполагается, что небольшого маневра в поле тяготения Венеры могло бы хватить на то, чтобы направить выполнивший свои исследовательские «венерианские задачи» корабль к комете Галлея. На самом деле все это не слишком тривиально, потому что нужно, умело манипулируя двумя, как говорят, свободными параметрами, рассчитать, осуществима ли такая идея. Один такой параметр — это время запуска. Корабль нужно запускать в тот период, когда Венера начинает нагонять Землю в своем гелиоцентрическом вращении. Это связано с тем, что стартовые импульсы космических аппаратов, запускаемых, например, с орбиты искусственных спутников Земли, невелики: 3—5 км/с. Поэтому догнать Венеру, вращающуюся вокруг Солнца быстрее Земли в 1,6 раза, невозможно. Отсюда возникают уже упоминавшиеся окна запуска на Венеру длительностью приблизительно в две недели. Внутри этих двух недель

нужно оптимально выбрать дату запуска, чтобы космический аппарат подошел к Венере как раз в нужный момент и мог снова стартовать — теперь уже к комете.

Второй свободный параметр — это момент начала гравитационного маневра, направляющего корабль от Венеры к комете. Расчеты показали, что идея осуществима, и проект «Вега» обрел жизнь. Мы уже знаем, что американцы отказались от своего проекта стоимостью в 250 млн. долларов, а «Европа летит» ориентировочно за 100—150 млн. долларов. Проект «Вега» относительно дешев, так как не требует отдельного запуска к комете. Тем не менее хорошо известно, что запуск в космос с исследовательскими целями 1 кг научной аппаратуры обходится дороже килограмма золота. Возникает вопрос: зачем? Не лучше ли эти деньги потратить на хозяйственные нужды; построить, например, больше жилых домов, санаториев и т. п.? Можно ответить коротко: «Не хлебом единым жив человек». Но можно и подробнее.

Прогресс в прикладных областях науки и техники, тех, которые создают станки, подъемные краны, хлебоуборочные машины, открывают месторождения полезных ископаемых, производят медикаменты и т. п., невозможен без прогресса в фундаментальных исследованиях, хотя на первый взгляд они не связаны между собой. Можно привести много примеров.

Глубоко абстрактные геометрические построения Больяи, Римана и Лобачевского, которые рассматривали математические свойства неких совершенно «нереальных» пространств, где кратчайшие расстояния между двумя точками есть какая-либо кривая, а отнюдь не прямая (как подсказывает повседневный опыт) линия, оказалось, описывают то реальное пространство, в котором мы с вами живем. Оно искривлено из-за того, как выяснилось, что в нем находится материя. Я не могу останавливаться подробнее на этом интереснейшем вопросе — мы ведь с вами сейчас говорим о другом.

Еще один, совсем близкий пример. Искусственные спутники Земли и управляемые космонавтами корабли, предназначенные для исследования околоземного космического пространства — области, далекой, казалось бы, от нужд народного хозяйства, — дают бесценную информацию о наших земных природных ресурсах, их залегании в недрах нашей планеты, позволяют делать долгосрочные метеорологические прогнозы, так необходимые в народно-хозяйственной деятельности.

Я не хочу становиться на зыбкую почву прогнозов того, что могут в будущем дать человечеству миссии к кометам вообще и комете Галлея в частности, но напомним еще раз о гипотезах, связывающих с кометами происхождение жизни на Земле, и многое другое, о чем уже говорилось в этой книге.

Итак, к комете Галлея стартуют три международные экспедиции. Это — «Вега» под эгидой Советского Союза, «Джотто» под флагом Европейского космического агентства (ЕКА) и «Планета-А» под руководством Института космоса и аэронавтики Японии. Кроме того, не желая оставаться в стороне, американцы остроумно вышли из положения, направив околоземный спутник АЙСИИ-3 (ISEE-3) к комете Джакобини — Циннера, с которой он должен встретиться 11 сентября 1985 г. Благодаря сложной околоземной траектории этого спутника, предназначенного в основном для изучения солнечного ветра *), оказалось возможным выбрать момент, когда небольшого стартового импульса (достигаемого путем включения ракетного двигателя) было достаточно, чтобы изменить нужным образом его траекторию. Это можно было сделать, по-видимому, в так называемой точке либрации, где равнодействующая всех сил, действующих со стороны Земли, Луны и Солнца на этот спутник, равна нулю. В противном случае слабого стартового импульса не хватило бы, чтобы заметно изменить его траекторию. Оказалось, что орбита периодической кометы Джакобини — Циннера располагается очень удачно, так что небольшой маневр в точке либрации позволяет перевести АЙСИИ-3 на траекторию встречи с этой кометой.

Итак, АЙСИИ-3 уже стартовал к комете Джакобини — Циннера, «Вега» стартует к комете Галлея в конце декабря 1984 г., «Джотто» стартует 10 июля 1985 г. и «Планета-А» — 14 августа 1985 г. Уже неоднократно подчеркивалось, что эти строчки пишутся весной 1984 г., когда до стартов еще далеко. Поэтому, наблюдая все возникающие при подготовке проекта «Вега» трудности (ничего не могу сказать о проблемах, с которыми сталкиваются специалисты программ «Джотто» и «Планета-А», но думаю, что их ничуть не меньше) и представляя, хотя бы приблизительно, проблемы будущие — выбор момента старта, коррекции, которые необходимо будет вносить по мере уточнения элемен-

*) Поскольку АЙСИИ-3 исходно не был предназначен для кометных исследований, то, естественно, научные задачи, которые он сможет выполнить при встрече с кометой Джакобини — Циннера, весьма ограничены.

тов орбиты кометы, и многое, многое другое — я могу лишь позавидовать своим читателям, которые откроют эту книгу, когда классическая формула «Делайте свои ставки, джентельмены!» уже отзвучит, «жеребий будет брошен» — «гонка века» стартует.

Теперь обсудим

§ 2. «Дороги, которые мы выбираем»

Итак, мы стартуем к комете Галлея. Прежде всего, почему именно к ней? Я обещал вернуться к этому вопросу, когда рассказывал об исключительной роли, которую сыграла эта комета в истории астрономии и даже физики (если иметь в виду то косвенное влияние, которое оказал Галлей на Ньютона, стимулировав исследование движения тел в центральном гравитационном поле). Очевидно, готовить экспедиции нужно заранее — это многолетняя трудоемкая работа, но заранее можно готовиться только к встрече с какой-либо известной, т. е. короткопериодической кометой. С другой стороны, с точки зрения эффективности проведения физических экспериментов ясно, что комета должна быть активной — яркой, с бурным выделением газов, пыльным хвостом, развитой атмосферой, «серьезной» ионосферой и т. п. Активными бывают, как правило, молодые кометы, впервые подлетающие к Солнцу. Но такие небесные гости, внезапно появляясь в поле зрения, стремительно проносятся через перигелий и вновь уходят в небытие. Подготовить космический корабль¹ с аппаратурой и запустить его навстречу такой комете физически невозможно.

В поэме М. Ю. Лермонтова «Демон» есть строчки о том, как

...бегущая комета
Улыбкой ласковой привета
Любила поменяться с ним...

Это как раз та самая ситуация — ничего, кроме «привета», ни космический аппарат, ни комета не успеют «передать» друг другу.

Остается ориентироваться на короткопериодические кометы, орбиты которых достаточно хорошо изучены, но такие кометы, как правило, не слишком активны — часто проходя вблизи Солнца в течение своей жизни, они теряют летучие вещества и становятся малоинтересными — свидания с ними не вызывают особого энтузиазма.

Комета Галлея в этом смысле также является исключительной. Несмотря на то, что ее появления вблизи Солнца регистрируются человечеством уже более 2000 лет, а в действительности, на своей нынешней (или близкой к нынешней) орбите она пребывает, возможно, более 100 тыс. лет, она продолжает оставаться весьма активной. Трудно сказать, в чем «секрет ее молодости», но, может быть, мы узнаем это после первого свидания.

Обратимся, однако, к «дорогам, которые мы выбираем». На языке науки речь идет о стратегии выбора траекторий полета космических аппаратов к комете Галлея. Несмотря на то, что «миссионеров» трое, стратегия у всех одна, которая определяется современным уровнем возможностей космической техники. Дело в том, что Земля движется по своей гелиоцентрической орбите со скоростью, близкой к 30 км/с. Стартовые импульсы, которые могут быть сообщены космическому аппарату, находящемуся на орбите искусственного спутника Земли, при современном уровне техники порядка 3—5 км/с. Такие малые по отношению к орбитальной скорости Земли импульсы не позволяют «организовать» встречу с «кем бы то ни было» далеко от плоскости эклиптики. Плоскость орбиты кометы Галлея, как вы помните, наклонена к плоскости эклиптики под углом 162° (или 18° , если не говорить о направлении ее движения). Поэтому можно не пояснять, по-видимому, что встречи возможны лишь вблизи узлов орбиты кометы Галлея — восходящего, где она поднимается из-под плоскости эклиптики и переходит в северное полушарие неба, или нисходящего, где она снова уходит после прохождения перигелия под плоскость эклиптики в южное полушарие. Таким образом, точки встречи с кометой Галлея определяются сразу же и однозначно, так как уровень современной космической техники не допускает других решений этой задачи. Таких точек, однако, две, и следующий вопрос заключается в том, какую из них выбрать.

Из чего следует исходить при решении этого вопроса? Успех физических экспериментов, как уже упоминалось, зависит от степени активности кометы в момент встречи. Наблюдения кометы Галлея в 1910 г. выявили некую, присущую именно этой комете, особенность: особенно активной она стала после прохождения перигелия, намного активнее, чем при подлете к нему. Это обстоятельство является сильным аргументом в пользу того, чтобы направить кометные миссии в нисходящий узел орбиты. Но есть и другие моменты, которые нужно учитывать, свои «за» и «против».

В Институте космических исследований АН СССР на компьютере были выполнены расчеты оптимальных траекторий полета в восходящий и нисходящий узлы орбиты кометы Галлея.

В проектах «Джотто» и «Планета-А» специалисты остановились на варианте полета в нисходящий узел орбиты кометы Галлея, считая, по-видимому, главным для успеха

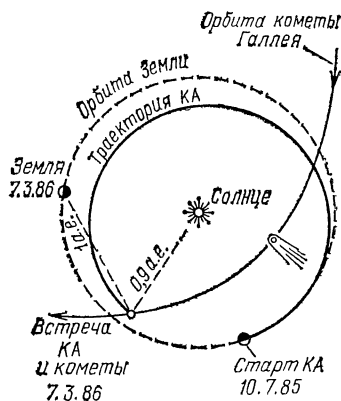


Рис. 43. Траектория полета космического аппарата «Джотто»

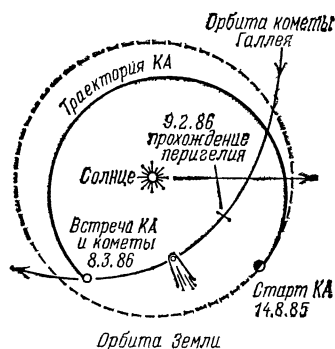


Рис. 44. Траектория полета космического аппарата «Планета-А»

физических экспериментов то, что уже отмечалось вначале — ожидаемую существенно более высокую активность кометы после прохождения ею перигелия. Несмотря на некоторые «плюсы», связанные с полетом в восходящий узел, это обстоятельство, вероятно, перевешивает.

Расчеты траекторий в этих проектах зависят от вида орбиты искусственного спутника Земли, с которой стартуют автоматы к комете, ряда других технических характеристик. Схемы траекторий, по которым полетят космические аппараты «Джотто» и «Планета-А», приведены на рис. 43 и 44 соответственно.

«Джотто» стартует 10 июля 1985 г., летит по траектории, показанной на рис. 43, встречает комету Галлея предположительно 7—13 марта 1986 г. В этот момент Земля будет находиться от точки встречи на расстоянии 0,98 а. е., а Солнце — на расстоянии 0,89 а. е. Рисунок позволяет любознательному читателю проследить взаимные расположения кометы Галлея, Земли и экспедиционного аппарата практически на всех этапах полета.

Геометрия в момент встречи показана на рис. 45.

Угол Солнце — Земля — точка встречи близок к рассчитанному советскими специалистами (что естественно,

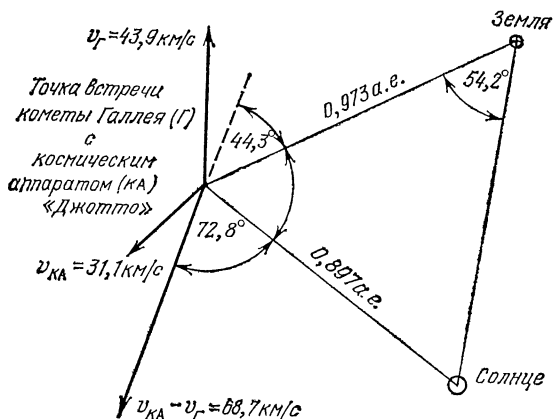


Рис. 45. Геометрия встречи космического аппарата «Джотто» с кометой Галлея: v_{Γ} — скорость кометы Галлея относительно Солнца; $v_{КА}$ — скорость космического аппарата относительно Солнца; $v_{КА} - v_{\Gamma}$ — скорость космического аппарата относительно кометы Галлея

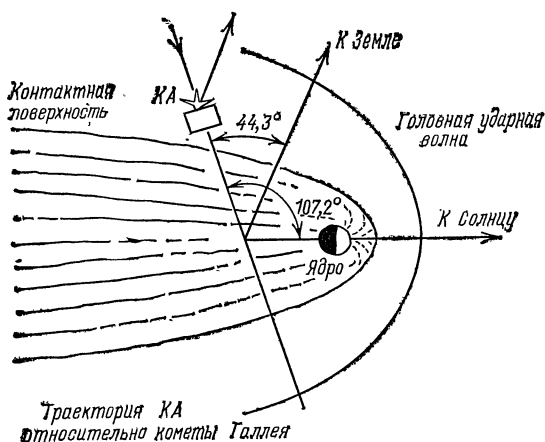


Рис. 46. Схема предполагаемого пролета аппарата «Джотто» через атмосферу кометы

так как близки расчетные даты запуска, начальные импульсы и другие параметры) и составляет 54° . Расчетные скорости кометы и аппарата равны $31,1$ км/с и $43,9$ км/с соот-

ветственно. Однако скорость — величина векторная, а сближение нелобовое — угол встречи виден из рис. 45. Поэтому относительная скорость равна 68,7 км/с. Стрелки на рис. 45 изображают векторы соответствующих скоростей. На рис. 46 показан путь космического аппарата внутри кометы

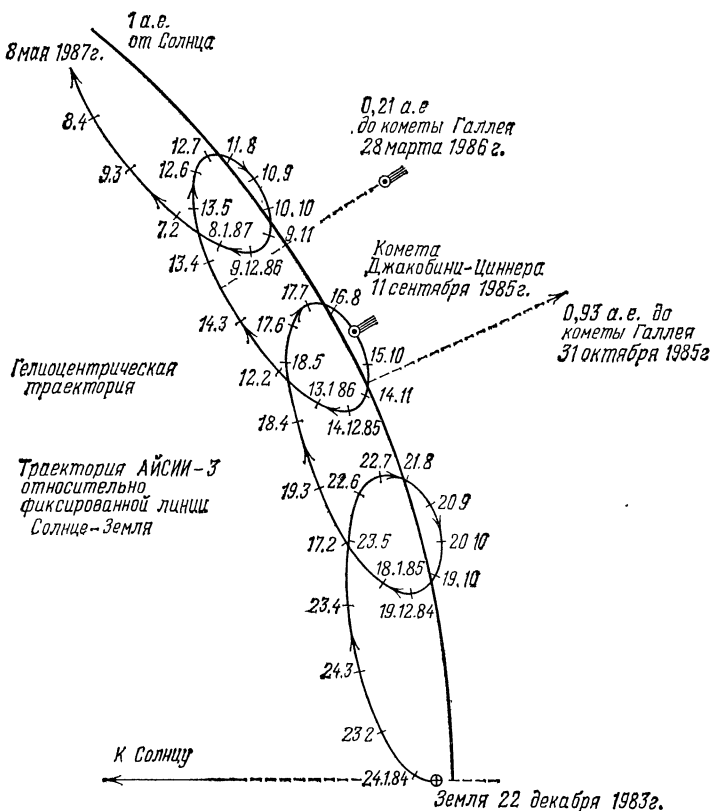


Рис. 47. Траектория космического аппарата АЙСИИ-3

Галлея, как предполагается согласно проекту «Джотто». О физических экспериментах, которые планируются в этом проекте, я скажу дальше, поэтому сейчас не стану останавливаться на том, что позволяет измерить такого рода прслет через комету. Обозначения на рис. 46 должны быть понятны — ведь мы уже говорили в гл. 5 об отошедшей (или головной) бесстолкновительной ударной волне и контактной поверхности.

На рис. 44 мы видим траекторию «Планеты-А». Здесь стартуют два автомата. Первым летит аппарат под названием MS-T5. Он стартует 4 января 1985 г. Вторым автомат, собственно «Планета-А», стартует 14 августа 1985 г. Аппарат MS-T5 предназначен для исследования свойств солнечного ветра вдали от кометы. Это нужно для того, чтобы можно было сравнить результаты MS-T5 и «Планеты-А», которая должна встретиться с кометой 8 марта 1986 г. Так же, как на рис. 45, здесь можно проследить взаимные расположения Земли, кометы и аппаратов, запускаемых Японией.

Приведу еще для сравнения «дорогу», которую выбрали американцы в своем полете к комете Джакобини — Циннера. Траектория АЙСИИ-3 показана на рис. 47. Мы видим большую плавную дугу — отрезок гелиоцентрической орбиты Земли — и петлеобразную траекторию космического аппарата, встречающего комету Джакобини — Циннера 11 сентября 1985 г. Пунктиром показано положение приближающейся к Солнцу кометы Галлея и указаны расстояния до нее в соответствующие даты.

Вернемся к проекту «Вега». Анализируя расчетные данные энергетически выгодных вариантов полета, советские специалисты остановились на следующем сценарии экспедиции (подробнее см. следующий параграф). В конце декабря 1984 г. с интервалом в неделю стартуют два аппарата (для обеспечения надежности). Их программы идентичны, поэтому дальше мы будем говорить об одном (любом) из них. Аппарат летит к Венере так, чтобы встретиться с ней на втором полувитке своей эллиптической гелиоцентрической орбиты. За двое суток до подлета к Венере (июнь 1985 г.) происходит его разделение на спускаемый аппарат (СА) и пролетный аппарат (ПА). Спускаемый аппарат входит в атмосферу Венеры и совершает посадку на ее поверхность. При входе в атмосферу от спускаемого аппарата отделяется аэростатный зонд, который затем дрейфует в атмосфере. На зонде и пролетном аппарате устанавливаются специальные передатчики для отправки на Землю научной информации. На Земле создается широкая международная сеть радиотелескопов для ее приема. На рис. 48 показано географическое расположение международной сети радиотелескопов на Земле. Другая часть космического аппарата — пролетный аппарат — совершает гравитационный маневр в поле тяготения Венеры и направляется на встречу с кометой Галлея. Для координации всех работ по проекту создан Международный научно-технический комитет.

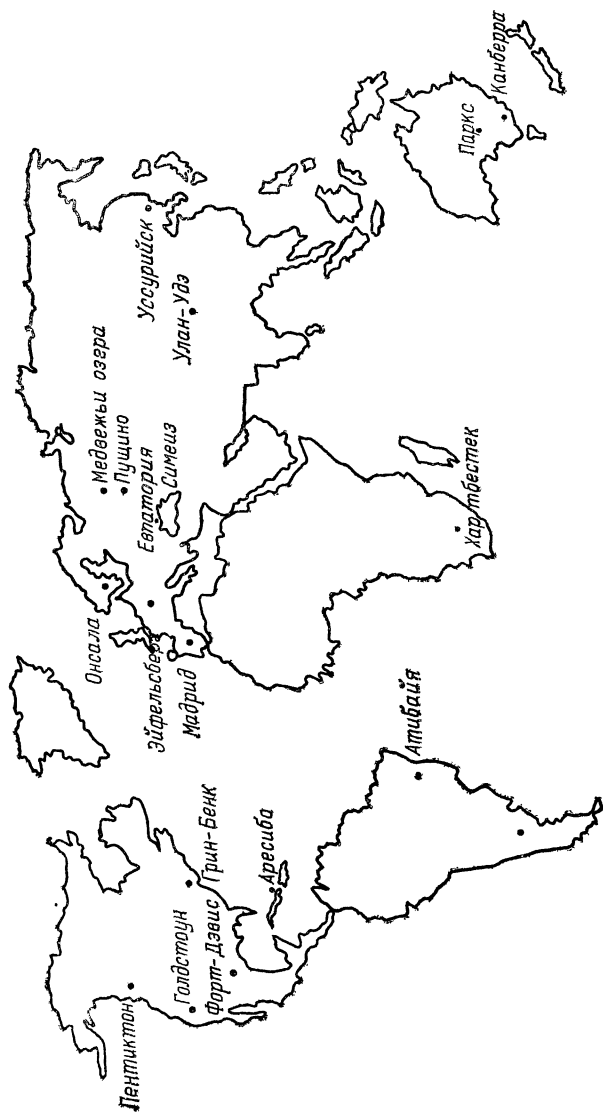


Рис. 48. География расположения радиотелескопов, принимающих сигналы «Веги»

Встреча с Венерой должна произойти в июне 1985 г., когда комета Галлея уже будет находиться между орбитами Юпитера и Сатурна (см. рис. 39). Далее, в процессе

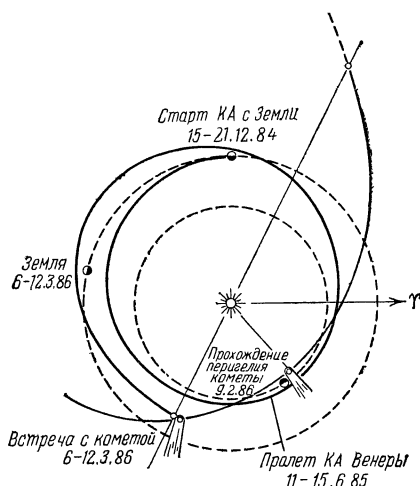


Рис. 49. Траектория полета космического аппарата «Вега»

полета к комете, двигатель еще будет включаться несколько раз, так как нужно будет произвести несколько коррекций траектории по мере уточнения элементов орбиты кометы при ее приближении к Солнцу.

На рис. 49 мы видим траекторию экспедиционного аппарата «Вега». По этому сценарию предполагается реализовать одноименный проект. На рис. 49 также изображены положения Земли, Венеры, кометы и космического аппарата в различные периоды времени. Приведу ко-

личественные данные сценария полета по проекту «Вега»:

- Старт с Земли: 15—21 декабря 1984 г.
- Продолжительность полета к Венере: около 175—180 суток
- Коррекция траектории на трассе Земля — Венера
- Встреча с Венерой: вторая декада июня 1985 г.
- Расстояние от Земли до Венеры в момент пролета мимо нее космического аппарата: около 103 млн. км
- Общая продолжительность полета до кометы: порядка 450 суток
- Коррекция траектории на трассе Венера — комета
- Встреча с кометой: начало марта 1986 г.
- Относительная скорость встречи аппарата с кометой: около 78 км/с
- Расстояние от точки встречи с кометой до Земли: около 173 млн. км
- Угол Солнце — Земля — точка встречи: 40—60°.

Так же, как в проекте «Джотто», встреча экспедиции «Вега» с кометой Галлея нелобовая, и векторы скорости аппарата и кометы неколлинеарны. При этом скорость космического аппарата — 34 км/с, скорость кометы Галлея —

46 км/с, относительная скорость — 78 км/с. Фазовый угол (угол между вектором относительной скорости и линией комета — Солнце) равен 110° . Этот угол определяет степень яркости ядра кометы при наблюдении с космического аппарата.

Вопрос, остающийся достаточно неопределенным и, естественно, всех волнующий, — это расстояние от ядра кометы Галлея, на котором пройдут экспедиционные аппараты. Здесь все определяется точностью, с которой известна орбита кометы, а она не слишком велика. Последнее обстоятельство связано с тем, что в районе перигелия комета подвержена действию значительных негравитационных ускорений, связанных, главным образом, с реактивными силами, возникающими при мощном испарении льдов, — собственно говоря, всевозможные струйные течения часто видны даже визуально.

Если основываться на предыдущих прохождении кометы Галлея, то прогноз местоположения узла ее орбиты может быть сделан с совершенно неудовлетворительной точностью порядка 10^6 км. Вспомним, что диаметр головы кометы Галлея всего лишь 400 000 км — так легко и промахнуться, пролетев мимо кометы и пройдя только через водородную корону. Если, однако, включить в расчеты уже начавшиеся наблюдения за движением этой кометы, то точность «стрельбы» по ней существенно повышается. Специалисты программы «Вега» надеются «пролететь» на расстоянии $\sim 10\,000$ км от ядра.

Специалисты программы «Джотто» рассчитывают, что аппарат пролетит приблизительно в 1000 км от ядра кометы Галлея, а «команда» японского проекта планирует пролет «Планеты-А» в 10^5 км от ядра.

Эти обстоятельства определяют и специфику экспедиционного оборудования. Например, на «Планету-А» не ставится пылевая защита. Зачем? Пыли, как мы знаем, на расстояниях, больших 100 тыс. км от ядра, почти нет. Зонд японского аппарата будет наблюдать лишь окраины кометы и состояние плазмы солнечного ветра. В отличие от японского проекта и «Вега», и «Джотто» предусматривают, конечно, пылевую защиту (см. далее). Последнее, о чем, может быть, стоит упомянуть, это полезная нагрузка, с которой летят аппараты по всем трем проектам. На «Вега» она составляет 130 кг, на «Джотто» — 49,2 кг, на «Планете-А» — 10—15 кг.

Итак, главной особенностью, которая, собственно, и определила стратегии полетов во всех проектах, является за-

метный наклон плоскости орбиты кометы Галлея и плоскости эклиптики. Это привело к тому, что «дорог», среди которых мы могли бы выбирать, не так уж много. Во всяком случае, все они ведут к узлам орбиты кометы Галлея.

Другой важнейшей особенностью, о которой пока говорилось лишь вскользь, является ретроградное, или обратное, движение кометы Галлея. Помните, когда мы говорили о ее наклонении $i=162^\circ$, отмечалось, что эта комета по своей орбите движется в сторону, противоположную направлению вращения Земли (и остальных планет) вокруг Солнца. Основной импульс космическому аппарату сообщает при своем гелиоцентрическом движении Земля, с которой он стартует. Реактивная тяга может изменить его скорость на 3—5 км/с, не более. Отсюда и следует вторая важнейшая особенность любых «свиданий» с кометой Галлея: в рамках всех проектов встреча может произойти только на «встречных курсах», если и не любых (см. рис. 45 и 50), то во всяком случае близких к ним. Это означает в свою очередь, что встреча должна произойти с большой относительной скоростью. Поэтому огромную научную программу нужно успеть осуществить за очень короткое время.

Если первая особенность определила стратегию выбора траекторий, то вторая особенность этой кометы определяет стратегию самого свидания с ней.

Стратегия, однако, — это лишь метод достижения цели. О стратегии — чуть позднее. Сейчас же обсудим научные цели, которые преследуют кометные миссии, и средства, с помощью которых их можно достичь. Итак,

§ 3. Комета Галлея с дальних и ближних подступов

...контролер все это время внимательно ее разглядывал — сначала в телескоп, потом в микроскоп и, наконец, в театральный бинокль.

Л. Кэрролл. «Алиса в Зазеркалье»

Научные задачи, которые надеются решить кометные миссии, можно, грубо говоря, разделить на две категории. К первой относятся исследования, которые можно вести издалека, с дальних подступов, используя приемники электромагнитного излучения. Ко второй относятся исследования, производимые при прямом контакте с кометой. Только разумная комбинация обоих подходов может дать достаточно полные ответы на многие неясные вопросы физики комет.

Прежде чем рассказать о научной программе, которую специалисты надеются реализовать при встрече с кометой Галлея, я хочу частично напомнить, но главным образом суммировать (упоминавшиеся и не упоминавшиеся) основные физические характеристики этой кометы, известные из ее наблюдений в прошлые прохождения.

1) *Химический состав* определялся спектроскопическим путем. В голове кометы светились полосы молекул C_2 , C_3 и CN, причем по мере приближения к Солнцу начинали все сильнее преобладать полосы молекулы C_2 . Одновременно в голове наблюдался сильный непрерывный спектр, который возникает, как мы уже знаем, при рассеянии солнечного света на пылинках. Это означает, таким образом, что в голове кометы Галлея много пыли. В хвосте ее светились полосы ионизованных молекул CO^+ и N_2^+ . Если говорить об изотопном составе, то из спектроскопических измерений в 1910 г. установлено, что молекула C_2 состоит из $^{12}C^{13}C$. Система полос, которая возникает в таком случае, в спектроскопии называется системой Свана. Важно ясно представлять, что все эти молекулы, скорее всего, являются дочерними — результатом распада или реакций неизвестных пока родительских молекул, установить которые, в частности, и должны попытаться космические «миссионеры».

2) *Солнечная активность* оказалась четко скоррелированной с активностью кометы Галлея в 1910 г. Специальный анализ показал, что колебания блеска кометы следуют за изменениями чисел Вольфа (грубо говоря, за числом пятен на Солнце).

3) *Метеорная опасность* обусловлена роением мелких частиц, растянутых вдоль орбиты кометы Галлея. Мы фиксируем их на Земле в виде метеорных потоков Акварид и Орионид. Естественно, наибольшая плотность метеорных частиц приходится на участки орбиты, близкие к кометному ядру. Кроме того, имеется и «неметеоритная» пыль. Например, Н. Т. Бобровников в Ликской обсерватории наблюдал 24 мая 1910 г. яркую вспышку и одновременное ослабление фиолетовой и ультрафиолетовой частей спектра в излучениях циана (длина волны $\lambda=388$ нм) и C_3 ($\lambda=405$ нм). По мнению этого опытного исследователя комет, такое ослабление связано с дополнительным поглощением в выделившемся облаке пыли, так как известно, что она сильнее поглощает фиолетовый свет. Аналогичные явления наблюдались в комете Галлея неоднократно. Блеск кометы менялся в значительных пределах, то и дело возникали вспышки яркости. Все это говорит о том, что на близком к

перигелию участка орбиты в комете Галлея можно ожидать внезапных выделений большого количества пыли (и газов). Это создает трудности для попыток увидеть (с помощью телекамеры, естественно) с космического корабля ядро, но главное, конечно, — это проблема пылевой защиты корабельного имущества. Пылевая защита — «больной вопрос» и «Веги», и «Джотто». Над ним пришлось много работать, но к этому мы еще вернемся.

4) В голове кометы Галлея в разные дни неоднократно наблюдалось *множественное ядро*, т. е., по-видимому, дробление основного ядра и одновременное сосуществование в течение нескольких часов основного ядра и отколовшихся от него частей. Существует, впрочем, гипотеза о том, что кометные ядра вообще не являются единым целым, а лишь компактным облаком отдельных кусков, движущихся по общей орбите. В этом случае интерпретация множественности, конечно, должна быть другой. Возможно, встреча с кометой Галлея позволит ответить и на вопрос о том, что собой представляет в этом смысле ее ядро. Наблюдатели отмечали, что угловое расстояние между основным и вторичным ядрами составляло до $40''$. Отсюда мы можем оценить линейное расстояние между ними. Если угловое разделение в $40''$ наблюдалось, например, когда комета находилась от Земли на расстоянии в 1 а. е., то, очевидно, $l \approx 1 \text{ а. е.} \times \times \operatorname{tg} 40'' \approx 30 \text{ тыс. км.}$ Конечно, это грубая оценка, но она показывает, что в основное ядро целиться нужно довольно внимательно.

5) «Фонтаны» и *извержения* в голове кометы Галлея наблюдались в стороне, обращенной к Солнцу, или, как говорят, на дневной стороне. Для их анализа корабль должен лететь через голову кометы с дневной стороны.

6) *Галосы* также наблюдались в голове кометы Галлея в 1910 г., иногда до пяти штук одновременно. Эти концентрические (с центром в ядре) окружности (материализованные, разумеется) расширялись со скоростями от 0,1 до нескольких километров в секунду. Впрочем, в голове этой кометы наблюдались и галосы, центры которых не совпадали с ядром. Эти образования также расширялись. В гл. 5 было сказано, что механизм образования галосов не до конца ясен. Если нам повезет и космический аппарат окажется в нужный момент в нужном месте, то, может быть, удастся взять непосредственную пробу вещества галоса.

7) *Оболочки* также наблюдались во время прошлого прохождения этой кометы. Напомню, что это незамкнутые

кривые, обращенные выпуклостью к Солнцу, расширяющиеся приблизительно с той же скоростью, что и галосы.

8) Максимальный диаметр *комы*, который наблюдался в прошлом прохождении, был близок к 400 тыс. км.

9) *Хвостов* у кометы Галлея было два: пылевой (II типа) и плазменный (I типа). Плазменный хвост начал формироваться за 1,5 а. е. до подхода кометы к перигелию, пылевой — вблизи перигелия. В плазменном хвосте наблюдались струи и лучи. Лучи сходились с течением времени к оси хвоста. Иногда из головы в хвост неслись облака со скоростью до 1 км/с.

Я уже говорил, что максимальной активности комета достигла после прохождения перигелия. В частности, через 5—6 недель после прохождения перигелия длина плазменного хвоста стала $\sim 0,75$ а. е. Ускорение, с которым двигались различные структурные детали в плазменном хвосте, доходило до нескольких сотен (в долях солнечного гравитационного ускорения на этом расстоянии). Максимальное ускорение было 2300.

Каковы же научные задачи, которые ставят перед собой экспедиции к комете Галлея? Я уже говорил о некоторых нерешенных проблемах физики комет. Естественно, именно эти проблемы и являются предметом изучения кометных миссий. Стоит, однако, сказать об этом несколько подробнее.

Ядро. Какова природа кометных ядер? Существует ли оно как единое целое, или это компактный набор близко летящих тел? Если это единое тело, то каков его размер, форма, альbedo, скорость вращения, поверхностные черты? Какова динамика истечения из него материи? Существует гипотеза, что ядро окружено роем ледяных зерен. Так ли это? Какова температура ядра?

Кома: структура, состав, движение атмосферы. Каковы пространственность, пространственное распределение, кинематика, скорость производства всех частиц в коме? Здесь много вопросов. Главный, конечно,— это состав родительских молекул, формирующих в дальнейшем свободные радикалы (неустойчивые компоненты). Для этого необходимо особое внимание уделить так называемой внутренней коме, т. е. области, примыкающей к ядру, с радиусом порядка 1000 км. Вероятно, именно здесь идет трансформация родительских молекул в дочерние. Этот вопрос крайне важен не только с чисто физической точки зрения. Нужно понять, какая здесь действует органическая химия — ведь органические молекулы могут иметь отношение к проблемам

происхождения жизни в космосе и на Земле. Не знаю, верна ли неоднократно упоминавшаяся гипотеза Хойла и Викрамасингха о кометном происхождении жизни, но если вспомнить, что «кометные дожди», похоже, неоднократно «поливали» Землю в прошлом, то вопрос об органике в кометных атмосферах приобретает первостепенный интерес.

Кроме того, исследование внутренней комы крайне важно еще и потому, что именно здесь у большинства комет наблюдаются полосы ионизованных молекул, т. е. именно здесь, по-видимому, происходит ионизация, причины которой до сих пор неизвестны. В этой околоядерной области, как мы видели в гл. 5, движения газов подчиняются законам аэродинамики сплошной среды. Каково это движение? Существует ли внутренняя ударная волна? Если существует, то течение газа во внутренней коме сверхзвуковое.

Взаимодействие солнечного ветра с кометой. Главные вопросы: существуют ли предсказанные теоретически головная ударная волна в солнечном ветре и контактная поверхность, отделяющая плазму ветра от кометной ионосферы? Сюда же примыкает старая проблема, о которой уже говорилось: проникает ли магнитное поле солнечного ветра в кометную ионосферу? Напомню, что существуют альтернативные мнения на этот счет. Последним отголоском давних дебатов по этому поводу была дискуссия автора с профессором А. Мендисом из Калифорнийского технологического института в США. Мы так и не пришли к единому мнению. Результат этих бесед свелся к тому, что мы (точнее, каждый из нас) опубликовали в научной печати «взаимно перпендикулярные», как иногда выражаются, статьи с противоположными утверждениями. Интересно, конечно, будет узнать, кто же из нас прав. Впрочем, истина может оказаться, как часто бывает, и «посередине».

Проблема ионизации. Уже неоднократно упоминалось, что это совершенно неясная проблема. Необходимо понять механизм, который приводит к ионизации молекул в кометах. Чтобы ответить на этот вопрос, нужны фактические данные. Необходимо попытаться измерить плотности электронов и ионов в коме, их распределение по энергиям. В плазме могут возбуждаться различные типы волн. На эту тему существует целая наука. Волны в плазме взаимодействуют с заряженными частицами, отнимая или отдавая им, в зависимости от ситуации, свою энергию. Это взаимодействие приводит к перераспределениям в обычном пространстве и в пространстве скоростей заряженных частиц. В частности, теоретически возможно возникновение нелинейных

волн, накачивающих энергией электроны. Существует гипотеза, что именно такие энергичные электроны, ускоренные волнами, могут путем соударения с нейтральными кометными молекулами ионизовать их. Но так ли это — большой вопрос. Необходимо, следовательно, произвести пример высокочастотных электрических и магнитных полей. Высокочастотных, потому что электроны легкие, в десятки тысяч раз легче ионов кометных молекул, а значит, частоты собственных колебаний плазмы, связанные с электронами, в $\sqrt{m_i/m_e}$ раз выше, чем частоты колебаний ионов (m_i , m_e — массы иона и электрона соответственно).

Пыль. Важно выяснить распределение пылевых частиц по размерам, массам, скоростям, их состав. Каково распределение пыли в функции от расстояния до ядра кометы.

Хвост. Звучит вполне «биологически», но именно здесь природа нас балует особым изобилием разносторонних физических явлений. В плазменных хвостах наблюдаются и волны, и спиралевидные движения. У кометы Галлея в ее прошлом появлении наблюдались быстро движущиеся облака, захлопывающиеся к оси хвоста лучи. Часто наблюдается явление отрыва хвоста или его части и появление нового, видны отходящие от ядерной области струи, волнистые потоки.

Похоже, у Даниила Бернулли были все основания написать: «...если тело кометы не служит видимым признакам гнева божьего, то хвост ее очень может им служить». Ну что же, хорошо бы проверить.

Важно было бы в первую очередь выяснить структуру магнитного поля в хвосте кометы Галлея. Существенно понять его природу: захвачено ли оно из межпланетной среды? С чем связаны колебания магнитных силовых линий в хвосте кометы? Может быть, это волны, распространяющиеся вдоль контактной поверхности, но может стать — и иной природы. Хвосты комет напоминают шлейфы, возникающие при обтекании планет солнечным ветром. Космические аппараты установили, что в планетных шлейфах существуют нейтральные слои, с обеих сторон от которых индукция магнитного поля имеет «противоположные знаки». Хотелось бы «пощупать» и кометы: нет ли и здесь чего-либо подобного?

Посмотрим, каким образом пролетят космические аппараты относительно ядра кометы. Пока планируется пролет через голову с дневной стороны. В этом случае измерения могут охватить лишь самые близкие к голове части хвоста, так что «гипотезу» Бернулли вряд ли удастся проверить. На

рис. 50 показан сценарий, по которому, как предполагается, будет происходить встреча «Джотто» с кометой Галлея. Мы видим, какие области комы будет пролетать аппарат «Джотто» за 10 часов, 1 час, 10 минут, 1 минуту и 1 секунду до момента максимального сближения с ядром кометы.

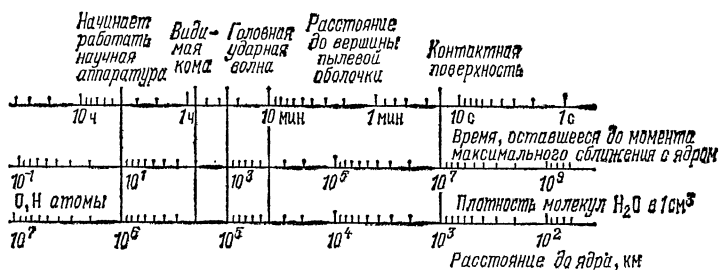


Рис. 50. Сценарий работы научной аппаратуры по проекту «Джотто»

В отличие от «Джотто» и «Планеты-А» проект «Вега» много сложнее и, как мне кажется, интереснее. Поэтому далее остановимся на сценарии проекта

§ 4. «Венера—Галлей»

А неопознанный предмет
Летел себе среди комет.

Д. Самойлов. «Струфиан»

Несмотря на то, что «изюминка» этого проекта — в совмещении исследований Венеры с полетом к комете Галлея, технические требования, предъявляемые к космическому аппарату, таковы, что использовать «стандартные» станции типа «Венера-11», «Венера-12» и т. п. без значительных изменений в их конструкции невозможно. Тому есть ряд причин. Уже было сказано о научных задачах исследования кометы Галлея, но как «театр начинается с вешалки», так и «Вега» начинается с Венеры (не только в смысле впечатления о научном уровне эксперимента, но и буквально). Поэтому разговор о сценарии этого проекта без хотя бы краткого описания подлета к Венере и предполагаемых исследований этой планеты невозможен.

Цели, которые ставятся в этом аспекте, в проекте «Вега» сводятся, во-первых, к продолжению научных исследований в атмосфере и на поверхности планеты с помощью спускаемого аппарата и, во-вторых, к проведению принци-

ально новых длительных экспериментов в венерианской атмосфере с помощью аэростатного зонда (затем уже полет к комете Галлея и попытка получить телевизионное изображение ее ядра).

Здесь много сложностей. Спускаемый аппарат, согласно условиям эксперимента, должен «привенериться» в заданный заранее район посадки. Кроме того, конструкция спускаемого аппарата вместе с аэростатным зондом накладывает ограничения на угол, под которым аппарат может входить в атмосферу Венеры. Есть и другая проблема. Как уже отмечалось, аэростатный зонд должен, согласно научной программе, дрейфовать в атмосфере и передавать на Землю информацию о скорости венерианских атмосферных течений, температуре, давлении и тому подобных параметрах вдоль своей траектории. Для приема этой информации предназначена целая международная сеть радиотелескопов (см. рис. 48). Поэтому и спускаемый аппарат, и аэростатный зонд должны входить в атмосферу Венеры и в течение всего времени дрейфа (одни-двое суток) оставаться на видимой с Земли части диска Венеры. Однако главная проблема не в этом.

Основную часть информации спускаемый аппарат может передавать на Землю только через ретранслятор. Таким ретранслятором будет служить пролетный аппарат. Тогда получается, что требования, которые предъявляет к нему комплексный характер эксперимента «Вега», взаимно противоречивы. Пролетный аппарат должен ввести в атмосферу Венеры спускаемый аппарат и аэростатный зонд, не имеющие собственных систем управления полетом в космосе, вполне определенным образом, но при этом он не должен входить в атмосферу планеты — ведь ему еще предстоит лететь дальше, к комете Галлея. Кроме того, во время работы спускаемого аппарата на поверхности Венеры он должен находиться в зоне связи, чтобы ретранслировать получаемую информацию на Землю. При этом оказывается, что пролетный аппарат не может выйти на траекторию полета к комете Галлея. Отсюда возникает необходимость в гравитационном маневре в поле тяготения Венеры — выполнив свои функции, пролетный аппарат должен включить реактивную тягу и изменить свою траекторию, чтобы направиться к комете.

Итак, планируется полет к Венере, отделение спускаемого аппарата с аэростатным зондом, гравитационный маневр пролетного аппарата после отделения спускаемого и вывод его на пролетную (к комете Галлея) траекторию, но

такую, чтобы были обеспечены условия ретрансляции информации на Землю.

Все это накладывает особое требование на точность выведения пролетного аппарата в нужную точку при встрече с Венерой, так что на участке полета Земля — Венера предполагается произвести две коррекции его траектории.

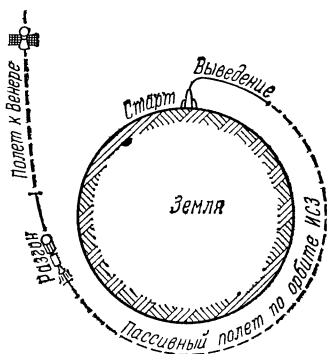


Рис. 51. Полет к Венере

Сценарий, по которому должна осуществиться встреча с Венерой, задуман следующим образом. Многоступенчатая ракета-носитель выводит космический аппарат вместе с так называемой разгонной ступенью на орбиту искусственного спутника Земли (именно поэтому в § 2 гл. 7 приводились начальные скорости для траекторий, рассчитанных для движения, начинающегося с

низкой круговой орбиты искусственного спутника). На первом же витке орбиты включается разгонная ступень и аппарат переходит на траекторию полета к Венере (рис. 51). Одна из двух упомянутых коррекций траектории производится в одну из первых двух недель полета, вторая — за одну-две недели до подлета к Венере. За двое суток до подлета спускаемый и пролетный аппарат разделяются и последний производит гравитационный маневр с выходом на пролетную траекторию, такую, которая позволяла бы поддерживать связь со спускаемым аппаратом (рис. 52). После отделения от спускаемого аппарата аэростатный зонд надувает свою оболочку и начинает автономный полет в атмосфере Венеры на высоте 53 км (рис. 53). Вся система работы радиопередатчиков (на длине волны 18 см) продумана так, что координаты аэростатного зонда можно будет точно определять и, следовательно, получать важнейшую информацию о параметрах венерианской атмосферы и ее метеорологии. Рассказ об этом уведет нас далеко от цели — ведь нас больше интересует вторая часть проекта «Вега». Поэтому перейдем к ней.

Через две-четыре недели после пролета Венеры планируется произвести первую коррекцию и перевести пролетный аппарат на траекторию полета к комете Галлея (рис. 54). Здесь возникают такие проблемы, с какими специалистам

пока не приходилось сталкиваться. Дело в том, что впервые в мире осуществляется полет к небесному телу, параметры движения которого в момент старта с требуемой точностью не будут известны. Помните, как часто ошибались специалисты в прогнозах момента прохождения кометы ее перигелия даже при использовании современных математических методов вычислений? Поэтому совершенно необходимо

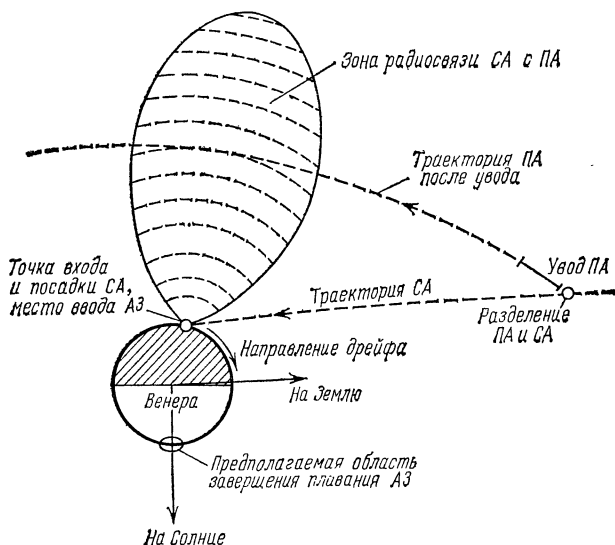


Рис. 52. Разделение пролетного и спускаемого аппаратов. Гравитационный маневр

постоянное уточнение элементов орбиты кометы уже в ходе подлета к ней по наземным наблюдениям. По этой причине сейчас уже создана точная небесно-механическая теория движения кометы Галлея. Основанная на анализе данных о ее движении в 1759, 1835, 1910 гг., она, как мы видели в предыдущей главе, показала очень хорошее согласие с наблюдениями.

Всего на участке полета Венера — комета будет произведено три коррекции. О первой уже говорилось. Вторая будет осуществлена в середине полета и третья — за две-четыре недели до подлета к комете. Первый сеанс научных исследований начинается за двое суток до подлета, когда расстояние до кометы будет составлять 14 млн. км. Второй сеанс начинается за одни сутки до подлета на расстоянии 7 млн. км. Третий сеанс начинается при встрече с ней.

Какова стратегия научных исследований или, как говорят, сценарий, по которому должна строиться работа научной аппаратуры? Очевидно, он определяется нашими знаниями о физическом строении кометы Галлея. Более того,

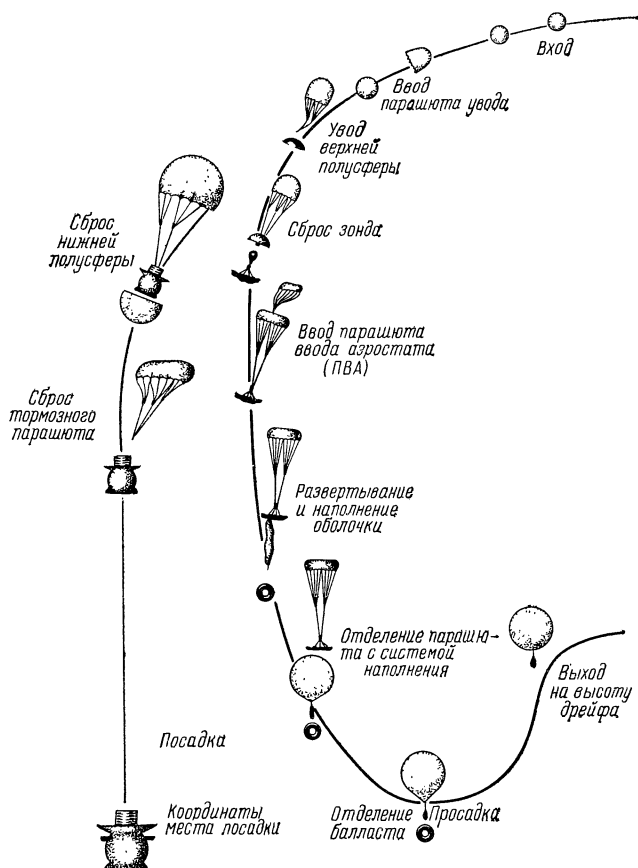


Рис. 53. Схема спуска аппарата в атмосферу Венеры

ее физическое строение накладывает особые условия и на конструкцию исследовательского корабля, например, на расположение и устройство экранов, защищающих его от пылевой опасности. Вообще говоря, мы довольно много знаем об этом. Но «много» и «мало» — понятия относительные. Нашего «много» достаточно, быть может, для понимания качественного характера физических и химических

процессов в кометах, но, возможно, совершенно недостаточно для того, чтобы точно знать, где начинается и где кончается пыль в комете Галлея, каково распределение пылинок по размерам, где какие молекулы следует ожидать

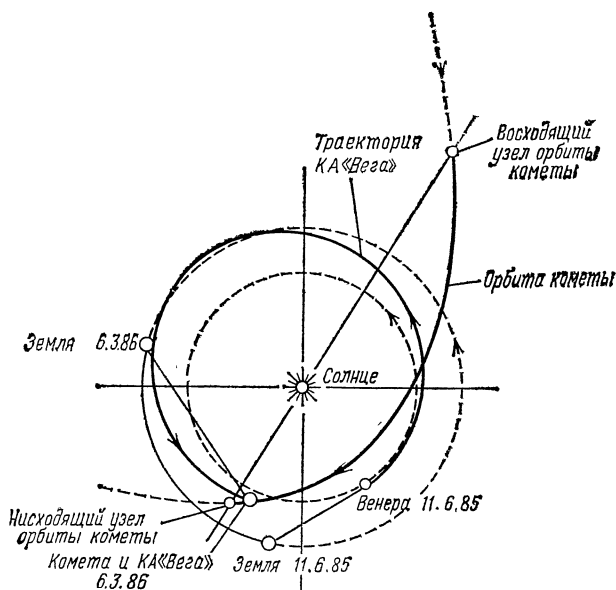


Рис. 54. Схема перелета от Венеры к комете Галлея

и т. д. Однако в планировании научного эксперимента из чего-то нужно исходить. Поэтому в таких случаях строят рабочую, как говорят представители физических наук, или инженерную, как говорят представители технических наук, модель исследуемого объекта.

Инженерная модель той, к которой мы так стремимся, должна отвечать на две группы вопросов. Первая из них относится к тому, как конструировать космический корабль, чтобы он, во-первых, мог самонаводиться на ядро кометы и, следовательно, оказаться как можно ближе к нему, и, во-вторых, как защитить аппарат от метеорной опасности, которая при пролете через атмосферу кометы Галлея велика. Вторая группа вопросов относится к тому, как планировать научные измерения: когда включать и выключать различные приборы. Таким образом, инженерная модель должна содержать сведения об относительной яркости ядра и комы, распределении пылинок по массам и в функции рас-

стояния до ядра, распределении нейтральных молекул различного состава в коме, положении головной и внутренней (если она существует) ударных волн, контактной поверхности, распределении плазмы и т. п. При построении инженерной модели специалисты исходили из данных, полученных при прошлом появлении кометы Галлея, а также из некоторых общих закономерностей, присущих большинству наблюдавшихся комет.

Если говорить о второй группе вопросов, то их стоит в свою очередь подразделить на два типа. Один касается экспериментов, которые могут проводиться еще до прямого контакта с атмосферой кометы (и после, конечно, тоже). Это так называемые дистанционные измерения, когда какие-либо физические параметры кометы начинают измерять с дальних подступов. Разумеется, речь идет о приеме электромагнитных волн в разных участках спектра (от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона). Для такого рода экспериментов инженерная модель должна, в частности, указать, в каких участках спектра следует ожидать максимальную и минимальную яркость комы и хвоста, а также в области каких длин волн контраст между ядром и комой максимален. Ясно, что именно в последней области спектра должна быть максимальной чувствительность датчиков наведения платформы с телевизионной камерой на ядро. Для фотографирования ядра, естественно, нужно выбирать участок спектра, где интенсивность рассеянного комой солнечного излучения минимальна, т. е. контраст между комой и ядром также максимален. Планирование по времени сеансов научных дистанционных измерений диктуется научными задачами и техническими соображениями. Не будем вдаваться в более подробные детали.

Второй тип вопросов касается экспериментов, которые проводятся при непосредственном пролете через атмосферу кометы. Для их планирования инженерная модель должна давать информацию об ожидаемом распределении молекул и пыли в коме, границах водородной короны, собственно комы, ударных волн, контактной поверхности. Такие расчеты были сделаны и специалистами программы «Джотто», и специалистами программы «Вега». Однако приближенные числовые оценки можно сделать и самим.

Действительно, мы уже знаем, что водородное гало у кометы Когоутека, например, простиралось на несколько миллионов километров. Если предположить, что и в комете Галлея ситуация такая же, то ясно, что первый сеанс контактных экспериментов следует произвести на подходе к во-

дородному гало, т. е. более чем за 10—15 млн. км до максимального сближения аппарата с ядром. А если учесть, что относительная скорость встречи близка к 78 км/с, то отсюда следует, что первый сеанс нужно проводить приблизительно за полтора-двое суток до момента максимального сближения аппарата с ядром. Как вы помните, именно так и планируется первый сеанс научных измерений — за двое суток (за 14 млн. км) до встречи. Обратите внимание на рис. 50: научная аппаратура «Джотто» (если не изменится в будущем сценарий встречи) включается за 10 часов до момента максимального сближения. Относительная скорость корабля «Джотто» ниже, чем у «Веги», она, как вы помните, равна 68 км/с. Поэтому расстояние от ядра все-таки достаточно велико, порядка 2,5 млн. км.

Я уже упоминал, что инженерные модели кометы Галлея были выполнены и в рамках проекта «Джотто», и в рамках «Веги». Естественно, они мало отличаются друг от друга. Поэтому нет смысла приводить здесь точные расчетные данные положений фронта ударной волны, контактной поверхности и т. п., в разных моделях они приблизительно одинаковы и соответствуют схематической ситуации для «Джотто», изображенной на рис. 50.

На рис. 55 дана схема полета «Веги» и указаны времена предполагаемых сеансов научных измерений при встрече с кометой Галлея. О том, какие именно измерения намерены провести «команды» «Веги» и «Джотто», мы уже знаем, с какой целью — тоже. Не будем к этому возвращаться.

Остается попытаться, хотя бы кратко, остановиться на первой группе вопросов, которые призвана решить инженерная модель — вопросах самонаведения аппарата на ядро и обеспечения его жизнестойкости при пролете через атмосферу кометы. Как вы помните, комету Галлея обнаружили в конце 1982 г. на расстоянии порядка 11 а. е. от Солнца. На таком расстоянии температура поверхности ядер комет слишком мала (см. гл. 4), чтобы могло происходить заметное испарение. Поэтому ядро наблюдалось в «голом виде». Интенсивность отраженного ядром солнечного света пропорциональна, очевидно, площади обращенной к Земле поверхности ядра (πR_k^2) и коэффициенту отражения A (альбедо). Поэтому тогда же удалось определить произведение $R_k^2 \cdot A = (1,35 \pm 0,15) \text{ км}^2$. Эта формула содержит свойства ядра в «чистом виде», из которых можно определить его яркость в период встречи, т. е. на расстоянии порядка 0,8 а. е. от Солнца. Выраженная в звездных величинах яркость ядра ожидается близкой к 6^m , $0 \pm 0,3$. Ядро предполагается фо-

тографировать телевизионной камерой в диапазоне длин волн 0,63—0,76 мкм. В этом участке спектра излучения молекул кометных газов наиболее слабые, и, следовательно, контраст ядра и комы максимален.

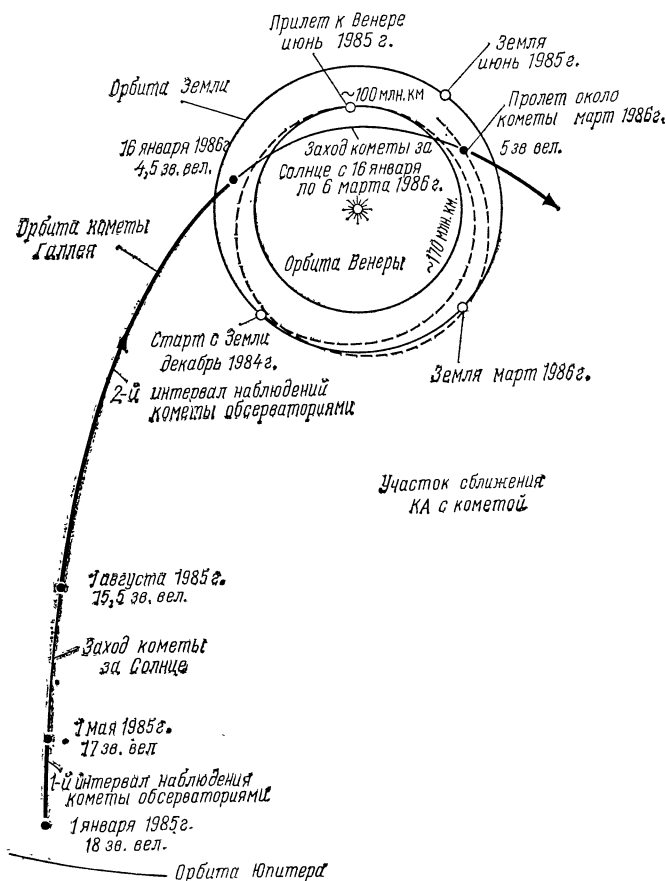


Рис. 55. Схема полета и работы научной аппаратуры космического аппарата «Вега»

Общий вид космического аппарата «Вега» показан на рис. 56. Это полностью снаряженный аппарат вместе со спускаемой на Венеру частью. На рис. 57 мы видим пролетный аппарат, который, собственно, и встречается с кометой Галлея. Существенной частью пролетного аппарата являет-

ся автоматическая стабилизированная платформа (АСП). Именно на ней располагается вся оптика: трехканальный и инфракрасный спектрометры и, главное, телевидение и датчики наведения на ядро. В бортовой компьютер заложен алгоритм уточнения относительного движения кометы и аппарата, информация в который поступает от датчиков наведения. В результате осуществляется автоматическое слежение за кометой и по возможности точное наведение научных приборов, установленных на АСП, на ядро.

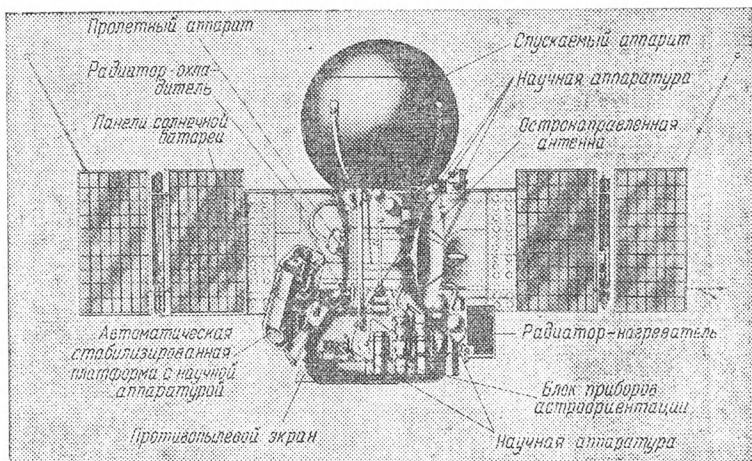


Рис. 56. Внешний вид «Веги» вместе с пролетным аппаратом

Датчики приборов, предназначенных для контактных измерений (пыли, плазмы, молекулярного состава кометных газов), расположены на корпусе станции со стороны набегающего потока кометной атмосферы (рис. 57). Датчики приборов, предназначенных для электромагнитных экспериментов (анализаторы волн в плазме, магнитометр), вынесены, как мы видим, максимально далеко от корпуса аппарата на штангах. Это сделано для того, чтобы максимально уменьшить электрические наводки (помехи) от металлического корпуса станции.

Что говорит инженерная модель о пылевой или метеоритной опасности? Заранее можно сказать: не слишком определенные вещи. Скорости пылинок относительно ядра кометы малы, порядка нескольких метров в секунду.

Поэтому можно считать, что скорости, с которыми они налетают на лобовую часть аппарата, равны относительной скорости аппарата и кометы, т. е. близки к 78 км/с. Это очень много. Начальная скорость пули порядка нескольких

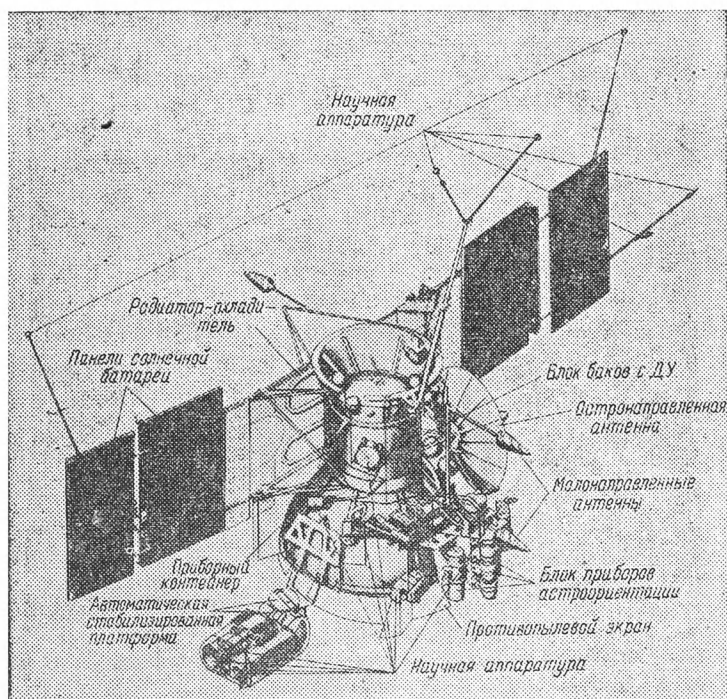


Рис. 57. Внешний вид пролетного аппарата в проекте «Вега»

сотен метров в секунду; представляете, какой нужно сделать защитный экран, чтобы ее задержать? Здесь же скорости примерно в 100 раз большие. Утешительное обстоятельство заключается в том, что пылинки — не пули, их массы неизмеримо меньше классических девяти граммов. Глубина кратера, образующегося при ударе, зависит от ряда факторов. В частности, она пропорциональна кинетической энергии относительного движения пылинки (или пули) и экрана и находится в обратной зависимости от прочности последнего. Прочность материалов, идущих на изготовление космического аппарата, известна, но вот о массах

пылинок можно только делать более или менее правдоподобные предположения.

Расчеты, выполненные специалистами проекта «Вега», показали, что пылинки массой $m \approx 10^{-10}$ г должна давать кратер глубиной $d \approx 0,003$ см, но пылинки массой $m = 0,001$ г уже дает кратер с $d \approx 2$ см. Согласно инженерной модели за время пролета число ударов пылинок с $m = 10^{-10}$ г на 1 м^2 поверхности аппарата, пролетающего на расстоянии $10\,000$ км от ядра кометы, близко к $3 \cdot 10^6$, а число ударов пылинок с $m \approx 0,001$ г — порядка $0,3$.

Площадь полной лобовой поверхности аппарата около 5 м^2 , и плотность пыли по мере приближения к ядру заметно увеличивается. Все это говорит о том, что аппарат необходимо закрыть с лобовой стороны защитными экранами. Именно по этому пути и пошли как в проекте «Джотто», так и в проекте «Вега». При этом главная задача состоит в том, как создать защиту максимальной прочности, но минимальной массы (помните, сколько стоит каждый лишний килограмм массы, запускаемой в космос?) — нельзя же поставить на космический аппарат что-то вроде танковой брони. Например, броня толщиной 1 см приводит к увеличению массы на 150 кг. В то время как вся полезная нагрузка аппарата «Вега» составляет 130 кг, а аппарата «Джотто» ~ 50 кг.

Красивое решение этой задачи было найдено так: решили ставить двух-, а в особо опасных местах и трехслойные защитные экраны.

Первый экран играет роль испарителя. Действительно, при скорости 78 км/с удельная энергия пылинки близка к 10^{13} эрг/г, а это раз в 100 больше, чем удельная теплота сублимации, например, алюминия (если производить расчет для алюминиевого экрана). Поэтому пылинки испаряются сами и испаряют часть вещества экрана. В результате образуется коническая газовая струя, разлетающаяся с большим углом раствора и попадающая далее на второй экран. В этом случае экраны могут быть достаточно тонкими (первый из них — $0,4$ мм), а расстояние между ними определяется оптимальным образом. На рис. 57 мы видим расположение защитных экранов на «Веге».

И все-таки вопрос о том, пролетят ли без повреждений аппараты через атмосферу кометы, остается открытым. По расчетам советских и зарубежных специалистов, существует вероятность порядка нескольких процентов, т. е. весьма небольшая, но все же не равная нулю, что повреждение может произойти. Это опять-таки накладывает ограничения

на конструкции аппаратов и требует новых технических решений.

В полетах к планетам Солнечной системы, где метеорная опасность неизмеримо ниже, научная и служебная информация записывается на запоминающее устройство, с которого она передается на Землю в сеансы связи. От этой практики пришлось отказаться, так как «лучше иметь синицу в руках, чем журавля в небе»: если произойдет повреждение научной или служебной аппаратуры (например, бортовой кабельной сети), то это поставит под удар успех экспедиции. Поэтому в проекте «Вега» предусмотрена прямая передача информации на Землю. Конечно, это потребовало отказа от сложившихся технических решений. Например, информативность служебного радиокomплекса, ответственного за отправку на Землю данных научных измерений, увеличена более чем в 20 раз. Остронаправленная радиоантенна при пролете через атмосферу кометы Галлея будет все время направлена на Землю (аппарат во время научных измерений должен лететь в режиме трехосной ориентации).

Разумеется, это был весьма беглый обзор насущных проблем и трудностей, с которыми столкнулись специалисты при проектировании первых в истории человечества миссий к кометам. Очень многое осталось «за бортом» нашего рассказа. Например, никто не может прогнозировать, как будут появляться и развиваться расширяющиеся (предположительно пылевые) оболочки и будут ли они появляться вообще. Пройдут ли космические аппараты через них? Неясно. Никто не может сейчас сказать, например, не произойдет ли во время пролета экспедиционного аппарата через кому одной из знаменитых вспышек свечения. В 1910 г. такие вспышки наблюдались, и по мнению Н. Т. Бобровникова, исследовавшего их тогда, они обязаны своим происхождением гигантскому облаку выделившейся при этом пыли. Сможет ли телевизионная камера в таких условиях продолжать съемку ядра? Будет ли оно «видно» сквозь пылевую завесу? Не произойдет ли вообще повреждения оптики и других систем? — ведь не очень ясно распределение по массам выделяющихся пылинок и неизвестно, в какой зоне во время вспышки может оказаться тот или иной аппарат.

Будем надеяться на лучшее. Конечно, это не беспочвенные надежды. Как вы помните, в проекте «Вега» для подстраховки от случайностей летят два дублирующих друг друга аппарата с интервалом порядка недели. Кроме того, мы видели, что предусмотрено многое — почти все. Остается ждать.



ЭПИЛОГ

И Шехерезаду застало утро, и она прекратила дозволенные речи.

«Тысяча и одна ночь»

В шестнадцатой строфе первой главы романа А. С. Пушкина «Евгений Онегин» есть строки о том, как Евгений

...Вошел: и пробка в потолок
Вина кометы брызнул ток.

В словаре пушкинского языка мы находим комментарий к ним. Речь идет, оказывается, о шампанском урожая 1811 г. В тот год осенью на небе была видна яркая комета, поэтому 1811 г. называли годом кометы, а шампанское урожая 1811 г. — вином кометы. Известно, что это было шампанское чрезвычайно высокого качества. Дальнейшее, пожалуй, можно домыслить. Во-первых, в 1812 г. было нашествие Наполеона, и, по-видимому, довоенное шампанское стало раритетом. Во-вторых, первая глава «Евгения Онегина» была закончена Пушкиным в 1823 г., так что к тому времени «вино кометы» стало, вероятно, не просто редкостью, но редкостью высокого качества — 12-летней выдержки. На пробках этого шампанского была изображена комета.

Я думаю, 1986 г. можно с неменьшим основанием называть годом кометы. Не знаю, появится ли на пробках шампанского урожая 1986 г. изображение кометы Галлея, — «времена меняются», как говорили в Древнем Риме. Романтический и возвышенный XIX век сменился XX-м — как многие считают, веком торжества прагматизма и стандартов. Сейчас, 175 лет спустя, изображение кометы Галлея появилось лишь на «прозаических» значках. «О времена, о нравы!» — восклицал Цицерон, изобличая Катилину в Римском сенате. Не будем, однако, спешить присоединяться к Цицерону.

Следующее перигелийное прохождение кометы Галлея должно произойти в 2061 г., и специалисты всех космических программ не забыли подумать о будущих поколениях: вся научная информация, полученная экспедициями, независимо от флагов, под которыми они стартовали, будет собрана в Мировом центре данных, чтобы дети и внуки современных людей могли ею воспользоваться при следующем возвращении этой замечательной кометы.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Г л а в а 1. КОМЕТЫ И СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА	5
§ 1. «Что было, что будет, чем сердце успокоится...»	6
§ 2. От древнего халдея до Эдмунда Галлея	11
§ 3. С современных научных позиций	25
Г л а в а 2. НА ЗВЕЗДНОМ НЕБЕ	33
§ 1. Кометы глазами наблюдателя	33
§ 2. Их имена	42
§ 3. Рекордсмены и чемпионы	47
Г л а в а 3. ОРБИТЫ КОМЕТ	55
§ 1. Движение по орбитам	56
§ 2. Кометы в гравитационном поле Солнца	64
Г л а в а 4. АБОРИГЕНЫ ИЛИ ПРИШЕЛЬЦЫ?	71
§ 1. Происхождение комет	71
§ 2. Кометное облако	77
§ 3. Столкновения комет с Землей	91
Г л а в а 5. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОМЕТАХ	101
§ 1. Голова кометы	102
§ 2. Хвосты комет	109
§ 3. Кометы и солнечный ветер. Нерешенные проблемы	113
Г л а в а 6. КОМЕТА ГАЛЛЕЯ	129
§ 1. «По эллипсу нестись гигантскому в эфире...»	129
§ 2. 76 лет спустя	137
§ 3. О ее прошлом	145
§ 4. Ее орбита	152
§ 5. Что нас ожидает в 1986 году	164
§ 6. Наблюдения в унисон	169
Г л а в а 7. СВИДАНИЕ С КОМЕТОЙ	171
§ 1. «Лирическое отступление»	171
§ 2. «Дороги, которые мы выбираем»	177
§ 3. Комета Галлея с дальних и ближних подступов	186
§ 4. «Венера — Галлей»	192
ЭПИЛОГ	205

Леонид Самойлович Марочник

СВИДАНИЕ С КОМЕТОЙ

Редактор *Л. А. Панюшкина*

Художник *О. А. Сухомлинов*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *Л. В. Лихачева*

Корректоры *Е. Ю. Рычагова, Т. С. Вайсберг*

ИБ № 12789

Сдано в набор 24.05.85. Подписано к печати 30.09.85. Т-20136. Формат 84×108/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,92. Усл. кр.-отг. 11,34. Уч.-изд. л. 11,51. Тираж 130000 экз. Заказ № 1203. Цена 35 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
113054, Москва, Валовая, 28

35 коп.

