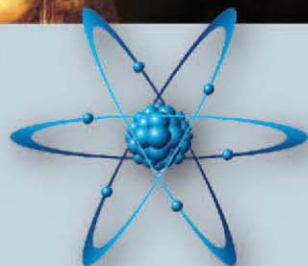


ВЫПУСК

122+ Библиотечка КВАНТ

А.З.Долгинов

СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ: ОТ АТОМОВ ДО ВСЕЛЕННОЙ





БИБЛИОТЕЧКА
КВАНТ⁺
ВЫПУСК
122

Приложение к журналу
«Квант⁺» № 4/2011

А. З. Долгинов

**СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ:
ОТ АТОМОВ
ДО ВСЕЛЕННОЙ**

Москва
Издательство МЦНМО
2012

УДК 536.46
ББК 22.3я72
Д43

Серия «Библиотечка «Квант»
основана в 1980 году

Редакционная коллегия:

Б.М.Болотовский, А.А.Варламов, Г.С.Голицын, Ю.В.Гуляев,
М.И.Каганов, С.С.Кротов, С.П.Новиков, В.В.Произволов, Н.Х.Розов,
А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин, В.М.Тихомиров, А.Р.Хохлов,
А.И.Черноуцан

Долгинов А.З.
Д43 Строение материи: от атомов до Вселенной. – М., Издательство МЦНМО, 2012. – 160 с.: ил. + 16 вкл. (Библиотечка «Квант+». Вып. 122. Приложение к журналу «Квант+» №4/2011.)

ISBN 978-5-94057-929-8

В книге в научно-популярной форме рассказывается о нашей Вселенной – о строении атомов и атомных ядер, о различных элементарных частицах, о телепортации квантовых состояний, о том, что пустое пространство вовсе не пустое, а содержит множество частиц, которые рождаются и исчезают, о строении звезд и источниках их энергии, о возникновении и развитии Вселенной и о многом другом. При этом излагаются только те результаты, которые утвердились в современной науке и подтверждены опытом.

Эта книга – для самого широкого круга читателей.

ББК 22.3я72

ISBN 978-5-94057-929-8

ОГЛАВЛЕНИЕ

Для кого написана эта книга	6
Глава 1	
ТЕОРИЯ И ОПЫТ	7
Глава 2	
ЧАСТИЦЫ И ВОЛНЫ	14
Частицы	14
Волны	14
Электромагнитные волны	17
Объемная фотография	18
Глава 3	
ФОТОНЫ: ВОЛНЫ ИЛИ ЧАСТИЦЫ	21
Глава 4	
ЭЛЕКТРОНЫ	24
Частицы или волны?	24
Спин электрона	25
Как электрон выглядит в зеркале	27
Глава 5	
С КАКОЙ ТОЧНОСТЬЮ СОХРАНЯЕТСЯ ЭНЕРГИЯ	29
Глава 6	
ПУСТАЯ ЛИ ПУСТОТА	34
Глава 7	
КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ	37
Глава 8	
АТОМЫ	43
Из чего состоят атомы	43
Вынужденное излучение атомов. Лазер	47
Что держит протоны и нейтроны в ядре атома	49
Атомные ядра	51
Глава 9	
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И СИЛЫ МЕЖДУ НИМИ	55

Глава 10	
ВОЗМОЖНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА	63
Молекулы	63
Нанотехнологии	66
Девять состояний вещества	67
Природа магнетизма различных веществ	75
Глава 11	
ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК В ПРИРОДЕ	77
Борьба с беспорядком	77
Случайные блуждания	82
Волны в веществе	83
Распространение тепла	86
Глава 12	
ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	89
Пространство и время	89
Геометрия нашего мира	92
Является ли наше пространство трехмерным	96
Глава 13	
ВОЗНИКНОВЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	98
Глава 14	
СОЛНЦЕ	100
Глава 15	
ПЛАНЕТЫ	106
Строение Солнечной системы	106
Внутренние планеты – Меркурий, Венера, Земля, Марс	107
Планеты-гиганты	113
Кометы и метеориты	115
Глава 16	
ЗВЕЗДЫ	120
Межзвездная среда	120
Космические лучи	122
Почему зажигаются звезды	123
Какие бывают звезды	124
Колебания звезд	127
Пятнистые звезды	128
Белые карлики	129
«Новые» звезды вовсе не новые	129
Сверхновые звезды	130
Нейтронные звезды	131
Черные дыры	132

Глава 17	
КАК ВОЗНИКАЮТ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТ	135
Глава 18	
ГАЛАКТИКИ	141
Структуры галактик	141
Млечный Путь	142
Магнитные поля галактик	143
Квазары	144
Загадка темной материи	144
Глава 19	
ВСЕЛЕННАЯ	147
Чем дальше, тем краснее	147
Сколько весит пустота	148
Излучение Большого взрыва	150
Где записаны законы природы	153
Глава 20	
ЧТО ОЖИДАЕТ НАС ЗАВТРА	156

ДЛЯ КОГО НАПИСАНА ЭТА КНИГА

Эта книга написана для тех, кто хочет познакомиться с современными представлениями о нашей Вселенной, начиная с элементарных частиц и кончая скоплениями галактик и черными дырами. Мы постараемся понятно рассказать о строении атомов и атомных ядер, о различных элементарных частицах, о телепортации квантовых состояний, о том, что «пустое» пространство вовсе не пустое, а содержит много частиц, которые рождаются и исчезают, о строении звезд и источниках их энергии, о возникновении и развитии нашей Вселенной и о многом другом. Мы будем излагать только те результаты, которые утвердились в современной науке и подтверждены опытом. В книге почти нет математических формул. Это позволит читать книгу тем, кто не хочет или не может затруднять себя математическими выкладками и входить в детали теории и опытов. Мы предлагаем не учебник и не научную статью, а популярную книгу, рассчитанную на неспециалистов в физике и астрономии, а также на студентов и школьников. Ведь порой студенты первых курсов, постигая математический аппарат физики, не получают четкого представления о картине природы как целого. Мы постараемся дать наглядное описание и объяснение наблюдаемых явлений со всей возможной строгостью, избегая неточных формулировок. Тем не менее, иногда нам придется использовать такие слова, как «по-видимому» и «вероятно». Они означают, что предложенное описание какого-нибудь явления справедливо с большой вероятностью, однако неопределенность в использованных опытных данных оставляет место сомнениям.

Безусловно, в одной, да еще популярной, книге нельзя остановиться на всех, даже очень интересных вопросах, которые соответствуют заглавию книги. Мы постараемся дать лишь краткий обзор самых важных, по нашему мнению, результатах предыдущего и нынешнего веков, которые изменили представление о мире, начиная от микрочастиц и кончая Вселенной.

ТЕОРИЯ И ОПЫТ

Начнем с общих замечаний о природе науки. Первичным всегда является опыт, включая сюда и наблюдения. Только те факты, которые обнаружены и проверены многократными экспериментами, ложатся в основу науки. Однако надо помнить, что мы всегда определяем свойства объекта только по отношению к взаимодействию с другими объектами, в частности с наблюдателем, и если имеет смысл говорить о каких-либо свойствах объекта самого по себе, то только через описание взаимодействий.

Описание поведения объектов вне взаимодействия это лишь удобная модель, которая изменяется при необходимости объяснить новые открытия, если они не соответствуют прежней модели. Например, электромагнитное взаимодействие движущихся зарядов объяснялось как результат распространения волн взаимодействия в некоторой неподвижной среде – эфире, подобно волнам в воде. Мы говорим о распространении волн, но реально определяем только связь поведения одного из зарядов с поведением другого. Когда опыты показали, что скорость передачи взаимодействия не зависит от движения зарядов относительно предполагаемой промежуточной среды, то от эфира пришлось отказаться. Это не прибавило наглядности, но упростило описание взаимодействия зарядов и привело к согласию с новыми опытами.

Чаше всего новые данные сначала описываются просто как совокупность каких-либо наблюдений, например: два электрических заряда притягиваются (или отталкиваются) друг к другу. Это еще не теория. Теория возникает, когда обобщаются результаты многих опытов и на этой основе предсказываются явления, которые до сих пор были неизвестны.

Каждая наука имеет свой язык, причем не менее трудный, чем любой иностранный. Язык физики включает в себя математический аппарат и совокупность терминов, которые могут означать множество сложных понятий. Все уравнения физики это математическая запись связи между несколькими характеристиками тел и явлений, которые определяются независимыми опытами. В популярной книге, используя повседневный язык, мы проигрываем в подробности и полноте изложения, но все же оставляем

себе возможность описать простым образом широкий круг явлений природы.

Наука создает картину природы. Эта картина изменяется от поколения к поколению, но старая не выбрасывается, а скорее дорисовывается. Новая теория не отбрасывает предыдущие объяснения, а является их обобщением на новую область исследований. Например, многие тысячи лет Земля казалась человечеству плоской. Открытие, что Земля это шар, сначала казалось удивительным и неправдоподобным. Так что же? Следует ли совсем отбросить прежние представления? Конечно, нет! Если, например, вы идете к соседу, то шарообразность Земли вам не важна. В этом приближении вполне справедливо считать Землю плоской.

Имеются всего два условия, чтобы предлагаемое объяснение фактов могло называться теорией. Во-первых, теория не должна противоречить всем известным опытам и, во-вторых, должна предсказывать новые явления или хотя бы объяснять известные, но до сих пор непонятные факты. В современной науке имеют смысл только те заключения, которые можно проверить на опыте. Например, когда мы говорим, что время течет одинаково (или по-разному) на Земле и на Луне, то надо указать способ измерения и сравнения промежутков времени на этих объектах. Нельзя быть заранее уверенным, что двое часов, сверенных на Земле, будут показывать одинаковое время, если одни часы оставить на Земле, а другие унести на Луну.

Характерной особенностью науки является то, что она всегда не замкнута в том смысле, что никак нельзя обойтись без тех или иных аксиом, т.е. положений, которые нельзя доказать, получить из теории, а следует брать как основные результаты из опыта. В математике существует теорема Геделя: «...всегда имеются утверждения, ложность или истинность которых доказать в принципе невозможно». Вместе с тем используется принцип «бритвы Оккамы»: «не придумывать сущностей сверх необходимого». На современном языке это означает, что надо вводить в науку только минимально необходимое число аксиом. Снова подчеркнем, что не любое утверждение можно выбрать как аксиому в физике, а только то, которое является следствием опыта. Например, опыт показывает, что скорость света в пустоте есть постоянная величина. На этом основано огромное число выводов. Однако утверждение о постоянстве скорости света не выводится, а берется как данное из опыта, хотя возможно, что в будущем за основу будут брать что-то другое. Мы еще вернемся к этим вопросам в следующих разделах.

Очень важным результатом науки является введение понятия «силовое поле». Опыт показывает, что силы, действующие на тело со стороны других тел, не определяются положением и состоянием этих тел в данный момент времени, а зависят от их положения и состояния некоторое время тому назад. Поэтому приходится вводить понятие «поля» как способа описания физической реальности, которая с некоторым запаздыванием переносит взаимодействие одних тел на другие. Уравнения современной физики учитывают это запаздывание. Вместе с тем, теория и опыт показывают, что возможно одновременное изменение состояний двух или более объектов (так называемая квантовая телепортация), которые могут находиться очень далеко друг от друга. Однако и в этом случае скорость передачи информации не превышает скорости света (см. седьмую главу).

Большую роль в современной физике играет изучение симметрий различного типа, имея в виду не только зеркальную симметрию или симметрию кристаллов, но также симметрию процессов. Симметрия всегда бывает неполной, и характер ее нарушения приводит к важным выводам о природе веществ и процессов.

Есть ли предел развития науки, когда картина Вселенной окажется ясной и останутся только мелкие уточнения и практические приложения? Может ли появиться окончательная теория, которая объяснит все явления? По-видимому, нет, и вот почему. Человек есть ступень на пути эволюции, и нет никаких оснований предполагать, что это последняя ступень и что возможность познания мира на этой ступени ничем не ограничена. Шимпанзе, стоящие на предыдущей ступени, никогда не осилит учебник для школьника первого класса. Для шимпанзе существует свой предел познания мира. Есть все основания думать, что подобный предел существует и для человека. По-видимому, имеются вопросы, которые человек даже поставить не сможет.

Современная наука становится все менее наглядной с точки зрения житейского опыта. Вместе с тем, она связывает все более отдаленные явления, обнаруживая их глубинную общность. К новым взглядам привыкают с трудом. Проходят годы, и следующие поколения знакомятся с этими взглядами в школе и не видят в них ничего удивительного. Напомним, как трудно в средние века воспринимался вывод о том, что Земля не центр Вселенной, а вращается вокруг Солнца. Вряд ли кто усомнится в этом в настоящее время. Или другой пример. В начале прошлого века даже специалисты с трудом воспринимали теорию относительности Эйнштейна. Теперь ее изучают студенты,

и мы постараемся изложить ее достаточно просто в двенадцатой главе этой книги.

Современная физика исследует процессы, начиная от тех, которые происходят с элементарными частицами за времена порядка 10^{-25} с и на расстояниях порядка 10^{-15} см, и вплоть до тех, которые происходили во Вселенной 10^{10} лет тому назад на расстоянии 10^{28} см от Земли. Чтобы почувствовать масштабы явлений, приведем четыре таблицы.

Типичные энергии различных процессов, Дж

10^{44} – взрыв сверхновой звезды	10^6 – 8 часов работы дровосека
10^{34} – энергия, излучаемая Солнцем за один год	10^2 – энергия ружейной пули
10^{30} – энергия вращения Земли	10^{-6} – взмах крыла мухи
10^{18} – сильное землетрясение	10^{-10} – распад одного ядра урана
10^{14} – энергия атомной бомбы	10^{-18} – химическая связь двух молекул

Типичные скорости разных процессов, см/с

$3 \cdot 10^{10}$ – скорость света в пустоте	$3 \cdot 10^6$ – скорость Земли на орбите
10^8 – скорость разбегания далеких галактик	$3,4 \cdot 10^4$ – скорость звука в воздухе
10^7 – скорость электрона в атоме	10^{-6} – скорость роста волос человека

Типичные температуры, К

10^{10} – внутренность горячих звезд	373 – кипение воды
10^8 – центр водородной бомбы	77 – жидкий азот
10^7 – центр Солнца	20 – жидкий водород
10^5 – поверхность горячих звезд	4,2 – жидкий гелий
10^4 – поверхность Солнца	2,7 – реликтовое радиоизлучение во Вселенной

Типичные размеры различных объектов, м

10^{28} – наблюдаемая часть Вселенной	10^{-2} – размер муравья
---	----------------------------

10^{21} – Галактика – Млечный путь	10^{-10} – атом
10^{13} – Солнечная система	10^{-15} – атомное ядро
10^7 – Земля	10^{-18} – размер возможных скрытых измерений простран- ства(?)
1–2 – средний рост человека	10^{-35} – минимально возмож- ный размер(?)

В настоящее время в еще большей степени, чем раньше, работа физика-теоретика отличается от работы физика-экспериментатора. Если теоретику необходимы только данные опытов и наблюдений, а также контакт с коллегами для обсуждения своих результатов, то для экспериментатора необходимы сверхточные измерительные приборы, громадные ускорители частиц, космические аппараты и многое другое. Все это требует большого числа людей и больших затрат. Приходится выбирать, какое из направлений науки наиболее перспективное. К сожалению, в большинстве случаев выбор определяется не учеными, а теми, кто стоит у власти и имеет деньги и средства. Как правило, большие деньги выделяют военным программам. Поэтому много важных результатов получено при выполнении этих программ. Что же касается фундаментальных исследований, от которых не видно немедленной практической пользы, то их обычно недооценивают. Достаточно вспомнить разгром биологической науки в Советском Союзе, или изгнание ведущих физиков, включая Эйнштейна, из гитлеровской Германии, или шельмование создателей атомной бомбы во времена Маккарти в Соединенных Штатах Америки.

История показывает огромную роль отдельных личностей. Можно указать всего несколько имен, которые заложили основы всей современной физики. Это Евклид, Архимед, Галилей, Коперник, Ньютон, Максвелл, Планк, Бор и Эйнштейн. Однако в данной книге мы почти не будем касаться истории открытий и вклада отдельных ученых.

Трудности понимания сложных и непривычных результатов современной науки иногда привлекают внимание публики к псевдонаучным измышлениям, которые проникают в средства массовой информации, но «почему-то» не признаются учеными. Есть один верный способ отличить науку от псевдонауки. Если открытие опубликовано в известном научном журнале, где все статьи проходят придирчивую рецензию, то это, скорее всего, верно. Ученые не боятся даже самых непривычных идей. Если

же новость исходит только из газет, по радио или по телевизору, то это почти наверняка неверно. Например, в прессе много раз обсуждался вопрос о посещении Земли инопланетянами. На самом деле нет ни одного подтвержденного факта такого посещения. Вместе с тем, имеются вполне серьезные попытки обнаружить сигналы из космоса, которые говорили бы о наличии внеземной цивилизации.

Вряд ли стоит возражать против подобных попыток, хотя очень мало оснований надеяться на такой контакт. При этом следует четко различать, имеется в виду существование жизни или цивилизации. Жизнь на других планетах вполне возможна и даже вероятна. В одном из следующих разделов данной книги мы будем говорить о процессах самоорганизации, которые часто происходят в природе. Одним из таких процессов является возникновение жизни. Поиски жизни на других планетах вполне оправданы. Совсем иное поиски цивилизации, если цивилизацию понимать как такую ступень развития, которая подразумевает возможность обоюдного понятных контактов с человечеством. Вспомним, что современный человек появился на Земле не более 100 тысяч лет тому назад, хотя более примитивные предки людей возникли за несколько миллионов лет до этого. Принимая во внимание, что жизнь на Земле зародилась на три с половиной миллиарда лет раньше, чем человечество, мы видим, что время существования цивилизации составляет не более чем одну стотысячную долю от времени существования жизни.

Даже допуская, что эволюция внеземной жизни шла в том же направлении, как на Земле (хотя этому нет подтверждений), нет оснований считать, что эволюция шла с той же скоростью и именно в данный момент достигла уровня, позволяющего установить с нами контакт. Существа более низкого уровня, чем мы, не способны связаться с нами. Для существ более высокого уровня мы интересны не более, чем для нас насекомые, и опять-таки контакт невозможен.

Вспомним, какими наивными были в начале прошлого века вполне серьезные предложения по установлению контактов с инопланетянами. Предлагалось, например, расположить в Сибири цепочку лампочек в виде геометрической иллюстрации теоремы Пифагора – инопланетяне увидят столь необычный узор и поймут, что на Земле существует цивилизация. Похоже, что современные предложения о способах установления контактов будут казаться столь же наивными через несколько поколений.

Надо сказать, что само возникновение человека не есть обязательный путь развития жизни. Имелся ряд особенных обстоятельств, которые привели к появлению человечества. В частности, сюда следует отнести изменение климата, что заставило обезьян спуститься с деревьев. Все известные существа, начиная от насекомых и кончая современными обезьянами, существуют сотни миллионов лет без всяких изменений по направлению к человеку. Если уж говорить о более высоком, точнее ином, типе самоорганизации, то, пожалуй, мыслящий океан в философском романе Станислава Лема «Солярис» представляется наиболее впечатляющим примером. Таким образом, остается надежда только на себя. «Братья по разуму» нам не помогут.

ЧАСТИЦЫ И ВОЛНЫ

Перейдем теперь к описанию физических явлений во Вселенной, но прежде напомним некоторые хорошо известные факты о волнах и частицах.

Частицы

Существуют два типа движений вещества. Это движение частиц или пучка частиц и движение сплошной среды в виде волн различного вида. Слово «частица» обычно используется для обозначения тела, структура и размеры которого несущественны для рассматриваемой задачи. Ее положение определяется точкой в пространстве. Движение такой частицы характеризуется ее скоростью и траекторией. Очень важным свойством частицы, а также любого физического объекта является связь между массой и энергией. Если частица покоится, то ее энергия E связана с массой m и скоростью света c знаменитым соотношением Эйнштейна

$$E = mc^2.$$

Если две частицы связаны какими-то силами, то их энергия (а значит, и масса) меньше, чем сумма энергий этих частиц по отдельности. Эти выводы следуют из теории относительности (о ней мы будем говорить в двенадцатой главе).

Волны

В отличие от частицы, волна не локализована в какой-либо одной точке пространства. Волну характеризуют различными параметрами. Прежде всего – длиной волны, т.е. расстоянием между двумя соседними гребнями или впадинами, амплитудой волны, т.е. высотой гребня (или глубиной впадины), фазой какой-либо точки волны, т.е. местонахождением точки на волне (если для точки на дне впадины фаза равна нулю, то на вершине соседнего гребня фаза равна 180°), частотой волны, которая определяется как величина, обратная времени повторного появления и исчезновения гребней (или впадин). Квадрат амплитуды волны, умноженный на частоту, называется интенсивностью волны. Интенсивность волны определяет энергию,

которую переносит волна. Волны характеризуются также поляризацией, которая определяет плоскость колебаний, и скоростью перемещения гребней (или впадин).

Характерной особенностью волн является возможность огибать препятствия и возможность двум или нескольким волнам усиливать или гасить друг друга. Если поставить на пути потока частиц препятствие, а за ним экран, то на экране будет резкая тень от препятствия. Частицы либо застрянут в препятствии, либо минуют его и попадут на экран. Совсем иначе ведет себя поток волн. Волны могут обогнуть препятствие, и тень будет нерезкой. Более того, если препятствием будет служить решетка со щелями, размеры которых близки к длине волны излучения, то волна пройдет сразу через все щели. На каких-то участках экрана волны попадут в одной фазе и усилят друг друга, а на других участках экрана они попадут в противофазе и погасят

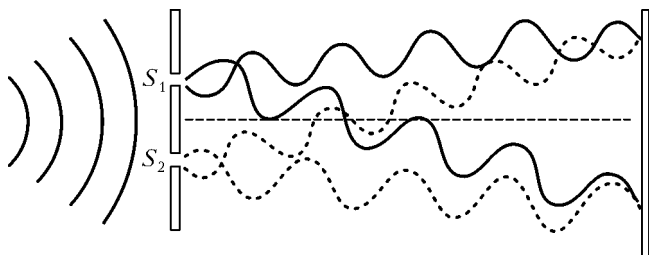


Рис.1. Схема интерференции волн, проходящих через две щели S_1 и S_2 и попадающих на экран. В одной из точек верхней части экрана волны приходят в противофазе и гасят друг друга, в то время как те же волны в одной из точек нижней части экрана усиливают друг друга

друг друга (рис.1, 2). На экране мы увидим то, что называют интерференционной картиной. Ничего такого не наблюдается для потока обычных частиц.

Если источник волн движется относительно наблюдателя, то число волн, которые идут навстречу наблюдателю в единицу времени, будет больше, чем число догоняющих волн. Поэтому наблюдатель найдет, что частота встречных волн будет тем больше (а догоняющих тем меньше),

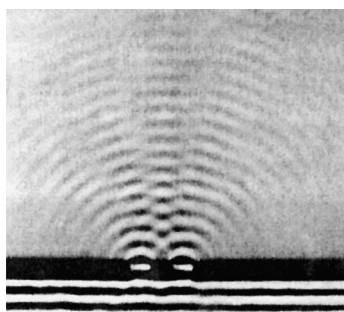


Рис.2. Фотография интерференции волн на воде, проходящих через две щели в экране

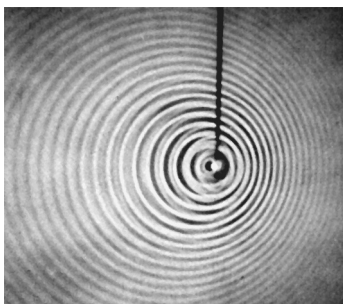


Рис.3. Иллюстрация эффекта Доплера — фотография волн на воде. Волны создаются телом, которое движется слева направо

чем больше относительная скорость наблюдателя и источника. Вспомним, что гудок поезда кажется более высокого тона, когда поезд приближается, и кажется более низким, когда поезд удаляется. Расстояние между гребнями волн становится меньше, когда источник приближается, и расстояние увеличивается, когда источник удаляется (рис.3). Это относится как к звуковым, так и к электромагнитным волнам. Этот эффект называется эффектом Доплера.

Необходимо указать еще одно очень важное свойство волн. Напомним, что отдельная волна математически описывается как процесс, неограниченный в пространстве и времени. Однако все реальные процессы имеют конечную продолжительность и занимают конечный объем. Когда радиостанция объявляет, что работает на волне в столько-то метров, то это означает лишь, что в излучении радиостанции данная волна преобладает. Если процесс длится конечное время, то его можно описать только суммой волн с разными частотами. На рисунке 4 показан пример того, как можно представить

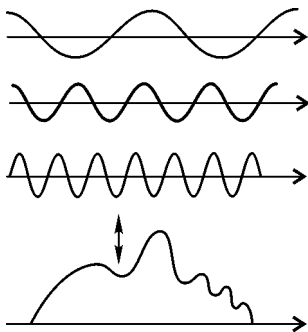


Рис.4. В нижней части рисунка показан пример сигнала, ограниченного по времени (или в пространстве), который можно представить как сумму бесконечного числа волн. Сверху изображены три волны, сумма которых дает основной вклад в данный сигнал

возмущение среды, которое длится конечное время, в виде суммы волн разных частот (чем меньше это время, тем больше надо волн для его описания).

Электромагнитные волны

Электромагнитные волны отличаются от волн на воде тем, что: 1) распространяясь в пустоте, они всегда поперечные и имеют скорость, равную скорости света; 2) их скорость в веществе меньше, чем в пустоте; 3) они характеризуются величинами электрического и магнитного полей. Наличие этих волн определяется по их действию на заряженные частицы, подобно тому как волнение воды можно определить по движению поплавка. Радиоволны, тепловое инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения, гамма-лучи – все это электромагнитные волны с длиной волны от километров для радиоволн до 10^{-12} см для гамма-лучей.

Электромагнитные волны возникают при движении заряженных тел. Движущиеся заряды – это электрический ток, который создает вокруг себя электрическое и магнитное поля. Переменный ток создает переменное поле, которое распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн. Скорость распространения этих волн в пустоте равна $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. Скорость распространения в веществе может быть много меньше этой величины.

Электромагнитные волны поперечны в том смысле, что направление электрического поля перпендикулярно направлению распространения волны. Плоскость, в которой колеблется это поле, называется плоскостью поляризации. Магнитное поле колеблется в плоскости, которая перпендикулярна как направлению распространения волны, так и плоскости поляризации (рис.5).

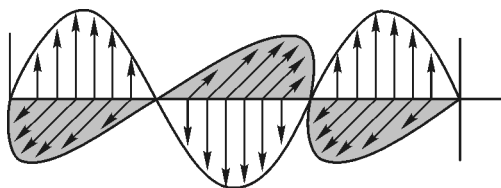


Рис.5. Электрическое и магнитное поля электромагнитной волны

Свет, излучаемый Солнцем, состоит из многих волн с самыми различными направлениями поляризации. Такой свет называется неполяризованным. При рассеянии в веществе волны с разными поляризациями могут рассеиваться по-разному. Такой рассеянный свет называется частично поляризованным. При прохождении решетки с шагом порядка длины волны удается

выделить волну с одним определенным направлением поляризации (рис.6). Такой свет называется линейно поляризованным. Различать глазом поляризацию света человек не может, однако

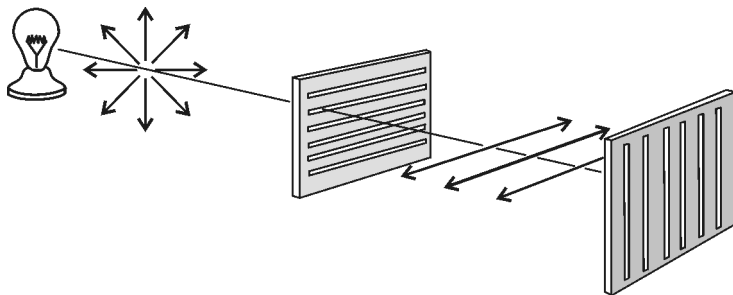


Рис.6. Схема возникновения поляризованного пучка света при прохождении неполяризованного света от лампы через щели в решетке. Заметная степень поляризации возникает только в том случае, когда ширина щелей порядка длины волны излучения. Для рентгеновского излучения такой решеткой является кристалл, атомы которого расположены в строгом порядке

с этой задачей легко справляются многие насекомые. Например, пчелы используют поляризованный рассеянный свет облачного неба для определения положения Солнца и, тем самым, для определения направления на улей. Степень линейной поляризации определяется как отношение вклада волн, у которых электрическое поле имеет какое-либо данное направление, к вкладу волн с электрическим полем в перпендикулярном направлении. Если излучение можно описать как сумму двух сдвинутых по фазе волн, поляризованных перпендикулярно друг другу, то направление результирующего электрического поля будет вращаться по часовой стрелке или против нее. Такие состояния называются состояниями с правой или левой круговой поляризацией.

В следующем разделе мы приведем один из примеров практического использования интерференции.

Объемная фотография

Оказывается, интерференция световых волн позволяет записывать гораздо больше информации в том же объеме вещества, чем одиночная волна. Существуют свидетельства, к сожалению пока еще не достоверные, что интерференция электрических импульсов определяет способ запоминания событий в мозгу человека.

Покажем, как с помощью интерференции световых лучей можно получать объемные, а не плоские фотографии предметов. Такой процесс называется голографией.

Объект облучают двумя лучами от лазера с одной и той же длиной волны, один из которых отражается непосредственно от объекта, а другой сначала отражается от зеркала (рис.7). Затем

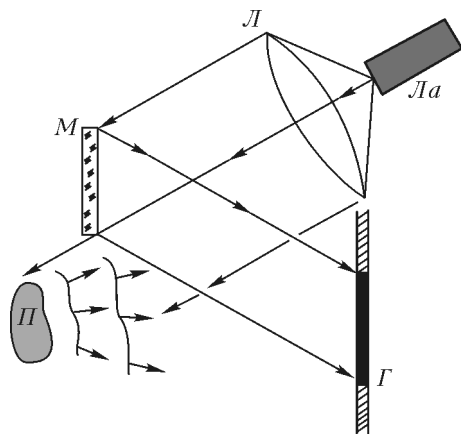


Рис.7. Луч лазера (Ла) проходит через линзу (Л), создавая пучок параллельных лучей. Часть лучей попадает на зеркало (М) и оттуда на пластинку (Г), а часть попадает на предмет (П), отражается от него и тоже попадает на пластинку, где создается интерференционная картина

они попадают на фотопластинку. При обычной фотографии луч света, отражаясь от объекта и попадая на пластинку, вызывает ее почернение, которое тем больше, чем больше интенсивность отраженного луча. Таким способом получают негатив. В отличие от этого случая, два упомянутых выше луча создают интерференционную картину на пластинке. Эта картина совершенно не похожа на изображение предмета. Она имеет вид набора более или менее темных пятен. Характер интерференции зависит от удаленности тех или иных частей предмета от пластинки, а степень почернения зависит от интенсивности отраженной волны. Таким образом на пластинке записываются две характеристики: интенсивность отраженных лучей и удаленность от точки отражения, т.е. фиксируются не только отражательные свойства предмета, но и пространственное расположение его частей. Теперь надо превратить полученное изображение в картину предмета. Для этого, как обычно, проявляют пластинку и снова облучают ее лучом лазера с той же длиной волны, которая была

использована при съемке. Этот луч, попадая на интерференционные пятна, зафиксированные на пластинке, по-разному отражается или проходит через разные участки пластинки. Если теперь смотреть на пластинку, то за ней можно увидеть объемное изображение предмета.

В отличие от фотографии, где каждой точке предмета соответствует точка на пластинке, интерференционная картина распределена по всей пластинке. Поэтому изображение сохранится, если разбить пластинку и использовать только один из осколков, хотя в этом случае изображение будет менее четким. В настоящее время создан голографический микроскоп, который позволяет исследовать такие микроорганизмы, которые слишком прозрачны для четкой фотографии. Хорошо освоена техника получения объемных фотографий небольших предметов, однако технические трудности делают голографию слишком сложным и дорогим способом для изображения крупных объектов.

ФОТОНЫ: ВОЛНЫ ИЛИ ЧАСТИЦЫ

Волновая природа света была установлена вовсе не сразу. Распространение света в виде луча приводило к мысли, что свет это струя мельчайших частиц. Только в начале девятнадцатого века волновая теория света стала общепринятой. Казалось, что все в порядке. Однако оставалась одна неприятность – никак не удавалось получить из теории той зависимости интенсивности излучения абсолютно черного тела от частоты волны света, которая наблюдалась на опыте. Абсолютно черным телом называют такое тело, которое поглощает все падающее на него излучение. Если такое тело нагрето, то цвет его вовсе не черный. Если взять, например, кусок черного чугуна и раскалить его, то он будет ярко светиться сначала в красном, потом в белом свете. Теория, которая должна была описывать такое излучение, противоречила опыту. Выход оказался совершенно необычным с точки зрения волновой теории света. Немецкий ученый Макс Планк предположил, что излучение происходит не непрерывно, а отдельными порциями, которые он назвал квантами. При этом энергия кванта E должна быть пропорциональна частоте излучения $\nu = c/\lambda$ или циклической частоте $\omega = 2\pi c/\lambda$, где λ – длина волны излучения, т.е. $E = h\nu = \hbar\omega$. Величина $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, а также соответствующая ей величина $\hbar = h/(2\pi)$, есть универсальная постоянная, которая была названа постоянной Планка.

Наряду со спектром излучения абсолютно черного тела было обнаружено еще одно явление, непонятное с точки зрения волновой теории. Если облучать вещество электромагнитными волнами, то, взаимодействуя с электронами, электромагнитные силы могут вырвать электроны из вещества наружу. Такое явление называют фотоэффектом. Как и ожидалось, чем больше интенсивность излучения, т.е. чем больше общая энергия потока волн, тем большее число электронов покидают тело. Однако волны с небольшой частотой даже при очень большой интенсивности вовсе не вырывали электронов. Тем не менее, электроны вырывались немедленно при увеличении частоты волн, причем порог фотоэффекта оказался независимым от интенсивности облучения. Решение, которое предложил Альберт Эйнштейн,

состояло в предположении, что электромагнитные волны не только испускаются порциями, но и распространяются и поглощаются тоже отдельными порциями с энергией, пропорциональной частоте волны. Такие порции были названы фотонами. Интенсивность излучения определяла число фотонов, но не энергию фотона. Распространение порциями характерно для частиц, а не для волн. Можно сказать, что электромагнитное излучение ведет себя в различных случаях по-разному – иногда как обычная волна, а иногда как частица.

Раньше мы уже обсуждали, как механическая волна создает интерференционный узор. Подобный узор создает и световая волна, если использовать щели с размерами, близкими к длине волны света. Казалось бы, уменьшая освещенность, т.е. используя более тусклую лампу, мы получим тот же узор, но менее четкий. Волна не должна создавать точечные следы на экране. Что же мы видим на опыте? Возьмем экран в виде фотопластинки или иного детектора, чувствительного к попаданию света. Если мы будем все уменьшать и уменьшать интенсивность света, то в конце концов увидим на экране следы в виде отдельных точек, густота расположения которых будет соответствовать интенсивности волны в данном месте экрана (рис.8). Такие

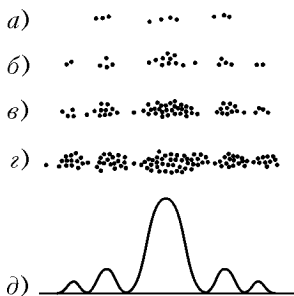


Рис.8. а) Следы на пластинке от электромагнитной волны малой интенсивности (небольшое число фотонов), прошедшей через одну щель в экране; б), в) и г) следы от все более сильных волн; д) распределение почернения на пластинке от сильной волны большой интенсивности (много фотонов)

следы характерны для частиц, а не для волн, хотя следы частиц не должны быть разбросаны по экрану.

Рассмотрение электромагнитных волн как потока фотонов чаще всего не представляет интереса для обычной жизни. Например, радиопередатчик на 100-метровой волне с мощностью 100 киловатт излучает 10^{30} фотонов в секунду. В этом случае вклад отдельных фотонов мал, их общее действие усредняется, и излучение прекрасно характеризуется как волна. Однако атом одномоментно обычно излучает всего один фотон. Человеческий глаз очень чувствителен к свету. В полной темноте глаз может заметить появление всего нескольких фотонов.

Укажем на еще одно прямое свидетельство поведения электромагнитных волн как потока фотонов. Если облучать рентгеновскими лучами электроны, то можно ожидать, что рассеянная волна будет иметь ту же частоту, что и падающая, потому что волна должна раскачивать электрон со своей частотой. Однако в опытах наблюдается уменьшение частоты рассеянного электроном излучения, зависящее от угла рассеяния (эффект Комптона). Это явление получает качественное и количественное объяснение, если рассмотреть процесс рассеяния как столкновение с электронами фотонов, обладающих энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = E/c = h\nu/c = h/\lambda$. Фотон, сталкиваясь с электроном, отдает ему часть своей энергии, и рассеянный фотон будет иметь меньшую энергию и меньшую частоту. Наблюдаемое в опыте уменьшение частоты (увеличение длины волны) излучения получает полное количественное объяснение, если записать для этого столкновения законы сохранения энергии и импульса.

Таким образом, электромагнитному излучению присущи как свойства волны (способность огибать препятствия, интерференция и т.д.), так и свойства, присущие частицам (фотоэффект, эффект Комптона и т.д.).

Рассмотрим вопрос о возможности установить положение и импульс фотона. Напомним, что по определению единичная волна — это непрерывный периодический процесс, заполняющий все пространство. В реальности любой сигнал всегда конечен во времени и пространстве. В этом случае сигнал можно представить как сумму волн с разными длинами волн. Чем больше разброс длин волн излучения, тем больше неопределенность в импульсе фотонов, из которых состоит излучение. Оказалось, что произведение неопределенности импульса на неопределенность координаты не меньше чем постоянная Планка:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar.$$

Кроме того, аналогичное соотношение связывает длительность сигнала, которую можно назвать неопределенностью времени, и разброс энергий фотонов, составляющих этот импульс:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar.$$

Эти соотношения были впервые получены в явном виде немецким ученым Вернером Гейзенбергом. Они исключительно важны для понимания многих наблюдений и для практических приложений.

ЭЛЕКТРОНЫ

Частицы или волны?

Не менее удивительные свойства обнаружились у электронов. Два физика – Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер – исследовали рассеяние пучка электронов на никелевой пластинке и обнаружили очень странный характер рассеяния. Распределение рассеянных электронов имело такой вид, как будто бы рассеивались не частицы, а волны. Пытаясь понять этот странный характер рассеяния, Дэвиссон и Джермер случайно наткнулись на статью французского физика Де Бройля, который предположил, что частицы с импульсом p так же, как и фотоны, обладают волновыми свойствами с длиной волны $\lambda = h/p$. Результаты упомянутых опытов удалось объяснить только в предположении, что рассеяние электронов на кристалле происходит, как рассеяние волн с указанной длиной волны. В частности, если пропустить пучок электронов через решетку, роль которой может играть кристалл, где атомы расположены в виде пространственной решетки, то на экране, например на фотопластинке, появятся точечные следы попадания электронов. Эти следы в совокупности создают такое же потемнение пластинки, как если бы через решетку проходила волна. Каждый отдельный электрон дает точечный след на пластинке, но не обязательно там, где был бы след от прямо летящей частицы. Оказалось, что движение электрона нельзя описать какой-либо определенной траекторией. Можно говорить только о вероятности попадания в ту или иную точку. Если все же использовать понятие о траектории электрона, то придется сказать, что электрон не летит по кратчайшему пути, а, с известной вероятностью, движется по любой возможной, в том числе кривой, траектории от источника через решетку к экрану. Картина распределения почернения на пластинке от пучка электронов, проходящих через одну щель в решетке, точно такая же, как для фотонов (см. рис.8).

Для электронов справедливы те же соотношения неопределенности, как для фотонов. Действительно, местоположение электрона можно определить только взаимодействуя с ним, например облучая электрон светом. Но при этом свет передаст

ему импульс. Чем короче будет волна света, т.е. чем точнее мы определим положение электрона, тем больший импульс мы сообщим электрону и, тем самым, увеличим неопределенность его импульса. Определяя положение электрона с помощью излучения с длиной волны 10^{-9} см (т.е. в рентгеновском диапазоне), мы изменяем его скорость на огромную величину — $5 \cdot 10^7$ см/с. Однако неопределенность для макроскопических тел пренебрежимо мала. Например, определяя положение шарика массой в 1 г с точностью до атомного размера 10^{-9} см, мы получаем ничтожную погрешность в определении его скорости — всего $5 \cdot 10^{-19}$ см/с.

Принцип неопределенности по сути дела является ограничением, которое свойственно всем волновым процессам. Не следует думать, что на самом деле мы просто не умеем определять одновременно и точно положение и скорость тела. Эта невозможность лежит в самой природе вещей.

Принимая во внимание двойственный, корпускулярно-волновой, характер электронов и других элементарных частиц, удалось объяснить и предсказать огромное число явлений природы, что привело к невиданному развитию техники, в том числе атомной энергетики и современных компьютеров.

Спин электрона

Наряду с электрическим полем, электрон обладает и собственным магнитным полем. Это поле имеет такую же структуру, как магнитное поле заряженного шарика, который вращается вокруг своей оси. Вращение шарика можно характеризовать его угловым моментом. Напомним, что угловой момент шара пропорционален его угловой скорости, которая определяется числом оборотов в секунду, и его моменту инерции. Момент инерции, в свою очередь, пропорционален массе шара и квадрату его радиуса. Важность понятия углового момента состоит в том, что имеется закон сохранения углового момента, подобный законам сохранения энергии и импульса. Например, вращающаяся вокруг своей оси фигуристка, сгруппировавшись, уменьшает свой момент инерции — и ее угловая скорость заметно возрастает.

Вращающееся заряженное тело обладает магнитным моментом, пропорциональным угловому моменту. Магнитный момент полностью определяет как собственное магнитное поле тела, так и его взаимодействие с внешним магнитным полем. Магнитный момент маленького витка с током равен произведению силы тока на площадь витка и направлен по оси витка. Исходя из этого,

можно рассчитать магнитный момент вращающегося заряженного тела. Отношение магнитного и углового моментов для вращающегося заряженного тела равно $q/(2m)$.

Оказалось, что электрон, как и другие элементарные частицы, обладает и собственным угловым моментом, и собственным магнитным моментом. Угловой момент проявляется в опытах, связанных с законом сохранения углового момента, а магнитный момент проявляется в магнитных взаимодействиях. Однако эти свойства электрона нельзя получить как результат быстрого вращения заряженного шарика вокруг своей оси. Во-первых, вращение должно быть таким быстрым, что скорость некоторых точек шарика превышала бы скорость света. Во-вторых, отношение магнитного момента к угловому оказалось равным не $e/(2m)$, а e/m . Угловой момент электрона является его внутренним, «врожденным» свойством, таким же, как заряд и масса, и называется спином.

Сила, действующая на магнитный момент со стороны неоднородного магнитного поля, пропорциональна проекции момента на направление поля. Если пучок электронов пропустить через такое поле, то пучок не только отклонится от исходного направления движения, но и расщепится веером на несколько пучков – в зависимости от угла между направлением внешнего поля и направлением магнитных моментов. Чтобы упростить задачу и не рассматривать взаимодействие магнитного поля с движущимся зарядом, можно использовать, например, атомы водорода, у которых заряд ядра компенсируется зарядом электрона и атом в целом нейтрален. Магнитный момент ядра атома гораздо меньше, чем у электрона, так как ядро гораздо тяжелее. Пропуская пучок атомов водорода между полюсами магнита, можно увидеть, что пучок во всех случаях расщепится только на два пучка (рис.9). В одном пучке будут атомы, у которых угловой момент (спин) электрона направлен по полю, а в другом – против поля.

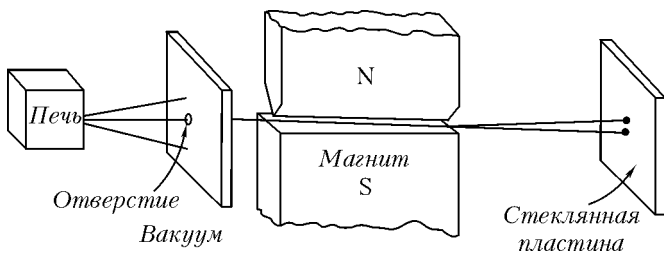


Рис.9. Пропускание пучка атомов через магнитное поле и расщепление его на два пучка (опыт Штерна–Герлаха)

Если теперь один из этих пучков пропустить через другое магнитное поле, которое направлено под углом к первому полю, то он снова расщепится на два пучка, потому что возможны только два направления углового момента (спина) электрона по отношению к любому направлению поля. Можно сказать, что электрон обладает только двумя возможными направлениями спина по отношению к направлению любого магнитного поля, через которое электрон проходит. Из опытов следовало, что возможны только два значения проекции спина на любое направление, а именно $\hbar/2$ или $-\hbar/2$. Можно говорить только о вероятности того или иного направления спина, пока электрон не попал на экран. Процесс измерения выбирает определенное состояние из двух или из нескольких возможных. Приведем следующую аналогию. Если бросить монету, то она упадет одним из двух способов – орлом или решкой. Это предсказание классической теории. Аналогом квантового случая является монета на ребре. Пока ничто не задело монету, ее состояние неопределенно. Можно сказать, что она находится в смешанном состоянии – орла и решки одновременно. Она может остаться на ребре, даже если ее закрутить, например, в магнитном поле. Однако любое макроскопическое взаимодействие, которое отвечает на вопрос: орел или решка, уронит монету. Следует подчеркнуть, что взаимодействие человека с любым объектом это всегда макроскопическое взаимодействие.

Со спином электрона связано его другое свойство, у которого нет аналога в обычной классической физике, а именно: два электрона с одним и тем же направлением спина не могут находиться в одном и том же состоянии движения. Этот закон, который называется принципом Паули, имеет фундаментальное значение для понимания структуры атома.

Таким же спином, как электрон, обладают также протоны и нейтроны. Протон и нейтрон с противоположными знаками спинов образуют ядро дейтерия, который, очевидно, имеет нулевой спин. Подобным образом определяются спины более сложных ядер.

Как электрон выглядит в зеркале

У электрона, а также у всех других частиц с полуцелым спином (протоны, нейтроны и др.) имеются близнецы – античастицы, похожие на них, как зеркальное отражение. Близнец электрона – позитрон. Он имеет точно такую же массу, как электрон, но положительный электрический заряд.

Между частицами и античастицами имеется то фундаментальное различие, что наша Вселенная, во всяком случае окру-

жающая нас часть Вселенной, построена только из частиц. Античастицы исчезают (аннигилируют) при столкновении с частицами. Позитрон и электрон исчезают при столкновении, порождая два гамма-кванта или другие частицы, например пи-мезоны, если энергия столкновения достаточно велика. Наш мир не мог бы состоять из частиц и античастиц, находящихся поблизости друг от друга. Хотя нет оснований решительно отвергать возможность того, что в отдаленных от нас участках Вселенной существуют антимирры – антизвезды, антигалактики и т.п., нет никаких указаний на такую возможность.

В настоящее время удалось получить в лаборатории не только позитроны, но также антипротоны и антиатомы, состоящие из антипротона и позитрона. Антивещество, конечно, нельзя хранить в каком-либо сосуде из обычного вещества, однако его можно хранить в виде плазмы в магнитной ловушке, стенками которой служат магнитные поля, не пропускающие заряженные частицы. Напомним, что обычная плазма это газ из электронов и атомов, у которых оторваны эти электроны. Если в будущем появится возможность накопить антивещество, то оно может служить самым выгодным топливом. Одна тонна антивещества дала бы приблизительно столько же энергии, сколько расходует Россия за десять лет, в то время как химические реакции могли бы дать только 10^{-10} от этой величины.

С КАКОЙ ТОЧНОСТЬЮ СОХРАНЯЕТСЯ ЭНЕРГИЯ

Рассмотрим более подробно, что следует из принципа неопределенности для времени и энергии. Мы обсуждали это соотношение только для фотонов и электронов, но все те же рассуждения можно повторить для любого объекта. Получается, что для процессов, протекающих за короткое время, нельзя говорить о точной величине энергии. В этом смысле определение энергии похоже на определение температуры газа. Как известно, температура газа измеряется энергией и числом молекул газа, которые ударяются о поверхность термометра. Число ударов случайно во времени, а молекулы имеют разные энергии. В разреженном газе, например в верхних слоях атмосферы, удары редки и случайны. Определенное значение температуры имеет смысл только как средней величины по времени, причем интервал усреднения должен быть много больше, чем интервал между ударами молекул. Аналогичным образом, определенное значение для энергии макроскопического тела имеет смысл только как среднее по времени, но необходимое время усреднения очень мало, и можно принять, что энергия имеет точную величину и строго выполняется закон ее сохранения. Иная ситуация для электронов, фотонов и других элементарных частиц.

Рассмотрим взаимодействие двух электронов. Поскольку переносчиком взаимодействия является электромагнитное поле, то процесс взаимодействия можно представить как испускание фотона одним электроном и поглощение этого фотона другим электроном. И действительно, рассматривая процесс обмена фотонами, удастся как получить закон Кулона для взаимодействия двух зарядов, так и описать все другие возможности взаимодействия электронов. Однако для этого надо принять, что происходит обмен фотонами с любой энергией. На первый взгляд, такой обмен невозможен. Как может электрон испустить фотон с энергией больше, чем электрон имеет, т.е. больше, чем энергия, которая соответствует его массе покоя? Такая возможность существует, но только в том случае, если время нарушения закона сохранения энергии достаточно мало. Электрон может испустить фотон с большой энергией, но лишь на короткое время, так как энергия не определена точнее чем $\Delta E \geq \hbar/\Delta t$. За время $\Delta t = \hbar/\Delta E$ фотон не успеет улететь далеко от электрона. Этим объясняется

уменьшение электрических сил с расстоянием. Частицы и фотоны, которые появляются только на короткое время, называются виртуальными частицами и виртуальными фотонами.

Закон сохранения энергии и импульса запрещает прямое поглощение одного фотона одним электроном. Но поскольку энергия имеет определенное значение только в среднем, то на короткое время электрон может испустить фотон и поглотить его снова. Это и происходит на самом деле. Электрон окружен облаком фотонов, которые непрерывно испускаются и поглощаются. Эти фотоны и образуют электрическое и магнитное поля электрона. Испущенный на короткое время фотон, в свою очередь, может превратиться в электрон и позитрон, которые затем аннигилируют, т.е. исчезают, превратившись в фотон. Потом этот фотон будет поглощен электроном. В результате мы снова имеем один электрон.

Процессы взаимодействия частиц, в том числе и фотонов, удобно изображать графиками, которые были впервые предложены американским ученым Ричардом Фейнманом. Мы будем часто использовать подобные графики. На рисунке 10 приведены схемы некоторых из возможных состояний частицы, которую мы называем электроном. Соответственно, взаимодействие двух

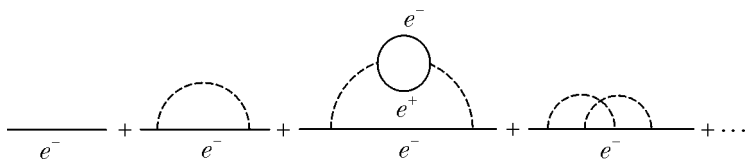


Рис.10. Некоторые из возможных состояний электрона. Фотоны, испускаемые на короткое время, создают электрическое и магнитное поля электрона. Фотоны изображены на рисунке пунктиром, электрон обозначен e^- , позитрон — e^+ . Электрическое и магнитное поля вокруг электрона можно описать как совокупность процессов многократного испускания фотонов разных энергий с рождением электронно-позитронных пар и других частиц разных сортов

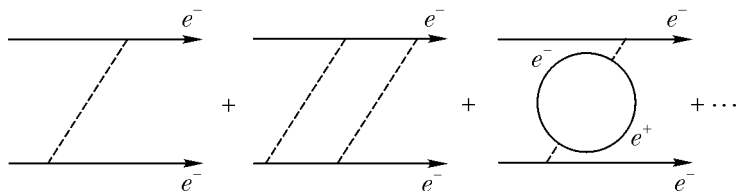


Рис.11. Схема взаимодействия двух электронов

электронов можно описать серией графиков, некоторые из которых даны на рисунке 11.

Так как же выглядит электрон? Приведем аналогию, далекую от проблем электрона, но, возможно, поясняющую суть вопроса. Если смотреть на берег океана из космоса, то хорошо видна четкая береговая линия, с борта самолета видны мелкие детали и береговая линия выглядит не такой уж и четкой, а если вы идете по берегу, то вместо линии вы видите волны, которые заливают песок, непрерывно меняя очертания сухих областей. Так что все дело в масштабе в пространстве и во времени.

Рассмотрим теперь рассеяние фотона на электроне. Электрон может поглотить фотон на короткое время и сразу же испустить другой фотон (рис.12). Рассеяние фотона на электроне может

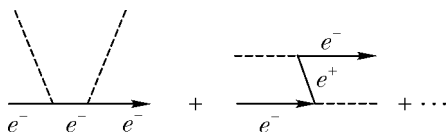


Рис.12. Два из возможных путей рассеяния фотона на электроне

происходить также следующим образом (рис.13): 1) фотон распадается на электрон и позитрон, энергия пары может быть больше, чем энергия исходного фотона, но время жизни такого

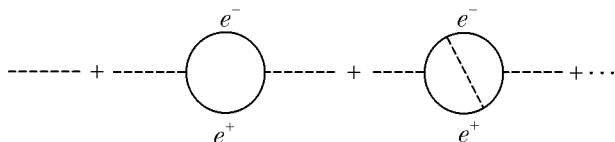


Рис.13. Три из возможных состояний фотона: «голый» фотон; фотон на короткое время превратился в пару электрон-позитрон; электрон пары испустил фотон, который затем поглотился позитроном

состояния невелико и компоненты пары не могут далеко уйти от места рождения; 2) исходный электрон аннигилирует с позитроном, порождая фотон; 3) родившийся электрон уходит из области взаимодействия. В результате опять имеем один электрон и один фотон, но с другими энергиями и импульсами.

Суммарная энергия и суммарный импульс в конце и в начале процесса сохраняются. Но сохраняется ли индивидуальность электрона? Учитывая разные пути рассеяния, можно ли говорить о том, что электрон после рассеяния тот же самый, что и вначале? Конечно, нет. Электрон, который появился в конце

процесса рассеяния, не тот, который аннигилировал с позитроном, породив новый фотон. Поскольку электроны все время испускают и поглощают фотоны, которые в промежуточном состоянии рожают электроны и позитроны, мы не можем говорить о точной локализации и индивидуальности электронов.

Если мы имеем в атоме два электрона, то они в принципе неразличимы. Этот вопрос похож на вопрос, какой из стаканов воды мы выльем из чайника, если налили туда два стакана воды. Движение фотона тоже совсем не простое. На короткое время фотон может превратиться в пару электрон и позитрон: e^- и e^+ .

Это время не больше чем $\hbar/(2m_e c^2) = 5 \cdot 10^{-16}$ с, и частицы не могут уйти далеко друг от друга за столь короткое время. Они снова аннигилируют, превратившись в фотон.

Процесс превращения фотона в пару электрон и позитрон объясняет такое наблюдаемое явление, как рассеяние света на свете.

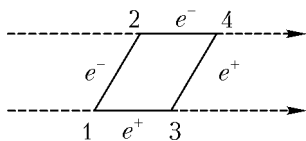


Рис.14. Один из возможных путей рассеяния света на свете

Подобный процесс совершенно невозможен с точки зрения классической теории. На рисунке 14 изображен один из возможных путей рассеяния света на свете. В какой-то момент, назовем его моментом 1, один из фотонов порождает пару электрон-позитрон. В момент 2 электрон поглощает фотон, а в момент 3 позитрон испускает фотон. Затем в момент 4 электрон и позитрон аннигилируют, испуская фотон. В результате вместо исходных фотонов, исчезнувших в моменты 1 и 2, появились два новых фотона. Энергия конечных фотонов не такая, как у исходных, но в конце процесса сумма энергий исходных фотонов равна сумме энергий возникших фотонов. Интересно отметить, что в промежуток времени между моментами 2 и 3 в системе нет фотонов, а есть только электрон и позитрон.

Возможны и более сложные промежуточные состояния. Например, в промежуточном состоянии испускается и поглощается еще один фотон. Однако каждая добавочная частица или фотон в промежуточном состоянии означает более короткое время существования этого состояния.

Возможны и более сложные промежуточные состояния. Например, в промежуточном состоянии испускается и поглощается еще один фотон. Однако каждая добавочная частица или фотон в промежуточном состоянии означает более короткое время существования этого состояния.

Вероятность какого-либо события обычно понимают как меру нашего неумения получить точную и полную информацию. Само существование такой информации не ставится под сомнение. Изучение микромира показало, что там вообще не существует

определенности в обычном смысле этого слова. О каком определенном импульсе или положении фотона можно говорить, если часть времени, хотя и короткую, фотон существует в виде пары электрон-позитрон.

Напомним, что чем больше линий на графике, тем меньше его вклад в процесс взаимодействия. Как видно из характера графиков, возможное их число бесконечно велико. Чем меньше промежуток времени, тем большее число частиц и фотонов могут окружать электрон. Прямое суммирование вкладов всех графиков дает бесконечно большую величину, что очевидно не имеет смысла. Надо ли отбрасывать очень сложные графики? Является ли время непрерывным или оно состоит из отдельных очень маленьких интервалов? На эти вопросы пока ответа нет. За очень маленькие промежутки времени начинают играть роль очень большие энергии, и теория приводит к бессмысленным бесконечно большим величинам. Выход из положения был найден путем вычитания одной бесконечности из другой. Например, вычисляя энергию одного из возможных процессов с участием какой-либо из частиц, мы получаем бесконечно большую величину. Вычисляя массу этой частицы, мы тоже получаем бесконечность. Можно вычесть из формулы для первой бесконечности вторую бесконечность, получить конечный результат и прибавить не вычисленное, а наблюдаемое значение массы. Такая процедура называется перенормировкой.

Электрические заряды виртуальных частиц, которые появляются и исчезают в вакууме, частично экранируют заряды электрона, протона и других реальных частиц. Это приходится учитывать при изучении эффектов, зависящих от заряда. Как и в других случаях, суммирование всех возможных графиков приводит к бесконечно большим выражениям, и только перенормировка приводит к результатам, которые согласуются с опытом. И все же процедура перенормировки не решает проблему бесконечно больших величин, возникающих в теории, а только отодвигает ее.

ПУСТАЯ ЛИ ПУСТОТА

Вернемся к вопросу о пустом пространстве – вакууме. Казалось бы, все ясно. Пустота это пространство, где ничего нет. Когда говорят «ничего нет», то понимают, что нет привычного нам вещества, состоящего из атомов, протонов, электронов и т.д., и никакие опыты там ничего не обнаружат. Однако это не так. Мы уже упоминали, что пространство, в котором нет частиц (включая фотоны), т.е. пустое пространство, нельзя считать пустым в том смысле, что оно никак не влияет на наблюдаемые процессы. Энергия в любой точке пустого пространства только в среднем равна нулю. На очень короткое время энергия там может оказаться очень большой. Сильное электрическое или гравитационное поле может вырвать частицы из пустоты и превратить их в реальные неисчезающие частицы.

Самое низкое энергетическое состояние любой системы вовсе не означает отсутствие движения. Наоборот, нулевая скорость при вполне определенном положении в состоянии равновесия означала бы одновременное точное определение координат и импульса, т.е. нарушение принципа неопределенности. По тем же причинам электромагнитное поле имеет нулевую энергию, которая существует даже при отсутствии реальных фотонов.

Электроны и позитроны, возникающие на короткое время в вакууме, частично экранируют заряд атомного ядра. Это взаимодействие влияет на энергетические уровни атомов (см. главу 8), немного смещая их положение. Такое смещение было открыто американским ученым Уиллисом Лэмбом и оказалось в полном согласии с теорией. Поэтому не следует воспринимать пустое пространство как область, где ничего нет. На самом деле пустота (вакуум) это сложная система, где непрерывно, но на короткое время рождаются и исчезают фотоны, электронно-позитронные пары и всевозможные другие частицы.

Приведем два примера. Напомним, что электромагнитные волны не могут проникнуть в металл, который хорошо проводит электрический ток. Если в сосуде, где выкачан воздух, установить параллельно две металлические пластины на очень маленьком расстоянии друг от друга (около нескольких тысячных долей сантиметра или еще меньше), то в пространстве между ними будет невозможно появление вакуумных частиц и фотонов,

кроме тех, у которых длина волны такова, что между пластинами укладывается целое число полуволн, т.е. на поверхностях пластин амплитуды волн равны нулю (рис.15). Иными словами, между пластинами могут быть только стоячие волны, все остальные волны погасят друг друга. Снаружи пластин возможно появление на короткое время вакуумных фотонов с любыми длинами волн. Наружные вакуумные фотоны порождают силу (F), которая давит на пластины и старается их сблизить. Этой силе не может противостоять давление вакуумных фотонов между пластинами, так как возможность их появления ограничена. Если плотность энергии пустого пространства условно принять равной нулю, то придется считать плотность энергии между пластинами отрицательной.

Снова возьмем сосуд, из которого выкачан весь воздух, так что там не осталось ни одной частицы вещества. Постараемся проверить, что может появиться на короткое время в таком сосуде. Каков возможный результат опыта? Если проверка будет требовать длительного времени, хотя в данном случае даже доли секунды надо считать длительным временем, то мы действительно ничего не найдем. Но если мы сумеем провести опыт по обнаружению частиц за очень короткое время, то мы обнаружим частицы. Их будет тем больше, чем короче будет время наблюдений.

Можно ли вырвать частицу из вакуума? Опыт говорит, что можно. Если в пустоте создать очень сильное электрическое поле, плотность энергии которого достаточна, чтобы родить электронно-позитронную пару, то такая пара появится. Можно опять провести аналогию (но не модель) на примере океана. Если фотографировать поверхность океана с большой выдержкой, то на снимке вы увидите ровную поверхность. Если же выдержка невелика, то на снимке вы увидите волны. При совсем короткой выдержке на гребнях волн будут видны отдельные капли. Чем короче выдержка, тем больше деталей волны можно

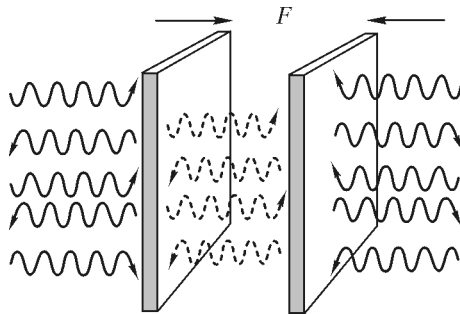


Рис.15. Между пластинами могут существовать только волны с узлами на обеих границах, а вне пластин возможны волны с узлами только на одной границе (эффект Казимира)

увидеть. Но чтобы поймать каплю, надо затратить работу, иначе капля упадет в океан.

Возникающие частицы вакуума имеют массу, а значит на них действуют гравитационные поля других подобных частиц, а также окружающих материальных тел. Может ли распределение этих частиц вакуума стать неоднородным в их общем поле тяжести и, тем самым создать гравитационные поля в пустоте ? Этот вопрос пока не решен. Все что мы знаем в настоящее время это возможность возникновения реальных частиц в сильных внешних полях, в частности в гравитационных полях черных дыр, а также локальные изменения структуры вакуума в результате эффекта Казимира (см.гл.6).

Казалось бы, вакуум, в котором все время рождаются и исчезают частицы, должен создавать сопротивление движению тел. Чем больше скорость тела, тем чаще оно должно было бы сталкиваться с частицами вакуума. Этого не случится только в том случае, если частицы вакуума будут расступаться перед движущимся телом. Именно подобное поведение вакуума следует из теории. Такое поведение возможно, если давление вакуума отрицательно. Давление обычных газов и жидкостей всегда положительно. Чем сильнее мы сжимаем эти тела, тем труднее продолжать сжатие. Исключением являются тела, предварительно уже растянутые. Если у нас в руках находится растянутая пружина, то она не сопротивляется сжатию, а наоборот – сжимается сама по себе. Можно сказать, что в этом случае давление в пружине отрицательное. Подобным же образом ведет себя вакуум, хотя аналогию с пружиной не следует понимать слишком буквально.

КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ

Квантовая телепортация это связь квантовых состояний двух (или большего числа) удаленных друг от друга объектов без прямого взаимодействия между ними. Изменения, происходящие с одной частью системы, немедленно сказываются на состоянии всей системы, даже если части системы находятся в разных областях пространства. Такие состояния системы называются *спутанными* состояниями. С привычной для нас точки зрения, совершенно непонятно, как состояния двух удаленных объектов могут зависеть друг от друга, если они не связаны никакими силами и не обмениваются никакими сигналами, которые бы содержали информацию об их состоянии. Спутанные частицы по сути дела являются единым объектом вне зависимости от расстояния между ними. Например, одна из них может находиться на Земле, а другая – на Марсе. На существование спутанных состояний впервые обратили внимание Альберт Эйнштейн, Борис Подольский и Натан Розен, которые считали это серьезной проблемой теории. Однако реальность таких состояний не только доказана на опыте, но эти состояния уже используются на практике.

Квантовая телепортация не имеет никакого отношения к мгновенному переносу людей или вещей, о которой часто пишут писатели-фантасты. Тем не менее, подобный процесс необычен и не похож на что-либо привычное в обыденной жизни. Попытки объяснить это явление более или менее обычным образом до сих пор не достигли успеха, и скорее всего такое объяснение невозможно.

Можно определить на опыте состояние одной из частиц, входящих в спутанную систему, и тем самым вывести ее из спутанности. При этом состояние всех других частиц системы окажется связанным с состоянием наблюдаемой частицы, которая может находиться от них на сколь угодно большем расстоянии.

Приведем несколько примеров спутанных состояний. В качестве первого примера спутанного состояния рассмотрим молекулу водорода, которая состоит из двух атомов. Два электрона этой молекулы находятся на одном энергетическом уровне. Их спины направлены противоположно друг другу. Расщепим эту молеку-

лу, например излучением, таким образом, чтобы атомы разлетелись в разные стороны и попали между полюсами двух магнитов (рис.16). Если оси этих магнитов параллельны друг другу, то атомы отклонятся магнитным полем в разные стороны (как это

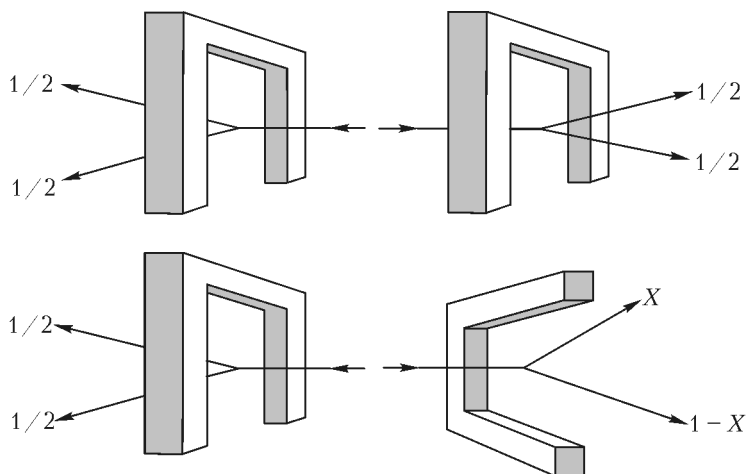


Рис.16. В верхней части рисунка показано, как отклоняются два атома водорода в спутанном состоянии с противоположными спинами электронов, когда они проходят через два параллельных магнитных поля. Если один из них отклоняется к северному полюсу в левом магните, то другой отклоняется к южному полюсу в правом магните. В нижней части рисунка дана картина отклонения атомов, проходящих через два магнитных поля, которые направлены под углом друг к другу. Если не определять направление спина атома, проходящего левый магнит, то вероятность отклонения атома к северному или к южному полюсу в правом магните одинакова ($X = 1/2$). Если же определяется направление спина одного из атомов по его отклонению левым магнитом, то вероятность отклонения другого атома правым магнитом будет зависеть от того, куда отклонился первый атом, и от угла между направлениями полей этих магнитов, которые могут быть расположены сколь угодно далеко друг от друга ($X \neq 1/2$)

объясняется при обсуждении опыта Штерна–Герлаха). Для определенности рассмотрим случай, когда один из атомов, назовем его атом 1, отклонится к северному полюсу первого магнита. Тогда второй атом – атом 2 – обязательно отклонится к южному полюсу второго магнита. Это не удивительно. Например, если мы знаем, что в закрытой коробке было два шара – белый и черный и мы вынули белый, то можно быть уверенным, что в коробке остался черный шар.

Необычность спутанности атомов проявится в том случае, если пропустить эти атомы через магнитные поля, оси которых наклонены друг к другу. Так, определим отклонение первого атома от направления поля одного из магнитов, назовем это направление Z_1 и, тем самым, определим направление спина электрона этого атома. Пропустим второй атом, который может улететь далеко от первого атома, через магнитное поле, ось которого, назовем ее Z_2 , наклонена относительно оси Z_1 . Если в первом случае оказалось, что спин направлен вверх относительно оси Z_1 , то результат второго измерения нельзя предсказать точно. Он будет соответствовать вероятности отклонения второй частицы вверх или вниз по отношению к оси Z_2 , как если бы для нее уже была определена проекция относительно оси Z_1 и она оказалась противоположной по знаку проекции первой частицы, так что суммарная проекция спинов обоих атомов на ось Z_1 осталась бы равной нулю. Это совершенно удивительный результат. Ведь если бы мы не определили направление спина первого атома, то второй атом отклонился бы с равной вероятностью вверх или вниз по отношению к направлению поля Z_2 . Откуда электрон второго атома «знает» о том, какие поля проходил электрон первого атома и в какую сторону он в конце концов отклонился? Атомы могут уйти столь далеко друг от друга, что опыт по пропусканию атома 2 через магнитное поле может быть сделан раньше, чем какой-либо сигнал от наблюдателя 1 дойдет до наблюдателя 2. Более того, можно установить ориентацию первого из магнитов уже после того, как атомы разлетелись. И в этом случае отклонение второго атома будет связано с отклонением первого. Теория предсказывает именно такой результат, и опыт подтверждает теорию. Что же связывает эти атомы? Ведь опыты приводят к выводу, что сигналы, несущие информацию, не могут распространяться со скоростью большей, чем скорость света.

Подчеркнем, что связь спутанных частиц вовсе не противоречит этому выводу. Действительно, наблюдатель 2 может на опыте обнаружить, что атом 2 отклонился в определенную сторону в магнитном поле, которое поставлено на пути этого атома, но в этот момент он вовсе не знает, где находится атом 1, какие поля проходил атом 1 и т.д. Он сможет это узнать только тогда, когда получит информацию от наблюдателя 1, причем, как и следовало ожидать, скорость передачи этой информации будет не больше скорости света.

Спутанность сохраняется, пока состояние изучаемых атомов остается неопределенным. При столкновениях с какими-либо

частицами – молекулами, атомами и т.п., когда положение или другие характеристики данных атомов станут определенными, спутанность разрушается. Поэтому в обыденной жизни мы не имеем дела со спутанными состояниями.

Конечно, не только электроны и атомы, но, вообще говоря, любые объекты могут быть частями спутанной системы, хотя чем больше система, тем труднее сохранить спутанность. Если с помощью линз и зеркал создать пучок спутанных фотонов, то связь между поляризациями этих фотонов сохраняется, даже если один из них ушел, например по световоду, далеко от первого. В настоящее время была осуществлена передача спутанных состояний фотонов на расстояние более 100 км. Спутываются фотоны только с одинаковыми длинами волн.

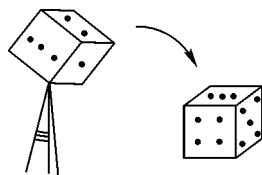
Уже в настоящее время возникла возможность использовать теорию спутанных состояний для практических применений. В частности, можно создать такой способ передачи информации, при котором сразу обнаруживается, подслушивают ее или нет. Каждое постороннее вмешательство в передачу, например в случае передачи информации спутанными фотонами, вызывает такое искажение связи, которое легко обнаружить. Опишем, как может работать такая система. Создадим, например, с помощью лазера, линз и зеркал, пучок спутанных пар фотонов, которые поляризованы вправо или влево по кругу (см. главу 2). Заранее можно говорить только о вероятности правой или левой поляризации каждого из фотонов. Определим последовательно поляризацию одного из фотонов – назовем его А – каждой спутанной пары, а второй – назовем его В – отправим к получателю, которому мы хотим передать какое-либо сообщение. Поскольку фотоны А и В спутаны, то, определяя поляризацию фотонов А, мы узнаем, какие поляризации будет наблюдать получатель В. Если, например, оказалось, что фотон А имеет правую круговую поляризацию, то фотон В будет иметь обязательно левую поляризацию. Можно условиться, что правая поляризация нечетных по порядку фотонов означает точку азбуки Морзе, а четных – тире. Левая поляризация может означать пропуск между словами. Напомним, что азбукой Морзе с помощью всего двух «букв» – точки и тире (или цифр 0 и 1) можно записать любое слово. Поскольку поляризация фотонов случайна (например, может оказаться, что несколько фотонов подряд имеют одинаковые поляризации), а точки и тире означают слова, только если идут в определенном порядке, то надо сообщить получателю В, какие номера фотонов соответствуют нужному нам сообщению, а какие не следует принимать во внимание. Такое сообщение можно

передать от А к В открытым образом, например по телефону. Это не раскроет смысл сообщения, так как номера нужных фотонов случайны. Никто, кроме получателя, не знает о поляризации фотонов, потому что любая попытка перехватить эти фотоны нарушает спутанность и делает все сообщение бессмысленным.

В главе 4 мы привели аналогию квантового состояния монеты, стоящей на ребре. Если бы нам удалось «спутать» две таких монеты, то опыт мог бы выглядеть следующим образом (на самом деле, монета слишком велика и внешние воздействия быстро бы разрушили спутанность). Пусть сначала монеты стояли на ребре, орлами в разные стороны. Пусть теперь одна из монет укатится далеко-далеко, а на вторую подействуем внешним полем, которое может ее закрутить. Вероятность этой монете упасть орлом или решкой в определенном направлении будет зависеть от того, как она закрутилась. Через какое-то время остановим эту монету и посмотрим, как она упадет. Например, она упадет направо и орлом. При этом окажется, что первая монета, которая никакими взаимодействиями не связана со второй, упадет обязательно налево и решкой.

Если имеется три таких монеты, то возможны восемь комбинаций. Квантовая система из нескольких электронов или атомов может иметь не две, а много характеристик своего состояния. Аналогом (но не моделью) подобной системы может служить, например, игральная кость, стоящая углом на игле (рис.17).

Рис.17. Нельзя сказать, в каком состоянии находится игральная кость на игле, пока мы ее не тронули. Опыт может определить только такие состояния, как положение кости на столе. Результаты должны быть сформулированы макроскопически, потому что сам человек — объект макроскопический



Состояние на игле смешанное, мы не можем увидеть его, так как луч света сбросит эту кость с иглы и она упадет, с определенной вероятностью, на одну из шести граней. Строго говоря, утверждение, что кость была на игле, не проверяется опытом. Это лишь теория, которая удобна для объяснения опытов.

В настоящее время сделаны первые шаги по созданию компьютеров, основанных на явлении квантовой телепортации. В отличие от обычных компьютеров, которые записывают информацию в виде «бит», т.е. двух чисел — либо «0», либо «1», в квантовых компьютерах информация записывается в виде «кубита», который является квантовой системой, состояние которой

может быть с определенной вероятностью как «0», так и «1». Если использовать систему из нескольких или многих спутанных частиц, можно работать одновременно со всеми возможными комбинациями квантовых состояний, а не только с двумя. Например, три кубита дают восемь возможных состояний, а цепочка из N кубитов имеет сразу 2^N состояний. Если использовать около сотни спутанных частиц, каждая из которых может иметь два состояния, то можно будет одновременно производить 2^{100} , т.е. около 10^{30} операций.

Различие в скорости нахождения информации для обычного и квантового компьютера можно образно описать следующим примером. Если вы хотите найти книгу в библиотеке, вы ищете соответствующий раздел, затем полку, затем книгу на полке. Это последовательный поиск обычного компьютера. Если же у каждой книги поставить по библиотекаря, то вы можете лишь произнести название книги, и она сразу предстанет перед вами. Это параллельный поиск квантового компьютера.

Мы не будем здесь обсуждать различные практические пути построения квантовых компьютеров, поскольку эта задача еще далека от решения. Одной из основных трудностей квантовой телепортации является необходимость предотвратить (или сделать очень малым) любое ненужное взаимодействие спутанных частиц с окружающей средой, которое уничтожает спутанность. В обычной жизни не приходится встречаться со спутанными состояниями именно потому, что на каждую частицу окружающей нас среды оказывается огромное число случайных воздействий.

АТОМЫ

Из чего состоят атомы

Как образуется пар из воды? Почему мы чувствуем запах цветов? Эти и многие подобные вопросы привели древнегреческого философа Демокрита к мысли о том, что все тела состоят из мельчайших частиц – атомов, которые могут улетучиваться с поверхности тела. Гениальная догадка Демокрита была надолго забыта и снова возникла только в восемнадцатом веке. Теперь мы точно знаем, что все окружающие нас тела состоят из атомов, которые могут соединяться друг с другом, образуя молекулы, или выстраиваться определенным образом в виде кристалла, или объединяться иным образом. Атомы очень малы. Атом водорода легче билиардного шара во столько же раз, во сколько билиардный шар легче земного шара. Масса атома водорода около $1,66 \cdot 10^{-24}$ г, масса электрона $9,11 \cdot 10^{-28}$ г.

В центре атома находится ядро, которое окружено облаком электронов. Ядро, в свою очередь, состоит из протонов и нейтронов. Протон имеет массу в 1840 раз больше, чем масса электрона, и положительный электрический заряд, равный по величине отрицательному заряду электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Нейтрон имеет массу немного больше, чем масса протона, но заряда не имеет. Атом почти «пустой». Если представить, что ядро увеличилось до размеров земного шара, то расстояние до ближайшего электрона будет больше, чем расстояние от Земли до Солнца. Самый легкий атом – атом водорода – содержит один протон и один электрон, а, например, атом железа имеет ядро из 26 протонов и 30 нейтронов, которое окружено 26-ю электронами. Химические элементы отличаются друг от друга числом протонов в ядре атома.

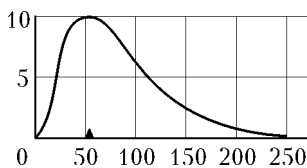
Электроны притягиваются к ядру и должны были бы упасть на ядро. Планеты тоже притягиваются к центральному телу – к Солнцу, но не падают на Солнце, потому что двигаются по замкнутой орбите. В отличие от планет, электрон и ядро имеют заряды и движение по орбите не должно бы спасти электрон от падения, так как опыт показывает, что при движении одного заряда вокруг другого возникает переменное электромагнитное поле и излучаются электромагнитные волны. Эти волны уносят

энергию, и заряды должны сближаться, пока не упадут друг на друга. Потери энергии столь велики, что электрон должен был бы упасть на ядро за 10^{-10} с. Это противоречие удалось разрешить только на основе тех представлений о природе электронов и электромагнитных волн, о которых мы рассказывали в предыдущих разделах. Действительно, если бы электрон упал на ядро, т.е. очутился бы в области размером $R_{\text{я}} \approx 10^{-12}$ см, то его энергия, согласно принципу неопределенности, была бы больше: $E > \hbar c / R_{\text{я}}$, что намного превышает выигрыш энергии при падении на ядро.

Характер излучения, которое могут испускать или поглощать отдельные атомы, удобно изучать, используя газ этих атомов, потому что в твердых и жидких телах излучение зависит от взаимодействия атомов. Излучение атомов, как и любое электромагнитное излучение, испускается при движении заряженных частиц. Такими частицами в атоме являются электроны. Спектр излучения атомов имеет вид набора отдельных линий, которые соответствуют различным частотам излучения. Такой характер спектра и то, что излучение может испускаться только отдельными порциями (квантами), немедленно приводит к заключению, что электроны в атоме могут иметь не любые, а определенные значения энергии. Говорят, что электроны могут находиться только на определенных энергетических уровнях. Состояние электрона на этих уровнях стабильное. Если сообщить электрону энергию, например облучением светом или ударом другого атома, то электрон переходит с одного разрешенного уровня энергии на другой, более высокий. Переход возможен только на пустой верхний уровень. Излучение испускается при переходе электрона с более высокого на более низкий уровень. Энергия излучаемого фотона соответствует разности энергий уровней. Разные спектральные линии испускаются при переходах между разными энергетическими уровнями атома. У каждого атома имеется свой набор спектральных линий. Например, атомы обыкновенного оконного стекла не имеют уровней, разности энергий которых соответствовали бы энергиям фотонов видимого света. Поэтому стекло прозрачно. Однако тепловое, инфракрасное, излучение имеет энергию, которая соответствует разностям энергий уровней атомов в стекле. Стекло не пропускает тепловое излучение и поэтому используется в парниках и оранжереях.

Движение электрона внутри атома можно описать как движение по орбите в том смысле, что радиус орбиты определяет наиболее вероятное расстояние электрона от ядра. Устойчивыми

Рис.18. По вертикальной оси задана относительная вероятность нахождения электрона на разных расстояниях от ядра в самом нижнем квантовом состоянии атома водорода ($n = 1, L = 0$). По горизонтальной оси задано расстояние в единицах 10^{-9} см. Треугольником на оси обозначен радиус орбиты, на которой укладывается целое число длин волн



состояниями электрона в атоме являются такие состояния, когда на орбите укладывается целое число волн, длина которых определяет энергию электрона. Разным энергетическим уровням соответствуют разные орбиты (рис.18). Как и любое движение по орбите, движение электронов можно характеризовать заданием углового момента. Напомним, что угловой момент вращения макроскопического тела имеет направление, перпендикулярное плоскости вращения, подобно винту с правой нарезкой, причем возможно любое направление углового момента в пространстве. Иное дело для электрона в атоме. Величина орбитального углового момента электрона может иметь только определенный набор значений. Кроме того, возможно только ограниченное число проекций орбитального момента на произвольную ось, подобно спину, который имеет только две возможных проекции на любую выбранную линию. Таким образом, состояние электрона в атоме можно определить, задавая несколько чисел, которые называются квантовыми числами. Это, во-первых, номер энергетического уровня: $n = 1, 2, 3, \dots$; во-вторых, величина орбитального момента: $L = 0, 1, 2, \dots$; в третьих, проекция орбитального момента: $m_L = -L, -L + 1, \dots, L - 1, L$; наконец, проекция спина: $m_s = 1/2$ или $m_s = -1/2$. Полный угловой момент атома есть сумма спина ядра и полного углового момента всех электронов.

Очень важным является то обстоятельство, что, согласно принципу Паули, никакие два электрона не могут иметь один и тот же набор квантовых чисел. На рисунке 19 изображены орбиты электронов для атомов от водорода (один электрон) до аргона (восемнадцать электронов). Разные атомы отличаются разным числом протонов в ядре, т.е. зарядом ядра, и разным числом электронов на орбитах. Разные ядра по-разному притягивают к себе электроны, поэтому потенциальная энергия взаимодействия электронов с ядром и друг с другом разная у разных атомов (рис.20). Это приводит к тому, что энергетические уровни у разных атомов разные. Такой набор уровней обеспечивает разный набор спектральных линий. Наблюдение спектров

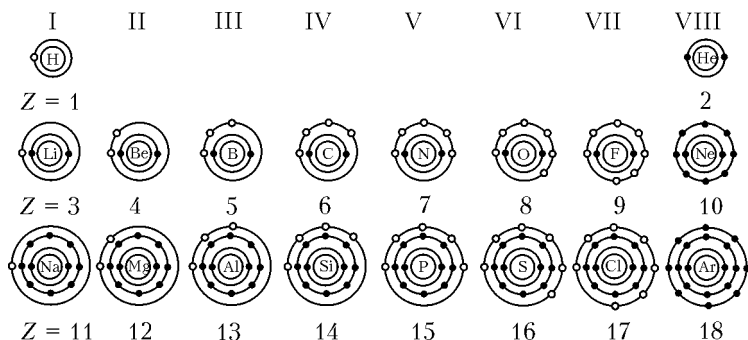


Рис.19. Схема заполнения энергетических уровней атомов. Электроны заполненных оболочек отмечены черными точками

атомов является мощным средством определения наличия малых примесей того или иного химического элемента. Интересно, что наблюдения необычного набора спектральных линий в излучении солнечной короны позволило обнаружить ранее неизвест-

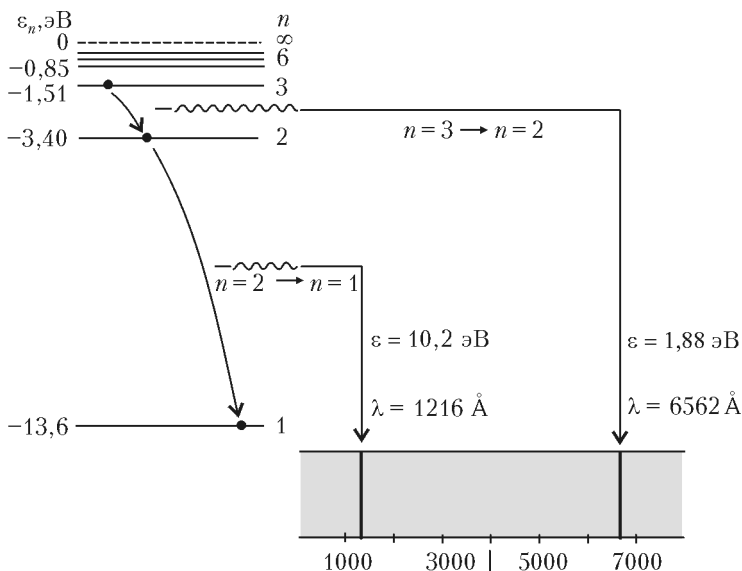


Рис.20. Схема энергетических уровней атома водорода. Стрелками отмечены переходы с излучением на волне 1216 ангстрем и 6562 ангстрема. Напомним, что один ангстрем (\AA) равен 10^{-10} м , а один электрон-вольт (эВ) равен $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Справа внизу изображены две из наблюдаемых линий в спектре атома водорода

ный химический элемент, а именно гелий, который до этого не был обнаружен на Земле.

Как уже было упомянуто, электроны в атоме обладают собственным угловым моментом (спином) и орбитальным угловым моментом. Энергия электрона зависит от направления его спина и орбитального момента относительно направления внешнего магнитного поля. Магнитное поле влияет на орбитальное движение электрона, как на движение любого заряда. Поэтому энергетические уровни атома расщепляются во внешнем магнитном поле. Поскольку электрон имеет не любые, а определенные значения спина и орбитального момента, это расщепление выглядит в спектре атома, как появление нескольких узких полосок на месте прежней одной полосы.

Чтобы атом испустил излучение, надо его возбудить, например облучить его светом или столкнуть с другим атомом, и, тем самым, поднять один из электронов на более высокий свободный уровень. Электрон какое-то время находится на высоком уровне, прежде чем возвратиться назад. Существует определенное среднее время жизни уровней. Отсюда следует, что испускаемое излучение должно иметь разброс по энергиям $\Delta E \geq \hbar/\Delta t$. Именно это и наблюдается. Поэтому спектральные линии, положение

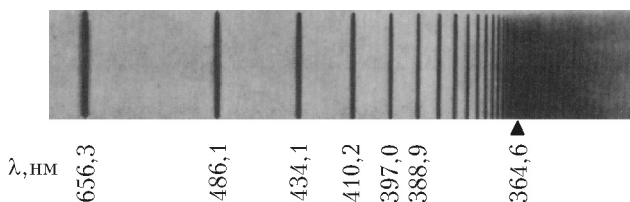


Рис.21. Спектр атома водорода. Слева – красная, а справа – фиолетовая части спектра. Длина волны дана в нанометрах (10^{-9} м). Видны полосы, соответствующие переходам между разными уровнями. Полосы имеют ширину, определяемую временем жизни возбужденного уровня

которых соответствует частоте излучения, т.е. разности энергий атомных уровней, имеют определенную толщину (рис.21).

Современная картина строения атомов была впервые предложена датским ученым Нильсом Бором.

Вынужденное излучение атомов. Лазер

Если на возбужденный атом падает излучение, у которого энергия фотонов такая же, как энергия, испускаемая самим этим атомом, то время жизни возбужденного состояния сильно уменьшается. Внешнее излучение как бы раскачивает

электрон, заставляя его быстрее перейти на нижний уровень. Такие переходы были предсказаны Эйнштейном и названы вынужденными переходами. При самопроизвольных переходах фотоны от разных атомов уходят в разные стороны. При вынужденных переходах все фотоны от разных атомов испускаются в том же направлении, что и падающий пучок фотонов. Можно достигнуть очень большой интенсивности вынужденного излучения, если одновременно возбудить с одинаковой энергией много атомов, а затем направить на них пучок фотонов с той же энергией. Практически это достигается следующим образом. Выбирается вещество, у которого верхние атомные уровни расположены так близко, что почти сливаются в одну полосу (рис.22). Тогда можно разными способами (излучением, столкновениями и т.д.) перевести электроны в эту полосу. Кроме того,

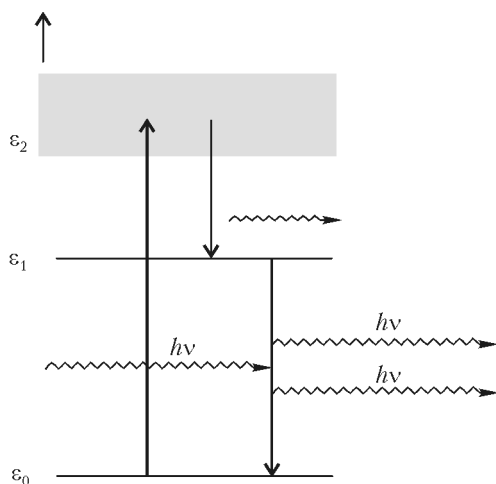


Рис.22. Схема возникновения излучения лазера. Луч света (жирная стрелка) возбуждает атом, переводя электрон из основного состояния на один из верхних уровней. Возвращение обратно совершается путем двух последовательных переходов. Сначала испускается фотон с энергией $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$, и атом находится какое-то небольшое время на промежуточном уровне ε_1 . Вместе с тем, атом облучается фотонами с энергией $h\nu = \varepsilon_1 - \varepsilon_0$. Эти фотоны имеют энергию такую же, как фотоны, которые могут излучиться при переходе из промежуточного уровня на основной уровень. Они вызывают быстрое вынужденное излучение атома, так что в результате вместо одного фотона с энергией $h\nu$ получаем два одинаковых фотона с энергиями $h\nu$ и $h\nu$. Дальше процесс развивается в виде лавины. Фотоны на рисунке представлены волнистыми линиями

выбранное вещество должно иметь промежуточный свободный уровень. Возвращаясь на нижний уровень, электроны какое-то время задерживаются на промежуточном уровне. Если при этом направить на вещество даже слабый пучок фотонов с энергией, равной энергии перехода с промежуточного уровня на нижний уровень, то возникнет лавина фотонов и все атомы практически одновременно будут испускать излучение. Такой процесс может длиться столь долго, сколь долго атомы возбуждаются на самые верхние уровни. Атомы можно возбуждать самым различным способом, а получать в результате излучение строго с одной частотой и направленное в одну сторону. Такое излучение называется лазерным.

В настоящее время луч лазера имеет очень широкое применение. Он может сбивать ракеты в космосе или работать как хирургический нож при сложных операциях на сердце.

Что держит протоны и нейтроны в ядре атома

Рассуждая о строении атома, нельзя не коснуться вопроса о ядерных силах. Малый размер ядра и опыты по рассеянию протонов на протонах и на более тяжелых ядрах свидетельствуют о том, что ядерные силы могут связывать как заряженные, так и нейтральные частицы и действуют только на коротком расстоянии. Переносчики таких сил были найдены (рис.23). Ими оказа-

лись так называемые пи-мезоны (π -мезоны). Имеется три типа пи-мезонов: не имеющие электрического заряда π^0 и имеющие положительный π^+ или отрицательный π^- заряд, равный заряду электрона. В дальнейшем мы еще раз коснемся вопроса о месте этих мезонов среди других элементарных частиц.

Взаимодействие двух ядерных частиц, например протона и нейтрона, можно описать графиками, подобными графикам для двух электронов (см. рис.11 и рис.23), но роль фотонов будут играть пи-мезоны. В какой-то момент протон может испустить положительно заряженный пи-мезон и превратиться в нейтрон. В следующий момент соседний нейтрон поглощает этот пи-мезон и превращается в протон. Пи-мезон переносит энергию и импульс от одной частицы к другой. В конце процесса мы снова

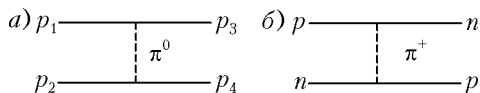


Рис.23. а) Схема упругого рассеяния протона (p_1) на протоне (p_2) с обменом нейтральным (π^0) пи-мезоном; б) схема упругого рассеяния протона (p) на нейтроне (n) с обменом положительным (π^+) пи-мезоном

имеем один протон и один нейтрон, но с иными величинами энергий и импульсов. При этом общая энергия и импульс системы остаются постоянными. Возможно также, что протон и нейтрон обмениваются нейтральным пи-мезоном. Как и в случае с электронами, наряду с графиками, представленными на рисунке 23, возможны и другие, описывающие процессы с участием разных промежуточных частиц.

Пи-мезоны, в отличие от фотонов, имеют массу и могут иметь любую скорость, но, конечно, меньшую скорости света. Для рождения пи-мезона нужна энергия не меньше, чем его масса умноженная на квадрат скорости света: $E = mc^2$. Поэтому пи-мезоны могут появляться только на короткое время – не более чем $\hbar/(mc^2)$. За такое время они не могут уйти на расстояние больше чем 10^{-13} см. Это определяет короткий радиус действия ядерных сил. Фотоны не имеют массы покоя. Они могут иметь любую энергию, в том числе очень маленькую. Время существования таких виртуальных фотонов сравнительно велико, и они могут уйти далеко от заряда. Поэтому электромагнитные силы уменьшаются с удалением от заряда гораздо медленнее, чем ядерные силы.

Протоны и нейтроны имеют такой же собственный угловой момент – спин, как электроны. Протон имеет электрический заряд и собственное магнитное поле. Его магнитное поле меньше, чем у электрона. Если использовать аналогию (не тождество) с заряженным шариком, то можно сказать, что при том же угловом моменте, что у электрона, но в 1836 раз большей массе протон вращается медленнее и поэтому создает меньшее магнитное поле. Спин пи-мезона равен нулю, а масса в 273 раз больше массы электрона. Заряженный π^+ -мезон распадается на μ^+ -мезон и нейтрино. Возможность, даже на короткое время, рождения протоном π^+ -мезона и превращения в нейтрон (рис.24) позволяет объяснить наблюдаемую величину магнитного поля протона. Нейтрон не имеет заряда и, казалось бы, не должен иметь собственного магнитного поля. Но он это поле имеет именно

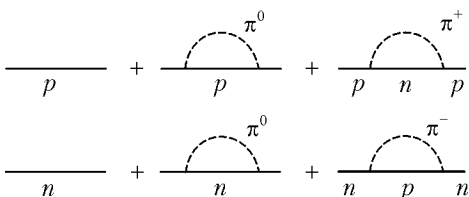


Рис.24. Схема возможных состояний протона и нейтрона с испусканием на короткое время пи-мезонов

потому, что проводит часть времени в виде протона и отрицательного пи-мезона.

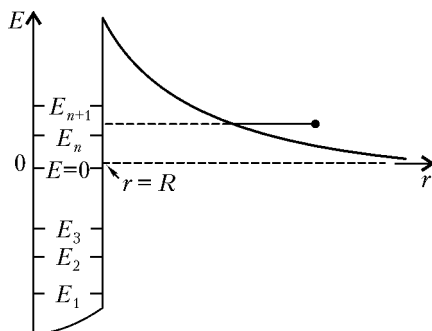
Можно сказать, что и протон, и нейтрон окружены облаком мезонов, подобно тому как электрон окружен облаком фотонов, а фотон на короткое время существует в виде виртуальной пары электрон-позитрон.

Атомные ядра

Ядерные силы притяжения между протонами, между нейтронами, а также между протонами и нейтронами, обеспечивают стабильность атомных ядер. Чтобы ядерные силы начали действовать, надо приблизить частицы друг к другу. Этому препятствуют электрические силы отталкивания протонов. Надо затратить энергию, чтобы преодолеть эти силы и сблизить частицы. Зато потом мы получим значительный выигрыш в энергии за счет того, что энергия возникшего ядра меньше, чем энергия исходных частиц. Напомним, что энергия связана с массой: $E = mc^2$ и масса атомного ядра меньше, чем масса составляющих ядро частиц. Процесс образования ядра напоминает, хотя и далекий по существу, процесс скатывания камней с холма в соседний овраг. Надо затратить энергию, чтобы вкатить камни с равнины на холм. Но если затем эти камни будут падать в овраг, то будет выделено гораздо больше энергии, чем затрачено на подъем.

Остановимся более подробно на причинах устойчивости и неустойчивости атомных ядер. На рисунке 25 приведено изменение энергии электрических и ядерных сил на разных расстояниях от центра ядра. Ядро, как и атом, является квантовой системой, и частицы ядра располагаются на разных энергетических уровнях. У тех ядер, которые легче железа, заполнены уровни, лежащие ниже нулевого уровня. Поэтому эти ядра

Рис.25. Схема потенциальной ямы атомного ядра, окруженной потенциальным барьером. Показаны уровни протонов в ядре. Протоны с энергией выше $E = 0$ могут просочиться через барьер и вылететь наружу



стабильны, и надо затратить энергию, чтобы их разрушить. У более тяжелых ядер заполняются уровни выше $E = 0$. Эти ядра неустойчивы, так как их энергия больше, чем энергия их осколков. На рисунке 25 показано, как могут заполняться эти уровни для легких и для тяжелых ядер. Чтобы извлечь протон из потенциальной ямы легкого ядра, надо, затратив энергию, вытащить протон из ямы и преодолеть барьер. У тяжелых ядер некоторые протоны имеют энергию выше, чем край ямы, и достаточно только преодолеть барьер, чтобы вылететь из ядра. Потенциальный барьер, через который, с точки зрения классической физики, не может проникнуть частица, если ее энергия меньше высоты барьера, все же преодолим, если за барьером частица будет иметь положительную энергию. Как мы подробно обсуждали в предыдущем разделе, энергия частицы на короткое время может быть достаточно большой. Это позволит частице преодолеть барьер и оказаться на свободе. Частица будет иметь ту же энергию, но находиться уже вне ядра. Очевидно, что для легких ядер такой распад невозможен. Протоны ядер, более тяжелых, чем железо, могут просочиться через барьер и покинуть ядро. Чем тяжелее ядро, тем легче оно распадается, причем оно может распадаться не только с вылетом протона, но также разделившись на два более легких ядра.

Самопроизвольный распад тяжелых атомных ядер называется радиоактивностью. Впервые это явление было обнаружено при исследовании химического элемента радия. Имеется три вида радиоактивности: альфа-, бета- и гамма-распады. Альфа-распад это распад ядра с выбросом ядра гелия. Испускание ядра гелия, а не протонов или нейтронов по отдельности, энергетически выгодно потому, что два протона и два нейтрона очень прочно связаны в ядре гелия. Если в ядре слишком много нейтронов, то один из них может превратиться в протон, испуская электрон и антинейтрино. Такой тип распада называется бета-распадом (рис.26). Если после альфа- или бета-

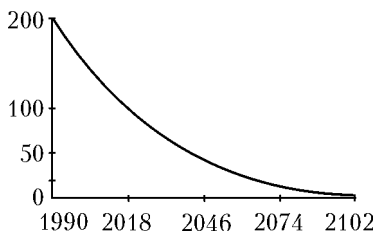


Рис.26. Радиоактивный бета-распад 200 грамм стронция-90 в зависимости от времени. По вертикальной оси отложено количество стронция-90, который еще не успел распасться, а по горизонтальной оси отложены годы

распада ядро остается в возбужденном состоянии, то оно переходит на основной уровень с испусканием гамма-кванта.

Химические свойства элементов определяются числом электронов в атоме, которое равно числу протонов в ядре. Однако ядра с тем же числом протонов могут иметь разное число нейтронов. Такие ядра называются изотопами.

Процесс соединения протонов и образование ядер гелия является основным источником энергии нашего Солнца, Мы будем говорить об этом подробно в четырнадцатой главе. Попытки получить таким образом энергию для использования на Земле пока не привели к успеху, хотя работа ведется уже много лет. Такая энергия обычно называется термоядерной, потому что используется высокая температура, чтобы ускорить протоны и придать им энергию, достаточную, чтобы преодолеть электрическое отталкивание и соединиться. Для этого нужна температура свыше миллиона градусов. Основная трудность задачи состоит в необходимости удерживать быстрые протоны в небольшом объеме реактора. Ясно, что стенки реактора не могут состоять из обычного вещества – оно моментально сгорит при такой температуре. Солнце удерживает протоны силой своего тяготения. На Земле тяготение не столь велико. Однако можно удерживать протоны сильным магнитным полем. К сожалению, до сих пор не удалось преодолеть технические трудности, связанные с этой задачей.

Термоядерная энергия может быть очень выгодной, так как в этом случае горючим является водород, запасы которого в составе воды практически неисчерпаемы. Иное дело уран, который используется на атомных станциях. Запасы урана невелики, и использование его небезопасно. Тяжелые ядра, содержащие много протонов, неустойчивы потому, что электрические силы отталкивания протонов больше, чем ядерные силы притяжения. Ядерные силы превышают электрические на малых расстояниях, но если, например, «потрясти» ядро изотопа урана, с 92 протонами и 143 нейтронами, ударив по нему нейтроном, то оно развалится на части – в данном случае на ядро бария, ядро криптона и два или три нейтрона. Эти ядра разлетаются под действием электрических сил отталкивания. Замечательное свойство такого распада состоит в том, что, затратив один нейтрон, мы получаем два или три нейтрона. Если выбранный объем куска урана невелик, то нейтроны вылетят из него, не задев ни одного ядра по дороге. Если же их путь до границы достаточно длинный, то они попадут по дороге в одно из ядер урана и процесс повторится. Тем самым,

возникнет лавина распадов (рис.27)¹. Число нейтронов и осколков ядер урана будет умножаться, пока кусок не разлетится на части. Это и будет атомным взрывом.

Отметим, что те силы, которые были ответственны за атомные взрывы в Хиросиме и Нагасаки, и те, которые работают на атомных станциях, это вовсе не ядерные силы. То, что обычно называют атомной энергией, это энергия электрических сил отталкивания протонов в атомном ядре. Кинетическая энергия осколков урана и есть та энергия, которая проявляется в виде взрыва атомной бомбы или в виде тепла в ядерном реакторе атомной станции.

¹ Этот рисунок и некоторые последующие рисунки приведены на цветной вклейке.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И СИЛЫ МЕЖДУ НИМИ

Все тела состоят из атомов, атомы состоят из ядра и электронов, ядро состоит из протонов и нейтронов, протон состоит из кварков и так далее. Так что же, наш мир похож на матрешку? Атом испускает фотоны, но готовые фотоны не упакованы в атоме. Так как же определить, что такое «элементарная частица» и что такое «состоять из чего-то»? Наиболее приемлемое условие того, что один объект состоит из других объектов, это необходимость затратить энергию, чтобы разделить исходный объект на части. Имея в виду связь между массой и энергией $E = mc^2$, можно сказать, что сложный объект должен иметь меньшую массу, чем его части. Например, молекула водорода имеет меньшую массу, чем два свободных атома водорода. Ядро гелия имеет меньшую массу, чем два свободных протона и два свободных нейтрона. Однако это условие справедливо только для устойчивых объектов. Как быть, например, с нейтроном? Хотя свободный нейтрон самопроизвольно распадается на протон, электрон и антинейтрино, нельзя сказать, что он состоит из протона, электрона и антинейтрино. Если атом поглощает фотон, то это не значит, что он состоит из невозбужденного атома и фотона.

Так что же такое «элементарная частица»? Обычно называют элементарными частицы, масса которых меньше массы протона или не слишком превышает эту массу. Можно сказать, что понятие элементарности частицы и ее составляющих используется скорее как интуитивное, чем как строгое понятие. Очень часто элементарной частицей называют такую частицу, которая выступает как целое и структура которой не представляет интереса.

Основным методом изучения элементарных частиц является изучение столкновений стабильных частиц друг с другом. К числу стабильных частиц, которые самопроизвольно вообще не распадаются, относятся электрон, протон, нейтрино и их античастицы, а также фотон. Все остальные частицы живут короткое время и распадаются на другие частицы. Стабильные частицы возникают в самом конце цепочки распадов. Заметим, что слово «распад» было бы точнее заменить словом «превращение».

Частицы разгоняют до больших энергий в переменных электрических и магнитных полях. Для этого используют огромные

ускорители (рис.28). В результате столкновений ускоренных частиц рождаются новые частицы, следы которых изучаются разными методами. Наиболее простым из таких методов является наблюдение следов частиц в камере с пересыщенным паром, который конденсируется вдоль следа частицы, подобно тому как образуется белый след на небе от сверхзвукового самолета. Именно таким образом английский физик Эрнест Резерфорд обнаружил, что атом состоит из ядра и электронов. Он наблюдал следы частиц, которые в большинстве случаев летели по прямой, но иногда резко отклонялись от своего пути, как бы отскакивая от препятствия. Можно было оценить размеры объекта, от которого отскакивали частицы. Этими объектами оказались ядра атомов. Размеры частиц определяются как расстояние, на которое они должны сблизиться при столкновении, чтобы существенно изменить свой характер движения. Следы частиц наблюдают в фотопластинках, а также используя различного вида детекторы – счетчики частиц. Иногда следы частиц разветвляются по дороге. Это означает, что частица распалась.

Все частицы можно разделить на две большие группы: частицы с целым значением спина (0, 1, 2, и т.д. в единицах \hbar), которые называются бозонами, и частицы с полуцелым спином ($1/2$, $3/2$, $5/2$ и т.д.), которые называются фермионами. Фермионы, в отличие от бозонов, подчиняются принципу Паули. Два одинаковых фермиона с одинаковыми направлениями спинов не могут находиться в одинаковом состоянии. Принцип Паули получен из опыта, и его можно назвать одним из основных законов, определяющих поведение фермионов. В отличие от фермионов, любое число бозонов могут находиться в одинаковом состоянии, в частности – на самом нижнем доступном энергетическом уровне. Если четное число фермионов объединяются и образуют сложную систему, то эта система будет бозоном и будет иметь целый спин. Например, спин ядра гелия, которое состоит из двух протонов и двух нейтронов, равен нулю.

Среди фермионов со спином $1/2$ можно выделить три группы: барионы, лептоны и кварки. К числу барионов относятся протон, нейтрон и большая группа нестабильных частиц – гиперонов. Названия, массы и заряды основной группы барионов приведены ниже в таблице. Массы большинства частиц даны в мегаэлектронвольтах. Напомним, что один мегаэлектронвольт равен $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$, что соответствует массе $1,8 \cdot 10^{-27} \text{ г}$. Мы не будем подробно описывать все многообразие существующих элементарных частиц, а ограничимся таблицей характер-

Частица	Масса	Заряд	Частица	Масса	Заряд
Протон	$1,6 \cdot 10^{-24}$ г	+1	Λ-баритон	115 МэВ	0
Нейтрон	$1,66 \cdot 10^{-24}$ г	0	Σ-баритон	1193 МэВ	0, ±1
			Ξ-баритон	1317 МэВ	0, -1
Электрон	0,511 МэВ	-1	Фотон	0	0
μ-мезон	105,66 МэВ	-1	W-бозон	≈ 83 ГэВ	±1
τ-мезон	1784,2 МэВ	-1	Z-бозон	≈ 93 ГэВ	0
π-мезон	140 МэВ	0, ±1	u-кварк	340 МэВ	+2/3
K-мезон	497 МэВ	0, +1	d-кварк	320 МэВ	-1/3
			s-кварк	510 МэВ	-1/3

ных значения масс и зарядов отдельных групп этих частиц и обсуждением этой таблицы.

Электрон не является одинокой частицей, а принадлежит к семейству из шести частиц, называемых лептонами. Сюда входят электрон, мю-мезон, тау-мезон и их античастицы. Эти частицы тоже называются мезонами, но они не имеют сходства с теми мезонами, которые определяют взаимодействие нуклонов. Каждый из упомянутых лептонов имеет пару: нейтральную частицу, называемую нейтрино, с очень малой массой покоя. Массы электрона, мю-мезона и тау-мезона соотносятся как 1: $2 \cdot 10^2$: $4 \cdot 10^3$.

Имеется шесть сортов кварков, их обозначают буквами: *u*, *d*, *s*, *s*, *t*, *b*. Поскольку все вещества состоят из стабильных частиц, а такими являются только протоны и электроны, то мы привыкли к тому, что любые заряды состоят из целого числа зарядов электронов и протонов. Необычным является то, что кварки имеют дробный заряд. Кварки *u*, *s*, *t* имеют положительный заряд величиной в 2/3 заряда электрона, а кварки *d*, *s*, *b* имеют отрицательный заряд в 1/3 заряда электрона. Кварки являются фермионами и имеют спин $\hbar/2$. Одним из многих доказательств существования кварков является появление узких струй разлетающихся частиц при столкновениях быстрых протонов. Анализ таких струй показал, что они могут возникнуть только в том случае, если порождаются маленькими, компактными объектами, которые разлетаются в разные стороны.

К числу бозонов относятся фотоны, положительно и отрицательно заряженные W-бозоны и нейтральный Z-бозон, несколько сортов мезонов, восемь сортов глюонов, а также предсказанный, но пока еще не обнаруженный нейтральный бозон Хиггса.

Глюоны, как и фотоны, имеют нулевую массу покоя и спин, равный единице. Переносчиками взаимодействия между фермионами являются бозоны.

Мы не приводим здесь подробных характеристик отдельных частиц, так как это мало что дает для общего понимания ситуации. Главное, что мы видим, это большое число различных частиц, которые взаимодействуют друг с другом, распадаются и порождают другие частицы (рис.29, 30). Процессы распада кончаются появлением протонов, электронов, фотонов и нейтрино.

Перейдем теперь к обсуждению строения и взаимодействия частиц. Протон состоит из трех кварков: uud , нейтрон состоит также из трех кварков: udd . Нейтральный пи-мезон состоит из кварка и антикварка. Положительный пи-мезон состоит из антикварка \bar{u} и кварка d , а отрицательный пи-мезон – из антикварка \bar{d} и кварка u . Пи-мезоны имеют спин, равный нулю.

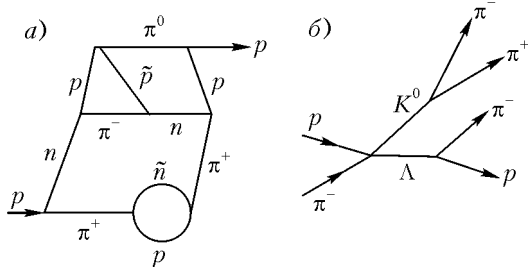


Рис.29. а) Схема одного из возможных состояний протона. Указанное промежуточное состояние может существовать только очень короткое время Δt порядка $\hbar/\Delta E$, поскольку оно содержит много частиц, что требует большой энергии ΔE . Античастицы обозначены волнистой чертой над буквой. б) Одна из возможностей столкновения пи-мезона (π^-) с протоном (p). Протон и пи-мезон порождают ламбда-частицу (Λ), которая распадается на протон и пи-мезон, и K^0 -частицу, которая распадается на два пи-мезона

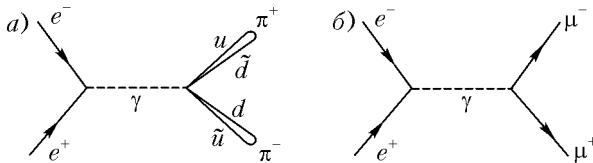


Рис.30. Примеры столкновений электрона с позитроном. а) Аннигиляция электрона и позитрона и превращение в промежуточном состоянии в фотон, который порождает два кварка u и d и два антикварка, кварки объединяются с антикварками, образуя два пи-мезона π^+ и π^- ; б) аннигиляция электрона и позитрона и рождение двух мю-мезонов (μ^- и μ^+) с положительным и отрицательным зарядами

Кварки связаны друг с другом путем обмена глюонами. Эта связь столь прочна, что кварки нельзя вырвать из протона или нейтрона. Например, при столкновении двух протонов энергия идет на рождение мезонов, но не на вылет кварков. Тем не менее, анализ процессов столкновений частиц подтверждает теорию строения барионов и мезонов из кварков. Наличие нескольких сотен частиц, структуру и взаимодействие которых можно простым образом описать с помощью кварков, является серьезной проверкой теории. Согласно теории, энергетически выгодна такая конфигурация глюонных полей, когда эти поля не заполняют все пространство, подобно электромагнитным полям, а концентрируются вдоль линий, соединяющих кварки. Понятие «энергетически выгодна» обычно означает, что рассматриваемая структура имеет наименьшую из возможных энергий. Более подробно смысл этого утверждения будет рассмотрен в одиннадцатой главе.

Энергия системы из двух кварков, соединенных глюонной трубкой, растет с расстоянием между кварками. Это похоже на пружину, которую тем труднее растягивать, чем больше она растянута. Поэтому нельзя разорвать связь между кварками и получить свободные кварки. Такая конфигурация глюонного поля называется струной. Она возникает из-за взаимодействия глюонов с частицами вакуума, которые рождаются и исчезают за короткое время.

Бозоны W и Z ответственны за так называемое слабое взаимодействие частиц. Например, распад нейтрона происходит следующим образом. Сначала нейтрон испускает отрицательный W -бозон, превращаясь в протон, затем родившийся W -бозон распадается на электрон и антинейтрино.

На чем же основано объединение частиц в отдельные группы, имея в виду, что частицы различаются по массе, заряду, типу распада и по времени жизни? Основой объединения являются свойства симметрии частиц. Можно сказать, что симметрия – это неизменность свойств материальной системы и (или) происходящих в ней процессов при повторных изменениях каких-либо характеристик системы. Например, зеркальная симметрия означает, что при двукратном отражении в зеркале мы вернемся к прежнему образу. Зарядовая симметрия трех пи-мезонов – положительного, нейтрального и отрицательного – означает, что при трехкратном изменении заряда на единицу мы вернемся к исходному состоянию. Утверждение, что состояние какого-либо объекта симметрично относительно сдвига во времени, означает выполнение закона сохранения энергии для этого тела, так как

энергия изолированного тела не меняется со временем. Симметрия относительно сдвига в пространстве означает сохранение импульса, так как скорость свободного движения тела не меняется вдоль пути. Симметрия относительно поворотов на любой угол в пространстве означает сохранение углового момента. Таким образом, законы сохранения энергии, импульса и углового момента как для частиц, так и для крупных тел прямо связаны с симметрией. Поле, в котором проявляется различие частиц, входящих в группу с определенной симметрией, называется калибровочным полем. Например, отличие электрона от позитрона или трех пи-мезонов друг от друга проявляется только в электрическом поле. В остальном эти частицы одинаковы.

Частицы объединяют в группы, игнорируя наблюдаемые различия, но учитывая симметрию уравнений, описывающих эти частицы. Сходные по симметрии частицы предполагаются разными состояниями одной и той же частицы. Чтобы учесть изменение уравнения при операциях симметрии, вводятся поля, которые обеспечивают взаимодействие частиц. Например, таким полем является электрическое поле по отношению к заряженным и нейтральным пи-мезонам, только в этом поле пи-мезоны ведут себя по-разному. В теории используется симметрия уравнений, исходя из того, что уравнения это математическая запись законов природы и, тем самым, мы имеем дело с симметрией в природе. В данной книге мы не исследуем уравнения и поэтому не можем более подробно остановиться на проблеме симметрии частиц. Мы указали лишь простейшие случаи.

Интересно отметить, что существуют частицы, которые меняют свои характеристики в процессе движения. Сюда относятся так называемые К-частицы и нейтрино.

Существуют три разновидности нейтрино, которые соответственно входят в одну группу с электроном, мю-мезоном и тау-мезоном. Масса электронного нейтрино очень мала, не более 10^{-35} г. Масса мю-мезонного нейтрино около 10^{-34} г, а масса тау-мезонного нейтрино порядка 10^{-33} г. В процессе своего движения электронное нейтрино превращается в мю-мезонное нейтрино и в тау-мезонное нейтрино и обратно. Можно привести аналогию (но не модель) такого процесса с колебаниями двух маятников, которые висят на одной балке. Сначала колеблется один маятник, затем колебания передаются по балке второму маятнику и какое-то время колеблются оба, потом колеблется только второй, затем снова оба и так далее. Нейтрино очень слабо взаимодействуют с веществом. Они могут пройти насквозь всю Землю, не испытав ни одного столкновения (рис.31).

Каждую секунду через каждый квадратный сантиметр нашего тела проходят пять миллионов нейтрино, идущих от Солнца, но никто этого не замечает.

Аналогично нейтрино ведет себя К-мезон. Его состояние все время меняется. Когда он находится в одном из состояний, он может распадаться на два пи-мезона, а в другом состоянии он распадается на три пи-мезона. Важно отметить, что такой тип распада К-мезона означает существование хотя и небольшой, но неполной симметрии частиц и античастиц. Возможно, что именно эта несимметрия привела к тому, что наш мир построен из частиц, а не из античастиц.

Теперь несколько слов об относительной величине сил, связывающих частицы. Самой слабой силой является сила тяготения. Мы ее ощущаем только по отношению к огромным телам, таким как Земля или Солнце. Притяжения к окружающим нас предметам мы не чувствуем. Тем более это справедливо по отношению к элементарным частицам. Следующая по величине это сила, отвечающая за распад нейтрона. Мы уже упоминали, что это взаимодействие называется «слабым взаимодействием», хотя оно сильнее, чем тяготение. Гораздо больше электрические и магнитные силы и, тем более, силы, которые связывают частицы (протоны, нейтроны) в атомном ядре. Если силу ядерного взаимодействия двух протонов на расстоянии порядка размеров протона, т.е. 10^{-13} см, принять за единицу, то электромагнитное взаимодействие на том же расстоянии будет слабее в 1370 раз, слабое взаимодействие – в 10^7 раз, а гравитационное – в 10^{37} раз. Слабость гравитационных сил не позволила до сих пор проверить закон всемирного тяготения Ньютона на расстояниях меньше 0,01 см, хотя эта задача представляет большой интерес для теории.

Почему частицы ускоряются по-разному под действием одной и той же силы? Одним из возможных решений является предположение о том, что Вселенную заполняет некое силовое поле. Это поле называют полем Хиггса. Разные частицы по-разному тормозятся полем Хиггса, что выглядит как наличие у них разной массы. Кванты этого поля названы частицами Хиггса. Попытки обнаружения этих частиц ведутся в настоящее время. Поле Хиггса не мешает частицам двигаться, но мешает им ускоряться. Фотоны вообще не взаимодействуют с полем Хиггса, и их масса покоя равна нулю. Напомним, что гравитационное притяжение тел определяется не их массой покоя, а их полной энергией. Поэтому лучи света отклоняются в гравитационном поле массивных тел.

Как мы уже много раз упоминали, положение частицы нельзя определить сколь угодно точно вследствие принципа неопределенности. Но возникает и другой вопрос: можно ли вообще использовать понятие о частице как объекте, положение которого в пределе характеризуется точкой в пространстве, а не линией, поверхностью или каким-то объемом? Этот вопрос пока еще не решен, но уже сейчас теория предсказывает существование таких элементарных объектов, как «струны» и «мембраны», т.е. неточечных объектов. Струны могут колебаться с различными частотами, т.е. иметь разные энергии. Набор элементарных частиц в струнной теории описывается в виде вибрирующих с разной частотой «струн» или «петель» в многомерном пространстве. В двенадцатой главе мы будем обсуждать возможность того, что наше пространство не трехмерно, а имеет большее число мелкоструктурных измерений, которые нельзя обнаружить в привычных для нас масштабах.

К сожалению, теоретические возможности существования таких объектов, как «струны» и «мембраны», не получили пока достаточного экспериментального подтверждения. В настоящее время вошел в строй гигантский ускоритель элементарных частиц (CERN), и можно надеяться, что опыты на этом и на других ускорителях прояснят ситуацию.

Перейдем теперь от самых мелких к более крупным объектам.

ВОЗМОЖНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Молекулы

Молекулы состоят из двух или нескольких атомов. Какие же силы связывают эти атомы? Прежде всего это обычные электрические силы. Для примера рассмотрим молекулу поваренной соли. Она состоит из атома натрия и атома хлора. У атома натрия полностью заполнены электронами все энергетические уровни, кроме последнего, где находится всего один электрон. У атома хлора, наоборот, для заполнения последнего уровня не хватает одного электрона. При сближении этих атомов электрон натрия переходит к хлору, так что атом натрия приобретает положительный, а атом хлора – отрицательный заряд. Противоположные заряды притягиваются, обеспечивая существование молекулы соли. Такая химическая связь называется ионной. Подобным, хотя и несколько более сложным, образом взаимодействуют атомы во многих других молекулах, но не во всех. Рассмотрим молекулу водорода. Она состоит из двух одинаковых атомов, каждый из которых имеет один протон и один электрон. Как мы знаем, два электрона не могут находиться на одном энергетическом уровне, если их спины направлены одинаково. Значит, в молекуле водорода спины электронов должны быть направлены в разные стороны. В этом случае для каждого электрона будет иметься возможность находиться у любого из двух ядер. Вспомним снова соотношение неопределенности. Если допустимая область нахождения электрона ограничена областью размерами l , то его импульс $p = mv$ не может быть меньше чем \hbar/l , где \hbar – постоянная Планка, а значит, его кинетическая энергия не может быть меньше чем $mv^2/2 = \hbar^2/(2ml^2)$. Возможность находиться вблизи двух ядер приблизительно вдвое увеличивает размеры области l , доступной для каждого электрона, т.е. уменьшает энергию молекулы по сравнению с суммой энергий двух отдельных атомов. Это означает, что надо затратить энергию, чтобы разорвать молекулу водорода. Такая химическая связь называется ковалентной. Упомянутые две возможности являются основными причинами образования молекул.

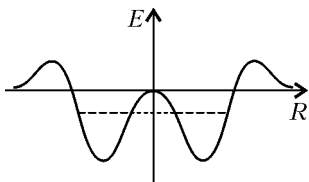


Рис.32. Потенциальный барьер молекулы водорода

На рисунке 32 дана схема – разрез потенциального рельефа для электронов в молекуле водорода. Он состоит из барьера, который отталкивает электрон на больших расстояниях от молекулы, и потенциальной ямы вокруг каждого из ядер. Пунктиром обозначен энергетический уровень электронов в яме.

Спины электронов направлены противоположно, и поэтому электроны имеют одинаковую энергию. Каждый из электронов может находиться вблизи любого ядра.

Характер химической связи, а тем самым возможность химических реакций, определяется строением электронных оболочек атомов. Напомним (см. главу 8), что состояние электрона в атоме определяется квантовыми числами. Это главное квантовое число $n = 0, 1, 2, \dots$, которое определяет номер оболочки, орбитальный момент $L = 0, 1, 2 \dots$ (в единицах \hbar), причем $n \geq L$, проекция момента m_L , которая меняется на единицу от $-L$ до L , и проекция спина m_s , равная $1/2$ или $-1/2$. Атом водорода ($n = 0, L = 0$) легко соединяется с другими элементами, передавая свой единственный электрон в общую потенциальную яму. Напротив, атом гелия, имея два электрона с противоположными спинами $m_s = 1/2$ и $m_s = -1/2$, химически неактивен. Его оболочка ($n = 0$) заполнена. Переход на более высокую оболочку требует заметной затраты энергии. Следующий элемент литий имеет три электрона, один из которых находится на оболочке с $n = 1$ и не имеет пары, поэтому литий очень активен химически. На оболочке с $n = 1$ и $L = 0$ или $L = 1$ могут находиться восемь электронов с $L = 0$ и $m_L = 0$ или $L = 1$ и $m_L = 1, 0, -1$, при этом $m_s = 1/2$ или $m_s = -1/2$. Следующим элементом после заполнения оболочки с $n = 1$ будет натрий, который, как и следует ожидать, является очень активным. Свойства элементов меняются по мере заполнения оболочек от очень химически активных до инертных. Порядок заполнения оболочек объясняет периодичность химических свойств элементов и, тем самым, периодическую таблицу Менделеева.

Разные молекулы могут очень сильно отличаться по пространственной структуре и по числу атомов (рис.33). Самая маленькая молекула это молекула водорода. Средний размер молекул земной атмосферы около 10^{-9} м. Если, например, переметить все молекулы в стакане воды, вылить воду в Черное море, перемешать, а затем зачерпнуть стакан воды в

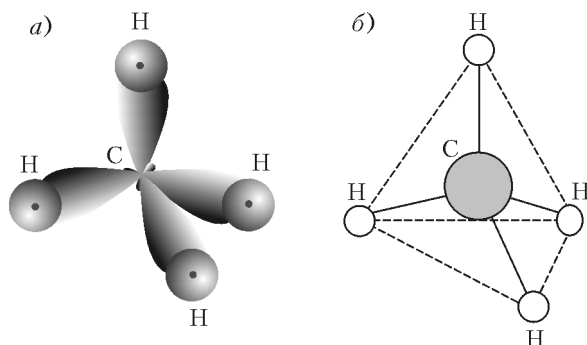


Рис.33. Молекула метана. а) Распределение вероятности найти электрон в данной точке внутри молекулы; б) схема молекулы

любом месте моря, то мы найдем там около двухсот меченых молекул.

Молекулы органических веществ могут состоять из тысяч и миллионов атомов. Молекулы ДНК, которые содержатся в ядрах клеток всех живых существ, регулируют синтез белков и определяют всю генетическую информацию об организме, состоят из миллионов атомов. Если мысленно растянуть молекулу ДНК человека, то получим цепочку длиной в полтора метра. Молекула ДНК построена в виде двойной спирали (рис.34), которая раскручивается в процессе деления клетки. Затем каждая из половин соединяется с другими молекулами определенного вида и достраивается таким образом, что в каждой из вновь возникающих клеток появляются две новые молекулы ДНК той же структуры, что и исходная молекула.

До сих пор остается нерешенным вопрос, как создавались в природе столь сложные молекулы, как ДНК, содержащие огромное количество информации. Тем не менее, факты говорят о том, что химические процессы в древнем океане молодой Земли привели к тому, что возникли сложные молекулярные комплексы, которые обладали тем основным свойством, что могли воспроизводить свои копии. Понадобилось около миллиарда лет, пока не возникла удачная комбинация молекул.

Уже долгое время обсуждается вопрос, возникли ли эти молекулы и, тем самым, жизнь на Земле или они принесены из мирового пространства. Имеется много возражений против второй возможности. В межзвездной среде наблюдались спектры достаточно сложных веществ, в том числе полициклических ароматических углеводородов, молекулы которых состояли из 24 и 26 атомов. Однако соседние звезды очень далеки, и только

ничтожное количество межзвездного вещества попадает на Землю, не говоря уже о том, что это все-таки только молекулы, а не организмы, которые вряд ли могли сохраниться, странствуя миллионы лет и облучаясь смертельными космическими лучами. Предположение, что жизнь попала к нам из планет Солнечной системы, также маловероятно, так как условия на Земле были и есть гораздо более благоприятны для возникновения жизни, чем на любой из планет.

Интересно отметить, что у молекул бывают зеркальные близнецы, которые отличаются друг от друга, как отличается правый винт от левого. При этом химические свойства молекул-близнецов могут быть совсем разными, поскольку они зависят от пространственной структуры молекул. Наш мир вообще не вполне симметричен, даже в крупном масштабе. Например, все речные и морские ракушки закручены в одну сторону, сердце у человека расположено слева, функции правого и левого полушарий мозга не вполне одинаковы и так далее.

Нанотехнологии

В настоящее время появилась возможность создавать приборы и механизмы непосредственно из отдельных атомов и молекул. Такая возможность называется нанотехнологией. Термин «нано» означает одну миллиардную часть. Нанотехнология имеет дело с объектами порядка одной миллиардной части метра. Мы не имеем возможности описывать здесь приборы и опыты и остановимся лишь на некоторых результатах и перспективах.

Нанотехнология позволяет создавать структуры из отдельных атомов и молекул с заданными и порой совершенно необычными свойствами. Опираясь на отдельные атомы, можно создавать сверхпрочные и жаропрочные покрытия практически без дефектов.

Напомним, что прочность различных материалов определяется, прежде всего, теми дефектами, которые там имеются (где тонко, там и рвется). Для создания новых веществ можно использовать сложные молекулы, например молекулы типа ДНК, и, тем самым, получать совершенно необычные материалы и лекарства.

В настоящее время уже построены комбинации из сложных молекул, которые служат катализаторами, фильтрами, топливными элементами, поглотителями вредных веществ и т.п. Возможно создание наноконтейнеров для переноса лекарств и генетических конструкций в клетки и ткани организма.

Удалось создать сверхтонкие трубки и проволочки. Создан зонд-микроскоп. Для этого используется сверхтонкая игла (10^{-8} м), к которой приложено слабое электрическое напряжение. При перемещении этой иглы над какой-либо поверхностью можно определить, как меняется напряжение, которое зависит от неровностей и от состава изучаемой поверхности. Таким образом можно различить объекты порядка размеров атома. Более того, этот зонд удалось использовать, чтобы отрывать определенные атомы или молекулы с поверхности и переносить их на другое место. Тем самым, появилась возможность построения самых удивительных структур из отдельных атомов. Имеется ряд возможностей управлять движением наноструктуры. Простейшая возможность это движение в текущей среде «под парусом», иными словами, при специальной геометрии наноструктуры. Можно управлять структурой, действуя на нее внешними магнитными или электрическими полями.

В настоящее время изучается возможность создания микроботов, которые сами, по определенной команде, будут выполнять сложные операции. В частности, их можно будет использовать для диагностики болезней и проведения операций внутри человеческого тела. Не исключено, что микророботы смогут собирать себе подобных, т.е. как бы размножаться.

Нанопластины позволяют записать огромную информацию на очень маленькой площади. Это очень важно и для работы обычных компьютеров, и для создания квантовых компьютеров.

Работа в области нанотехнологии интенсивно ведется во многих странах.

Девять состояний вещества

Возможен самый разный порядок расположения молекул в веществах и возможно различное распределение скоростей молекул. Разные состояния вещества отличаются прежде всего отношением средней кинетической энергии молекул (или атомов) этого вещества к их средней энергии взаимодействия друг с другом. Если отношение мало, то это твердое тело, а если велико, то это газ.

Газ. При высокой, но не слишком высокой температуре, разной для разных веществ, молекулы образуют газ. Слово «газ» происходит от слова «хаос», что означает беспорядок. Действительно, молекулы газа двигаются беспорядочно, сталкиваясь друг с другом, меняя при этом направление своего движения. Среднее расстояние, которое пробегает молекула между столкновениями, называется длиной свободного пробега. Сво-

бодный пробег молекул воздуха у поверхности Земли имеет длину всего $4 \cdot 10^{-6}$ см, что примерно в 10 раз больше среднего размера молекулы. Протон в межзвездном пространстве может пройти без столкновений десятки световых лет (один световой год равен $9,46 \cdot 10^{12}$ км).

Изменения температуры и давления какого-либо участка газа приводит к движениям различного вида, таким как конвективные течения, звуковые и ударные волны и т.п. (см. главу 11).

Жидкость. При дальнейшем понижении температуры газ превращается в жидкость. В жидкости молекулы расположены рядом друг с другом и проводят большую часть времени в окружении тех же соседей. Только изредка одна из молекул случайным образом при столкновении с соседями получает энергию, достаточную, чтобы переместиться на небольшое расстояние и попасть в соседнее общество молекул. Говорят, что в жидкости есть «ближний порядок». Расстояние между соседними молекулами приблизительно такое же, как размеры молекул. Чем более вязкая жидкость, тем медленнее перемещаются молекулы.

В отличие от кристаллов, свойства которых различны по разным направлениям, в жидкостях и газах все направления равноправны. Давление жидкости, т.е. сила, действующая на единицу площади, не зависит от направления. Поэтому малая сила, действующая на небольшой поверхности, может уравновесить большую силу, распределенную по большой поверхности.

В жидкости, так же, как в газе, возможны звуковые и ударные волны и конвективные движения. Молекулы веществ, растворенных в жидкости, могут вести себя самым различным образом. Например, молекулы обычной поваренной соли, растворенной в воде, распадаются на атомы натрия и хлора, окруженные молекулами воды, но они вновь соединяются, если выпарить воду.

Аморфное твердое тело. При достаточно быстром понижении температуры движение молекул жидкости становится очень медленным, и они практически застывают на тех же местах, где они находились. Аморфное тело сохраняет свойство текучести, хотя и очень медленной. Таким свойством обладают, например, асфальт или стекло. Одна из внутренних областей Земли, так называемая мантия, находится в аморфном состоянии. Над мантией располагается земная кора. Большие участки земной коры могут перемещаться по мантии. Это определяет движение материков.

Кристалл. При не слишком быстром понижении температуры молекулы (или атомы) успевают выстроиться в пространственную решетку и, тем самым, занять наиболее выгодные места, обеспечивая наименьшую энергию тела. Таким образом возникает кристалл. В кристалле, в отличие от жидкости, существует не только ближний, но и дальний порядок. Структура кристаллической решетки сохраняется по всему объему кристалла. Обычно процесс кристаллизации начинается сразу во многих местах тела, и отдельные участки растут, не согласуясь друг с другом. Так образуется поликристалл, состоящий из многих мелких кристаллов. Только при очень медленном охлаждении удастся получить монокристалл с единой решеткой. В зависимости от природы атомов (или молекул) образуются решетки разной геометрической структуры (рис.35). Для разных направлений в кристалле характерна неоднородность (анизотропия) таких свойств, как теплопроводность, электропроводность, упругость. Среднее расстояние между атомами в кристалле около 10^{-9} см. Эта величина такая же, как длина волны рентгеновского излучения. Поэтому рентгеновские лучи, проходя через кристалл, создают на экране дифракционную картину (см. главу 2).

В реальных кристаллах всегда имеются нарушения, мелкие разрывы решетки. Это как раз те места, где начинается разрушение решетки, если на кристалл действует внешняя сила. Именно число и характер этих нарушений определяют прочность кристалла. Поэтому, например, канаты делают не сплошными, а состоящими из отдельных нитей. Нарушение в одной из нитей не продолжается в соседней нити.

Наиболее прочный материал, созданный в настоящее время, состоит из атомов углерода, соединенных в виде нити. Канат толщиной в 0,6 см, сплетенный из этих нитей, способен удержать тело массой 45 тонн.

Если свет попадает на поверхность твердого или жидкого тела, то он частично отражается, а частично проходит внутрь. При этом свет поглощается атомами вещества, атомы возбуждаются, а затем излучают свет, возвращаясь в исходное состояние. Это приводит к задержке в распространении света, т.е. к уменьшению скорости прохождения светом вещества. Кроме того, в зависимости от расположения и симметрии молекул и атомов вещества, изменяется направление луча света, иными словами, происходит преломление света. Наверное, каждый из нас видел, как кажется сломанной ложка на границе воды в стакане. Законы преломления и отражения света широко ис-

пользуются в самых различных оптических приборах: линзах, телескопах, прожекторах и т.д. В настоящее время вместо передачи телефонных сообщений по проводам начинают использовать световоды – тонкие полупрозрачные нити, по которым идет световой сигнал, многократно отражаясь от внутренних стенок нити. Характер преломления и отражения зависит от длины волны света. Красный свет имеет длину волны $7,5 \cdot 10^{-7}$ см, зеленый $5 \cdot 10^{-7}$ см, а фиолетовый $4 \cdot 10^{-7}$ см. Поэтому солнечный свет, в котором имеются волны разных частот, проходя через стеклянную призму, расщепляется призмой на веер разных цветов. Солнечный свет, отражаясь и преломляясь на поверхности дождевых капелек, создает разноцветную радугу. Голубой цвет неба возникает из-за рассеяния солнечного света на неоднородностях плотности воздуха.

Некоторые кристаллы являются хорошими проводниками электрического тока, другие – хорошими изоляторами. Существуют полупроводники – вещества, которые проводят ток при определенных условиях.

Рассмотрим механизм электропроводности кристаллов. Для этого вспомним структуру энергетических уровней атома и то,

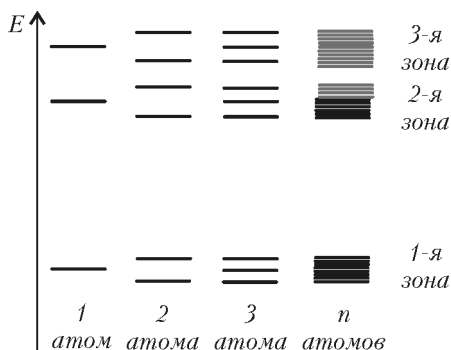


Рис.36. Схема уровней энергии атома лития. Показано их расщепление при объединении атомов в кристалл и возникновение энергетических зон

что на одном уровне могут находиться только электроны с разными квантовыми числами. Для примера рассмотрим кристалл лития (рис.36). У атома лития три электрона. Два из них заполняют оболочку, ближайшую к ядру, а третий расположен на следующем энергетическом уровне. Поскольку два электрона с параллельными спинами не могут быть на одном уровне, а переход на возбужденный уровень

очень невыгоден, то при сближении двух атомов лития уровни просто немного сдвигаются. Можно сказать, что исходный уровень расщепился. Теперь оба электрона окажутся на более низком из сдвинутых уровней, если их спины были с самого начала противоположно направлены, а если спины были парал-

лельны, то одному из электронов придется изменить направление спина. При этом более высокий подуровень окажется пустым. А если сблизить три атома, то уровень расщепится на три части. При образовании кристалла и сближении многих атомов их уровни образуют целую непрерывную полосу – зону разрешенных энергий.

Самые нижние зоны, которые возникли из полностью заполненных нижних уровней, будут полностью заняты электронами. Верхняя зона может быть занята только частично, а зоны, которые возникли из верхних свободных уровней, так и остаются пустыми. Число мест для электронов в полупустой зоне равно удвоенному (из-за возможности двух направлений спинов электронов) числу атомов в кристалле. Ширины зон по энергии обычно сравнимы с расстояниями между зонами. Электроны в заполненной зоне не могут увеличить свою энергию и поэтому не могут создать электрический ток. Если верхняя зона заполнена, то кристалл будет изолятором (рис.37).

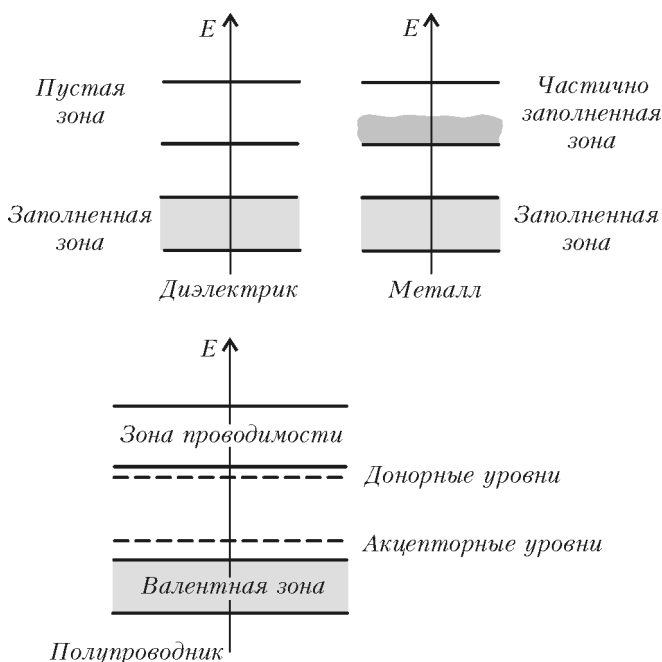


Рис.37. Энергетические зоны диэлектрика, проводника и примесных полупроводников

Если же зона частично заполнена, то электроны могут свободно перемещаться от атома к атому, оставаясь по энергии внутри своей зоны. Они могут иметь любую энергию, и нет запрета ускорить их внешним полем. Конечно, энергия электрона не может стать выше верхнего края зоны. Внешнее поле может ускорить электроны в частично заполненной зоне и, тем самым, создать поток электронов, т.е. электрический ток. Такие кристаллы, в частности все металлы, являются хорошими проводниками электрического тока.

Если верхняя зона заполнена, но следующая свободная зона находится недалеко по энергии, то внешним воздействием, например нагреванием или облучением, можно перевести какое-то число электронов в свободную зону и, тем самым, обеспечить проводимость вещества. Такое вещество будет полупроводником.

Электроны могут также появиться в свободной зоне, если в веществе имеются инородные примеси и уровни атомов примеси лежат несколько ниже свободной зоны (доноры), так что небольшое воздействие переводит электроны с этих уровней в свободную зону. Если уровни примеси находятся несколько выше полностью занятой зоны (акцепторы), то слабое внешнее воздействие может перевести часть электронов занятой зоны на свободные уровни атомов примеси, так что электроны занятой зоны получают свободу перемещения и тем самым обеспечивают проводимость.

Возбуждение в кристалле может проявляться как в виде локальных колебаний соседних частиц, так и в виде звуковых волн, бегущих по решетке. Каждая волна в решетке имеет определенную энергию. Энергия может быть получена или потеряна волнами при взаимодействии друг с другом или с электронами. Волны в воде, воздухе и т.д. обычно описывают на основе классической механики, и только для электромагнитных волн приходится вводить понятие о фотонах. Необходимость фотонов является прямым следствием опытов (см. главу 3). Возникает вопрос: может быть, вообще все волновые процессы можно описать набором «частиц»?

Напомним, что в третьей главе при выводе принципа неопределенности мы не использовали предположение, что речь идет только об электромагнитной волне. Те же рассуждения можно отнести к волнам любого типа. Опыт оправдывает такую картину. Это позволяет математически описывать поведение возможных колебаний решетки кристалла как «газа» из частиц, подобных фотонам в электромагнитной волне. Такие квазичастицы

называют фононами. Можно говорить о рождении и поглощении фононов, об их столкновениях друг с другом, о взаимодействии фононов с электронами и т.п. Взаимодействие электронов с решеткой можно рассматривать как рассеяние электронов на фононах.

Фотоны, так же, как электроны и все другие частицы, это разные типы возбуждения вакуума. Соответствующая им длина волны не ограничена. Фононы это возбуждения кристалла. Они отличаются тем, что их длина волны определяется структурой решетки кристалла. Это делает фононы во многом непохожими на фотоны.

Сверхпроводники. Сопротивление электрическому току в кристаллах создается главным образом за счет передачи энергии электронов колебаниям решетки, т.е. фононам. Напомним, что даже при очень низких температурах не прекращаются колебания атомов решетки кристалла. Однако, подобно тому как электрическое притяжение зарядов объясняется обменом фотонами (см. главу 4), взаимодействие электронов с фононами приводит не только к рассеянию электронов, но и к появлению сил притяжения между электронами. Это взаимодействие в некоторых кристаллах при низких температурах оказывается сильнее, чем электрическое отталкивание электронов. Оно связывает попарно электроны с противоположно направленными спинами. Такая система из двух электронов имеет нулевой спин и, тем самым, является бозоном. Мы уже упоминали, что бозоны не подчиняются принципу Паули и все они стремятся перейти в самое низкое энергетическое состояние. Между этим состоянием и ближайшим возбужденным состоянием имеется энергетическая щель.

Внешнее электрическое поле действует на электроны, объединенные в пары, так же, как на отдельные электроны. Поэтому в сверхпроводнике может протекать электрический ток. Однако электроны не могут передать свою энергию решетке и, тем самым, создать сопротивление току, так как для этого надо разорвать пары и затратить энергию не меньше чем ширина энергетической щели. Поэтому при низких температурах ток не встречает сопротивления, и проводник становится сверхпроводником. Пока еще не удалось создать сверхпроводники при температуре заметно выше 140 К. Очень сильный ток или нагрев сверхпроводника разрушают электронные пары и уничтожают сверхпроводимость.

Возможность создать в сверхпроводниках сильные токи используется, например, для сверхсильных магнитов. Циркуляция

тока без затухания позволяет запастись ток в сверхпроводнике. Этот ток можно использовать по мере надобности.

Не следует думать, что сверхпроводящее состояние вещества существует только на Земле и только при сверхнизких температурах. В главе 16 мы будем говорить о нейтронных звездах. Вещество внутри этих звезд является и сверхпроводящим, и сверхтекучим, хотя там существуют сверхвысокие давления и очень большие температуры.

Плазма. При высокой температуре энергия столкновений атомов достаточна для их ионизации. Атомы теряют один или несколько электронов и превращаются в положительно заряженные ионы. Вещество, полностью или частично ионизованное, называется плазмой. Плазму в домашних условиях можно увидеть в так называемых лампах дневного света. Значительная часть вещества во Вселенной — в звездах и межзвездной среде представляет собой плазму.

Вырожденные электроны. Если давление на вещество очень велико, как это бывает, например, в недрах массивных звезд, и тепловое движение частиц не может противостоять силам тяжести, то тело будет сжиматься до тех пор, пока электроны этого тела не сблизятся настолько, что сжатие прекратится. В плотном веществе электроны уже не принадлежат отдельным ядрам. Они двигаются по всему объему и занимают энергетические уровни, свойственные всему данному телу. Электроны распределены по разным энергетическим уровням таким образом, чтобы полная энергия тела имела наименьшее возможное значение. Поскольку в каждом состоянии может находиться не более одного электрона (или двух, если направления их спинов противоположны), то электроны заполняют все состояния с энергиями от наименьшей до некоторой наибольшей, величина которой определяется числом электронов в теле. При увеличении давления и, тем самым, при уменьшении объема тела электронам приходится переходить на все более высокие уровни энергии. Это энергетически невыгодно, и при некоторой плотности сжатие останавливается.

Вырожденные нейтроны. Если давление еще больше, то атомные ядра сближаются настолько, что ядерные частицы также обобществляются, отдельные ядра исчезают и появляется сплошное ядерное вещество. Энергетически выгодным становится состояние, при котором протоны поглощают электроны, испуская нейтрино, и превращаются в нейтроны. Нейтроны могут быть упакованы плотнее, чем протоны и электроны по отдельности.

Сверхтекучесть. Однажды академик Петр Леонидович Капица наблюдал очень странное явление. Жидкий гелий при температуре 2,71 К мог протекать через очень узкие трубки, не испытывая трения о стенки трубок, как бы не протекая, а проваливаясь. Такое явление было названо сверхтекучестью. Оно оказалось чисто квантовым явлением. Напомним, что вязкость определяется потерей энергии текучей жидкостью в процессе внутреннего трения и трения о стенки сосуда. Эта энергия идет на торможение и нагревание жидкости. Атомы гелия это бозоны. Их спин равен нулю. Снова напомним, что бозоны, в отличие от фермионов, не подчиняются принципу Паули и, даже если их много, все они могут находиться в одном и том же энергетическом состоянии. При очень низких температурах все атомы гелия стремятся занять самое низкое энергетическое состояние. Между этим состоянием и следующим возможным, более высоким, состоянием имеется энергетический промежуток. Надо затратить значительную энергию, чтобы перескочить на более высокий уровень. В частности, если все атомы гелия движутся в одном направлении, то надо затратить энергию не меньшую, чем ширина энергетической щели, чтобы затормозить это движение. Энергия гелия, протекающего через трубку, для этого недостаточна. Поэтому при очень низких температурах жидкий гелий становится сверхтекучим. Как мы уже упоминали, сверхтекучим является также плотное и горячее вещество нейтронных звезд.

Природа магнетизма различных веществ

По-видимому, первые упоминания о магнитах были связаны с находкой около города Магнезия удивительных камней, которые притягивали железо. Однако только в восемнадцатом веке было установлено, что магнитная сила имеет ту же природу, что и сила, действующая на электрический заряд, и зависит не только от положения заряда, но также от того, с какой скоростью он движется. Что же общего между магнитным полем электрического тока и полем намагниченного куска железа? Прежде всего вспомним, что не только поступательное, но и любое движение зарядов создает поле. Электрон не является шариком, который вращается, но, подобно такому шарiku, он имеет магнитное поле, которое связано с его угловым моментом.

Если атом внести во внешнее магнитное поле, то возникают два конкурирующих эффекта. Во-первых, спины электронов, как маленькие магнитики, стремятся ориентироваться вдоль поля и, тем самым, усилить это поле. Однако такая ориентация

спинов электронов далеко не всегда возможна, потому что переворот спина запрещен принципом Паули, если на том же энергетическом уровне (с теми же квантовыми числами) уже находится другой электрон. Очевидно, что ориентация спина в магнитном поле наиболее вероятна для того электрона, который находится на самом высоком уровне, где у него нет пары. Суммарное магнитное поле ориентированных электронных спинов усилит приложенное к телу внешнее поле. Усиление внешнего поля в веществе называется парамагнетизмом.

Однако имеется причина, ослабляющая поле в веществе. Дело в том, что электрический ток, создаваемый при круговых движениях электрического заряда и, в частности, при орбитальном движении электронов в атоме изменяется во внешнем магнитном поле таким образом, что создает магнитное поле, противоположное внешнему полю. Ослабление внешнего поля в веществе называется диамагнетизмом. Электроны проводящей зоны в металлах не находятся каждый у своего атома, а могут странствовать по всему телу. В этом случае диамагнетизм возникает при вращении электронов вокруг линий магнитного поля.

Тело будет парамагнитным или диамагнитным в зависимости от того, какой эффект будет преобладать для данного вещества.

В отличие от большинства атомов, в атомах железа, кобальта и никеля электронные оболочки заполняются в такой последовательности, что некоторые из нижних энергетических уровней остаются занятыми не полностью. Это дает возможность на таких оболочках существовать электронам, которые не имеют пары с противоположным направлением спина. Все эти электроны могут выстроиться во внешнем магнитном поле и очень сильно увеличить величину поля. Более того, если даже убрать внешнее поле, то спины электронов остаются ориентированными и магнитное поле не исчезает. Такое явление называется ферромагнетизмом. Однако выстроиться всем электронам в большом куске ферромагнетика все же оказывается энергетически невыгодным, и ферромагнетик разбивается на отдельные области, которые называются доменами. Внешнее поле ориентирует магнитные поля доменов. В железе при температуре выше 143 К тепловое движение атомов приводит к исчезновению ферромагнетизма. Для кобальта эта температура немного выше, а для никеля ниже, чем для железа.

ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК В ПРИРОДЕ

Борьба с беспорядком

Состояние систем многих тел, состоящих из атомов и молекул, начиная с повседневных предметов и вплоть до звезд и галактик, характеризуется определенной степенью порядка. Например, колебания маятника в часах почти регулярное, а движение молекул в воздухе почти хаотическое. При любых процессах, происходящих в природе, беспорядок может только увеличиться. Возможностей для беспорядка много больше, чем для порядка. Очевидно, что существует гораздо больше способов разбросать кирпичи беспорядочно, чем построить из кирпичей дом. Недаром пословица говорит: «ломать – не строить». Однако вокруг себя мы видим много хорошо упорядоченных систем. Мы сами являемся такой системой. Внешние влияния, как правило, стремятся разрушить порядок в системе. Тем не менее, порядок в небольшой части системы может возникать самопроизвольно за счет увеличения беспорядка в окружающем мире. Такой процесс называется самоорганизацией.

Например, наша Солнечная система образовалась из облака газа и пыли. Очевидно, что строение и движение планет и Солнца гораздо более упорядочено, чем газово-пылевое облако. Однако, полная энергия Солнечной системы заметно меньше, чем исходного облака. Остальная энергия излучилась в пространство в виде тепла и света. При этом общее число возможных состояний системы, включая сюда испущенное излучение, увеличилось и, тем самым, увеличился беспорядок. Степень беспорядка, которая определяется числом возможных состояний системы, называется энтропией. Чтобы яснее представить себе ситуацию, приведем такой пример. Если тепловой поток, испущенный при гравитационном сжатии протопланетного облака, пройдет через соседние облака газа и пыли, то он их нагреет. Скорость беспорядочного движения частиц нагретого газа больше, чем у более холодного, и соответственно больше число возможных скоростей и положений частиц нагретого газа. Это означает, что увеличился беспорядок. Несложный подсчет показывает, что степень беспорядка этих облаков стала больше, чем уменьшение беспорядка исходного облака.

Процессы конденсации газа в жидкость и превращения жидкости в твердое тело также являются примерами уменьшения беспорядка у части системы при увеличении общего беспорядка вследствие выделения тепла наружу.

Часто говорят, что системе «выгодно» перейти в состояние с меньшей энергией. Почему, например, возбужденному атому «выгодно» испустить электромагнитное излучение и перейти в более низкое энергетическое состояние? Ведь общая энергия невозбужденного атома и испущенного излучения такая же, как у возбужденного атома. На самом деле не изменение энергии, а только увеличение энтропии (беспорядка) делает процесс излучения «выгодным». Аналогично, упавшая со стола и разбитая чашка не уменьшает общую энергию системы, включая осколки чашки, звуковую волну от падения, колебания пола и т.д. Все что увеличилось, это степень беспорядка. Когда хозяйка наводит порядок в квартире, она тем самым увеличивает беспорядок во Вселенной.

Вся наша жизнь это постоянная борьба с беспорядком. Строение организма и физиологические процессы направлены, прежде всего, на обеспечение порядка и регулярности. Кровообращение, дыхание, мыслительные процессы являются примерами исключительно высокой степени организации вещества. Эти процессы обеспечивают стабильность организма, несмотря на множество внешних воздействий, которые, как правило, могут только нарушить эту стабильность. Поглощаемая пища имеет гораздо более упорядоченное строение, чем вещества, выделяемые человеком. В результате удается поддерживать существование организма за счет увеличения беспорядка в окружающей среде. Взрослый человек излучает тепло, как стоваттная лампа. Тело человека должно быть теплым, чтобы обеспечить условия для протекания химических реакций, необходимых для поддержания жизни. Можно сказать, что «жизнь» требует такую степень самоорганизации материи, которая позволяет поддерживать, или даже увеличивать, порядок в живой системе путем изменения собственной структуры системы и характера протекающих в ней процессов, а также путем изменения окружающей среды. Условием существования жизни является также возможность создания копий данной системы, не накапливая ошибок, препятствующих процессу самоорганизации. Не случайно, что возникновение жизни связано с углеродом. Именно углерод образует длинные цепи молекул, включающие также кислород, азот и много других элементов. По видимому, именно такие блоки молекул, слипаясь друг с дру-

гом, привели к возникновению структур, которые могли повторять сами себя.

Где же записаны те правила, которые необходимы для существования жизни? Очевидно, что любое тело образуется по каким-то законам, иными словами, требуется информация об этих законах применительно к данному случаю. Информацией о системе можно назвать полный набор сведений, необходимых для построения и функционирования этой системы. Эта информация может содержаться как в самом построении данной системы, так и во внешних факторах, стремящихся построить эту систему. Информация, в отличие от энтропии, характеризует степень порядка в системе. В математике полное количество информации о данном объекте определяется числом ответов «да» и «нет» на все вопросы, которые необходимо и достаточно получить, чтобы построить данный объект. Один ответ «да» или «нет» называется один «бит».

Очевидно, что вполне беспорядочная система не имеет никакого плана строения, и она характеризуется нулевой информацией. Возможен порядок двух типов: равновесный и неравновесный. Например, порядок расположения атомов в кристалле – это равновесный порядок. Для поддержания такого порядка требуется приблизительная неизменность окружающей среды. Для поддержания неравновесного порядка требуется постоянный обмен веществом или энергией с этой средой. Таков порядок турбулентного течения жидкости, порядок строения и существования живых организмов и так далее.

Информация, которую использует природа, чтобы определить весь облик и характер человека, записана с помощью всего четырех «букв». Такими «буквами» являются сложные молекулы: аденин, тимин, цитозин и гуанин, которые состоят из тысяч атомов. Эти молекулы образуют двойную спираль ДНК и управляют синтезом белков в организме. Напомним, что азбука Морзе, с помощью которой можно записать любое сообщение, использует только три «буквы»: точку, тире и пропуск. В молекулах ДНК человека содержится информация, равная шести миллиардам бит. В этих молекулах записаны не только все характеристики организма, но и естественная продолжительность его жизни. Организм умирает вовсе не потому, что он изнашивается. ДНК задает максимально возможное число делений клеток организма. По мере приближения к этому числу начинают нарушаться все функции клеток, и организм умирает.

Человек это пример системы с высокой степенью организации, которая откликается на возможные, в том числе еще не наступив-

шие, изменения окружающей среды так, чтобы сохранить свое существование. Разум это, во-первых, возможность использовать предыдущий опыт, в том числе обучение, чтобы предвидеть вероятность большого числа разных событий на основе неполной информации об условиях наступления этих событий; во-вторых, оценка, на основе такого предвидения, вероятных результатов того или иного своего поведения; в-третьих выбор поведения с максимальной пользой для существования данного индивида, а также для его потомков и сообщества, к которому он принадлежит. Возможно противоречие между задачей сохранения индивида и задачей сохранения данного вида существ. Вторая задача иногда требует пожертвовать индивидом. Простейший пример – защита потомства, а также защита своего племени. Не только отдельный человек, но и общество людей должны поддерживать порядок для своего существования. Этому, в частности, служат различные идеологии, религии и правила поведения. Отметим, что естественный отбор ведет к возникновению существ, более приспособленных к изменениям окружающей среды, но не обязательно более сложных. Строение бактерий почти не менялось за более чем три миллиарда лет. Число их (общий объем) на Земле много больше, чем всех остальных существ.

Еще одним примером самоорганизации является появление колебательных режимов у самых различных систем. Так, движения в сложных системах иногда приводят к возникновению колебательных состояний, которые часто оказываются неустойчивыми, когда очень малое внешнее воздействие достаточно, чтобы система перешла в новое состояние, хотя другое, тоже слабое воздействие, может заставить систему идти совсем по другому пути. Существуют устойчивые колебательные состояния. Такие, как колебания электронов внутри атома, колебания атомов внутри молекулы, молекул внутри кристалла. Другой характер имеют некоторые химические реакции, которые могут протекать сколь угодно долго, причем протекание реакции меняется периодически: происходит то образование химического соединения, то распад этого соединения, причем при постоянной величине подводимой энергии. В этом случае колебания связаны с тем, что ничтожное изменение внешних условий оказывается достаточным, чтобы обратить ход реакции.

Другим примером неустойчивости является наша погода, изменчивость и плохая предсказуемость которой известны каждому. Приведем две возможности сильного изменения климата, вызванного малыми изменениями температуры. Как известно, основную долю углекислого газа в атмосферу Земли поставляют

извержения вулканов. Углекислый газ поглощает тепловое излучение Земли, нагретой Солнцем, препятствует уходу тепла в космос и, тем самым, способствует общему потеплению климата (парниковый эффект). Если по какой-то причине, которая связана с процессами внутри Земли, увеличится число извержений, то потепление климата приведет к усиленному таянию ледников, что, в свою очередь, увеличит температуру атмосферы, так как ледники отражают солнечный свет гораздо сильнее, чем леса, пустыни и океаны. Однако увеличение испарения ледников и океанов ведет к повышению влажности климата и увеличению числа дождливых дней. Дожди вымывают углекислый газ из атмосферы, что препятствует дальнейшему потеплению. Если случайные изменения числа извержений вулканов невелики, то возникает режим повторных смен теплых и ледниковых периодов. Если, однако, разница поступления и ухода углекислого газа превысит некий предел, то изменения климата могут стать необратимыми и Земля может превратиться в ледяную планету или, наоборот, стать горячей, подобно Венере. Именно поэтому являются опасными промышленные выбросы углекислого газа, которые могут необратимо нарушить тепловой баланс атмосферы.

В простейших случаях разные причины, которые вызывают те или иные явления, действуют практически независимо и не взаимодействуют друг с другом. Однако это имеет место далеко не всегда. Например, действие двух струй воды на какой-либо объект очень часто не равно сумме действия каждой из струй по отдельности. Взаимодействие струй может привести к возникновению турбулентных структур, которые представляют собой систему вихрей и потоков различных размеров и вида. Их действие совсем не похоже на действие отдельных струй. Даже два луча света могут рассеиваться друг на друге, хотя этот эффект и невелик. Подобные взаимодействия называются нелинейными взаимодействиями, и они играют очень важную роль в процессах самоорганизации.

Возможны нерегулярные процессы самых разных типов. При малых скоростях течения жидкости (или газа) скорости слоев меняются плавно. Такое спокойное течение называется ламинарным. При увеличении скорости течения, за счет взаимодействия струй и усиления случайных неоднородностей, возникают турбулентные вихри (рис.38). Они растут, иногда дробятся на более мелкие структуры, которые затухают из-за вязкого трения, и все повторяется снова, хотя новые вихри не являются копией прежних. Иногда мелкие вихри объединяют-

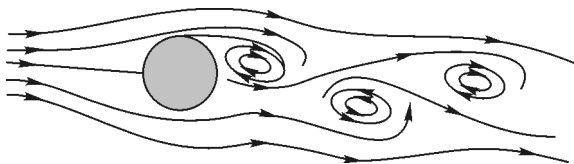


Рис.38. Образование вихрей при обтекании цилиндра быстрым потоком жидкости. При увеличении скорости вихри не успевают далеко уйти от оси течения, и возникает узкий бурный турбулентный след

ся в более крупные. Можно с некоторой вероятностью указать характерный масштаб вихрей и время их существования, но теории, которая должна была бы предсказывать вероятность появления и исчезновения тех или иных турбулентных структур, до сих пор не существует.

Интересно отметить, что во многих случаях геометрическая форма крупных структур сложных систем повторяется в мелких структурах. Ветки дерева являются простейшим примером такой структуры. Мелкие ветки повторяют рисунок более крупных ветвей. Другой пример – это турбулентное течение жидкости. Мелкие вихри повторяют рисунок более крупных вихрей. Кровеносная система, легочные бронхи, даже структура кристаллов – все это примеры подобных структур.

Случайные блуждания

Еще одним важным примером хаотических движений являются случайные блуждания. Почему запах цветов распространяется в воздухе? Почему весь чай становится сладким, хотя сахар был только на дне чашки? Блуждание каких-либо частиц в среде называют диффузией. Чтобы лучше понять это явление, напомним несколько случаев из другой области.

Если вы бросали, скажем, пять раз монету и все пять раз выпадал орел, то будет ли больше вероятность того, что на шестой раз выпадет решка? Конечно, не будет. Монета не знает о предыдущих попытках, и вероятность выпадения орла или решки одна и та же. Но если вы будете бросать монету много раз, то можно ли ожидать, что полное число выпадений орла будет почти такое же, как и решки? Нет, нельзя. Окажется, что либо число выпадений орла будет много больше, чем решки, либо, наоборот, оно будет много меньше, чем решки. Если вы таким образом долго играете на деньги, то вы будете либо в большом выигрыше, либо в большом проигрыше, но не останетесь при своих. Этот вывод легко понять из другого примера. Предположим, что группа завсегдатаев вышла поздно ночью из кабака.

Завсегда они слишком пьяны и не помнят дорогу домой. Они абсолютно случайно делают шаги то вправо, то влево. Совершенно ясно, что вскоре они все разбредутся и никто не останется у дверей кабака.

То же самое происходит с частицами. Двигаясь в какой-то среде, они сталкиваются с частицами среды и получают с равной вероятностью случайные удары с разных сторон. В результате они все дальше уходят от первоначального положения (рис.39). Диффузия играет огромную роль в природе. Диффундируют частицы в растворе, тепло от центра Солнца к поверхности, космические лучи в межзвездном пространстве и так далее.



Рис.39. Пример траектории пылинки, которая движется под действием случайных столкновений с частицами воздуха. Вспомните «пляску» пылинок в комнате в луче солнечного света

Волны в веществе

В веществе могут распространяться волны различных типов.

Бегущие волны. Наиболее привычный вид волн это бегущие волны. Таковы волны на поверхности океана, звуковые волны в газе, жидкости или твердом теле, точнее – любые волны, идущие от источника, который создает изменение плотности или скорости в сплошной среде.

При звуковых колебаниях каждая из частиц в среднем остается на месте, совершая лишь колебания около положения равновесия. Скорость звука в воздухе 340 м/с. Звук с частотой свыше 20000 колебаний в секунду (ультразвук) или с частотой ниже 20 колебаний в секунду (инфразвук) неслышен для уха человека. Однако эти звуки хорошо слышны ряду животных. Например, летучие мыши и дельфины издают и воспринимают ультразвук и используют ультразвук, отраженный от разных объектов, для определения местонахождения этих объектов. Если источник звука приближается к нам, то он воспринимается, как звук с большей частотой (более высокий), а если источник удаляется, то звук кажется более низким. Смещение частиц воздуха при разговоре составляет около 10^{-6} см, а скорость – 0,02 см/с. Отражение звуковых волн от объектов в воде используется, например, для изучения рельефа морского дна или для определения нахождения вражеских подводных лодок.

Стоячие волны. Стоячие волны возникают, когда создаются бегущие волны, у которых фиксированы две границы, например

– между двумя стенками, от которых отражаются волны. Обычно при таком отражении появляются также волны с иной частотой, чем у первичных волн, – так называемые обертоны.

Одиночные волны (солитоны). При сложении волн с различными частотами может возникнуть волна совсем необычного характера, которая имеет вид единичного холма, и этот холм бежит по среде не разрушаясь. Такие волны называют солитонами. Вот что пишет о солитонах английский ученый Джон Рассел, который был первым, кто их наблюдал: «...масса воды, которая собралась у носа судна, затем неожиданно оставила его позади, катясь вперед с огромной скоростью и принимая форму большого одиночного возвышения, который продолжал свой путь, не меняя своей формы и не снижая скорости».

Обычно пакет волн расплывается в пространстве потому, что волны разных частот имеют разные скорости. Однако волны только приблизительно независимы. В реальности они взаимодействуют друг с другом. Это относится к звуковым, электромагнитным и любым другим волнам. Именно взаимодействие волн может привести к возникновению солитонов. Взаимодействие существенно только для волн с достаточно большой амплитудой, когда они начинают перемешиваться.

Солитоны, по-видимому, ответственны за наводнения в Петербурге. Циклоны создают поднятие воды в Балтийском море. При входе воды в узкий Финский залив образуются солитоны, которые нагоняют воду в Неву.

Ударные волны. Если источник изменения плотности или скорости среды, например самолет, сам движется со скоростью большей, чем скорость звука в данной среде, то возникают ударные волны. Эти волны интересны не только тем, что возникают при взрывах и переносят большую энергию, но также тем, что играют огромную роль для процессов на Солнце и звездах, в межпланетной и межзвездной среде. Скорость звука это та максимальная скорость, с которой распространяются изменения давления и скорости в сплошной среде. Вещество впереди тела, которое движется со сверхзвуковой скоростью, еще не «знает» о движении тела, так как звуковые волны отстают от тела. Впереди твердого тела или струи жидкости или газа, имеющих сверхзвуковую скорость, образуется ударный фронт. Фронт ударной волны представляет собой резкий скачок давления и плотности газа, за которым следует длинный и более плавный хвост разрежения.

Если принять во внимание, что вещество все же не сплошное, а состоит из молекул (или из атомов, или из ионов), то мы

увидим, что сам фронт не является линией, а имеет ширину порядка нескольких длин свободного пробега молекул. Напомним, что длиной свободного пробега называется среднее расстояние, которое проходят молекулы между двумя столкновениями друг с другом.

Ударная волна, которая возникает при атомном взрыве, создает температуру порядка 3500 градусов и давление свыше 100 атмосфер, хотя достаточно давления всего в одну треть атмосферы, чтобы начали рушиться здания.

Плазменные волны. Из плазмы состоят звезды и значительная доля межзвездной среды. Движения плазмы гораздо разнообразнее, чем движения нейтральных газов. Волны в плазме отличаются от волн в нейтральном газе. Это связано прежде всего с тем, что плазма состоит из двух взаимно связанных компонентов с противоположными зарядами и поэтому в плазме действуют электрические и магнитные силы. Наличие заряженных частиц приводит к возможности возникновения электрических токов. Эти токи создают магнитные поля, которые могут сильно изменять характер движения частиц плазмы. Такие поля, как правило, возникают в звездах и галактиках. В этом случае движение плазмы диктуется не только силой тяжести, но и магнитными полями.

Заряженная частица может свободно двигаться вдоль, но не поперек линий магнитного поля. Траектория частицы навивается на магнитную линию (рис.40). Такой сложный характер движения частиц приводит к тому, что в плазме могут возникать волны

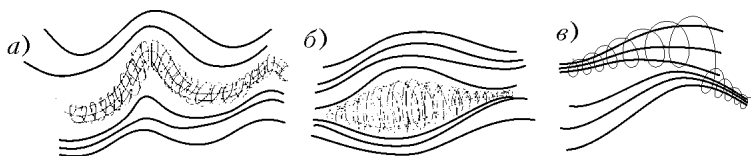


Рис.40. Различные возможности движения заряженных частиц плазмы при разных конфигурациях поля. Идея удержания горячей плазмы, необходимой для возникновения управляемой термоядерной реакции, основана на возможности создания конфигурации поля типа б)

различного типа. Возможность искривлять траекторию частиц плазмы используется в попытках получения термоядерной энергии в земных условиях. Чтобы нагреть плазму до высокой температуры, порядка миллиона градусов, которая необходима для начала термоядерной реакции, надо иметь возможность удержать эту плазму в каком-то объеме. Для этого подбирают

специальные конфигурации магнитного поля (магнитные ловушки). К сожалению, разнообразие волн в плазме придает ей капризный неустойчивый характер, и поэтому оказалось очень трудно построить такую ловушку. В настоящее время еще не существует устройства, пригодного для промышленного использования.

Сейсмические волны. При землетрясениях и атомных взрывах на поверхности и внутри Земли возникают и распространяются колебания, которые называют сейсмическими волнами. Имеется два основных вида сейсмических волн. Это, во-первых, волны сжатия и растяжения, а во-вторых, волны сдвига. Как ясно из названия, первые волны, подобно звуковым волнам, создают колебания в направлении хода волны, а вторые смещают вещество в перпендикулярном направлении. Замечательно то, что волны первого типа могут распространяться как в твердом теле, так и в жидкости или газе. Волны сдвига могут существовать только в твердом теле, потому что жидкость и газ не оказывают сопротивления деформации сдвига.

Наличие отраженных волн сжатия и отсутствие отраженных волн сдвига, идущих от внутренней области Земли, расположенной на глубине 2880 км, позволяет утверждать, что там находится толстый расплавленный жидкий слой (см. главу 15).

Гравитационные волны. Движение любых тел сопровождается изменением сил тяготения. Эти силы убывают с расстоянием подобно электромагнитным силам. Изменение сил тяготения передается в пространстве в виде гравитационных волн. Гравитационное взаимодействие велико только для очень больших тел, таких как Земля или Солнце. Мы не ощущаем тяготения окружающих нас тел меньших размеров. Очень сильные гравитационные волны могут возникнуть, когда черная дыра (см. главу 16) разрывает звезду, которая к ней приближалась. Однако такие события происходят не часто. При катастрофах меньших масштабов гравитационные волны довольно слабы и до сих пор не наблюдались на опыте. Однако множество других опытных подтверждений теории, которая, в частности, предсказывает существование этих волн, не позволяет сомневаться в их реальности.

Распространение тепла

Тепловая энергия это кинетическая энергия движения молекул (или атомов, или ионов) вещества. Эта энергия может передаваться при контакте тел, при движениях струй и потоков, а также излучением.

Тепло в кристалле передается колебаниями решетки, амплитуда которых с усилением нагрева все увеличивается, пока решетка не разрушится и кристалл не расплавится.

В жидкости и в газе кинетическая энергия передается при столкновениях более энергичных частиц с более медленными. Но это не единственный возможный способ передачи энергии. Все из нас видели поднимающиеся и опускающиеся струйки кипящей воды. Такой перенос тепла называют конвекцией. Конвективное движение имеет вид ячеек, которые выглядят сверху, как шестигранные пчелиные соты. В середине ячеек горячее вещество поднимается вверх и охлаждается у поверхности (рис.41).

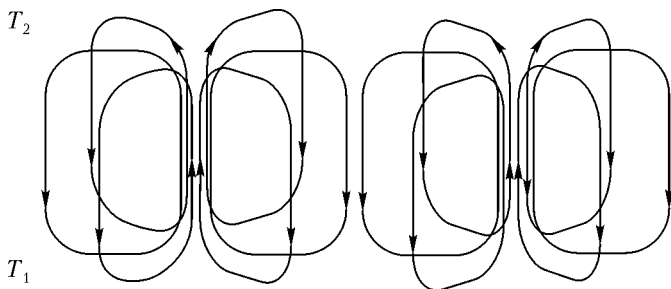


Рис.41. Схема течения вещества в конвективных ячейках. Температура T_1 снизу больше, чем температура T_2 сверху

Охлажденное вещество опускается на краях ячеек, чтобы опять подняться в другом месте. Положение поднимающихся и опускающихся струек все время меняется. Если нагрев достаточно сильный, то течение становится турбулентным, а движение внутри струек оказывается хаотическим. Во вращающемся теле, а небесные тела – планеты и звезды – обычно вращаются вокруг своей оси достаточно быстро, конвективные ячейки изгибаются и закручиваются. В семнадцатой главе будет показано, что такой характер движения плазмы способствует появлению магнитного поля. Для возникновения конвекции необходимо, чтобы на какой-то глубине в жидкости, газе или плазме один из участков вещества оказался, по случайным обстоятельствам, теплее соседних участков. Более теплый участок легче окружающей среды и поднимается вверх. Необходимо, чтобы он остался легче среды на всем пути до поверхности. Однако плотность и давление вещества с высотой уменьшаются, и на какой-то высоте поднимающийся участок может оказаться тяжелее среды. В этом случае конвекция не возникает. На улице и в наших комнатах тепло переносится конвекцией в воздухе. Поэтому нагревательные

приборы ставят на полу комнаты, а форточку делают в верхней части окна. Увеличение теплового потока разрушает конвективные ячейки, и возникает хаотический набор вихрей. Однако при дальнейшем увеличении теплового потока более или менее регулярные вихревые структуры возникают снова. Зоны относительного порядка и полного хаоса чередуются. Причиной возникновения таких структур является взаимодействие струй текущей жидкости или газа. Подобное чередование хаоса и упорядоченности возникает не только при усилении теплового потока, но также при увеличении скорости турбулентно текущей жидкости, при химических, биологических и многих других процессах.

Каждый из нас когда-то стоял у открытой, пылающей жаром печки. В этом случае тепловой поток переносится электромагнитными волнами в инфракрасном диапазоне длин волн. Солнечное тепло в глубине Солнца переносится сначала гамма- и рентгеновскими квантами, ближе к поверхности – более мягкими квантами, затем – конвекцией и выходит с поверхности в виде волн видимого света. Теплопередача излучением типична для внутренних областей многих звезд, где нет условий, необходимых для конвекции.

Еще один способ распространения тепла связан со взрывом. Обычный химический взрыв это лавинообразное протекание химической реакции, когда возникают быстролетающие осколки (атомы, ионы или молекулы), которые передают свою энергию окружающей среде и сильно нагревают ее. Реакция идет тем быстрее, чем выше нагрев. При атомном взрыве разлетающиеся осколки атомных ядер сталкиваются с окружающими атомами, возбуждают и ионизируют их, передают им свою кинетическую энергию, нагревают окружающую среду, которая, расширяясь со сверхзвуковой скоростью, создает ударную волну на фронте расширения.

Перейдем теперь к рассмотрению самых крупномасштабных объектов нашей Вселенной: Солнца, звезд и Вселенной как целого. Но прежде нужно рассказать об основных идеях теории относительности Эйнштейна, на которой основаны многие выводы о свойствах окружающего нас мира.

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Пространство и время

Наблюдаемый факт взаимодействия тел на расстоянии, причем с некоторым запаздыванием, привел к гипотезе, что между телами существует некая субстанция – эфир, который передает это действие. Распространение света рассматривалось как распространение волн в неподвижном эфире. Совсем другая точка зрения была высказана Альбертом Эйнштейном. Она состояла в том, что сами электромагнитные волны, в виде потока фотонов, являются переносчиками взаимодействия. Мы уже обсуждали в третьей главе, что эта точка зрения была доказана на опыте и явилась одной из основ квантовой теории, которая в настоящее время имеет огромное число практических приложений.

Следующим фактом, который был положен Эйнштейном в основу теории относительности, были наблюдения, которые доказали постоянство скорости света независимо от движения источника. Мы привыкли к совсем другому результату. Например, бросая мяч из автомобиля путнику, стоящему на шоссе, мы видим, что скорость мяча относительно путника складывается из скорости автомобиля и скорости мяча относительно автомобиля. Казалось бы, что скорость света, испущенного движущимся источником, должна быть суммой скорости света в пустоте c и скорости v источника света, т.е. либо $c + v$, либо $c - v$. Опыт показал совсем другой результат. Наблюдения над звездами в двойной звездной системе, когда одна из звезд, вращаясь вокруг другой, то удалялась то приближалась к Земле, показали, что свет приходит к нам с одним и тем же запаздыванием в обоих случаях (рис.42).

Это наблюдение, а также много других опытов показали, что скорость

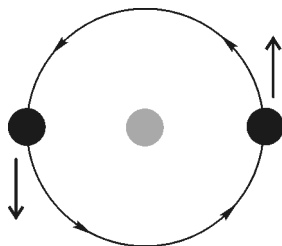


Рис.42. Наблюдение двойной звездной системы показывает, что время, необходимое, чтобы свет достиг наблюдателя, когда звезда удаляется (справа), то же самое, которое необходимо, когда звезда приближается (слева)

света в пустоте не зависит от движения источника. Такая картина совсем не похожа на распространение волн в какой-либо неподвижной среде. Если не существует неподвижного эфира, то нет абсолютной системы отсчета, относительно которой движутся тела, и можно говорить только о движении тел друг относительно друга. Если нет выделенной системы, то все законы природы должны быть одинаковыми для всех тел, которые движутся без ускорения. Наличие ускорения можно установить внутри любой системы. Для этого нет необходимости обращать внимание на другие тела.

Удивительным результатом вывода о постоянстве скорости света явилось заключение, что время течет по-разному на объектах, движущихся относительно друг друга. Продемонстрируем это на следующем примере. Рассмотрим результаты опытов двух наблюдателей, назовем их А и В (рис.43). Пусть на расстоянии

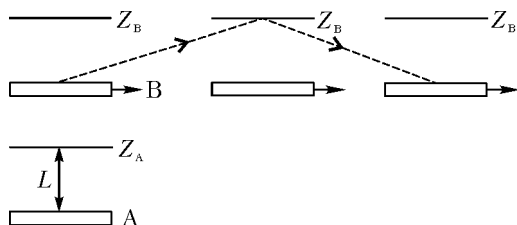


Рис.43. Посылка и отражение сигналов от зеркал в системах А и В с точки зрения наблюдателя А

L от наблюдателя А на той же платформе, где находится наблюдатель А, покоится зеркало, назовем его Z_A . Пусть на другой платформе, где находится наблюдатель В, на расстоянии L от него покоится другое зеркало Z_B . Пусть одна платформа движется относительно другой платформы и в момент, когда А и В находились друг против друга, они посылают световые сигналы – каждый на свое зеркало. Сигнал А отразится от его зеркала и придет к нему через время $t = 2L/c$, где c – скорость света. Если же А посмотрит на сигнал, посланный В, то он заключит, что свет был послан, когда В был рядом с А, а получен В, когда В прошел какой-то путь, удаляясь от А. Иными словами, свету в системе В, с точки зрения А, пришлось пройти больший путь, так как В двигался относительно А. Значит, одно и то же событие – посылка, отражение и возвращение сигнала – у В по часам В длится $2L/c$, а с точки зрения А – больше, чем $2L/c$. Это было бы неудивительно, если бы можно было сказать, что скорость сигнала зависит от скорости наблюдателя относительно

источника сигнала (т.е. скорость света складывается с соответствующей составляющей скорости источника). Но это объяснение не подходит, потому что из опыта следует независимость скорости сигнала от относительного движения источника и наблюдателя. Тогда приходится заключить, что промежутки между событиями в одной из движущихся систем не такие, как в другой системе. Поскольку скорость света одинакова и для В и для А, то А приходит к выводу, что время у В течет медленнее. То же самое думает В относительно времени А. Напомним, что только результаты опытов лежат в основе науки и выводы, полученные наблюдателем В, столь же достоверны, как и выводы А. Отсюда следует общий вывод, что время в системе, которая движется относительно наблюдателя, с точки зрения этого наблюдателя, течет медленнее. На рисунке 43 пунктиром обозначен путь света в системе наблюдателя В с точки зрения наблюдателя А.

Но, может быть, двум наблюдателям следует поступить по-другому. Просто остановиться, сверить часы, а затем улететь в разные стороны, вернуться и посмотреть, что будет? К сожалению, такая постановка вопроса нарушит исходное условие о том, что обе системы движутся без ускорения. Что произойдет с учетом ускорения, будет рассмотрено в следующем разделе. Оказывается, что время для любого наблюдателя будет идти медленнее в ускоренной системе. Все объекты, которые уходят и возвращаются, это ускоренные системы, так как для возвращения надо затормозиться и снова ускориться в обратном направлении.

Количественные оценки показывают, что эффект замедления времени играет важную роль только для очень быстрых движений. Выигрыш времени при полете на самолете в течение суток при скорости 600 км/ч всего две миллионные доли секунды. Иное дело для элементарных частиц, распад которых описан в девятой главе. Скорость таких частиц бывает очень велика. Опыт показывает, что те частицы, скорость которых достигает 0,85 от скорости света, распадаются в два раза медленнее, чем медленные частицы. Приведем конкретный пример. Наблюдения свидетельствуют, что на Землю непрерывно падает поток космических лучей, которые состоят в основном из протонов и ядер гелия. Сталкиваясь с частицами воздуха, космические лучи порождают другие короткоживущие частицы, в частности мю-мезоны (μ), которые распадаются на электрон и нейтрино. Время жизни мю-мезона в покое хорошо известно. Однако движущийся мю-мезон живет дольше. Чем он дольше живет, тем больше его пробег в воздухе до распада. Опыт показывает, что

время жизни до распада тем больше, чем больше скорость мю-мезона, в точном согласии с предсказаниями теории относительности.

Другим результатом теории является уменьшение длины всех предметов в направлении их движения относительно наблюдателя. Принимая во внимание изменение времени и длины (а значит, и скорости), а также законы сохранения энергии и импульса, Эйнштейн пришел к очень важному выводу о том, что полная энергия тела связана с его массой соотношением $E = mc^2$. Отсюда следует, что молекула будет легче, чем составляющие ее атомы, что стабильное атомное ядро легче, чем протоны и нейтроны, из которых оно состоит, и так далее. Этот результат явился основой не только для создания атомной бомбы, но также для атомной энергетики, для химической индустрии, для создания космических ракет и для множества других приложений.

Еще более радикальные выводы следуют для ускоренных систем. Не приводя сложных математических формул, дадим один из примеров. Из астрономических наблюдений известно, что до центра нашей Галактики (звездной системы Млечный путь) свет идет двадцать четыре тысячи лет по часам на Земле. Может ли человек в течение своей жизни достигнуть центра Галактики и вернуться обратно? Казалось бы, невозможно. Однако представим себе, что построена ракета, которая имеет огромный запас очень эффективного топлива (например, анти-вещества) и может все время ускоряться с величиной ускорения, равным ускорению силы тяжести на Земле. При таком ускорении ракета сумеет достигнуть скорости, близкой к скорости света. Время на ракете будет идти медленнее, и по часам на ракете пройдет около пятидесяти лет, когда ракета вернется на Землю. Человек на ракете станет старше всего на пятьдесят лет. Впрочем, на Земле пройдет уже больше двухсот тысяч лет, так что возвращаться будет неинтересно.

Геометрия нашего мира

Вначале геометрия развивалась для измерения участков Земли, для создания карт местности и для расчета маршрутов дальних походов. Само название «геометрия» означает измерение земли. Основы геометрии заложил великий ученый древности Евклид, и геометрия на плоскости до сих пор называется евклидовой геометрией. Казалось очевидным, что Земля плоская и кратчайшее расстояние между двумя точками это прямая. Когда появилась возможность совершать дальние плавания, пришлось использовать уже известный к тому време-

ни факт, что Земля шарообразна и кратчайшее расстояние между двумя точками это дуга большого круга, проходящего через эти точки. Геометрия на шаре не такая, как на плоскости. Именно совокупность линий, соединяющих точки кратчайшим путем, определяет характер геометрии. Только после задания сетки кратчайших линий можно давать вывод геометрических теорем. Очевидно, они будут различны на плоскости, на шаре или на другой фигуре. Можно задать вопрос: как выбрать кратчайшее расстояние в космосе, который нельзя измерить линейкой и циркулем? Есть лишь один способ определения таких расстояний. Надо использовать луч света, так как свет распространяется быстрее всего. Свет «выбирает» из всех возможных путей, соединяющих две точки, тот путь, который требует наименьшего времени для его прохождения. Эйнштейн показал, что кратчайшие расстояния в космосе вовсе не прямые. Для этого он предложил сравнить видимое положение звезды ночью и той же звезды во время солнечного затмения, когда, как известно, Солнце закрыто Луной и звезды видны, но эта конкретная звезда должна быть в это время закрыта Солнцем. Направление на звезду можно определить ночью, когда Солнце находится за горизонтом. Солнце меняет свое положение на небесном своде, и лучи от далеких звезд могут в какое-то время проходить возле Солнца. Наблюдение такого случая показало, что одна из звезд, которая должна была быть закрыта Солнцем, оказалась видна под определенным углом к горизонту (рис.44). Ее лучи проходили вблизи Солнца, и Солнце отклонило направление этих лучей. Это означало, что тяготение Солнца, а также любого тела с большой массой, меняет геометрию пространства, поскольку геометрия определяется именно световыми лучами.

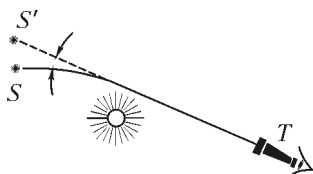


Рис.44. Звезда S во время затмения оказалась видна в телескоп T в направлении S' , хотя она скрыта за диском Солнца

Результаты этого опыта были предсказаны общей теорией относительности. Теория была построена на основе следующих фактов.

1) Эйнштейн обратил внимание на известное, но до него не оцененное обстоятельство, что невозможно отличить, находитесь ли вы в ускоренной системе или находитесь в поле тяжести. Он привел пример лифта. Если лифт находится на Земле, то вы чувствуете ее притяжение, т.е. свой вес, видите, как предметы падают на пол, и так далее. Если лифт тянут вверх с ускорением,

то ваш вес как бы увеличивается, предметы падают с большей скоростью и невозможно сказать, что случилось : находитесь ли вы в ускоренном лифте или сила тяготения увеличилась. Как закон Ньютона, который дает зависимость силы от массы и ускорения, так и закон всемирного тяготения содержат одну и ту же величину, а именно массу тела, хотя эти законы относятся к совсем разным случаям. Заранее нет оснований полагать, что эти законы должны быть каким-либо образом связаны. Тем не менее, опыт показывает, что все законы природы одинаковы в ускоренной системе и в гравитационном поле.

2) Как мы уже обсуждали в предыдущем разделе, длина одного и того же объекта оказывается меньше, когда объект движется относительно наблюдателя. В частности, наблюдатель в центре колеса видит, что обод колеса будет короче, если колесо вращается, хотя длина радиуса колеса, который перпендикулярен движению, не изменяется. Это означает, что отношение длины окружности к радиусу не такое, которое должно было бы быть в плоской геометрии. Напомним, что при вращении меняется направление скорости, т.е. вращение есть частный случай ускоренного движения.

Таким образом, мы имеем, что ускорение неотличимо от гравитации и что ускорение меняет геометрию. Отсюда следует очевидный вывод: геометрия в поле тяжести не является геометрией в плоском пространстве. Указанный выше опыт по наблюдению отклонения света звезды полем тяготения Солнца был примером этого вывода. Теория была подтверждена во многих других случаях.

Очень важным является предсказание теории о том, что время течет медленнее в поле тяжести. Это подтверждается опытом, который показывает, что частота света, испускаемого атомами массивного тела, меньше, а, значит, длина волны больше, чем длина волны света, испускаемого более легким телом. Наблюдения спектров атомов в солнечной короне однозначно показали, что спектральные линии там сдвинуты в красную сторону, т.е. в сторону меньших частот волн, чем в спектре таких же атомов на Земле. Удалось объяснить также ранее непонятную аномалию движения планеты Меркурий по орбите вокруг Солнца. Меркурий находится ближе к Солнцу, чем остальные планеты, и поэтому испытывает наибольшее влияние искривленности околосолнечного пространства. Из-за этого его орбита немного поворачивается. Этот поворот был необъясним с точки зрения обычной механики Ньютона, но был легко и точно объяснен Эйнштейном.

Закон всемирного тяготения Эйнштейна в слабых и постоянных гравитационных полях переходит в закон тяготения Ньютона. В настоящее время при расчете траекторий космических аппаратов принимаются во внимание поправки, полученные на основе теории относительности. Эта теория необходима в астрономии для объяснения существования таких объектов, как нейтронные звезды, квазары, черные дыры и т.д., о чем будет идти речь в шестнадцатой главе нашей книги.

Интересным следствием отклонения световых лучей полем тяготения массивных тел являются случаи, когда наблюдаются два совершенно одинаковых изображения удаленных галактик в разных, хотя и близких, точках неба. Дело в том, что световой луч по дороге к Земле может пройти возле массивного тела, например возле какой-то галактики. Эта галактика может служить как бы линзой, отклоняя лучи света и создавая два или даже несколько изображений одного и того же объекта. На рисунке 45 приведен пример «гравитационной линзы», которой является одна из галактик (в центре рисунка). Свет удаленной

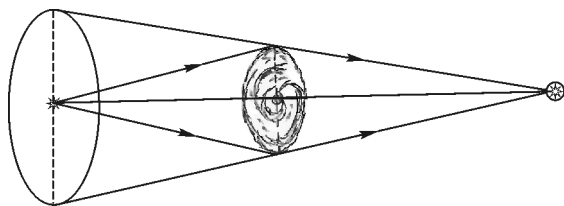


Рис.45.Схема гравитационной линзы

галактики (слева) фокусируется полем тяготения галактики, мимо которой этот свет проходит, и телескоп на Земле фиксирует излучение удаленной галактики в виде светящегося круга. На рисунке 46 приведены снимки, сделанные телескопом Хаббла и иллюстрирующие действие гравитационных линз.

Для описания быстрых движений и движений в сильных гравитационных полях удобно ввести понятие о четырехмерном пространстве. Точкой в таком пространстве является событие. Каждое событие можно характеризовать местом, где оно происходит, т.е. тремя пространственными координатами, и четвертой координатой, которой является время. Как мы уже говорили, наше трехмерное пространство только приблизительно плоское. Оно сильно искривляется вблизи массивных тел. Кривизну в каждой точке трехмерного пространства можно характеризовать радиусами двух кругов, которые определяют, насколько линия

в кривом пространстве отличается от прямой линии. Два радиуса приходится использовать потому, что искривление может иметь вид седла (рис.47). Математическое выражение для зависимости кривизны пространства-времени от масс и скоростей материальных тел является основным уравнением общей теории относительности.

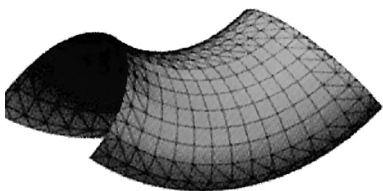


Рис.47. Два радиуса в каждой точке седла необходимы для описания его кривизны в трехмерном пространстве. Для описания кривизны четырехмерного пространства-времени необходимы четыре радиуса

Свободное падение это движение по геодезической (т.е. по кратчайшей) линии в пространстве. Предмет, падающий на Землю с какой-либо высоты, движется только под действием притяжения Земли, если не обращать внимания на сопротивление воздуха. Космонавт на орбите находится практически в невесомости, потому что притяжение к космической станции очень мало, а притяжение к Земле он не чувствует, так как свободно падает вместе со станцией на Землю. Он не сталкивается с Землей, так как, приближаясь к Земле, одновременно перемещается поперек направления падения. Луна также движется только под действием притяжения Земли. Можно сказать, что Луна все время падает на Землю, но не попадает на нее, так как имеет скорость поперек направления падения. Такое движение можно описать, как свободное движение в искривленном пространстве. Движение планет по орбитам вокруг Солнца это

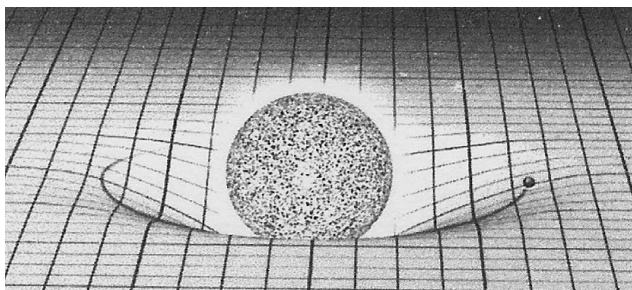


Рис.48. Земля как шарик, который скользит по стенке лунки, продавленной Солнцем в пространстве. Для наглядности пространство представлено здесь в виде двухмерной поверхности

свободное падение на Солнце в пространстве-времени, геометрия которого определяется притяжением Солнца (рис.48).

Вокруг вращающихся массивных тел возникают гравитационные вихри. Как уже было отмечено в предыдущей главе, движение массивных тел порождает гравитационные волны, т.е. периодические изменения геометрии пространства. Гравитационные волны обладают энергией и поэтому дополнительно искажают геометрию окружающего мира. Это ведет к появлению более сложных геометрических структур пространства и, тем самым, к более сложному полю тяготения.

Является ли наше пространство трехмерным

Можно ли быть уверенным, что наше пространство трехмерное? Приведем несколько примеров того, как суждение о размерности тела зависит от возможностей измерения. Круглый мяч издали кажется точкой, ближе – двухмерным кружком и лишь совсем близко – трехмерным телом. Гладкая поверхность льда кажется двухмерной, но если взглядеться, то мы увидим мелкие трехмерные трещинки и изломы. Все дело в масштабе, доступном для измерений. Если плоское существо ползет по двухмерной поверхности, то бугорки и ямки на поверхности останутся для него незаметными, когда неровности много меньше, чем размеры этого существа. Или другой пример. Рассмотрим ковер, который соткан из одного слоя ниток. Нитки, хотя и тонкие, но трехмерные. Если практически возможный масштаб наблюдений много больше толщины ниток, то ковер будет выглядеть двухмерным. Третье измерение как бы свернуто и не проявляется на опыте.

Так что не исключено, что наш мир имеет размерность больше, чем три. Ясно, что в привычных масштабах наше пространство трехмерное, и отличие надо искать в очень мелких масштабах. Напомним, что изучение сверхмалых размеров требует, согласно соотношению неопределенности, очень больших энергий. Радиоволны, длина волны которых велика, практически не могут проникнуть через малую щель в металлическом экране, через которую с легкостью проходит луч света, длина волны которого много меньше. Надо проверить, могут ли частицы сверхвысоких энергий уходить в другие измерения и взаимодействовать там. Такие опыты в настоящее время планируется провести на наиболее мощных ускорителях элементарных частиц.

Можно представить себе, что то пространство-время, в котором мы живем, это лишь поверхность в многомерном простран-

стве, в которое мы не можем войти. Подобно тому, как силы тяготения можно свести к геометрии пространства-времени, было бы соблазнительным и все другие силы также связать с геометрией, допуская, что число измерений пространства больше, чем три. Такие попытки делались неоднократно, но пока без особого успеха. Тем не менее, эту возможность нельзя отбросить. Не исключено также, что геометрия могла изменяться со временем.

Строгая теория гравитации должна одновременно учитывать как влияние сил тяготения на тела, так и влияние тел на силы тяготения, принимая, кроме того, во внимание квантовый характер частиц и полей. До сих пор не удалось убедительным образом объединить результаты квантовой теории с теорией гравитации. Попытки, сделанные в этом направлении, основаны на предположении, что мир симметричен относительно фермионов и бозонов, т.е. у каждого фермиона есть партнер в мире бозонов. Однако пока еще нет опытных фактов, говорящих за такую возможность или против нее.

Перейдем теперь к рассмотрению свойств более крупных объектов, и начнем с наиболее близкого – с Солнечной системы. Исследование процессов на Солнце позволяет понять многие процессы на звездах.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнечная система возникла из газовой-пылевого облака в межзвездном пространстве нашей галактики. Такие облака возникают под воздействием на межзвездную среду случайных возмущений со стороны соседних звезд (рис.49).

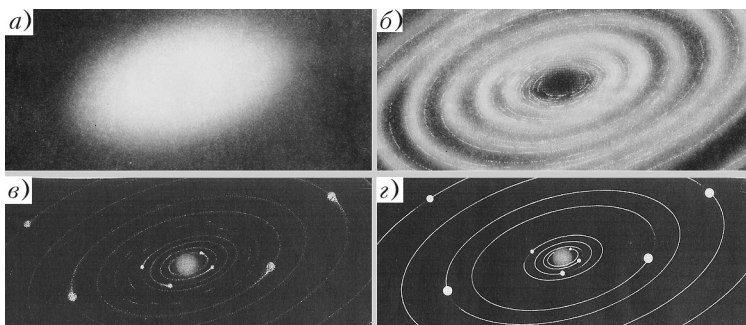


Рис.49. Схема эволюции протопланетного облака: а) облако после затухания турбулентных движений, уплотнение облака и возрастание плотности пылевой компоненты; б) распад диска на множество сгущений под действием сил тяготения; в) образование зародышей планет; г) окончательное формирование Солнечной системы

Облако неустойчиво потому, что даже не очень большое случайное увеличение плотности, а значит и массы, в какой-либо области облака должно возрасти, притягивая вещество из соседних областей. Чем больше становится масса сгущения, тем интенсивнее оказывается процесс поглощения соседнего вещества, пока поблизости все вещество не будет исчерпано. Силы притяжения, ведущие к образованию протопланетного облака из межзвездного вещества, не уравновешены. Они разные с разных сторон облака. Поэтому облако будет вращаться, и тем быстрее, чем сильнее оно сжимается. Вращение приводит к тому, что облако становится все более плоским. Сжатие облака должно приводить к очень быстрому вращению его центральной части. Примеры увеличения скорости вращения при уменьшении радиуса вращения легко встретить в обычной жизни. Например, ныряльщик, прыгая с вышки, будет вращаться, если он подожмет руки и ноги, но войдет прямо в воду, если он их вытянет.

Почему же в Солнечной системе суммарный момент вращения планет, т.е. периферии системы, оказался почти в сто раз больше, чем у Солнца? Дело в том, что в протопланетном облаке кроме сил тяготения действовали магнитные силы. Исходное облако состояло в основном из водорода с небольшой примесью гелия и еще меньшим количеством тяжелых элементов, таких как железо и кремний. Вещество облака было частично ионизовано в результате столкновений частиц, под действием космических лучей и, возможно, излучением соседних звезд. В такой среде возникали электрические токи и, тем самым, магнитные поля этих токов. Магнитные линии связывали центр и периферию облака, создавая ту «жесткость», которая приводила к передаче момента вращения (момента импульса) от центра к периферии, где возникали планеты.

Центром облака стала область с наибольшей массой. Эта область, сжимаясь под действием собственного тяготения, стала зародышем Солнца, которое в 740 раз массивнее всех планет вместе взятых. Наряду с основным центром, в более отдаленных областях тоже возникли свои центры сгущения. Наиболее крупный из них дал начало планете Юпитер, состав которого близок к составу Солнца. Сначала облако, заполненное газом и пылью, было малопрозрачно для света Солнца. Внутренние области получали больше тепла, и легкие элементы первыми уходили на периферию. Более тяжелые элементы, в первую очередь железо, оседали вблизи массивного центра облака. В этой области возникли такие планеты, как Меркурий, Венера, Земля и Марс. Железо и кремний преобладают в составе этих планет. В областях за Юпитером возникли Сатурн, Уран и Нептун, которые по составу близки к Юпитеру.

Все неоднородности в облаке росли до тех пор, пока не исчерпался материал в ближайшей окрестности. По-видимому, было очень много центров сгущения, и сначала возникли маленькие протопланеты, которые затем, сталкиваясь и объединяясь, образовали планеты.

Сам процесс образования Солнца и планет протекал относительно быстро, за 100–200 миллионов лет. Вокруг планет-гигантов возникло много спутников и образовались тонкие кольца из мелких каменных глыб. Планеты, подобные планетам Солнечной системы, обнаружены у многих звезд различного типа, даже у нейтронных звезд, которые совсем непохожи на Солнце. Есть много оснований предполагать, что жизнь возможна на планетах разных звездных систем, но вряд ли там следует ожидать существование цивилизации, с которой возможен контакт.

СОЛНЦЕ

Таких звезд, как наше Солнце, очень много в Галактике. Солнце не молодая звезда, но и не старая, ей всего 4,5 миллиарда лет от роду. Масса солнца $2 \cdot 10^{30}$ кг, т.е. в 330000 раз больше, чем у Земли. Расстояние до Солнца 150 миллионов километров, и солнечный свет доходит до нас за 8 минут. Вещество Солнца это плазма, состоящая на 90% из водорода и на 10% из гелия (по количеству атомов). Вклад остальных элементов около 0,1%. В центре Солнца находится ядро, температура которого 15 миллионов градусов, плотность 115 грамм в кубическом сантиметре, масса около половины всей массы, а радиус около трети радиуса Солнца. В ядре выделяется почти вся энергия Солнца. Эта энергия возникает главным образом за счет превращения четырех протонов в ядро гелия, когда при столкновении двух протонов один из них испускает позитрон и нейтрино, превращается в нейтрон, и объединяется с другим протоном, образуя ядро дейтерия (рис.50). Затем к дейтерию присоединя-

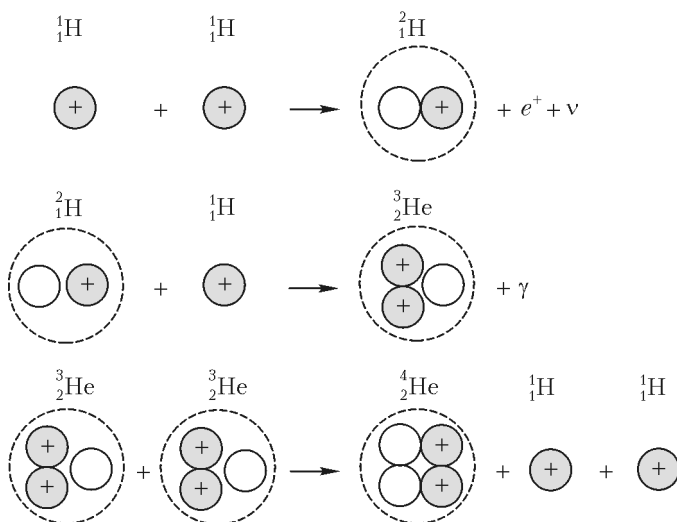


Рис.50. Схема основной термоядерной реакции на Солнце – превращение четырех протонов в ядро гелия

ется еще один протон, образуя ядро трития, и, наконец, при столкновении двух ядер трития отщепляются два протона и образуется ядро гелия. При этом лишний заряд уходит в виде двух позитронов, и излучаются два нейтрино. Во всем объеме Солнца в секунду возникают всего около $6 \cdot 10^{14}$ граммов гелия.

Масса ядра гелия на 3% меньше массы четырех протонов. При образовании одного грамма гелия выделяется $6 \cdot 10^{18}$ эрг энергии в виде гамма-фотонов, которые много раз поглощаются и снова излучаются веществом Солнца, пока через десять миллионов лет не достигнут слоев, расположенных на расстоянии около 0,7–0,8 радиуса от центра. Здесь возникают условия, благоприятные для конвекции, которая в этих слоях оказывается более эффективной для переноса тепла, чем излучение. Конвекция возникает, когда изменения плотности и температуры с глубиной таковы, что более горячие области становятся легче соседних участков среды и начинают подниматься к поверхности Солнца. Конвекция имеет характерную структуру в виде ячеек, в центре которых вещество поднимается, затем растекается во все стороны, охлаждается и опускается на глубину на периферии ячеек, чтобы опять подняться в другом месте (см. рис.41).

Положение поднимающихся и опускающихся струй все время меняется. Чем ближе к поверхности Солнца, тем быстрее падают температура и плотность вещества и тем меньше размер возникающих конвективных ячеек. Поверхность Солнца имеет вид кипящего слоя (рис.51, 52). Здесь наблюдаются следы конвективных ячеек нескольких характерных размеров: это гранулы размерами пять, десять и триста тысяч километров, а также гигантские ячейки размерами, сравнимыми с радиусом Солнца. Мелкие гранулы существуют всего 7–10 минут, исчезают и заменяются новыми гранулами.

Активные явления на Солнце цикличны. Имеется несколько характерных циклов. Это прежде всего одиннадцатилетний период появления и исчезновения солнечных пятен (рис.53). В два раза больше длится период смены полярности общего магнитного поля Солнца, когда хаотичность поля увеличивается, а северный и южный полюса меняются местами. Солнечный цикл несимметричен: восходящая ветвь приблизительно на два года короче нисходящей. Имеются еще несколько более продолжительных периодов.

Существует много попыток объяснения приблизительной цикличности активности Солнца. Наиболее полно разработана теория, которая основана на предположении, что цикличность

связана с усилением и распадом магнитных полей Солнца. Эти поля могут возникнуть в результате так называемого динамо-процесса, который мы будем рассматривать в семнадцатой главе.

Солнечные вспышки отрицательно влияют на здоровье ослабленных и пожилых людей.

Поверхностные слои Солнца, откуда исходит основная часть видимого излучения, называются фотосферой (рис.54). Температура фотосферы около 6000 К. Солнце каждую секунду излучает $3,86 \cdot 10^{33}$ эрг энергии, причем мощность излучения изменялась не более чем на несколько процентов за последние два-три миллиарда лет. Об этом свидетельствуют данные о климате Земли с момента возникновения жизни.

Солнце вращается не как твердое тело. Его поверхность совершает оборот вокруг оси на разных широтах за разное время: у полюсов за 35 дней, а у экватора за 25 дней. Наблюдаются также колебания, охватывающие большие участки фотосферы. Эти движения подобны тем, которые возникают при землетрясениях. Бурные процессы на Солнце вызывают колебания вещества вплоть до больших глубин. Изучение колебаний поверхности дает сведения о скачках плотности на границе конвективной зоны и об изменении скорости вращения вещества Солнца в зависимости от глубины. В частности было установлено, что период вращения зависит от широты, но почти не зависит от глубины внутри конвективной зоны, а ядро вращается почти как твердое тело.

Источником сведений о самых глубоких слоях солнечного ядра являются нейтрино. Как мы уже упоминали, при каждом столкновении протонов, которое ведет к образованию ядра гелия, испускаются два нейтрино, которые почти свободно выходят из Солнца и достигают Земли. Исходя из известной величины энергии, излучаемой Солнцем, легко подсчитать частоту образования ядер гелия и, тем самым, число возникающих нейтрино. Однако наблюдаемый поток нейтрино оказался вдвое меньше, чем если бы все испущенные нейтрино достигали Земли. Эта загадка беспокоила астрофизиков долгое время, пока не удалось понять, что существуют три состояния нейтрино (см. рис.31) и часть из тех нейтрино, которые возникает при образовании гелия, изменяли свое состояние по пути к Земле и не могли быть обнаружены тем методом, который был использован. Так что в конце концов существующие представления об энергетике Солнца нашли дополнительное подтверждение.

Уже в древних китайских летописях отмечалось, что на Солнце бывают пятна. В наше время выяснилось, что это

небольшие области размером порядка нескольких тысяч километров, температура которых заметно ниже средней температуры поверхности. Пятна не выглядят однородными, а имеют сложную структуру (рис.55).

Наблюдения спектров атомов, находящихся вблизи поверхности Солнца, показали, что на Солнце имеется магнитное поле, причем наряду с крупномасштабным полем, которое охватывает все Солнце, имеются локальные поля, которые могут быть гораздо сильнее общего поля. Особенно сильные поля наблюдались в солнечных пятнах. Собственно говоря, пятна являются как раз теми областями, где магнитное поле выходит на поверхность и, подавляя там движения плазмы, приводит к понижению температуры до 4500 К, отчего пятна выглядят темнее окружающей среды.

Пятна обычно бывают парными, с разной полярностью поля. Сравнительно слабое поле (10–100 гауссов), которое наблюдается почти по всей поверхности Солнца, на самом деле является средним из отдельных очень узких (100 км) и широко разбросанных пучков сильного (1000 гауссов) магнитного поля так называемых фибрилл (рис.56). Возникновение фибрилл коррелирует с колебаниями солнечной поверхности на звуковых частотах.

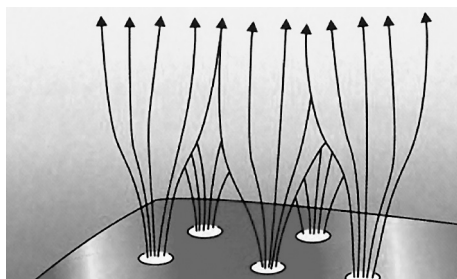


Рис.56. Схема магнитных линий фибрилл

Возможно, именно эти колебания вызывают локальные выбросы магнитного поля. Однако механизм возникновения фибрилл пока еще не вполне ясен.

Над фотосферой лежит более разреженная и прозрачная хромосфера, а над ней – корона. Хромосфера и корона становятся видны во время солнечных затмений, когда Луна заслоняет диск Солнца. Толщина хромосферы не более десяти тысяч километров, а корона простирается на расстояния в десятки солнечных радиусов. Хромосфера состоит из отдельных волокон, которые изменяют свою форму, появляются и исчезают. В

нижней хромосфере и фотосфере водород не ионизован. По мере удаления от фотосферы и приближения к короне температура сначала падает от 6600 до 4300 К, а затем снова возрастает до нескольких миллионов градусов в короне.

Нагрев верхней хромосферы и короны, по-видимому, связан с передачей энергии звуковыми и ударными волнами вдоль линий магнитных полей, которые простираются от фотосферы далеко в корону и даже продолжаются в плазме, истекающей из короны.

Локальные магнитные поля в хромосфере и короне имеют вид арок и петель. Размеры арок и петель во много раз превышают размеры Земли. Иногда плазма скапливается в петлях, образуя так называемые протуберанцы (рис.57).

Все эти структуры недолговечны, быстро обрушиваются или выбрасываются из петель и арок. Сами петли разрываются и сокращаются, как лопнувшая резинка. Иными словами, перестраиваются токи, создающие поля этих структур. В результате выделяется энергия порядка энергии взрыва миллиард мегатонной атомной бомбы, и мы видим вспышку на Солнце. Возможные причины возникновения магнитных полей Солнца, звезд и других небесных объектов будут рассмотрены в главе 17.

Какова же будет судьба нашего Солнца и Солнечной системы?

Когда Солнце исчерпает весь запас атомных ядер, способных участвовать в термоядерных реакциях, солнечное ядро начнет остывать и кинетическая энергия атомов и ионов не сможет противостоять силе тяжести. Внутренние области Солнца станут быстро сжиматься, пока их плотность не достигнет величины, необходимой для вырождения электронов (см. главу 10). Давление вырожденных электронов будет достаточным, чтобы остановить дальнейшее сжатие, и внутренность Солнца начнет превращаться в белый карлик. Наружные области, напротив, расширятся, поскольку горячее ядро передаст им энергию, выделившуюся при сжатии. Солнце станет красным гигантом. Внешние слои гиганта будут простирались за орбиту Меркурия. Правда, все это произойдет только через пять-шесть миллиардов лет, так что беспокоиться преждевременно.

Свет Солнца, проходя через стеклянную призму и преломляясь, образует спектр всех цветов. При внимательном рассмотрении видно, что солнечный спектр пересекают узкие темные полосы, возникающие при поглощении света той или иной длины волны атомами солнечной атмосферы. Разные атомы поглощают свет только определенного набора длин волн. Состав

солнечной хромосферы и короны был определен именно при исследовании линий поглощения в солнечном спектре.

Солнечного тяготения недостаточно, чтобы удерживать горячее вещество на самой вершине короны. Поэтому корона является источником потока быстрых протонов и электронов – так называемого солнечного ветра. Солнечный ветер изменяет характер токов в короне, что изменяет магнитное поле – линии поля вытягиваются. Солнечный ветер, достигая Земли, искажает магнитное поле Земли и вызывает магнитные бури. Звезды, как и Солнце, являются источниками истекающей плазмы – так называемого звездного ветра. На расстоянии примерно в сто раз больше расстояния от Земли до Солнца солнечный ветер сжимает межзвездную среду, создавая ударную волну.

Солнечное излучение и солнечный ветер делают вполне реальным проект межпланетных путешествий под парусом. Конечно, это медленное путешествие, но зато не надо запасаться горючим. Проводились первые испытания космических кораблей под парусом, хотя пока еще это скорее не корабли, а лодки. Испытывалась космическая лодка массой всего в 100 кг с парусом, который представлял собой полотнище из тонкой фольги площадью 600 м^2 .

ПЛАНЕТЫ

Строение Солнечной системы

Все планеты Солнечной системы четко разделяются на две группы. В первую группу входят ближайшие к Солнцу планеты: Меркурий, Венера, Земля и Марс. Эти планеты сравнительно невелики и состоят в основном из твердых пород, содержащих силикаты и железо. Их атмосферы возникли при выделении газов из недр и состоят в основном из углекислого газа, азота, водяного пара и кислорода в разных пропорциях у разных планет. Во вторую группу входят планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Они состоят в основном из водорода с примесью гелия и, по-видимому, имеют в центре небольшое силикатно-железное твердое ядро. Суммарная масса планет составляет всего 0,13 от массы Солнца. Орбиты всех планет почти круговые, лежат приблизительно в одной плоскости, и все планеты, кроме Урана и Венеры, вращаются вокруг своей оси в том же направлении, что и Солнце (рис.58).

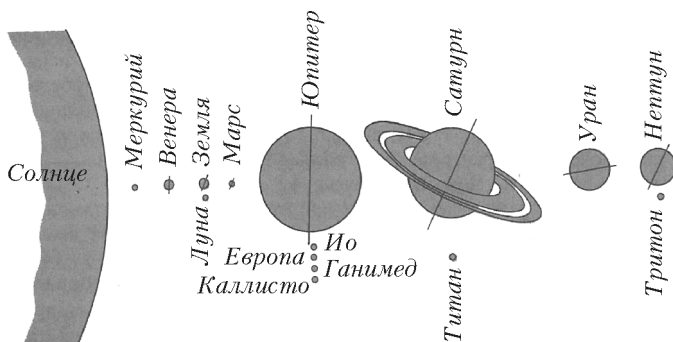


Рис.58. Размеры планет и их крупнейших спутников по сравнению с Солнцем. Показан также наклон осей вращения планет к плоскостям их орбит

Орбиты планет очень устойчивы. Планеты взаимодействуют друг с другом и с Солнцем, но не сбиваются при этом с пути. Именно взаимодействие в далеком прошлом всех тел Солнечной системы изменяло орбиты планет до тех пор, пока их движения

не согласовались. Оказалось, что радиусы орбит R_n приблизительно можно определить простой формулой $R_n = A + 2^n B$, где A и B – постоянные величины, а n равно $-\infty$ для Меркурия, 0 для Венеры, 1 для Земли и так далее. При этом номер 5 надо оставить для пояса астероидов.

Внутренние планеты – Меркурий, Венера, Земля, Марс

Меркурий. Меркурий – самая близкая к Солнцу планета. Его радиус всего в полтора раза больше, чем у Луны, а масса в восемнадцать раз меньше массы Земли. Ядро Меркурия состоит из железа и никеля. Внешние слои имеют тот же состав, что и земные породы. Поверхность неровная, покрыта слоем пыли и испещрена кратерами от ударов метеоритов. День Меркурия длится около трех земных месяцев, и столько же длится ночь. Солнце светит там втрое ярче, чем на Земле. Температура поверхности днем достигает плюс 425°C , а ночью минус 175°C . Атмосферы Меркурий практически не имеет.

Венера. Венера по размерам почти не уступает Земле. Однако на этом сходство кончается. Венера вращается очень медленно, так что год на Венере короче, чем ее звездные сутки. Солнце там восходит на западе, а заходит на востоке. На Венере есть и высокие горы, и довольно глубокие впадины. Очень толстая атмосфера состоит в основном из углекислого газа, которым дышать невозможно. Давление атмосферы у поверхности примерно 90 атмосфер, т.е. такое, как на дне земного океана. Небо всегда покрыто облаками. Температура поверхности достигает плюс 470°C . Такая температура может расплавить свинец. У поверхности ветры не очень сильные, но на высоте 40 км их скорости достигают 180 км/ч. Крупномасштабного магнитного поля Венера не имеет. Каждую секунду в среднем на планете вспыхивает около двадцати молний. Частые дожди из серной кислоты завершают картину. Именно так описывают ад церковные книги.

Земля. О Земле написано много хороших научных книг. Мы здесь коснемся только тех фактов, которые характеризуют Землю как члена семейства планет.

Возраст Земли 4,6 миллиарда лет. Жизнь на Земле возникла 3,5 миллиарда лет тому назад. Это были одноклеточные микроорганизмы. Растения возникли на Земле всего 400 миллионов лет назад. Еще через 200 миллионов лет появились динозавры. Современный человек существует на Земле не более 100 тысяч лет.

Основные представления о внутреннем строении Земли получены при анализе данных об отражении сейсмических волн от разных слоев внутри Земли. Сейсмические волны возникают при землетрясениях и сильных взрывах. При анализе сейсмических волн используются лабораторные данные о распространении волн в разных средах.

Если идти от центра Земли к поверхности, то мы увидим несколько сильно отличных областей (рис.59).

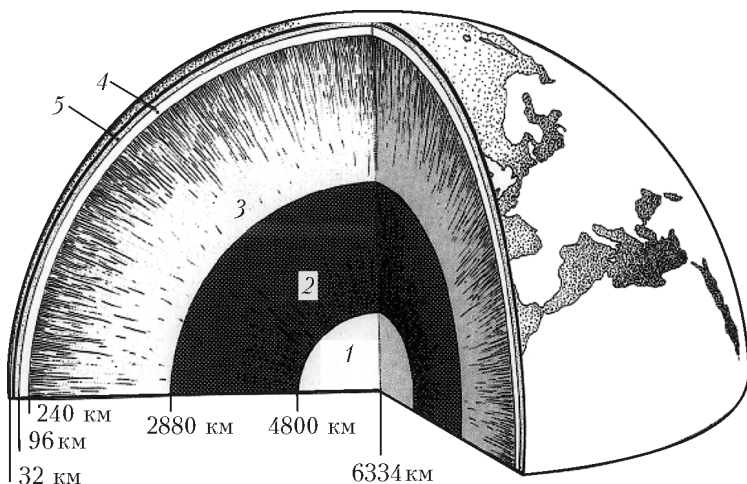


Рис.59. Внутреннее строение Земли, полученное из анализа сейсмических волн

1) Твердое земное ядро. Его масса составляет около трех процентов массы Земли. Оно состоит в основном из железа и отчасти из никеля, имеет размер 1400 км и температуру около пяти или шести тысяч градусов. Высокое давление позволяет ядру оставаться твердым даже при столь высокой температуре. Энергия разогрева ядра, как и более высоких слоев, возникает за счет радиоактивного распада урана и других радиоактивных элементов, которые содержатся в веществе Земли. Кроме того, небольшое количество теплоты сохранилось со времени образования планеты. Твердое ядро вращается относительно его жидкой части, поворачиваясь за год на 0,3–0,5 градуса дуги, совершая полный «лишний» оборот за 700–1000 лет. Не исключено, что скорость этого вращения меняется со временем и даже изменяет свое направление. Вращение твердого ядра может играть важную роль в создании земного магнитного поля.

2) Жидкое земное ядро. Она составляет около 30 % массы Земли, простирается от глубины 4800 км до глубины 2880 км и имеет температуру приблизительно от четырех до пяти тысяч градусов. В этой области давление меньше, и железо с примесью никеля и малого количества кремния остается в жидком состоянии.

3) Мантия. Она расположена между ядром и корой, начинается на глубине 2880 км и имеет толщину около 2500 км. Температура ее от двух с половиной тысяч градусов на границе с ядром до полутора тысяч градусов непосредственно под корой. Мантия состоит в основном из соединений кремния. Тяжелые примеси, такие как железо, из нижних слоев мантии постепенно выпадают в ядро, а из глубин ядра всплывают более легкие, в основном кремневые, примеси. Этот процесс создает движения в земном ядре, которые переносят тепловую энергию и, по-видимому, способствуют возникновению там электрических токов и связанного с током магнитного поля. Мантия неоднородна. Из глубин мантии поднимаются узкие потоки расплавленного вещества, которые пробивают кору и изливаются на поверхность в виде вулканической лавы. Вещество мантии находится в аморфном состоянии, подобном, например, асфальту. Такое вещество является хотя и твердым, но все же текучим. Если сила действует достаточно долго, то аморфное вещество ведет себя, как жидкость. В нем можно утонуть, на нем можно плавать.

4) Самый верхний, тонкий слой мантии. Этот слой с составом, обогащенном кремнием, называется слоем Мохоровича.

5) Кора. Она имеет состав, близкий к составу мантии. Толщина коры около 5–7 км под океаном и до 30–60 км под материками. Кора состоит из нескольких плит, которые могут перемещаться по поверхности мантии (рис.60). Внутреннее тепло Земли гораздо быстрее выходит наружу через более тонкую кору под океаном, чем через толстую кору под материком. Более теплое вещество мантии расширяется под материком и немного приподнимается. В результате плита может расколоться, ее части разойдутся, и между ними возникнут новые океаны. Перемещение плит происходит очень медленно, в течение многих миллионов лет, но оно приводит к сильным изменениям поверхности. Каких-нибудь 600 миллионов лет тому назад существовал всего один материк – Гондвана. Затем он раскололся на части, которые начали расходиться (рис.61). Легко заметить, что очертания восточного края Южной Америки повторяют очертания западного берега Африки. Атлантический океан расширяется, отодвигая Америку от Старого света. Западный берег

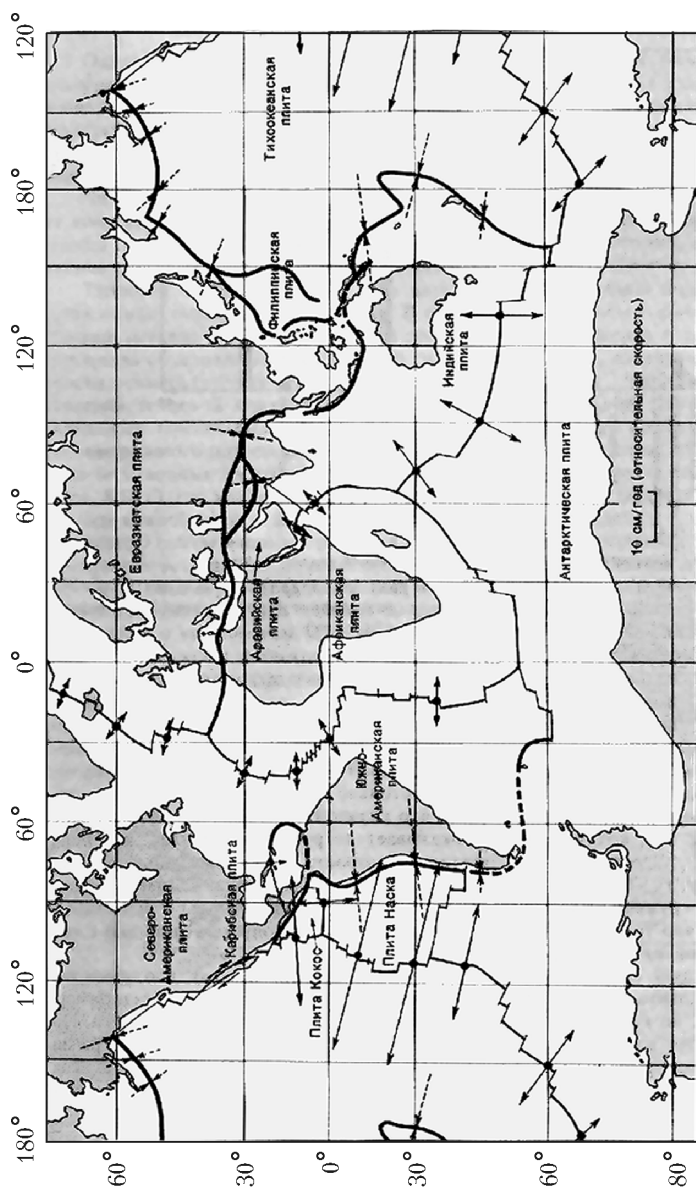


Рис.60. Строение коры и верхних (твердых) слоев мантии из литосферных плит. Линии со стрелками показывают направление движения плит. Имеется шесть крупных плит и много мелких

Северной Америки наезжает на Тихоокеанскую плиту и сминается, образуя Скалистые горы. Поэтому именно там случаются сильные землетрясения.

Атмосфера Земли состоит в основном из азота, кислорода и небольшого количества углекислого газа. Атмосфера Земли была вначале во многом похожа на атмосферу Венеры. В ней было много углекислого газа и почти совсем не было кислорода. Такая атмосфера была благоприятна для бактерий, вырабатывающих метан (рис.62). Температура была высока, так как солнечный свет легко проходил через атмосферу, но углекислый газ и

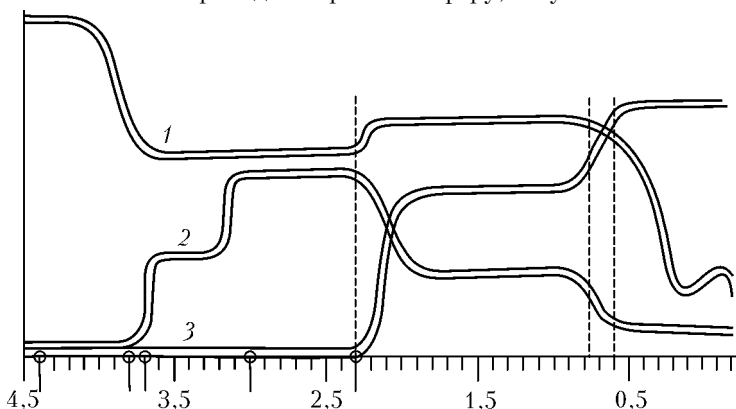


Рис.62. Изменение содержания углекислого газа (1), метана (2) и кислорода (3) в атмосфере Земли за 4,5 миллиарда лет. Резкое увеличение содержания кислорода и уменьшение содержания метана и углекислого газа полмиллиарда лет тому назад привели к окончанию жаркого периода в истории Земли

метан не пропускали обратно тепловое излучение от нагретой Земли. Это явление называется парниковым эффектом. Зеленые растения и, прежде всего, микроскопические водоросли в океане создали весь кислород планеты.

По мере движения Земли по орбите сменяются сезоны — от зимы к лету и обратно. Это происходит потому, что ось вращения Земли наклонена к плоскости ее орбиты на 23 градуса. Кроме того, ось вращения описывает круг с периодом 26 тысяч лет. Такое движение называют прецессией. Соответственно, нагрев каждого из полушарий меняется от наибольшего к наименьшему каждые 13 тысяч лет (рис.63).

Многие обеспокоены тем, что неконтрольный выброс промышленных газов сдвинет тепловой баланс планеты и приведет к радикальному изменению климата и состава атмосферы. Для

такого опасения имеются основания, хотя не вполне ясно, что сильнее влияет на климат — промышленные газы или наблюдаемые слабые изменения потока солнечного излучения. В частности, аномально холодные зимы в XVIII веке, возможно, были связаны с аномально слабой активностью Солнца в этот период.

Самые верхние слои атмосферы богаты озоном, который защищает живые существа от губительного избытка солнечных ультрафиолетовых лучей. Промышленные выбросы могут привести к частичному разрушению озонового слоя, что уже, по-видимому, происходит в полярных областях планеты. Верхняя часть атмосферы в значительной степени ионизована солнечным излучением.

Мы не замечаем, что все время находимся в сильном электрическом поле земной атмосферы. Разность потенциалов достигает 200 вольт на расстоянии, равном росту человека. К счастью, наше тело, а также трава, деревья и большинство окружающих предметов проводят ток гораздо лучше, чем воздух. Это выравнивает потенциалы электрического поля вокруг нас. Поверхность Земли имеет значительный отрицательный заряд. Этот заряд переносят молнии из облаков. Процесс возникновения заряда облаков пока еще не полностью ясен. По-видимому, заряд возникает при конденсации водяных паров в турбулентной воздушной среде. За сутки на Земле гремит в среднем триста тысяч гроз.

Магнитное поле Земли (см. главу 17) создает ловушку для электронов и ионов, которые возникают в самых верхних слоях

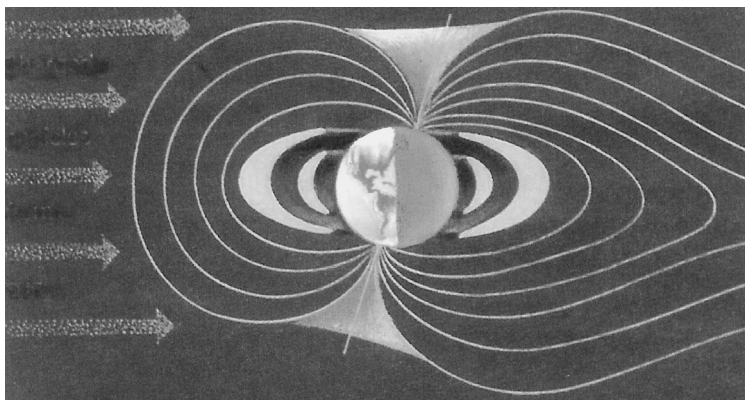


Рис.64. Магнитные линии земного магнитного поля, сжатые со стороны Солнца и вытянутые потоком солнечного ветра с противоположной стороны

атмосферы под действием излучения Солнца. Солнечный ветер обдувает магнитосферу и вытягивает линии земного магнитного поля (рис.64). Порывы солнечного ветра при вспышках на Солнце искажают магнитное поле Земли, вызывая, тем самым, магнитные бури. При этом нарушается радиосвязь, а электроны в полярных областях магнитосферы проникают в атмосферу, возбуждают атомы кислорода, которые испускают излучение, создавая разноцветные полосы полярных сияний. Резкие изменения магнитного поля плохо влияют на здоровье людей.

Луна. Единственное небесное тело, на котором побывал человек, это Луна, спутник Земли. Она в три с половиной раза меньше Земли по размеру, в 80 раз легче и находится на расстоянии 384000 км от Земли. Гравитационные силы Земли привели к тому, что в настоящее время Луна обращена к Земле всегда одной стороной. Как известно, на Луне нет ни воды, ни атмосферы, а поверхность ее покрыта метеорными кратерами и слегка присыпана пылью (рис.65). Сравнение лунных пород с составом мантии Земли, по-видимому, свидетельствуют о том, что Луна откололась от Земли около 4 миллиардов лет тому назад при столкновении Земли с небольшой протопланетой. Притяжение Луны вызывает приливы в земных океанах. Луна притягивает воду океана на той стороне Земли, которая обращена к Луне и поэтому ближе к Луне. Океан на противоположной стороне Земли дальше от Луны и поэтому притягивается слабее, чем тело Земли. На этой стороне тело Земли оттягивается от океана. В результате прилив возникает как на стороне, обращенной к Луне, так и на противоположной стороне.

Марс. Марс называют Красной планетой. С Земли он действительно выглядит как красноватая звездочка. Дело в том, что на поверхности Марса много пород, содержащих окислы железа, попросту говоря – ржавчину.

Размер Марса почти вдвое меньше размера Земли, а масса в десять раз меньше массы Земли. По-видимому, Марс, как и Земля, имеет железное ядро, но возможно, что это ядро целиком твердое. Поверхностные породы на Марсе в основном такие же, как на Земле. Имеются высокие горы. Самая высокая достигает 27 километров. Видны старые вулканы и кратеры от падения метеоритов (рис.66). На Марсе имеются извилистые каньоны, которые выглядят, как русла давно высохших рек (рис.67). Вполне возможно, что на Марсе когда-то действительно текли реки, вода которых давно замерзла и погребена под слоем грунта у полюсов. Похоже, что какое-то космическое событие, например падение астероида, привело к изменению климата Марса. На

Марсе имеются полярные шапки, состоящие в основном из замерзшего углекислого газа, так называемого сухого льда. Несомненно, что на Марсе существуют также области, содержащие водяной лед. Время от времени на Марсе бушуют песчаные бури. У Марса имеется очень разреженная атмосфера с плотностью в сто раз меньше земной, состоящая главным образом из углекислого газа. Тонкая атмосфера не препятствует охлаждению почвы, нагретой солнечным светом. Температура летним днем достигает плюс 10 °С, а зимней ночью – минус 120 °С.

Марс имеет два небольших спутника, которые, подобно Луне, покрыты кратерами. Орбита одного из спутников с течением времени оказывается все ближе к Марсу, и через сто миллионов лет он упадет на Марс.

Астероиды. Между орбитами Юпитера и Марса расположен Пояс астероидов. Там движутся несколько сотен тысяч малых тел размерами до тысячи километров. Астероиды представляют собой глыбы, состоящие в основном из кремния и железа. Они покрыты кратерами, которые возникли при их столкновениях друг с другом. По-видимому, астероиды это остатки протопланетного облака, которые не объединились в более крупное планетное тело из-за влияния сильного поля тяготения Юпитера. Влияние этого поля и полей других планет может сильно исказить орбиту астероида. Есть основания предполагать, что огромный кратер в Мексике, на полуострове Юкатан, возникший при падении небольшого астероида на Землю, был причиной обширных пожаров и выброса в атмосферу огромного количества пепла и пыли. Это привело к уменьшению прозрачности земной атмосферы, к похолоданию и, в конечном счете, к вымиранию многих видов растений и животных. Не исключено, что именно к этому времени относится вымирание всех крупных динозавров. Будем надеяться, что подобная катастрофа не случится в ближайшее время.

Небесное тело Плутон и его спутник Харон, лежащие на самой периферии Солнечной системы, за орбитой Нептуна, имеют состав, близкий к составу астероидов и, по-видимому, то же происхождение. По массе Плутон меньше Луны. Орбита Плутона отличается от окружности сильнее, чем орбиты планет.

Планеты-гиганты

Юпитер. Юпитер всего в тысячу раз меньше по массе, чем Солнце, но лишь чуть-чуть плотнее воды. Он столь велик, что выделяет тепла в два раза больше, чем получает от Солнца. Его диаметр в одиннадцать раз больше, чем у Земли. Он

состоит в основном из водорода с примесью около 20% гелия. В атмосфере Юпитера имеются также метан и аммиак. По мере углубления в недра Юпитера слой газообразного водорода сменяется сначала жидким, а затем твердым водородом. Водород в твердом состоянии имеет частично заполненную энергетическую зону и поэтому является металлом. Возможно, что в центре планеты имеется небольшое твердое ядро из тяжелых элементов, скорее всего из железа и кремния. Оценка температуры в центре Юпитера дает 30000 градусов. Юпитер быстро вращается, сутки длятся всего 10 часов. Сильные ветры дуют в основном в широтном направлении, и с Земли поверхность Юпитера выглядит полосатой (рис.68). На поверхности видно огромное красное пятно размером больше Земли. Это пятно представляет собой ураган, который существует в плотной атмосфере Юпитера уже многие сотни лет. Юпитер имеет магнитное поле (см. главу 17) и протяженную магнитосферу.

Вокруг Юпитера обращается много спутников (рис.69). Это напоминает Солнечную систему в миниатюре. Некоторые спутники Юпитера получают от него больше тепла, чем от Солнца. Мы видим на них в основном скалы и лед. На ближайшем к планете спутнике Ио видны активно действующие вулканы. Юпитер своим полем создает грандиозные приливы в теле Ио, разогревает его и, тем самым, вызывает извержение вулканов. Следующий спутник – Европа – целиком покрыт льдом. Лед трескается при попадании метеоритов, трещины заливаются водой и снова замерзают. Не исключено, что в подледной воде этого спутника существует какая-то жизнь. Третий спутник – Ганимед – по размерам превышает планету Меркурий. Его поверхность покрыта скалами и льдом.

Сатурн. Сатурн (рис.70) по составу близнец Юпитера. Он также состоит в основном из водорода с добавкой гелия, а в его атмосфере, кроме того, имеются метан и аммиак. Там дуют сильные ветры со скоростью до двух тысяч километров в час. В глубине Сатурна существует твердое ядро, покрытое океаном из жидкого водорода глубиной в тысячи километров, который переходит в толстую водородную атмосферу. Средняя плотность Сатурна мала – даже меньше, чем плотность воды.

Вокруг Сатурна имеется кольцо, точнее говоря, нескольких концентрических колец, которые состоят из каменных и ледяных глыб со средним диаметром сто метров (рис.71). Во внутренних кольцах сосредоточены более мелкие, в основном кремниевые частицы. Внешние кольца состоят из более крупных, в основном ледяных, глыб. Кольцо отстоит на 137 тысяч километ-

ров от планеты. Диаметр кольца около миллиона километров. Происхождение колец не вполне ясно. Это могут быть осколки столкнувшихся в давние времена спутников Сатурна. Приливные силы Сатурна не позволяют этим осколкам соединиться в планету.

Сатурн имеет более 60 спутников. Самый крупный из них Титан, по размерам он больше Луны. Его атмосфера в два раза плотнее земной атмосферы. Там обнаружены облака из метана, азот, углекислый газ, а на поверхности – скалы и лед. На Титане идут метановые дожди и текут метановые реки среди ледяных берегов. Хотя температура на поверхности Титана не превышает минус 180 °С, наличие сложных молекул создает возможность появления там примитивных живых организмов.

Уран. Данные об удаленных планетах, начиная с Урана, довольно скудны. Уран – гигантская газовая планета, подобная Юпитеру и Сатурну. В его облачной водородно-гелиевой атмосфере не наблюдается сильных ветров. Уран выделяется среди других планет тем, что он вращается вокруг своей оси не в ту же сторону, что и все другие планеты (кроме Венеры), и его ось вращения сильно наклонена к плоскости орбиты. Возможно, что эти аномалии вращения возникли в далеком прошлом в результате столкновения с другой протопланетой. Уран также окружен кольцом, но гораздо более разреженным и меньших размеров, чем Сатурн.

Уран имеет восемь больших (размером более 100 км) и много маленьких спутников.

Нептун. Нептун очень похож на Уран. Он имеет преимущественно водородную атмосферу. Метан в верхней части атмосферы придает ей голубой цвет. В атмосфере, покрытой толстым слоем облаков, дуют сильные ветры со скоростью сотни километров в час. Температура верхней атмосферы около минус 193 °С.

Нептун имеет семь больших и несколько малых спутников.

Кометы и метеориты

Кометы. Необычная форма комет с длинным хвостом, их неожиданное появление и движение по небосводу с древних времен пугали людей. Долгое время считалось, что появление комет предвещает голод, войну, болезни. Прогнозы часто оправдывались, поскольку все эти бедствия были обычны вплоть до недавнего времени. На самом деле комета это огромная глыба из пыли и льдов размером порядка десяти километров. Эта глыба состоит не столько из водяного льда, сколько из льдов

метана, углекислоты и т.д. В лед вморожены твердые пылинки разных веществ. Кометы это остатки протопланетного облака, которые были выброшены далеко за орбиту Плутона игрой сил тяготения более крупных сгущений, которые дали начало планетам. Кометные тела сохранились на самом краю Солнечной системы. Время от времени, опять-таки под действием случайных возмущений, кометы меняют свою орбиту и проникают вглубь Солнечной системы. При этом часть из них снова надолго уходят из области планет, а часть захватываются полями планет-гигантов и переходят на эллиптические орбиты. Примерно четыре новые кометы наблюдаются каждый год. В 1999 году одна из комет была притянута полем Юпитера и упала на эту планету. Приближаясь к Солнцу, твердое вещество кометы начинает испаряться, образуя хвосты длиной свыше миллиона километров (рис.72). Кометы часто имеют несколько хвостов. Один из них состоит в основном из нейтрального газа, который отгоняется от Солнца давлением солнечного излучения. Другой состоит из ионов, которые отгоняются от Солнца давлением магнитного поля солнечного ветра. Третий хвост образуют пылинки. Как бы кометы ни двигались, их хвосты направлены прочь от Солнца.

Солнечный свет, отражаясь от хвостов, создает феерическую картину на небе, которая так страшила людей в прошлом. Наиболее знаменита комета Галлея, которая движется по эллиптической орбите и становится видимой с Земли каждые 76 лет. Когда ледяная часть вещества кометы в значительной степени испарится, ее остаток распадается на мелкие части, образуя метеорные потоки.

Метеориты. Наверное, все наблюдали падающие звезды в ясные ночи. Обычно это свечение мелких пылинок размером не более сантиметра, проникающих с большой скоростью в атмосферу из космоса и сгорающих в атмосфере. Следы пылинок, сгорающих в атмосфере, называют метеорами. Наиболее яркие метеоры называют болидами. Тела, достигшие поверхности Земли, называют метеоритами. На Землю каждый год падают сотни тонн метеоритного вещества.

Имеются два источника метеоритов. Во-первых, это остатки комет. Они рассеяны вдоль исходной орбиты кометы и попадают на Землю в виде так называемых метеорных дождей, когда Земля пересекает орбиту кометы. Во-вторых, это мелкие остатки протопланетного облака. Некоторые из них приходят из Пояса астероидов, изменяя свою орбиту под действием притяжения планет. Поверхность Земли в значительной степени защищена

атмосферой от падения крупных метеоритов. Известны всего около 150 крупных кратеров, возникших при падении метеоритов. Один из них находится в США, в Аризоне.

Огромные пожары в тайге, поваленный лес на сорок километров вокруг и звук, слышимый на сотни километров, были следствием падения так называемого Тунгусского метеорита. Однако никаких остатков метеоритного тела не было найдено. Возможно, это был ледяной остаток кометы, который испарился в полете, но создал ударную волну огромной силы. Не исключено, однако, что это был необычно сильный электрический разряд (типа молнии), спровоцированный падением крупного болида, который разрушился в атмосфере на высоте 5–7 км.

Пылинки, выброшенные из планет при столкновениях с астероидами или в результате мощных извержений вулканов, могут переносить органические молекулы, а также простейшие микроорганизмы, если таковые существуют на планете. Опыты показали, что некоторые одноклеточные организмы могут выдерживать условия межпланетного пространства довольно долгое время.

Покинем теперь Солнечную систему и отправимся к звездам, но по дороге мы встретим не пустоту, а сложную и разнообразную межзвездную среду.

ЗВЕЗДЫ

Межзвездная среда

Основной составляющей межзвездной среды, как и всей нашей Вселенной, является водород. Межзвездная среда очень неоднородна. Молекулы водорода сконцентрированы в гигантских молекулярных облаках диаметром около ста световых лет и массой около трех миллионов масс Солнца. Их температура в нашей галактике составляет в среднем минус 260 °С, причем в одном кубическом сантиметре содержится около тысячи молекул. Облака атомарного водорода с температурой минус 150 °С и концентрацией 20 см^{-3} окружены теплой межоблачной средой с температурой около десяти тысяч градусов и концентрацией $0,2 \text{ см}^{-3}$. Горячие области сосредоточены в основном вблизи звезд, которые ионизируют газ своим ультрафиолетовым излучением. Самый горячий газ, с температурой порядка 10^6 К , остался от взрывов массивных звезд – сверхновых. Он очень разреженный, но заполняет почти половину Галактики.

Фаза	Температура, К	Плотность, см^{-3}	Доля объема в Галактике, %
Горячая	10^6	$3 \cdot 10^{-3}$	40 ± 25
Теплая	8000	0,25	50
Прохладная	80	40	3
Холодная	10	300	1

Основные области межзвездного газа

Межзвездная среда заполнена излучением, начиная от микроволнового и кончая гамма-излучением с высокой энергией. Не только звезды являются источником излучения, но и газ, и плазма межзвездной среды. Имеется также излучение, которое сохранилось с самых ранних стадий развития нашей Вселенной. Наряду с атомами, молекулами и ионами водорода в межзвездной среде имеются сложные молекулы, причем как

двухатомные, так и многоатомные. Концентрация таких молекул очень мала — всего одна десятиллионная от количества водорода. Хотя этих молекул очень мало, их излучение иногда бывает вполне заметным. Сложный характер энергетических уровней таких молекул и широкий спектр длин волн излучений, распространяющихся в межзвездной среде, создают благоприятные условия для квантовых переходов того типа, который лежит в основе лазеров. Такое излучения межзвездных молекул в микроволновом диапазоне длин волн называется мазерным излучением.

Еще один компонент межзвездной среды это межзвездная пыль. Пылинки образуются в атмосферах холодных звезд, а также в результате химических реакций в межзвездной среде. Больше всего пылинок в сравнительно холодных облаках нейтрального газа. Пылинки имеют сложный состав. Они могут содержать силикаты, грязные льдинки, железо и т.д. По размеру пылинки не больше микрона, однако именно они ответственны за поглощение света звезд и, тем самым, за непрозрачность отдельных областей межзвездной среды. Есть целые участки неба, где поглощение не позволяет видеть удаленные звезды. Эти области носят название «угольных мешков». Такие «мешки» заслоняют от нас центральную область Галактики.

Расширяющиеся оболочки горячих звезд, которые ионизованы излучением этих звезд, образуют так называемые планетарные туманности. Скорость их расширения порядка 20 км/с, размеры около одной световой недели.

Для межзвездной среды характерны интенсивные турбулентные движения разных масштабов. В среднем скорость движения составляет 8–15 км/с. Однако во многих случаях скорость оказывается сверхзвуковой, что ведет к появлению ударных волн различной протяженности. Энергия этих движений поступает в среду от взрывов сверхновых звезд, а также от сильных звездных ветров молодых и горячих звезд.

Наряду с более или менее регулярным магнитным полем Галактики в межзвездной среде существуют мелкомасштабные поля, которые сильно влияют на движение межзвездной плазмы. На магнитных полях, которые сжаты и усилены ударными волнами, происходит рассеяние и ускорение протонов и электронов окружающей плазмы.

Межзвездная среда имеет наибольшую среднюю плотность там же, где в основном сосредоточены звезды. Это, конечно, не случайно. Именно из межзвездной среды образуются звезды.

А межзвездную среду пронизывают космические лучи.

Космические лучи

Даже вдали от медицинских рентгеновских аппаратов и радиоактивных веществ человек непрерывно облучается потоком быстрых частиц, идущих с неба. Это космические лучи. Они состоят в основном из протонов с очень большой энергией, а также из небольшого количества быстрых ядер гелия и электронов, хотя встречаются и более тяжелые ядра. На каждый квадратный сантиметр земной атмосферы падает из космоса в среднем один протон в секунду.

Космические лучи оказывают большое влияние на эволюцию живых существ. Пронизывая организм, они вызывают мутации, т.е. такие изменения, которые передаются потомкам.

Космические протоны обладают огромной кинетической энергией. В интервале энергий от 10^{10} до 10^{14} эВ их интенсивность падает с увеличением энергии пропорционально энергии в степени 2,7. В интервале $10^{14} - 10^{15}$ эВ имеется небольшой избыток космических лучей, который, по-видимому, возник из-за вспышки сверхновой поблизости (по астрономическим масштабам) от Солнечной системы. Затем интенсивность падает как энергия в третьей степени вплоть до энергий $10^{18} - 10^{20}$ эВ. Основной вклад

в состав космических лучей дают протоны с энергией от нескольких десятков миллионов до нескольких десятков миллиардов электровольт. Число электронов с такой же энергией составляет не более одного процента от числа протонов.

Космические лучи, проникая в атмосферу и сталкиваясь с молекулами воздуха, порождают «ливни» различных частиц (рис.73). Магнитное поле Земли в значительной мере защищает нас от мягких космических лучей — они отклоняются этим полем и не попадают на поверхность Земли.

Ускорение протонов до скоростей, близких к скорости света, происходит в основном при рассеянии на магнитных

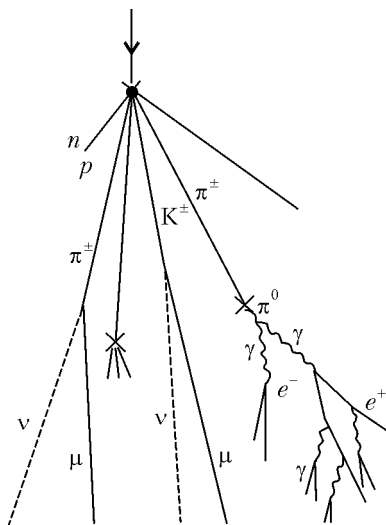


Рис.73. Схема возникновения ливня из различных частиц при столкновении протона космических лучей с молекулой воздуха

полях ударных волн, которые возникают при взрывах сверхновых, а также на границах звездных ветров в межзвездном пространстве. Как мы уже отмечали, электрический ток и соответствующее ему магнитное поле «вморожены» в плазму. Протоны не могут двигаться поперек поля и отражаются от неоднородностей магнитного поля на фронте ударной волны. При этом они получают энергию, подобно тому как получает энергию мячик при лобовом столкновении с мчащимся автомобилем. Те протоны, которые, отражаясь и многократно рассеиваясь в окружающей плазме, снова и снова возвращаются к ударной волне, могут очень сильно увеличить свою энергию. Таких протонов, конечно, немного — всего одна миллиардная доля от общей концентрации протонов межзвездной плазмы, но их энергия может достигать очень большого значения. В среднем кинетическая энергия одного протона космических лучей составляет около одного миллиарда электронвольт. Скорость протона с такой энергией равна 0,88 скорости света.

Частицы могут ускоряться не только на магнитных полях ударных волн, но также на хаотических магнитных полях межзвездной среды. Картина похожа на ту, которую можно наблюдать в газе, состоящем из крупных и мелких частиц. Крупные частицы будут передавать свою энергию мелким при столкновении с ними, пока средняя энергия всех частиц не станет одинаковой. Это означает, что скорость мелких частиц будет много больше, чем крупных. Магнитные поля, переносимые движениями плазмы, отклоняют заряженные частицы, передавая им при этом часть своей энергии. Наибольшая наблюдаемая энергия космической частицы достигает $10^{20} - 10^{21}$ эВ. Такую энергию имеет, например, свинцовая пуля массой 0,5 г, выпущенная из ружья со скоростью 800 м/с. Неясно, как возникают такие частицы. Согласно одной из гипотез, такие энергии могут быть получены протонами в магнитных полях в окрестности быстро вращающейся черной дыры.

Хотя концентрация частиц космических лучей в нашей Галактике всего 10^{-10} см⁻³, т.е. в миллиард раз меньше, чем средняя концентрация частиц межзвездной среды, общая энергия космических лучей велика, а их давление равно давлению газа и плазмы в Галактике.

Почему зажигаются звезды

При сжатии протозвездного облака, т.е., по сути, при падении наружных слоев к центру, выделяется гравитационная энергия. Это приводит к первоначальному нагреву и образо-

ванию звезды. Если сжимающаяся масса достаточно велика, чтобы температура внутри достигла нескольких миллионов градусов, то начинаются термоядерные реакции. Для начала реакции надо, чтобы протоны приобрели достаточную энергию, смогли преодолеть взаимное электрическое отталкивание и сблизиться на малое расстояние (около 10^{-13} см), где ядерные силы становятся больше электрических, что позволяет протонам объединиться. Самой первой начинается реакция превращения водорода в гелий, когда при столкновении протонов (ядер водорода) образуется ядро гелия. Эта реакция начинается при температуре в семь миллионов градусов. При несколько более высокой температуре, в десять–пятнадцать миллионов градусов (все зависит от плотности вещества), начинается также углеродно-азотно-кислородный цикл. В этом цикле в результате столкновения с участием ядер углерода, азота и кислорода опять-таки исчезают четыре протона и появляется ядро гелия. Если температура еще выше, то более тяжелые ядра последовательно объединяются в еще более тяжелые с выделением энергии в виде гамма-квантов, а также в виде кинетической энергии образовавшихся ядер. Термоядерные реакции полностью прекращаются, когда образуются ядра железа. Для образования ядер тяжелее железа пришлось бы затратить, а не получить энергию. Дело в том, что в тяжелых ядрах электрическое отталкивание почти уравнивает ядерные силы притяжения, и такие ядра могут самопроизвольно распасться, особенно при столкновениях. Все тяжелые ядра образуются в звездах и выбрасываются оттуда при взрывах звезд. Почти все элементы, из которых состоит человек, когда-то были образованы в звездах.

Какие бывают звезды

В нашей галактике имеется около миллиона миллионов звезд. Несмотря на то что массы звезд отличаются друг от друга не более чем в тысячу раз, их светимости, температуры и размеры могут отличаться во много тысяч раз (рис.74). Наиболее массивные звезды лишь в 50–100 раз больше Солнца по массе, но ярче его в 10000 раз и крупнее в 100 раз. Самая яркая звезда LBV 1806-20 в 50 миллионов раз ярче Солнца. Есть одиночные звезды, подобные нашему Солнцу, но не менее половины всех звезд входят в состав двойных или даже кратных систем. Двойные звезды – это системы из двух отдельных звезд, которые связаны полем тяготения и обращаются вокруг общего центра масс. Эти звезды порой сильно влияют друг на друга своими гравитационными полями, вызывая огромные приливы,

изменяя собственное вращение и орбитальное движение. Кроме того, во многих случаях вещество с поверхности одной из звезд может перетекать на другую.

В настоящее время удалось наблюдать планеты, принадлежащие звездам различных типов. Наличие планет возле звезд, по-видимому, является скорее правилом, чем исключением. Планеты отличаются от звезд своей массой, которая слишком мала для начала ядерной реакции. Планеты возникают из того же протозвездного облака, из которого образовалась звезда.

Свойства и развитие одиночных звезд во многом отличаются от звезд в двойных системах. Начнем с рассмотрения звезд-одиночек.

Все звезды возникают при гравитационном сжатии межзвездного вещества. Как и в случае Солнца, небольшие случайные сгущения начинают расти под действием сил тяготения, пока не исчерпается вещество в ближайшем окружении или пока данное сгущение не будет разорвано притяжением соседних сгущений. В нашей галактике в год появляются примерно десять новорожденных звезд. Кроме сил гравитации, в межзвездной среде действуют магнитные силы. (Возможные процессы, ведущие к появлению магнитного поля, будут рассмотрены в семнадцатой главе.) Принимая, что магнитное поле уже имеется, можно, во-первых, сказать, что оно будет способствовать образованию протозвездного сгущения, так как в области случайного изгиба магнитных линий будут концентрироваться ионы, т.е. будет возникать локальное увеличение массы. Во-вторых, магнитное поле, как и в случае протопланетного облака, может передать часть углового момента соседним областям межзвездной среды, уменьшив, тем самым, скорость вращения внутренней области. С увеличением плотности протозвездного облака уменьшается степень его ионизации, электропроводность падает, и магнитная связь с окружающей средой прекращается. В процессе сжатия центральной части протозвездного облака она разогревается все больше и больше и, наконец, превращается в звезду. Дальнейшая судьба звезды зависит от ее массы. Следует сразу отметить, что зависимость эволюции звезды от ее массы все же приближительная. Она определяется составом звезды и влиянием соседних звезд. В процессе эволюции данная звезда может сбросить или приобрести какую-то массу. Рассмотрим несколько отдельных случаев.

1) Если масса звезды в несколько раз меньше, чем у Солнца, то температура даже в самом центре не достигнет величины, необходимой для начала ядерных реакций с участием самого

распространенного легкого изотопа водорода. В этом случае возникающая звезда будет излучать свет в основном в красной и инфракрасной областях спектра, постепенно остывать, превращаясь в так называемый коричневый карлик с массой в среднем около 50 масс Юпитера, пока, через несколько миллиардов лет, не погаснет совсем. Коричневый карлик светит в основном за счет гравитационной энергии, которая переходит в тепловую энергию при сжатии звезды в процессе ее образования из протозвездного облака.

2) Если масса звезды раза в три меньше, чем у Солнца, то в центре звезды температура достигает девяти миллионов градусов, что достаточно для начала термоядерной реакции синтеза гелия из водорода. Такая звезда будет красным карликом. В центральной области этого карлика перенос энергии осуществляется излучением, а в наружных областях – конвекцией. В звездах с массой меньше, чем одна треть солнечной массы, лучистое ядро вообще не возникает.

3) Если масса звезды близка к массе Солнца, а таких звезд в нашей галактике несколько миллиардов, то температура в центре достигает пятнадцати миллионов градусов, и там возможны реакции превращения водорода в гелий как при непосредственном взаимодействии протонов друг с другом, так и в углеродно-азотном цикле. Цвет звезды будет желтым. Когда водород почти весь выгорает, центральная часть начинает сжиматься, и температура ее увеличивается, достигая сорока миллионов градусов. Но этого еще недостаточно для начала так называемой тройной гелиевой реакции. Сжатие остановится, когда все электроны во внутренней части звезды займут все доступные для них уровни энергии и дальнейшее сжатие станет невозможным. Наружные же области звезды, нагретые горячим ядром, начнут расширяться, но температура их будет падать, и звезда станет красным гигантом. Этот гигант поглотит ближайшие планеты, если такие имеются. По сути дела, красный гигант это белый карлик, окруженный обширной конвективной оболочкой, на внутренней границе которой возможны термоядерные реакции. В конце концов наружные части уйдут и рассеются в пространстве, и останется только ядро звезды – белый карлик. Именно такой будет судьба нашего Солнца через несколько миллиардов лет.

4) Если звезда в десять раз массивнее Солнца, то ее радиус будет в три с половиной раза больше, чем у Солнца. Температура в центре составит двадцать семь миллионов градусов, на поверхности – двадцать пять тысяч градусов, а светимость будет в три тысячи раз больше, чем у Солнца. Основным источником энер-

гии будет углеродно-азотный цикл. В центральной части такой звезды излучение не справляется с переносом энергии, и перенос энергии осуществляется конвекцией. Звезды с массой от одной до десяти масс Солнца в конце концов превращаются в белые карлики.

5) Внутри еще более массивных звезд вступают в термоядерную реакции более тяжелые элементы, пока не образуется железо, которое, как мы уже знаем, является наиболее устойчивым элементом. Эти звезды относятся к классу голубых гигантов. Типичная температура на поверхности равна 25–75 тысяч градусов. Голубые гиганты быстро расходуют свое горючее, и время их жизни, по звездным масштабам, сравнительно невелико. Такая звезда взрывается как сверхновая, а остаток превращается в нейтронную звезду или в черную дыру.

В конце концов все звезды перестают излучать, когда все виды горючего, доступного для звезд данной массы, уже исчерпаны и исчерпано также тепло, запасенное в активный период жизни звезды.

Звезды разделены огромными расстояниями, поэтому столкновения звезд очень редки. При лобовых столкновениях обычных звезд они либо разрушаются и превращаются в туманность (при большой скорости столкновения), либо сливаются и объединяются в единую звезду. Если столкновение не лобовое, то звезды могут образовать двойную систему (рис.75). При столкновениях белого карлика с красным гигантом разрушается красный гигант, а белый карлик уходит (рис.76). Наиболее грандиозная вспышка происходит, когда черная дыра разрывает, а затем поглощает звезду.

Изменение массы звезды может изменить характер протекающих там ядерных реакций. Реакции могут возникнуть не только внутри, но и на поверхности горячей звезды, если туда попадет достаточное количество водорода от соседней звезды. Именно это происходит при вспышках так называемых новых звезд.

Колебания звезд

Имеется целый ряд звезд, яркость которых периодически изменяется. Среди них наиболее интересны так называемые цефеиды (рис.77). Причина колебаний яркости цефеид следующая. Температура всех звезд падает по направлению к поверхности, и степень ионизации атомов уменьшается. В частности, в цефеидах меняется степень ионизации гелия, температура ионизации которого 40000 К. Началом процесса может

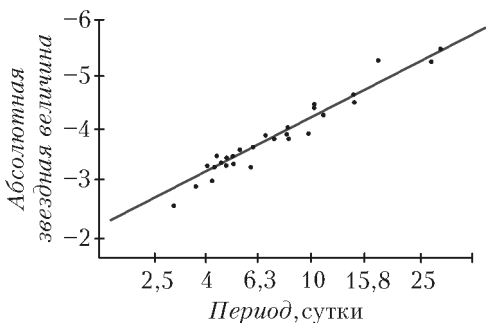


Рис.77. Зависимость абсолютной звездной величины цефеид от периода колебаний их блеска. Точками обозначены данные наблюдений для ряда звезд

служить небольшое увеличение потока энергии из недр звезды, что ведет к дополнительному нагреванию верхних слоев звезды. Эти слои расширяются, плотность их уменьшается, и уменьшается поглощение энергии, которая идет из глубины. Ионы гелия захватывают электроны, превращаясь в атомы гелия. Газ становится

прозрачным, и выделяющаяся энергия в виде излучения уходит наружу. Вещество охлаждается, давление уменьшается, и под действием тяготения верхние слои звезды сжимаются. Это снова ведет к нагреву, ионизации гелия и увеличению числа свободных электронов и ионов. Газ (точнее – плазма) становится менее прозрачным и активно поглощает идущее снизу излучение, давление увеличивается, оболочка звезды снова расширяется, и процесс повторяется. Теперь можно забыть о первоначальном толчке. Процесс будет сам себя поддерживать. Конечно, такой режим возможен далеко не всегда. Для этого надо, чтобы периоды изменения скорости ионизации были близки к периодам, которые необходимы для нагрева и изменения плотности вещества звезды. Именно такие условия существуют у цефеид.

Период колебаний зависит от массы звезды и, тем самым, от ее истинной яркости (т.е. светимости). Чем дальше от нас звезда, тем меньше ее наблюдаемая яркость. Сравнивая яркость, которая должна быть для звезды с данным периодом, с наблюдаемой яркостью, можно определить расстояние до звезды.

Пятнистые звезды

Среди молодых горячих звезд имеются звезды, поверхность которых химически неоднородна. Это звезды класса Ар. На поверхности этих звезд имеются обширные пятна, где обилие разных химических элементов, в частности гелия, сильно отличается от обилия этих же элементов в соседних областях звезды. Кроме того, такие звезды обладают сильным магнитным полем, которое много сильнее, чем поле подобных звезд класса

А, но не имеющих пятен. Надо сказать, что до сих пор нет ясного понимания, в чем здесь дело. Хотя магнитное поле препятствует перемешиванию вещества и у поверхности этих звезд нет заметной конвекции, все же непонятно, как такие пятна возникли и почему они долго существуют. Следует все же отметить, что такие химические неоднородности могут работать подобно карманной батарее, создавая электрический ток и связанное с ним локальное магнитное поле.

Белые карлики

Белые карлики это конечная стадия эволюции многих звезд. Размер их мал – радиус в сто раз меньше, чем радиус Солнца, но плотность огромна: объем величиной в коробок спичек весит несколько тонн. Плотность белых карликов столь велика, что электроны внутри звезды занимают все нижние разрешенные уровни энергии. Напомним, что импульс, а значит, и энергия электронов увеличиваются при уменьшении объема, который они занимают. Это препятствует сжатию белого карлика. Только в том случае если масса очень велика, сжатие может продолжаться путем поглощения электронов протонами, что приводит к возникновению нейтронной звезды. Типичные магнитные поля белых карликов находятся в интервале от 10^3 до 10^7 гауссов.

Белые карлики светятся ярко, но не за счет ядерных реакций внутри, а за счет тепла, запасенного в недрах, хотя в отдельных случаях термоядерные реакции продолжаются и в тонком слое на небольшой глубине. Тепла, запасенного в недрах, достаточно, чтобы светить миллиарды лет. Типичные температуры поверхности от 15000 до 50000 градусов. Цвет белых карликов вовсе не всегда белый. Они могут быть красными, желтыми или белыми – в зависимости от температуры поверхности.

«Новые» звезды вовсе не новые

Явление, которое астрономы называют «новой» звездой, это яркая вспышка обычно слабой, но уже известной звезды. Дело в том, что все эти звезды входят в состав системы из двух звезд. Одна из этих звезд – белый карлик, а другая – красный гигант. Вещество из оболочки гиганта под действием притяжения горячего белого карлика перетекает на этот карлик, и при достижении некоторой критической массы на поверхности карлика начинается термоядерная реакция превращения водорода в гелий. При этом очень быстро возрастает температура,

происходит термоядерная вспышка, вещество выбрасывается, и мы видим яркую «новую» звезду. Такой процесс может повторяться неоднократно.

Сверхновые звезды

В 1054 году китайские ученые, которые тогда были далеко впереди европейцев, отметили появление очень яркой звезды – теперь ее называют сверхновой. В настоящее время подобные вспышки наблюдались неоднократно как в нашей, так и в соседних галактиках. Эти вспышки во много раз ярче вспышек «новых» звезд и имеют совсем другую природу.

По-видимому, сверхновые возникают при эволюции красных гигантов. Мы уже отмечали, что при достаточно большой массе звезды термоядерные реакции приводят к образованию тяжелых элементов, вплоть до железа. При прекращении этих реакций ослабевают и тепловое движение, которое уже не может противостоять тяготению. Внутренность звезды начинает сжиматься, причем под тяжестью наружных слоев это сжатие происходит почти со скоростью свободного падения. Внутри возникает газ вырожденных электронов, но даже они не в силах удержать эту тяжесть. Гравитационная энергия падения наружных слоев увеличивает температуру и плотность ядра. Когда температура достигает $5 \cdot 10^9$ градусов, а плотность возрастает до 10^{10} г/см³, протоны начнут поглощать электроны и, испуская нейтрино, превращаться в нейтроны. Нейтроны будут занимать все доступные для них нижние энергетические уровни, и ядро звезды станет подобным гигантскому атомному ядру, состоящему в основном из нейтронов. Падение внешних слоев уже не сможет сжать такое ядро. Энергия падения очень велика, и, натолкнувшись на почти непреодолимое препятствие, эти слои отразятся и отскочат, как мячик, в окружающее пространство. Это будет выглядеть как колоссальный взрыв и появление сверхновой звезды. При этом выделится около 10^{51} эрг энергии. В максимуме блеска сверхновая звезда излучает, как миллиард Солнц, т.е. как некрупная галактика.

Излучение взрыва сверхновой покрывает весь диапазон от радио- до гамма-лучей. Так называемые гамма-всплески, по-видимому, также возникают при этих взрывах (рис.78). Остатки выброшенной оболочки образуют небольшую туманность, которая расширяется со скоростью в несколько тысяч километров в секунду, образуя ударную волну на фронте. В конце концов туманность рассеивается в пространстве и исчезает, а оставшееся ядро становится нейтронной звездой (рис.79).

Появление сверхновых в крупной галактике наблюдается в среднем каждые 30–50 лет. Существуют два основных типа сверхновых: SN I и SN II. По-видимому, их отличие связано, в первую очередь, с отличием в составе этих звезд. В частности, в спектрах SN II наблюдается водород, которого нет в SN I.

Нейтронные звезды

Радиус нейтронной звезды всего около десяти километров, а масса лишь вдвое меньше массы Солнца. Плотность вещества в центре звезды достигает тысячи миллионов миллиардов граммов в кубическом сантиметре (10^{15} г/см³). Звезда, сжимаясь, должна сохранять свой момент импульса, т.е. должна вращаться все быстрее и быстрее. Нейтронная звезда, возникшая в процессе сжатия центральных областей при взрыве сверхновой звезды, должна вращаться исключительно быстро. И действительно, периоды вращения нейтронных звезд простираются от нескольких секунд до тысячных долей секунды. Хотя возможность существования нейтронных звезд была давно предсказана советским ученым Львом Ландау, они были открыты совершенно случайно. Наблюдения над слабой звездочкой, которая находилась на месте остатка взрыва сверхновой, показали, что излучение этой звездочки периодически изменяется, причем период сохраняется с высочайшей точностью. Наблюдатели даже сначала подумали, что это сигналы внеземной цивилизации, и опубликовали свои результаты только тогда, когда обнаружили еще несколько подобных звезд. Вопрос окончательно прояснился, когда было измерено магнитное поле этих объектов. Оно оказалось безумно большим, а именно – тысячи миллиардов гауссов. Магнитное поле такой звезды вытягивает в нитку электронные оболочки атомов. Это поле имеет дипольный характер. Напомним, что самое сильное поле, которое удалось получить на Земле, это всего несколько тысяч гауссов. У большинства нейтронных звезд поле не превышает 10^{12} гауссов. Максимальное же поле, которое наблюдалось, достигало 10^{15} гауссов. Такие звезды называются магнитарами. Их поле столь сильно, что приводит к поляризации вакуума вокруг звезды.

Вращающийся магнит излучает электромагнитные волны. Электроны при движении в магнитном поле также излучают электромагнитные волны и дают свой вклад в общее излучение звезды. Излучение нейтронной звезды идет в основном из областей у полюсов магнитного диполя. Направление оси магнитного диполя далеко не всегда совпадает с осью вращения.

Излучение можно обнаружить только в то время, когда при вращении нейтронной звезды ось диполя направлена в сторону Земли. Поэтому наблюдаемое излучение, подобно маяку, пульсирует с периодом, равным периоду вращения нейтронной звезды. Такие нейтронные звезды называют пульсарами (рис.80). Конечно, не во всех случаях ось магнитного поля совпадает с лучом зрения. Поэтому пульсары обнаружены только в некоторых остатках сверхновых. Потеря энергии при интенсивном излучении замедляет вращение нейтронной звезды. Более старые нейтронные звезды вращаются медленнее, чем молодые.

Если какое-либо вещество падает на поверхность нейтронной звезды, то скорость падения оказывается близкой к скорости света. Нейтронные звезды входят в состав двойных систем столь же часто, как и все остальные звезды, поэтому вещество, перетекающее на нейтронную звезду в тесной двойной системе, выделяет огромную энергию (рис.81). Излучение различных нейтронных звезд простирается от радио-диапазона до рентгеновского – в зависимости от того, каков возраст звезды и входит ли она в двойную систему.

Под самой поверхностью нейтронной звезды, где плотность еще не слишком велика, существует обычная плазма из ионов и электронов. В более глубоких слоях плазма становится твердой, образуя кристалл. Высокая плотность приводит к вырождению электронов. При еще большей плотности протоны поглощают электроны, превращаясь в нейтроны. Эти нейтроны также становятся вырожденными. В нейтронной среде появляются нейтронные пары, подобные парам электронов в сверхпроводнике, и среда становится сверхтекучей. Там остается небольшое число протонов, которые также создают пары, и среда оказывается сверхпроводящей. Электроны при этом не объединяются в пары. Вращение нейтронной звезды приводит к образованию нитевидных вихрей в сверхтекучей жидкости, внутри которых условия сверхтекучести и сверхпроводимости нарушаются. Это создает небольшую вязкость и сопротивление электрическому току. В самом центре звезды, где температура достигает миллиарда градусов, а плотность составляет 10^{15} г/см³, вещество, возможно, состоит из кварков, глюонов и пи-мезонов.

Черные дыры

Масса звезды может быть столь велика, что даже давление вырожденной нейтронной среды не спасает ее от дальнейшего сжатия. В конце концов она сжимается до такого объема, что тяготение не позволяет даже свету покинуть ее поверхность. Луч

света пойдет по кривой траектории, огибая звезду, но не покидая ее. Хотя никакое излучение не может покинуть поверхность черной дыры (этим и определяется размер дыры), не следует думать, что дыра на самом деле невидима. Если какая-либо звезда окажется вблизи дыры, она будет разорвана тяготением, прежде чем поглотится дырой, и можно будет увидеть свет от такого события. Газовые потоки, которые втягиваются в дыру, сталкиваются друг с другом, что также ведет к излучению на разных частотах. Конечно, во всех случаях мы можем увидеть не саму дыру, а только ее окрестность (рис.82).

Черные дыры разрушают все, что приближается к ним. Недавно удалось наблюдать вспышку, которая возникла, когда черная дыра всего за несколько часов разорвала звезду, приближающуюся к ней под действием гравитационного поля этой дыры и поля соседних звезд.

Хотя плохая репутация дыр вполне ими заслужена, они иногда приносят и пользу – привлекая своим полем вещество даже из далекой окрестности, способствуют образованию звезд.

В сильном гравитационном поле вблизи дыры время течет медленно. Поэтому длина волны излучения из области близ дыры будет тем больше, чем ближе к дыре оно возникает. Если какой-то объект, падая на дыру, станет подавать сигналы, то это не поможет нам увидеть, как он достигнет дыры. Интервал между сигналами будет становиться все длиннее, и последних сигналов мы никогда не увидим. Вот почему никакие наблюдения внутренности дыры невозможны. Вещество, приближаясь к дыре, будет разорвано на все более мелкие части, вплоть до элементарных частиц. Внутри дыры почти совершенно пустая, так как все вещество сосредоточено в центре. Граница дыры это поверхность, где тяготение, создаваемое ее центром, столь велико, что даже свет не может ее пересечь.

Дыра не будет совсем невидима даже в том случае, если на нее вовсе не падает вещество. Чтобы понять, в чем здесь дело, вспомним некоторые результаты квантовой теории, о которых мы говорили в шестой главе. Гравитационное поле у поверхности дыры очень сильное. Плотность энергии этого поля достаточно велика, чтобы породить пару электрон-позитрон (закон сохранения заряда требует обязательного рождения пары). Пара электрон-позитрон может сама по себе появиться в вакууме на время не больше чем $\Delta t = \hbar / (2mc^2)$. За это время частицы не могут удалиться друг от друга на расстояние больше чем $2 \cdot 10^{-11}$ см. Тем не менее, даже на столь малом расстоянии разница сил

тяготения вблизи дыры достаточно велика, чтобы вырвать эти частицы из вакуума и превратить в реальные частицы.

Энергия, которая необходима для рождения пары электрон-позитрон, берется из энергии дыры. Возможно, что обе частицы упадут на дыру, и, тем самым, ее энергия не изменится. Но может случиться, что только одна из частиц будет падать к дыре, а импульс второй будет достаточен, чтобы преодолеть тяготение и покинуть окрестность дыры. Энергия этой частицы отнимет какую-то долю энергии дыры, т.е. дыра будет «испаряться». Количественный расчет показывает, что дыра излучает энергию, как нагретое абсолютно черное тело. Масса дыры будет расти, пока поблизости есть вещество, которое может быть захвачено дырой. В то же время дыра будет терять энергию, а значит и массу, в виде частиц, рождаемых у поверхности и покидающих окрестность дыры. Расчет показывает, что уменьшение массы дыры происходит исключительно медленно и только самые мелкие дыры могли уже испариться за время жизни Вселенной.

Увеличение гравитационного поля по мере сжатия вещества влияет на состояние вакуума. Это может привести к тому, что при определенных темпах сжатия дыра вовсе не образуется, а возникнет так называемая черная звезда, которая почти не излучает.

Частицы, поглощаемые дырой, обладают целым набором различных свойств, иными словами – содержат большой объем информации. Исчезают ли все следы этих свойств, когда частица поглощается дырой? Проявляются ли опять эти свойства, когда дыра испаряется и исчезает? На эти вопросы пока нет окончательного ответа.

КАК ВОЗНИКАЮТ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТ

Практически все небесные тела обладают большим или меньшим магнитным полем. Напомним, что электроны в атоме взаимодействуют с магнитным полем, в результате чего энергетические уровни атома расщепляются и, соответственно, расщепляются на несколько полосок наблюдаемые спектральные линии. Величина расщепления пропорциональна величине поля. Наблюдение этого расщепления является наиболее эффективным способом обнаружения и изучения поля.

Магнитные поля, будучи совсем разной величины, определяют многие процессы на звездах и в галактиках. Например, очень слабое поле, порядка одной миллионной доли гаусса, в значительной мере определяет движение межгалактической плазмы. Поле в тысячу миллиардов гауссов регулирует перетекание вещества на нейтронную звезду в двойной звездной системе. Наличие магнитного поля означает существование электрических токов, которые создают это поле. Как уже было много раз упомянуто, плазма является основной составляющей звезд и существенной составляющей межзвездной среды. Это определяет высокую электропроводность вещества звезд и галактик. Горячие внутренние области планет тоже хорошо проводят ток. Поэтому ток в этих телах может существовать очень долго, если он как-то возник. Ток создают электроны при их движении относительно положительных ионов плазмы. Если же какие-то участки плазмы движутся как одно целое, то ионы и электроны переносятся вместе, причем сохраняется движение электронов относительно ионов. Говорят, что электрический ток, а значит, и создаваемое этим током магнитное поле встроены в плазму. Конечно, через какое-то время электроны теряют энергию при столкновениях с ионами и атомами и ток затухает, если нет механизмов восстановления тока. Чтобы появился ток, надо затратить энергию: тепловую, химическую или любую иную.

Рассмотрим некоторые причины появления и поддержания токов. Остановимся прежде всего на возможностях возникновения токов в земных условиях.

1) Если нагреть какой-то участок проводящего ток тела, то электроны, скорость которых больше, чем у ионов, устремятся в более холодную область, создавая электрический ток.

2) Ток возникает, если давление в теле меняется не в том же направлении, в котором меняется плотность, например – вследствие вращения или химической неоднородности тела.

3) Ток появляется, если имеется направленный поток плазмы и скорость диффузии электронов отлична от скорости диффузии ионов.

4) При соприкосновении двух различных веществ возможно возникновение химической реакции, при которой освобождаются электроны и возникает электрический ток. Такой ток, например, питает электрические батарейки.

5) Если имеется хотя бы небольшое начальное магнитное поле, то оно создает ток в проводнике, который движется в этом поле. Ток в таком проводнике можно использовать для поддержания и усиления исходного магнитного поля, в котором ток возникает. Такой процесс будет усиливать как ток, так и поле за счет энергии, которая двигает проводник. Именно таким образом работает, например, динамо-машина. Поскольку подобный механизм, по-видимому, играет важную роль для звезд и галактик, мы остановимся на нем более подробно.

Чтобы механизм типа динамо-машины работал внутри звезд и галактик, необходимы сложные несимметричные движения плазмы. Такие движения существуют внутри многих небесных тел. Вращение и конвективные движения могут создать там условия, благоприятные для усиления поля механизмом, подобным работе динамо-машины. Рассмотрим какой-нибудь замкнутый контур тока в конвективной плазме вращающегося тела, где преобладают не симметричные, а либо правовинтовые, либо левовинтовые движения (рис.83). Конвективное движение рас-

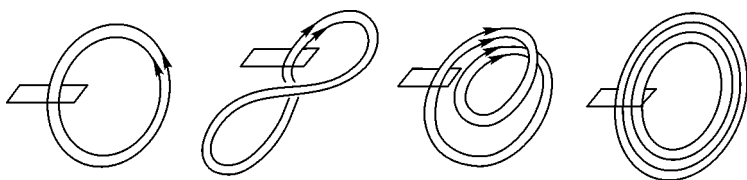


Рис.83. Схема усиления магнитного поля механизмом «динамо» в конвективной вращающейся среде

тягивает этот контур и, благодаря вращению, сворачивает его в «восьмерку». Нисходящее конвективное движение сложит «восьмерку» пополам и перезамкнет контур. В результате этих движений толщина исходной петли удвоится. Это приведет к удвоению тока и соответствующего потока магнитного поля.

Если такое удвоение повторяется многократно, то поле может достигнуть большой величины. Энергия, очевидно, берется из энергии конвективных потоков. Хотя подобные движения кажутся, на первый взгляд, очень сложными, их проявления наблюдаются на поверхности звезд и в галактиках. Причем наблюдаемые движения на поверхности звезд являются следствием конвективных потоков во внутренних областях звезд.

Циклы солнечной (и звездной) активности появляются в процессе возникновения и распада магнитных полей. Широтные течения в конвективной оболочке Солнца вытягивают линии дипольного поля вдоль широты. Точнее, увлекают вещество, в котором текут токи, создающее это поле. Всплывающее в процессе конвекции вещество увлекает поле к поверхности, образуя магнитные пятна. Меридианальные течения размывают пятна и вытягивают поле в меридианальном направлении. Это ведет к восстановлению дипольного поля, но при этом полюса меняются местами. Затем все повторяется снова. Нечто подобное происходит и в земном ядре. Это ведет к обращению полярности земного магнитного поля.

Рассмотрим теперь магнитные поля планет, величина которых установлена прямыми измерениями на космических аппаратах, посетивших окрестности этих планет.

Хотя у Меркурия, по-видимому, никогда не было достаточно большого конвективного внутреннего ядра, он имеет дипольное поле около 0,003 гаусса. Возможно, что все же имеется нетолстый жидкий слой железа, где действует динамо-процесс.

Крупномасштабного магнитного поля у Венеры не обнаружено. Возможно, это связано с очень медленным вращением Венеры вокруг своей оси – сутки Венеры равны 226 земным суткам.

У Земли имеется общее дипольное поле, величина которого на полюсах составляет 0,3 гаусса. Оно существует по крайней мере несколько миллиардов лет. В настоящее время ось поля наклонена к оси вращения Земли под углом 11° . Поле не вполне постоянно, северный полюс дрейфует в западном направлении, а величина поля немного уменьшается. В прошлом северный и южный полюса даже менялись местами, хотя такие изменения были редки и нерегулярны и происходили с интервалами от сот тысяч лет до десяти миллионов лет (рис. 84). Само изменение полярности занимало всего около десяти тысяч лет. Информацию о магнитном поле прошлых эпох извлекают, исследуя остаточную намагниченность древних горных пород, возраст которых известен из геологии. Сравнение этих данных для

разных материков подтвердило теорию о движении материковых плит по поверхности мантии Земли. Это отражает сложные процессы, идущие в земном ядре, где протекают токи, создающие земное магнитное поле. По-видимому, в земном ядре происходит конвекция и работает динамо-механизм генерации поля. Возможно также, что определенную роль играет разница температур и химического состава вдоль границы ядро-мантия. Между такими участками может возникнуть электрический ток. Имеется много теоретических работ, посвященных динамо-механизму генерации магнитного поля. Однако недостаточность знаний о внутренних областях Земли не позволяет с достоверностью описать, как именно этот механизм приводит к возникновению земного магнитного поля. Крупномасштабные искажения земного магнитного поля – так называемые магнитные аномалии – составляют 10–20% от интенсивности общего поля. Отметим, что магнитное поле Земли защищает нас от потоков космических лучей и солнечного ветра, действие которых может быть очень вредным и даже губительным для живых организмов. Поэтому периоды переполюсовки магнитного поля Земли могут быть очень опасны для жизни.

Луна не обладает крупномасштабным магнитным полем, но были обнаружены слабые локальные мелкомасштабные поля.

Марс вращается достаточно быстро, однако он не имеет заметного общего поля, хотя отдельные слабо намагниченные участки обнаружены на его поверхности. Сколько-нибудь надежных соображений о происхождении этих полей не имеется. Не совсем ясно, было или есть у Марса жидкое ядро, где мог бы работать механизм «динамо». Возможно, что локальные поля Луны и Марса возникли из-за неоднородностей температуры и состава во внутренних областях этих тел.

Быстро вращающийся Юпитер имеет дипольное поле, величина которого на полюсе около 15 гауссов, т.е. много больше, чем поле Земли. Ось диполя наклонена на $9,5^\circ$ к оси вращения. Как и в других случаях, предполагается, что движения в глубине планеты могут обеспечить динамо-механизм генерации поля.

Сатурн имеет дипольное поле величиной 0,56 гаусса, ось которого почти параллельна оси вращения планеты. Такое направление оси требует специальных предположений о внутренней структуре Сатурна, так как сами по себе осесимметричные движения не могут обеспечить динамо-эффект.

Наиболее необычно поле Урана – это дипольное поле величиной 0,22 гаусса, ось которого наклонена на 60° по отношению к оси вращения и смещена от центра планеты на 0,3 ее радиуса.

Поле Нептуна немного меньше, чем у Урана, оно достигает 0,14 гаусса.

Магнитное поле существует и в межпланетном пространстве – это поле солнечного ветра. Величина этого поля у орбиты Земли достигает 0,01 гаусса.

Наиболее разработана теория происхождения полей звезд, имеющих конвективные оболочки, где, по-видимому, существуют благоприятные условия для возникновения поля механизмом типа «динамо». У молодых горячих массивных звезд конвективный перенос тепла происходит только в центральных областях. Конвективная оболочка, если и существует, то очень тонкая. Не очень ясно, может ли поле проникнуть к поверхности из глубины. Однако поля таких звезд не малы – они могут достигать сотен и даже тысяч гауссов. Возможно, что играют роль механизмы, отличные от динамо-процессов.

Если звезды в двойных звездных системах имеют разные скорости вращения вокруг своей оси и проводимость плазмы между звездами достаточно велика, то взаимное влияние звезд может усиливать поле каждой из звезд.

Предполагается, что поля таких звезд, как белые карлики и нейтронные звезды, где нет конвективных движений, сохранились и усилились в процессе образования этих звезд при сжатии сердцевины звезды в процессе взрыва сверхновой. Токи, которые создавали сравнительно слабое (100–1000 гауссов) поле звезды до взрыва, не исчезают при взрыве. Действительно, при сжатии хорошо проводящей плазмы электрические токи не затухают. Их энергия сохраняется в меньшем объеме, а значит, сила тока увеличивается и величина магнитного поля растет. Магнитные поля белых карликов достигают величины десятков тысяч гауссов.

Как уже было упомянуто в предыдущем разделе, максимальное поле наблюдается у нейтронных звезд. У некоторых из таких звезд поле достигает фантастической величины в сто триллионов гауссов. Такую величину уже нельзя считать простым следствием усиления поля при сжатии звезды. Имеются попытки объяснить это поле динамо-механизмом при рождении нейтронной звезды в процессе взрыва сверхновой.

Магнитные поля Солнца, звезд и планет имеют, в среднем, не случайные значения, а значения, зависящие от их углового момента. Дипольный магнитный момент M пропорционален величине поля и кубу радиуса тела, а угловой момент L пропорционален угловой скорости и пятой степени радиуса. Если бы поле больше ни от чего не зависело, то наклон «прямой» на

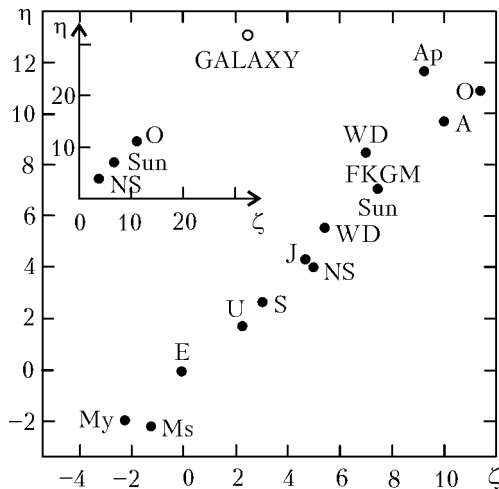


Рис.85. Зависимость логарифмов $\eta = \lg(M/M_0)$ отношений магнитных моментов M для планет и для среднего магнитного момента групп звезд, указанных на данном рисунке, к магнитному моменту Земли M_0 от соответствующих логарифмов $\zeta = \lg(L/L_0)$ отношений их угловых моментов. Обозначения: My – Меркурий, V – Венера, E – Земля, Ms – Марс, J – Юпитер, S – Сатурн, U – Уран, N – Нептун, Sun – Солнце; классы обычных звезд – A, O, F, K, G, M ; белые карлики – WD ; нейтронные звезды – NS . На рисунке даны средние значения η и ζ для звезд, относящихся к каждому классу. Разброс наблюдаемых значений внутри групп звезд данного класса достигает двух порядков величин, однако почти линейная зависимость средних значений простирается на двадцать порядков величин

рисунке 85 был бы $3/5$, вместо наклона, равного единице, который соответствует наблюдениям. Почему наблюдаемые величины не разбросаны вокруг прямой с наклоном $3/5$, а лежат на другой прямой, и почему на ту же прямую ложатся, в среднем, белые карлики и нейтронные звезды? Не ясно, имеет ли эта зависимость какое-нибудь простое объяснение или это свидетельство об общности механизмов возникновения поля.

По-видимому, во многих случаях, только механизм «динамо» может объяснить возникновение наблюдаемых магнитных полей. Однако в отдельных случаях, например для галактик, возможны и другие эффективные механизмы генерации поля.

ГАЛАКТИКИ

Структуры галактик

Звезды не равномерно разбросаны во Вселенной, а сгруппированы в отдельные острова – галактики. Все галактики это огромные звездные системы, содержащие от нескольких миллионов до сотен миллиардов звезд, межзвездный нейтральный газ, в основном водород, плазму, пыль и космические лучи. Масса большинства галактик лежит в пределах от миллиона до тысячи миллиардов масс Солнца. Звезды и межзвездная среда галактик связаны общим гравитационным полем. Все галактики обладают магнитными полями, а значит, там текут электрические токи, которые все время возникают и затухают. Пространство между галактиками очень разреженное и прозрачное для света. Расстояния между большинством галактик очень большие. Так, расстояние от нас до сравнительно недалекой галактики Андромеды составляет $2,13 \cdot 10^{24}$ см. Для таких расстояний более удобны не сантиметры, а световые года, равные $9,46 \cdot 10^{17}$ см, или парсеки, равные $3,09 \cdot 10^{18}$ см. Типичные размеры галактик – от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч световых лет. Если, например, взять масштаб, где размер земного шара равен одному миллиметру, то размер средней галактики будет равен расстоянию от Земли до Солнца.

В центральной части, по крайней мере некоторых из галактик, имеются черные дыры. Галактики образуют скопления, которые, в свою очередь, не расположены случайно, а образуют сложные структуры.

Мощность излучения средней галактики порядка 10^{43} эрг/с. Близко расположенные галактики могут обмениваться веществом и даже поглощать одна другую. Имеется три основных типа галактик: эллиптические, спиральные и неправильные. Название «спиральные галактики» связано с тем, что молодые яркие звезды и газ сосредоточены там в основном в «рукавах», которые имеют вид светящейся спиральной структуры (рис.86, 87). В эллиптических галактиках газ в основном израсходован на образование звезд, и доля старых звезд там выше, чем в галактиках других типов. Масса газа в эллиптических галактиках составляет около 0,1% от массы звезд, в спиральных галак-

тиках – до 15%, а в неправильных галактиках – 30%–50% . Число звезд и плотность межзвездного вещества велики в центральной плоскости – диске спиральной галактики. Скопления звезд часто возникают вблизи центра галактик, именно там, где, по-видимому, имеются черные дыры. Кроме того, шаровые скопления, в основном старых звезд, наблюдаются на периферии спиральных галактик.

Галактики разбросаны неравномерно. Обычно они образуют скопления, которые, в свою очередь, входят в состав сверхскоплений (см. таблицу).

	Средняя масса, в массах Солнца (M_{\odot})	Размер, в парсеках (пк)
Галактика	$10^{10} M_{\odot}$	10^4 пак
Скопление	$(50-300) \cdot 10^{10} M_{\odot}$	10^6 пак
Сверхскопление	$1500 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	10^7 пак
Вселенная	$6 \cdot 10^9 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$4 \cdot 10^9$ пак

Млечный Путь

Галактика, где находится наша Солнечная система, принадлежит к числу крупных спиральных галактик (рис.88). Основная часть звезд и, тем самым, основная часть массы нашей галактики, сосредоточена в области, называемой диском, радиусом около 16 тысяч парсек и толщиной около пятисот парсек. Диск окружает сферическая гораздо более разреженная область, называемая гало. Наша галактика содержит $2 \cdot 10^{11}$ звезд. Наиболее яркая область звездного диска видна на небе, как Млечный Путь. Газа в нашей галактике примерно в сто раз больше по массе, чем пыли, однако даже этого количества пыли достаточно, чтобы заслонить от нас центральную область Галактики. Вблизи плоскости диска газово-пылевой слой наиболее плотный. Там расположены молодые горячие звезды, скопления звезд, облака нагретого водорода и горячие ионизованные области. Возраст звезд в этой области обычно меньше миллиарда лет, а некоторым из них меньше ста миллионов лет, хотя там же находится наше Солнце, возраст которого пять миллиардов лет. Как в диске, так и в гало имеются шаровые скопления звезд с полной массой в десятки тысяч масс Солнца. Звезды в шаровых скоплениях обычно очень старые – возраста 12–13 миллиардов лет. Оказалось, что химический состав звезд, который определяется по их спектрам, разный у молодых и у старых звезд. У старых звезд

гораздо меньше элементов тяжелее водорода и гелия. Дело в том, что молодые звезды возникли из вещества, выброшенного из недр звезд первого поколения, которые обогатили межзвездную среду тяжелыми элементами.

Если бы мы могли посмотреть снаружи на диск нашей галактики, мы увидели бы хорошо выраженный спиральный узор, образованный сравнительно плотной межзвездной средой и большим числом звезд, чем в областях между спиралями. Вся Галактика вращается, но скорость вращения разная на разных расстояниях от центра. Она сначала увеличивается от центра к периферии, а затем сохраняется неизменной. Скорость вращения в окрестности Солнечной системы порядка 200 км/с. Легко понять, что любая крупномасштабная неоднородность в галактическом диске закрутится в спираль под действием притяжения соседей, если скорость вращения будет зависеть от расстояния до центра. Спиральные рукава в диске нашей галактики – это не стабильные структуры, а волны уплотнения межзвездного вещества, расходящиеся от центра.

Увеличение числа звезд в единице объема по мере приближения к центру Галактики приводит к их более частому сближению друг с другом. Это вызывает нестабильность орбит планет, обращающихся вокруг этих звезд, что как следствие, приводит к нестационарности условий на этих планетах, если они там имеются. С другой стороны, на периферии Галактики заметно уменьшается содержание элементов тяжелее водорода и гелия.

В центре нашей галактики находится черная дыра, но эта дыра сравнительно спокойная, так как вокруг нее не так много звезд, которыми она может питаться.

Магнитные поля галактик

В галактиках вдоль рукавов наблюдаются магнитные поля величиной всего в несколько миллионных долей гаусса, но огромная протяженность полей и малая плотность межзвездной среды делают эти поля одним из мощных факторов, определяющих движения галактической плазмы. Не совсем ясно, может ли динамо-процесс создать глобальное поле галактики, так как мелкие локальные магнитные поля могут подавить те движения, которые необходимы для этого. Одна из возможностей возникновения галактического магнитного поля основана на том, что поток космических лучей создает электрический ток и связанное с ним магнитное поле. Дело в том, что протоны космических лучей, даже рассеиваясь на магнитных полях по пути к границам галактики, теряют только неболь-

шую долю своей энергии. Электроны, которые должны компенсировать заряд этих протонов, быстро теряют энергию и отстают от протонов. Разная скорость положительных и отрицательных зарядов приводит к появлению электрического тока и порожденного им магнитного поля. Мелкомасштабные магнитные поля могут появиться в галактике по многим причинам, в частности при взрывах звезд. Во время взрыва выбрасывается плазма, в которой текут токи, создававшие магнитные поля этих звезд.

Магнитные поля величиной в одну миллиардную долю гаусса существуют также между галактиками.

Очевидна очень важная роль магнитных полей во Вселенной, но теория их возникновения еще далека от завершения.

Квазары

Квазарами названы очень удаленные от нас объекты, спектры которых сильно смещены в красную сторону (см. главу 12). Размеры квазаров около одного светового дня, т.е. гораздо больше, чем размеры звезд, но гораздо меньше, чем размеры галактик. Массы квазаров от 10^7 до 10^9 масс Солнца. Центральная часть квазара окружена газовой оболочкой, которая простирается на сотни световых лет. Квазар излучает в сотни раз больше энергии, чем рядовая галактика, в диапазоне волн от радио- до рентгеновского. Столь мощное излучение из небольшого объема может обеспечить только черная дыра, поглощая окружающее вещество. Газовые потоки в направлении быстро вращающейся черной дыры образуют вихри, где и возникает яркое излучение квазаров.

Вот примеры отношений светимостей (L) звезд и галактик к светимости Солнца (L_C).

Объект	Солнце	Звезда-гигант	Сверх-гигант	Наша галактика	Андромеда	Квазар	Сверх-новая
L/L_C	1	140	50000	$2 \cdot 10^{10}$	10^{11}	10^{12}	10^{15} при взрыве

Загадка темной материи

Наблюдая смещение спектров звезд в красную или фиолетовую сторону, можно определить скорости звезд и галактик, в состав которых входят эти звезды. Определив скорость и зная примерно массу каждой звезды, можно найти

как кинетическую энергию движения всех звезд галактики, так и потенциальную энергию притяжения звезд друг к другу. Очевидно, что потенциальная энергия должна быть не меньше кинетической, иначе бы все звезды разбежались и галактики не было. Распределение звезд определяет скорости вращения вещества галактики в зависимости от расстояния до центра (рис.89). Здесь обнаружился удивительный результат. Зависимость оказалась такой, как если бы в галактике существовало какое-то невидимое вещество, которое обеспечивает недостаток тяготеющей массы.

Такой же вывод можно сделать для скоплений галактик. Кинетическая энергия галактик в скоплениях оказалась много больше, иногда в сотни раз больше, чем потенциальная энергия, которая нужна, чтобы галактики не разлетелись в разные стороны за сравнительно короткое время – меньше чем миллиард лет. Такая ситуация не исключение для отдельных скоплений, а правило. Что же держит галактики вместе? Проще всего предположить, что там имеется какое-то вещество, какие-то тела или частицы, которые невидимы, не испускают и не рассеивают электромагнитные волны (свет, радио-, рентгеновское и гамма-излучение), не проявляют себя заметным образом при столкновениях с другими частицами, но обладают массой, причем достаточной, чтобы удерживать галактики вместе. Это загадочное вещество назвали темной материей. Темной материи больше всего на окраинах галактик и скоплений галактик.

По-видимому, Земля обдувается ветром из темной материи. Масса темной материи должна быть в пять раз больше, чем масса всех звезд и газа в галактике. Что же это такое? Может быть, это огромное число давно потухших звезд? Вряд ли, потому что такое предположение противоречило бы существующим представлениям об эволюции звезд. Это не могут быть также нейтрино, даже если их масса не равна нулю. Самые верхние существующие оценки вклада нейтрино недостаточны, чтобы обеспечить наблюдаемую массу темной материи.

Но, может быть, темная материя вообще не материя в том смысле, что она состоит из обычных частиц какого-то сорта. Все, что наблюдается, это неоднородные гравитационные поля. Возможно, что в процессе расширения Вселенной возникли долгоживущие местные неоднородности вакуума и, тем самым, неоднородные гравитационные поля в пустоте. Такие поля могут быть связаны с неоднородным распределением частиц, возникающих и исчезающих в вакууме (см. главу 6), которые

имеют массу и взаимодействуют друг с другом в их общем поле тяжести. Обычное вещество будет концентрироваться в областях с наибольшей гравитацией, которая связана с неоднородностями вакуума. Тогда становится ненужным предположение о существовании особых частиц темной материи.

Такое объяснение темной материи не противоречит существующим наблюдениям, хотя необходимы дальнейшие наблюдения и теоретические расчеты. Вопрос остается открытым.

ВСЕЛЕННАЯ

В настоящее время смыкаются, казалось бы, удаленные области исследования – изучение элементарных частиц и изучение Вселенной. Дело в том, что в обоих случаях приходится иметь дело с очень большими энергиями.

Чем дальше, тем краснее

Как определить размеры Вселенной? Расстояние до сравнительно близких звезд определяется достаточно просто и точно. Для этого надо измерить, как изменяется направление на звезду с интервалом в полгода. Тем самым мы будем знать одну сторону треугольника (диаметр орбиты Земли) и угол, под которым этот отрезок виден от звезды. Это позволит найти высоту треугольника, т.е. расстояние до звезды. Для более далеких звезд этот угол так мал, что измерить его не удастся, и данный метод не работает. Но есть другой метод. Мы уже упоминали, что существуют звезды, которые пульсируют, периодически меняя свой блеск. Такие звезды есть не только в нашей, но и в других галактиках. Интенсивность излучения этих звезд тесно связана с периодом пульсаций. Зная период, можно определить светимость. Если такая звезда светит слабее, значит, она расположена дальше, и по изменению светимости можно установить расстояние до звезды. Но и этот метод не годится для самых далеких объектов. В начале прошлого века было замечено, что чем дальше находится звезда (принадлежащая иной галактике), тем сильнее сдвигается в красную сторону ее спектр. Например, те спектральные линии излучения далеких звезд, которые на Земле расположены в синей области спектра, передвигаются в красную область, сохраняя свой порядок и относительную интенсивность. Это явление может быть объяснено только предположением, что все звезды удаляются от нас, причем чем дальше звезда расположена, тем быстрее она удаляется. Именно такой вывод, о разбегании звезд, следует из теории относительности, если наша Вселенная действительно расширяется и в среднем достаточно однородна.

Конечно, есть локальный разброс скоростей, но общая зависимость выполняется очень точно. Только звезды нашей галак-

тики и ближайших к нам соседних галактик не показывали такой зависимости. Так что же, Земля это выделенный центр, от которого уходят все далекие галактики? Нет, дело в другом. Вот пример, который часто приводится в книгах. Если взять детский воздушный шарик и начать его надувать, то все точки на поверхности шарика будут удаляться друг от друга и никакая точка не будет выделенной при расширении поверхности. Красное смещение свидетельствует именно о подобной картине. Приходится признать, что наша Вселенная расширяется.

Наблюдая взрывы удаленных сверхновых звезд, можно увидеть, что время протекания вспышки тем больше, чем больше красное смещение ее спектра, поскольку увеличивается не только длина волны фотонов, но и расстояние между началом и концом излучения вспышки.

Красное смещение спектров позволяет определить расстояния до самых далеких звезд и галактик.

Сколько весит пустота

Снова вернемся к вопросу о пустом пространстве – вакууме. Спрашивается: обладает ли пустота своим крупномасштабным гравитационным полем? Иными словами: притягиваются ли эти неродившиеся частицы вакуума друг к другу и влияет ли их гравитационное поле на остальной мир? Впервые этот вопрос был поставлен Эйнштейном еще в 1917 году. В настоящее время он снова возник, но уже не как предположение, а как одна из возможностей объяснить наблюдения, которые показали, что расширение Вселенной не замедляется, а все более ускоряется. Рассмотрим эту проблему.

Свет, который пришел к нам от далекой звезды, был испущен в далеком прошлом. Поскольку светимость звезд каждого типа, например сверхновых, лежит в определенных пределах, то можно сказать, что более тусклая звезда из звезд данного типа находится дальше от нас. Сравнение светимости удаленных звезд и красного смещения их спектров можно объяснить, если допустить, что в прошлом расширение Вселенной происходило медленнее, чем в настоящее время.

Высокие скорости вещества на ранней стадии расширения Вселенной были достаточны для преодоления сил тяготения, которые стремятся затормозить движение вещества, сжать его. По мере расширения скорости падают, гравитация начинает играть все большую роль, и расширение должно замедляться. Но в последние миллиарды лет этого замедления не наблюдается. Возможно, все дело в том, что гравитационные силы частиц

пустоты являются силами отталкивания, а не притяжения. Именно такой результат следует из теории. Объяснить наблюдения удастся, если предположить, что Вселенная заполнена темной энергией и доля этой энергии в десятки раз больше, чем вся энергия видимого вещества. Возможно, что наша Вселенная состоит в основном не из звезд, галактик и межзвездного газа и пыли и даже не из темной материи неизвестного нам происхождения, о которой мы говорили в предыдущей главе, а из темной энергии вакуума.

Мы знаем, что газ из обычных частиц, предоставленный самому себе, расширяется. Этому препятствуют силы гравитационного притяжения, которые могут преодолеть стремление к расширению. Под действием этих сил возникают звезды из межзвездного вещества. Теория показывает, что неродившиеся частицы в вакууме обладают обратными свойствами. «Газ» из частиц вакуума стремится не расшириться, а сжаться, подобно растянутой пружине. Однако гравитационные силы в этом случае являются силами не притяжения, а отталкивания. Они препятствуют сжатию. Когда плотность обычного вещества становится малой, эти силы оказываются преобладающими. Если темная энергия действительно есть гравитационная энергия вакуума, то, возможно, она создает силу, «расталкивающую» Вселенную.

Однако остается открытым вопрос о возможности того, что скорость расширения была разной в разных областях Вселенной. В этом случае наблюдения сравнительно более тусклого свечения звезд с большим красным смещением можно рассматривать как свидетельство того, что Земля находится в одной из больших гравитационных впадин. Тогда результаты наблюдения темпа расширения Вселенной будут говорить только о расширении этой впадины и о положении Земли внутри впадины. В этом случае предположение о существовании темной энергии можно отбросить.

Наблюдаемая высокая (хотя и неполная) однородность реликтового излучения вовсе не означает такой же однородности гравитационного поля пустоты в настоящее время, поскольку реликтовое излучение возникло тогда, когда не появились даже такие неоднородности, как звезды и галактики.

Процессы развития Вселенной оказались удивительным образом связанными с характером элементарных частиц. На начальной стадии расширения, примерно через 10^{-34} с после начала, когда температура Вселенной опустилась до 10^{27} градусов, произошел фазовый переход вакуума. Этот переход сопро-

вождался нарушением первоначальной симметрии вакуума, что привело к различию в свойствах и характере взаимодействия элементарных частиц, входящих в одну и ту же группу (см. главу 9.). Подобное нарушение симметрии аналогично тому изменению (хотя оно имеет совсем иную природу), которое происходит, когда замерзает вода. Однородность воды пропадает, и появляется лед, кристаллы которого имеют свою симметрию. При этом во льду после замерзания могут остаться мелкие незамерзшие капельки. В вакууме Вселенной также могут остаться участки, не испытавшие превращения. Согласно теории, их свойства подобны свойствам тех струн, о которых мы упоминали в девятой главе.

Излучение Большого взрыва

Если признать, что Вселенная расширяется, то придется также признать, что в прошлом она была горячее, чем ныне, так как та же энергия была сосредоточена в меньшем объеме. Более того, по скорости расширения можно определить, сколько лет назад это расширение началось, т.е. найти возраст Вселенной. Он оказался около 14 миллиардов лет. Что же было до этого? Ответ на этот вопрос пока не ясен прежде всего потому, что для описания того периода времени, когда Вселенная имела очень малый размер, в котором была сосредоточена вся ее энергия, надо использовать квантовые, а не классические представления. Не имея квантовой теории гравитации, мы мало что можем сказать о самом начале возникновения Вселенной. Действительно, поскольку энергия Вселенной E не бесконечно велика, мы вообще не можем с определенностью говорить о временах меньше чем \hbar/E . К сожалению, пока не найден способ объединения квантовой теории и теории гравитации. Может быть, наше понятие времени вообще теряет смысл при таких плотностях энергии. Поэтому мы начнем рассмотрение не с момента рождения Вселенной, а с того момента, когда существующая теория становится справедливой.

Наблюдения над звездами и галактиками, данные о радиоизлучении из космоса, лабораторные данные о ядерных реакциях и об элементарных частицах, а также знания о геометрии нашего мира приводят к следующей картине развития Вселенной (рис.90).

В течение первой десяти тысячной доли секунды от начала отсчета времени Вселенная состояла в основном из плазмы кварков и глюонов (о них мы упоминали в девятой главе). Температура достигала 10^{12} градусов. Такая Вселенная была непрозрачна даже для нейтрино. Затем через 10^{-5} секунды

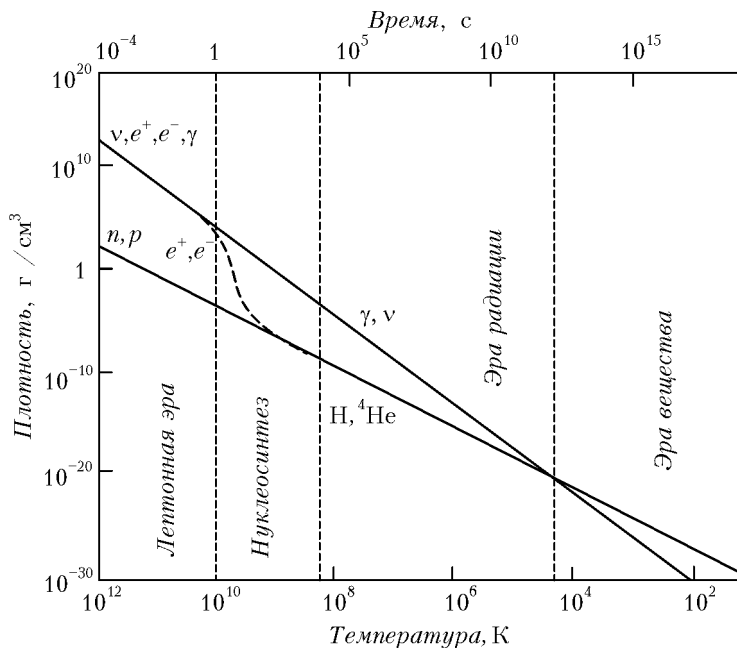


Рис.90. История Вселенной от Большого взрыва до наших дней

кварки и глюоны объединились и образовали протоны, нейтроны и мезоны. Начиная с температуры $5 \cdot 10^9$ градусов основную роль в динамике расширения Вселенной стали играть электроны, мю-мезоны, тау-мезоны, три сорта нейтрино и их античастицы, а также фотоны.

Возник тот спектр электромагнитных волн, который сохранился вплоть до момента, когда температура опустилась до нескольких тысяч градусов и плотность вещества стала настолько малой, что излучение смогло свободно распространяться по всей Вселенной. Вначале это было очень коротковолновое излучение в диапазоне гамма- и рентгеновских волн, так как оно возникло при очень высокой температуре. Как мы уже отмечали, при расширении Вселенной возрастают все расстояния. Поэтому длина волны, которая в тот ранний период формирования электромагнитного спектра была около 10^{-4} см, превратилась к настоящему времени в 2 мм, т.е. перешла из рентгеновского в радио-диапазон. Наблюдается именно такое излучение. Его называли реликтовым. Спектр этого излучения такой же, как у тела с температурой 3 кельвина. Величина потока реликтового

излучения, падающего на Землю, оказалась почти одной и той же независимо от направлений на небе. Это говорит о большой степени однородности молодой Вселенной. Однако не исключено, что могли остаться неоднородности масштаба галактик и их скоплений. На рисунке 91 красным отмечены наиболее теплые, а синим – наиболее холодные области на небесной карте реликтового излучения.

В горячей и плотной молодой Вселенной как протоны, так и нейтроны все время сталкивались. Это вело к образованию и разрушению атомных ядер. Примерно через $3 \cdot 10^5$ лет плотность Вселенной стала настолько мала и столкновения стали настолько редки, что образование ядер практически прекратилось. Нетрудно подсчитать, какой набор ядер остался. Оказалось, что должно было остаться около 75% водорода, около 25% гелия, порядка 0,01% дейтерия и ничтожное количество лития и бериллия. Более тяжелые ядра не успели возникнуть. Это предсказание теории прекрасно согласуется с наблюдениями состава звезд и межзвездного вещества. Первые звезды возникли только через 100–250 миллионов лет после начала расширения Вселенной. Эти звезды не содержали элементов тяжелее гелия и были массивнее и горячее, чем звезды типа Солнца. До появления звезд Вселенная была заполнена туманом из атомов водорода и гелия. Вселенная была холодна и темна. Когда появились звезды, они разогрели и разогнали этот туман. То разнообразие элементов, которое имеется на Земле, возникло потому, что вещество, из которого возникла Солнечная система, было сильно обогащено элементами, образовавшимися внутри звезд первого поколения и выброшенными в галактическое пространство при взрывах этих звезд.

Таким образом, можно утверждать, что, по крайней мере, три независимые группы наблюдений подтверждают картину расширяющейся Вселенной (рис.92). Это, во-первых, красное смещение спектров удаленных галактик, во-вторых, реликтовое излучение и, в-третьих, процентный состав вещества во Вселенной.

Мы видим ближайшую к нам звезду такой, какой она была четыре года тому назад. Но свет отдаленных галактик был испущен за много миллиардов лет до этого. Самое начало расширения Вселенной увидеть нельзя. Вселенная была настолько плотной, что никакое излучение не могло в ней далеко распространиться. Следует, кроме того, напомнить, что мы используем современную нам шкалу времени, но в плотной новорожденной Вселенной поле тяготения было очень велико и время текло много медленнее, если сравнивать с нашей шкалой.

Более того, скорость света в веществе расширяющейся Вселенной была меньше скорости расширения, так что отдаленные участки не сообщались друг с другом. У каждой точки был свой горизонт, за который нельзя было проникнуть. Однако расширение Вселенной приводит к тому, что горизонт все время удаляется. Наиболее удаленные объекты, которые удалось наблюдать в настоящее время, возникли через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва.

Высокая, хотя и не полная, однородность реликтового излучения указывает на высокую однородность молодой Вселенной. Почему происходили почти одинаковые процессы в областях, которые были изолированы друг от друга, так что даже свет не успевал за расширением? Одна из возможностей объяснить отсутствие заметных неоднородностей состоит в том, что все неоднородности сгладились именно из-за того, что расширение происходило столь быстро. При этом кривизна пространства также выгладилась, и современная геометрия Вселенной, при усреднении по масштабам, которые намного больше размеров галактик, стала близка к привычной для нас плоской геометрии.

Где записаны законы природы

«Вначале было Слово», – так говорит Библия о начале Вселенной. «Слово» на древнееврейском языке, на котором была написана Библия, означает также «мысль». На современном языке можно сказать, что Вселенная должна содержать информацию о законах природы. В какой форме были «записаны» эти законы при рождении Вселенной? Всегда ли законы природы были такими, как сегодня? Это совсем не праздные вопросы.

Информация, которая содержится в данное время в определенном объеме вещества, не может быть бесконечно большой. В частности, согласно принципу неопределенности, информация о промежутках времени меньше Δt является определенной, только если энергия этого состояния ΔE больше чем $\hbar/\Delta t$. Поскольку энергия Вселенной не бесконечно велика, информация также конечна. Более того, при попытке на опыте изучать сверхмалые расстояния и промежутки времени понадобится очень большая концентрации энергии, что приведет к возникновению там черной дыры.

Как много информации и в какой форме содержит Вселенная? Имеются лишь первые попытки исследовать этот вопрос. Наша Вселенная состоит из конечного количества вещества. Оно содержит приблизительно 10^{80} разных частиц обычной материи,

что, согласно существующим оценкам, соответствует 10^{100} бит информации. Какую информацию несет темная материя и состоит ли она из каких-то частиц или это неоднородности геометрии пустого пространства, пока совершенно неясно.

Существующие наблюдения спектров далеких звезд и галактик свидетельствуют, что основные постоянные величины, такие как скорость света c , постоянная тяготения G , постоянная Планка h и заряд электрона e , не изменились за последние несколько миллиардов лет. Но можно ли быть уверенным, что они вообще не менялись? Удивительным фактом является то, что даже очень маленькое отличие значений этих величин от существующих делает полностью невозможным возникновение звезд и галактик и, тем самым, существование человека.

Приведем два примера: 1) если бы электрон был втрое тяжелее, то он мог бы поглощаться протоном с возникновением нейтрона и нейтрино, но если бы исчезли протоны, то не было бы существующих химических элементов; 2) для образования углерода внутри звезд необходимо объединение трех ядер гелия, вероятность такой реакции велика только потому, что ядро углерода имеет возбужденный уровень как раз на высоте, которая соответствует превышению массы трех ядер гелия над массой невозбужденного углерода, а без углерода наша жизнь невозможна.

Означает ли это, что самоорганизация материи, необходимая для возникновения жизни, требует только тех значений заряда электрона, энергии ядра углерода и других характеристик, которые мы наблюдаем? Да, означает, если говорить об этих величинах по отдельности. Но можно выбрать совсем другой полный набор характеристик материи, который опять-таки будет допускать самоорганизацию. В этом смысле свойства нашей Вселенной лишь один из многих мыслимых случаев, который допускает возникновение жизни, хотя в других случаях жизнь будет выглядеть совсем по-другому – например, будет основана не на углероде, а на кремнии.

Почему наша Вселенная такая, а не иная? Один из ответов состоит в том, что если бы Вселенная была иной, то не было бы человека, который мог бы задать этот вопрос.

У Вселенной нет границы, через которую можно было бы попасть куда-либо вне Вселенной. Но, может быть, она конечна? Например, поверхность шара не имеет границы. Ее можно покинуть, только если уйти с поверхности в третье измерение. Но сама эта поверхность конечна. Куда бы мы ни ушли, мы в конце концов вернемся обратно. Возможно ли, что луч света

обойдет всю Вселенную и вернется обратно? Этот вопрос до сих пор не вполне ясен. Данные о реликтовом излучении скорее всего говорят о том, что в среднем геометрия Вселенной близка к плоской евклидовой геометрии. Однако данные не настолько точны, чтобы исключить даже очень сложную геометрию пространства-времени, не говоря уже о возможности большего, чем четыре, числа измерений в очень малом масштабе.

Хотя современная модель расширяющейся Вселенной объяснила и предсказала ряд важных и необычных явлений, далеко не очевидно, что эта модель достаточно совершенна. Рассматривается, например, предположение о пульсирующей Вселенной, когда расширение сменяется сжатием. Можно ожидать, что будут предложены более совершенные модели, которые только в первом приближении совпадут с существующей простейшей моделью.

ЧТО ОЖИДАЕТ НАС ЗАВТРА

В этой книге мы постарались показать, что мир устроен гораздо сложнее, чем это кажется в повседневной жизни. Реальные результаты науки во многом более необычны, чем самые изощренные фантазии и сказки о леших и ведьмах. Даже наши близкие предки гораздо легче могли бы поверить в говорящего кота, чем в говорящий ящик телевизора. За прошедшие сто лет получено больше научных результатов, чем за прошлую тысячу лет. Один день просмотра телевизора содержит больше информации (в том числе и обмана), чем в среднем получал человек восемнадцатого века за всю свою жизнь (рис.93). Это, однако, не спасает современных людей от невежества и суеверий.

Две тысячи лет тому назад население Земли равнялось ста миллионам. В первой четверти двадцатого века в мире было всего два миллиарда людей. Теперь нас больше шести миллиардов. Именно наука дала возможность накормить население нашей планеты.

В дальнейшем фронт развития науки переместится, по-видимому, из области физики в биологию и информатику. Зачем, например, разводить коров, если будет возможно выращивать мясную ткань промышленным образом из отдельных клеток? А вдруг станет возможно из нескольких клеток человека вырастить для него запасное сердце? И это не фантазия. Такие опыты уже ведутся.

Для освоения планет не надо будет посылать команды строителей, достаточно будет послать небольшой объект с программой, которая последовательно создаст из местных материалов все более совершенные механизмы, способные выполнить поставленную задачу.

В настоящее время успешно выращивается генетически измененная кукуруза – урожайная и устойчивая к болезням. Начато выведение генетически измененных животных. Ничто не помешает таким же образом менять наследственность у людей. Но кто будет решать, что именно надо менять и какую породу людей желательно вывести?

Уже сейчас компьютеры обыгрывают чемпионов по шахматам, диктуют стратегию покупки акций и план военных опера-

ций. Не будут ли завтра они диктовать весь уклад нашей жизни?

В руках человека теперь оказались такие силы, которые могут уничтожить не только цивилизацию, но почти всю жизнь на Земле. Чем дальше развивается наука, тем очевиднее становится такая возможность. Хватит ли ума, чтобы избежать этого? Достаточно ли будет предосторожностей, чтобы эти силы не попали в руки фанатиков? Остается надеяться на разум человечества.

Аркадий Захарович Долгинов

СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ: ОТ АТОМОВ ДО ВСЕЛЕННОЙ

Библиотечка «Квант⁺». Выпуск 122

Приложение к журналу «Квант⁺» №4/2011

Редактор *В.А.Тихомирова*

Обложка *А.Е.Пацхверия*

Макет и компьютерная верстка *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *Е.А.Митченко, Л.В.Калиничева*

Формат 84×108 1/32. Бум. офсетная. Гарнитура кудряшевская

Печать офсетная. Объем 5 печ.л. Тираж 2500 экз.

Заказ №

119296 Москва, Ленинский пр., 64-А, «Квант⁺»

Тел.: (495)930-56-48, e-mail: math@kvantjournal, phys@kvantjournal

Отпечатано с готовых диапозитивов

в ППП «Типография «Наука»

121099 Москва, Шубинский пер., д. 6

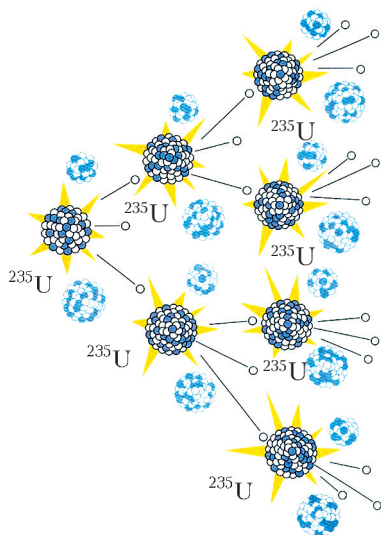


Рис.27. Схема цепной реакции на уране ^{235}U , в ядре которого 82 протона и 153 нейтрона. Ядра-осколки обозначены блеклыми кружками. Черные линии с белыми кружками на конце — это нейтроны. Не все из них попадают в ядра урана, но те, которые попадают, приводят к лавине нейтронов и ядер-осколков



Рис.28. Круговой туннель, где ускоряются и сталкиваются протоны (CERN). Длина туннеля 27 км. Изучаются столкновения протонов, скорость которых достигает 99,99975% от скорости света. Происходит 30 миллионов столкновений в секунду. Движением протонов управляют 7000 сверхпроводящих магнитов

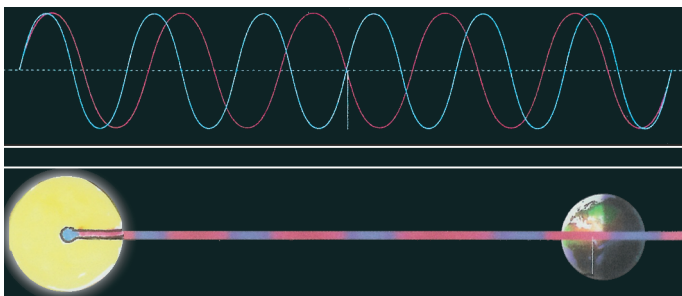


Рис.31. Схема распространения нейтрино, возникших при ядерных реакциях на Солнце. За 8 минут, необходимых, чтобы достичь Землю, электронное нейтрино много раз меняет свое состояние, превращаясь временами в мю-нейтрино или в тау-нейтрино. Проходя через Землю, сорт нейтрино также может меняться

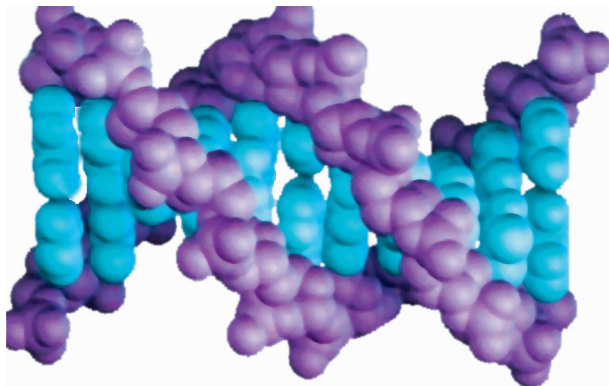


Рис.34. Схема двойной спирали молекулы ДНК

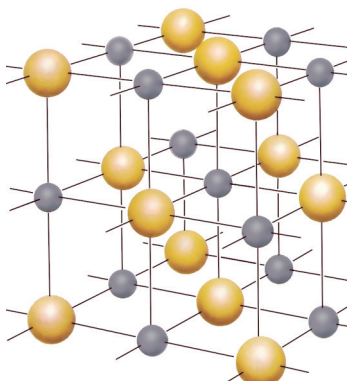


Рис.35. Пространственная решетка кристалла, состоящего из атомов свинца (маленькие шарики) и серы (большие шарики). Характер решетки определяет прочность кристалла, теплопроводность и многие другие свойства

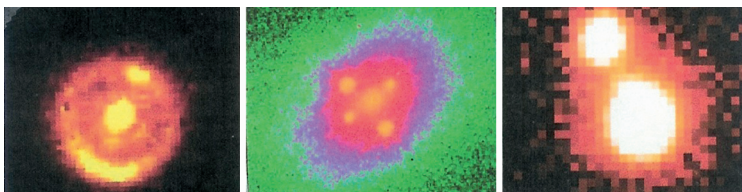


Рис.46. Слева показано изображение квазара В-1938+666, созданное гравитационной линзой на пути лучей. В центре приведены пять изображений одного и того же квазара HE-1104-1805, которые появились из-за отклонения луча этого квазара тяготением массивных тел (звезд или галактик) по дороге к Земле. Справа — двойное изображение квазара 02237 В 0305

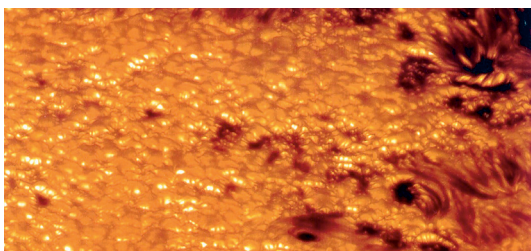


Рис.51. Снимок конвективных ячеек на поверхности Солнца

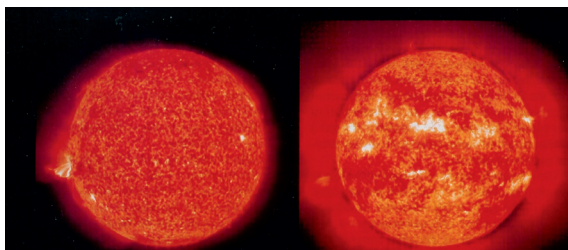


Рис.52. Наблюдаемая поверхность Солнца, покрытая конвективными ячейками. Слева дан снимок Солнца в минимуме, а справа — в максимуме активности

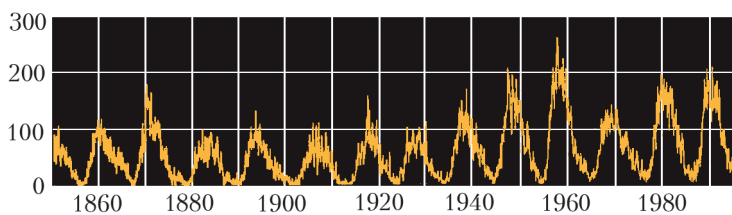


Рис.53. По вертикальной оси отложено количество пятен на Солнце в различные годы

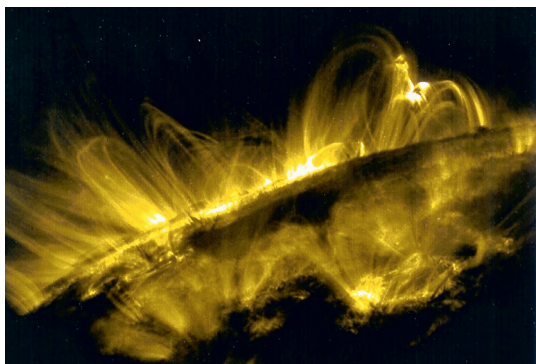


Рис.54. Арки и струи из плазмы в солнечной короне, которые удерживаются магнитными полями

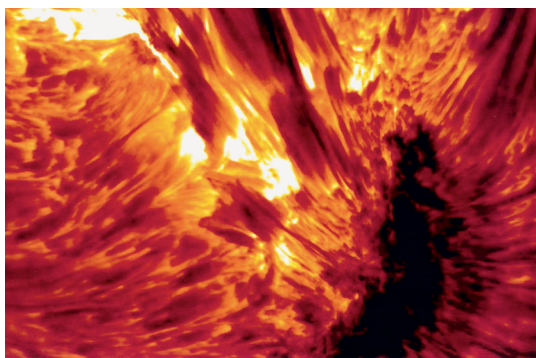


Рис.55. Снимок пятна (справа) на поверхности Солнца

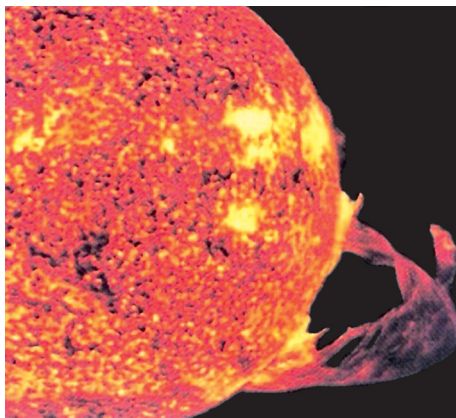


Рис.57. Фотография одного из самых крупных протуберанцев, возникающих во время вспышек на Солнце

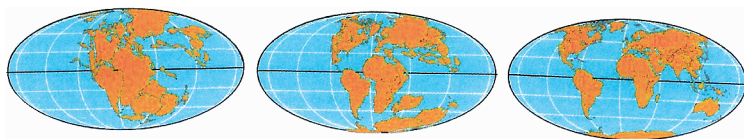


Рис.61. Распределение океанов и суши, соответственно, 200 миллионов лет тому назад, 100 миллионов лет тому назад и в настоящее время

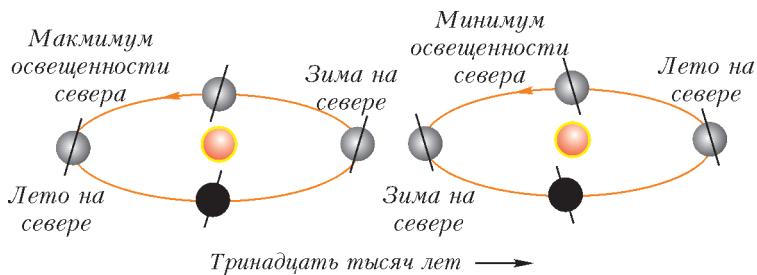


Рис.63. Изменения наклона земной оси в результате прецессии

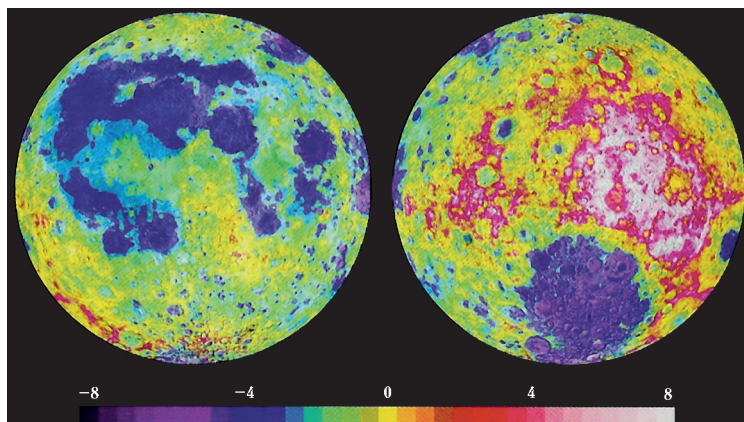


Рис.65. Топография Луны, слева — видимая сторона Луны. Синим обозначены низменности, красным — возвышенности. Цифры на шкале даны в километрах

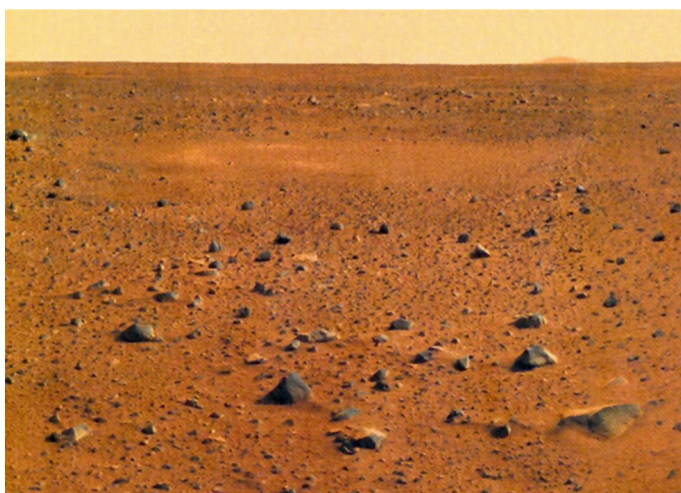


Рис.66. Снимок поверхности Марса



Рис.67. Русла марсианских рек, высохших миллионы лет тому назад

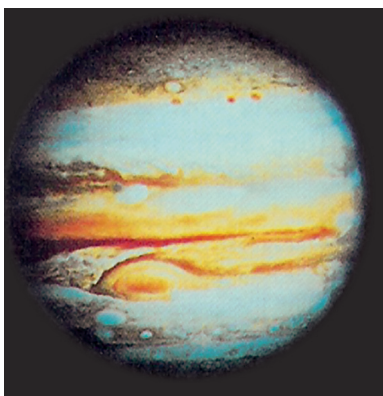


Рис.68. Снимок Юпитера: видны полосы и пятно

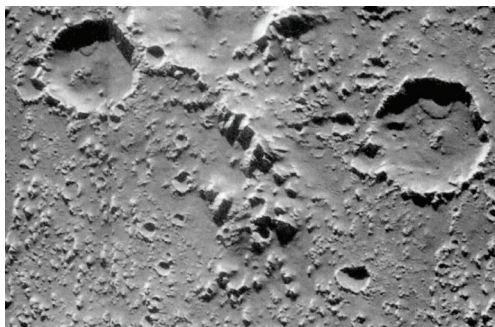


Рис.69. Снимок участка поверхности Каллисто — спутника Юпитера, покрытой кратерами от ударов метеоритов. Подобный же вид имеют поверхности спутников многих планет, в частности поверхность Луны



Рис.70. Снимок Сатурна

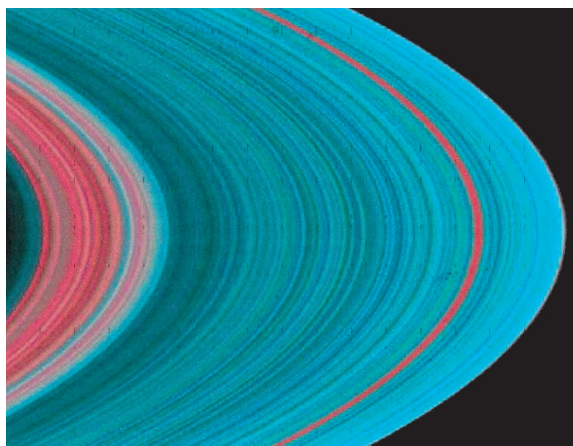


Рис.71. Снимок колец Сатурна в ультрафиолетовых лучах. Красный цвет соответствует в основном кремнию, зеленый — льду

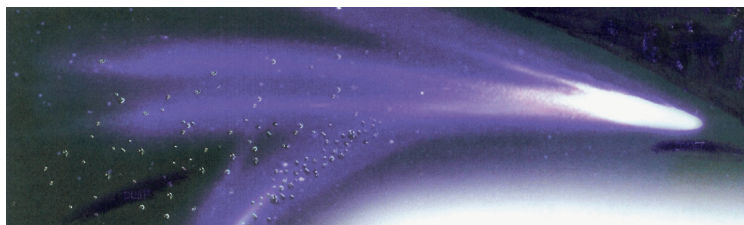


Рис.72. Структура кометы: ярко светящаяся голова кометы и плазменный, газовый и пылевые хвосты

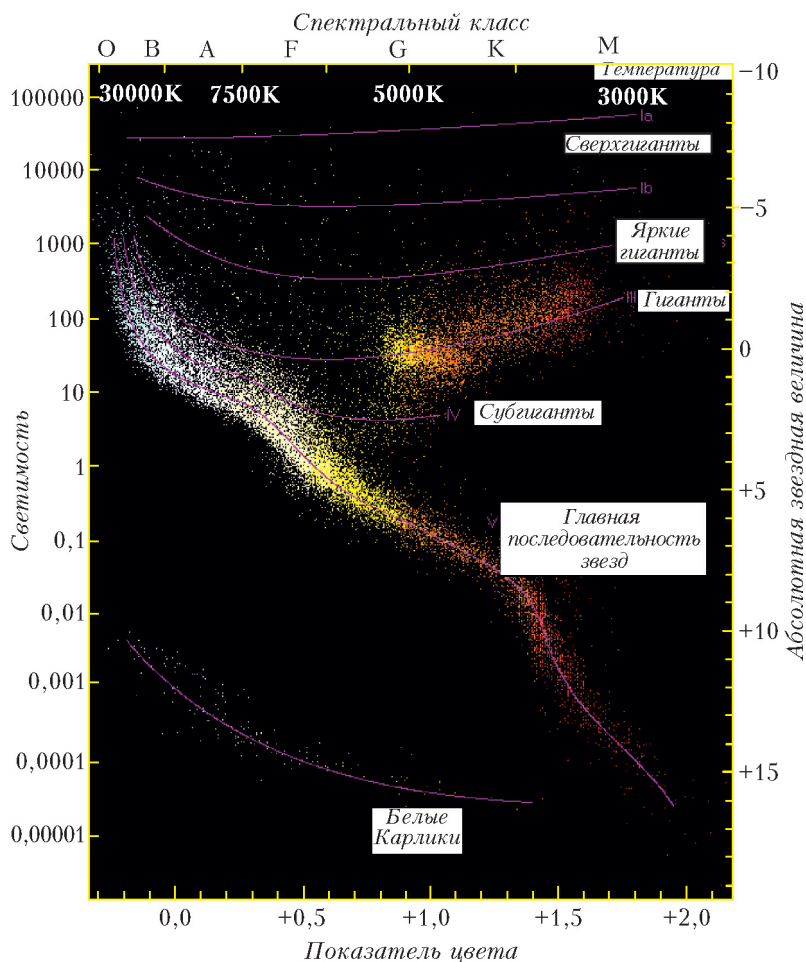


Рис.74. Диаграмма Герцшпрунга—Рассела — зависимость абсолютной звездной величины (светимости) от температуры (показателя цвета) звезд. Температура дана в кельвинах. Солнце находится среди желтых звезд (спектральный класс G, светимость 1). Слева вверху расположены самые массивные и горячие звезды, а справа — красные гиганты. Слева внизу лежат белые карлики. Коричневые карлики — самые тусклые и холодные. Разница в одну абсолютную звездную величину означает разницу в 2,512 раз в яркости звезды. Для удобства классификации звезд их обычно объединяют в спектральные классы — в зависимости от температуры. Самые яркие относят к классу O, затем идут классы B, A, F, G, K и M. В отдельную группу относят белые карлики (WD) и нейтронные звезды (NS)

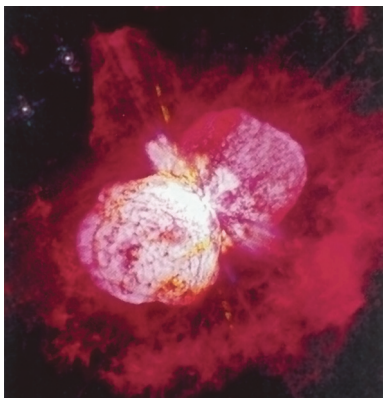


Рис.75. Плотная газо-пылевая оболочка звезды Эта Киля, которая является гигантом и одним из самых ярких звездных объектов. Возможно, что это двойная звездная система. Наблюдался ряд вспышек звезды Эта Киля. Размер ее оболочки вдвое превышает размер Солнечной системы

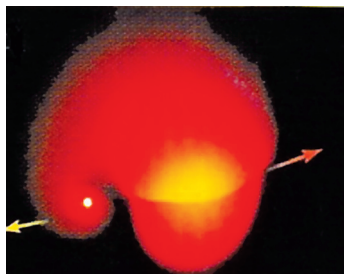


Рис.76. Схема столкновения белого карлика и красного гиганта. Белый карлик проходит через тело красного гиганта, разрушая его

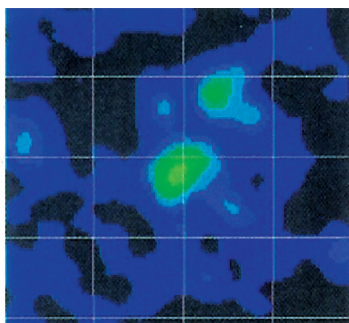
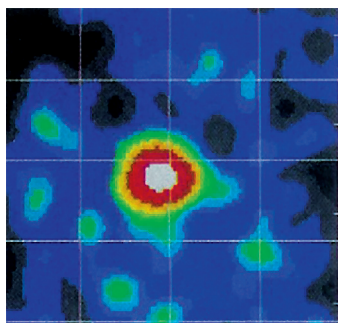


Рис.78. Снимок гамма-всплеска, полученный спутником ВерроSAX в феврале 1997 года: слева — через восемь часов, а справа — через три дня после максимума вспышки



Рис.79. Крабоподобная туманность — остаток взрыва сверхновой звезды 1054 года. Размер — 6 световых лет. В центре туманности расположена нейтронная звезда

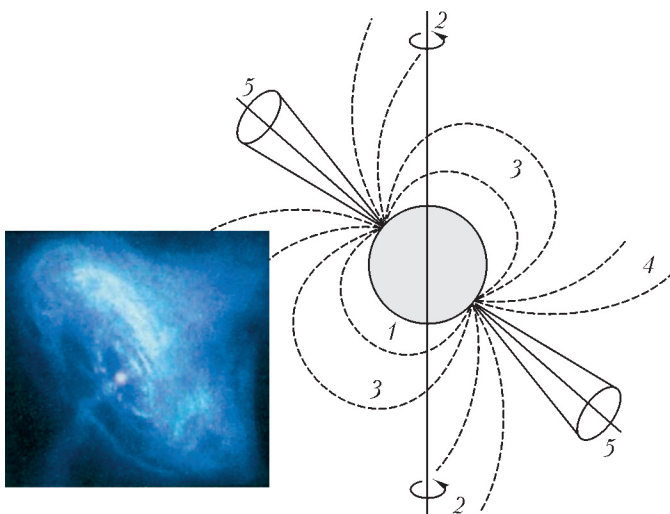


Рис.80. Схема пульсара (справа): 1 — нейтронная звезда, 2 — ось вращения, 3 — линии магнитного поля, образующие ловушку для электронов и ионов, 4 — магнитные линии, связанные с околозвездными полями, 5 — области вокруг магнитной оси, откуда выходит излучение. Слева приведен снимок Крабоподобной туманности, полученный в рентгеновских лучах из космоса рентгеновской обсерваторией «Чандра». В центре снимка виден пульсар, вращающийся со скоростью 30 оборотов в секунду, и видна струя, идущая из центра. Пульсар окружен вихрем вещества, уходящего из области пульсара со скоростью, равной почти половине скорости света

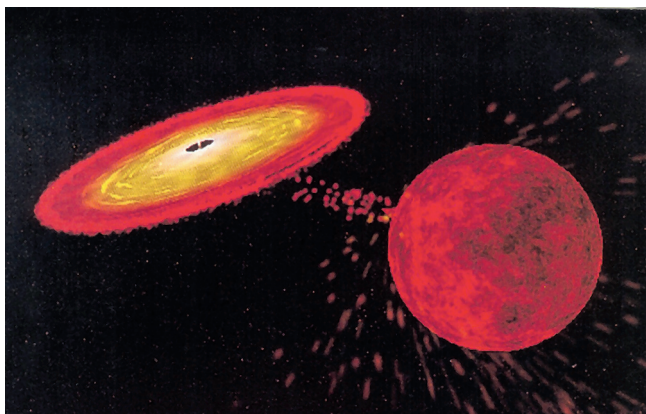


Рис.81. Схема перетекания вещества от обычной маломассивной звезды на нейтронную звезду (пульсар SAX J 608.4-3658) в двойной звездной системе. Пульсар окружен диском из вещества, текущего от соседней звезды

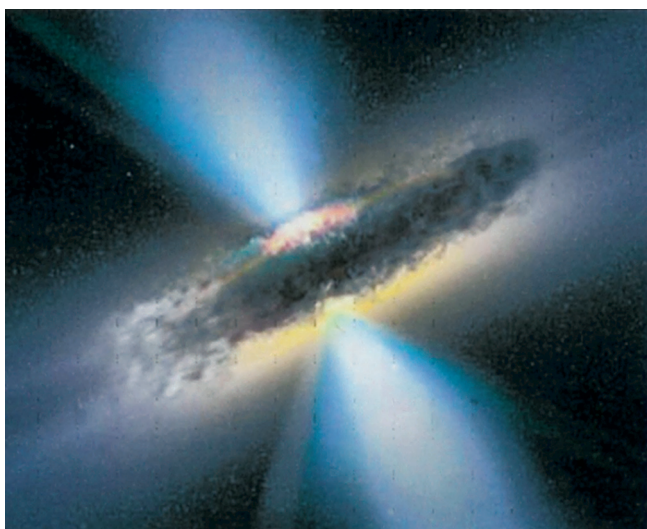


Рис.82. Черная дыра в галактике NGC 4388, окруженная массивным, раскаленным до ста миллионов градусов вращающимся газовым облаком в виде тора, который, в свою очередь, окружен тороидальной туманностью. Из полюсов исходит быстро вращающаяся струя вещества

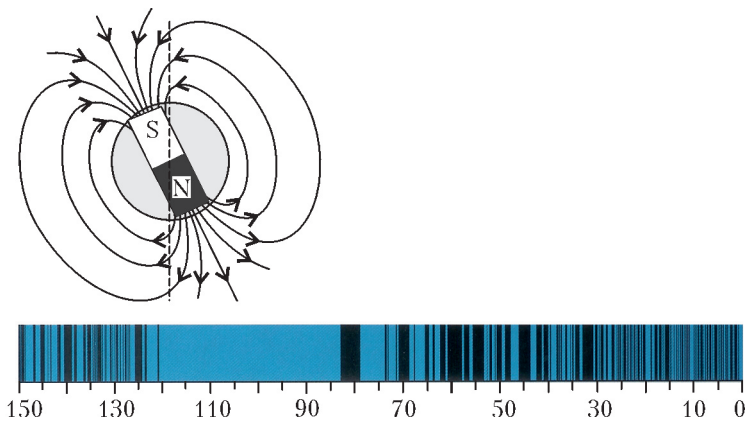


Рис.84. Магнитное поле Земли подобно полю магнита, наклоненного к оси вращения. На полосе внизу указаны периоды, в миллионах лет, когда поле было направлено так же, как в настоящее время (синий цвет), и периоды, когда направление поля было противоположным (черный цвет)

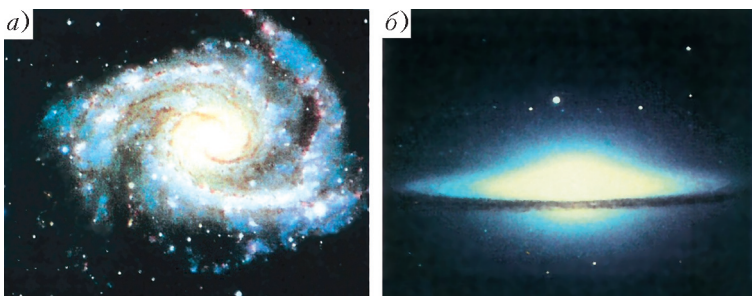


Рис.86. а) Фотография одной из типичных спиральных галактик NGC 2997; б) вид сбоку спиральной галактики Сомбреро



Рис.87. Снимок двух взаимодействующих спиральных галактик NGC 2207 и IC 2183 с перемычкой из звезд, газа и плазмы между ними

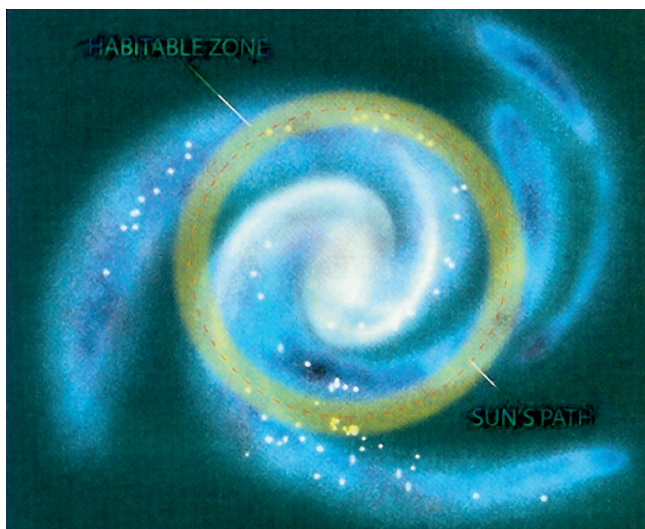


Рис.88. Спиральный узор нашей галактики. Желтым отмечена область, благоприятная для возникновения у звезд таких планет, как Земля. Другие области менее благоприятны для этого

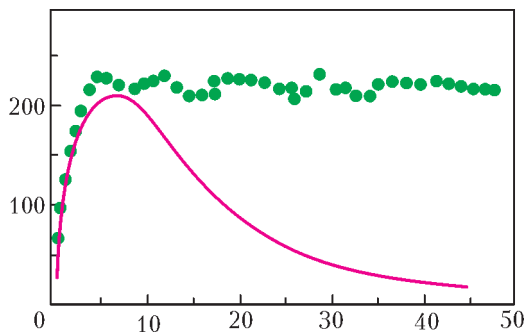


Рис.89. Пример характерной зависимости скорости вращения звездного диска от расстояния до центра для многих галактик. По горизонтальной оси отложено расстояние от галактического центра в тысячах световых лет. По вертикальной оси отложена скорость в километрах в секунду. Красная линия дает ту зависимость скорости от расстояния, которая должна была быть, если бы вся масса галактики содержалась в обычной материи, которую можно увидеть. Зеленые точки это результаты наблюдений, которые свидетельствуют о наличии гравитационных полей, не связанных с обычной материей

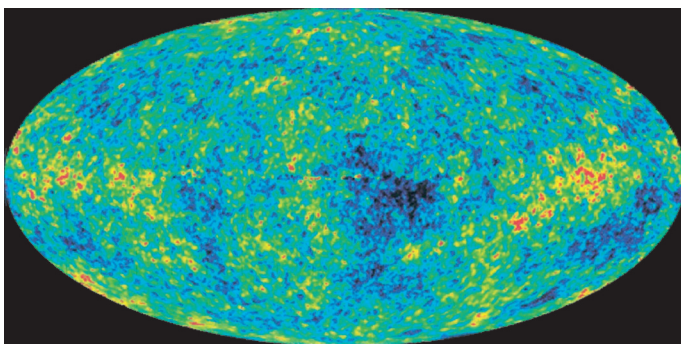


Рис.91. Карта распределения вариаций температуры реликтового излучения по измерениям с космического аппарата WMAP

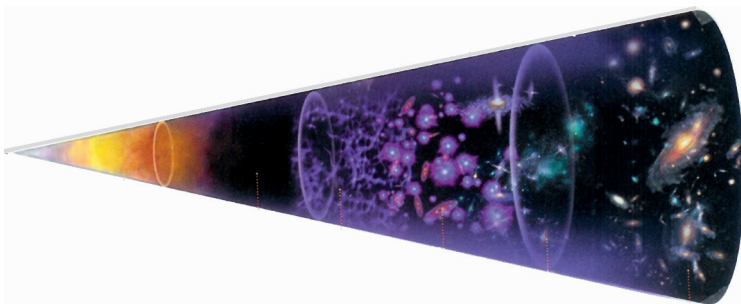


Рис.92. Периоды расширения Вселенной: гипотетическая эра быстрого расширения — 10^{-36} с, возникновение протонов и нейтронов из кварков — 10^{-5} с, образование атомных ядер — 3 мин, непрозрачная Вселенная — в первые 300000 лет, эпоха реликтового излучения и начало образования атомов — от 300000 до 100 миллионов лет, темные века до образования звезд — от 100 миллионов до 1 миллиарда лет, первое поколение звезд и галактик — от 1 миллиарда до 5 миллиардов лет, взрывы сверхновых и возникновение звезд, содержащих тяжелые элементы, — от 5 миллиардов лет — по настоящее время (14 миллиардов лет)

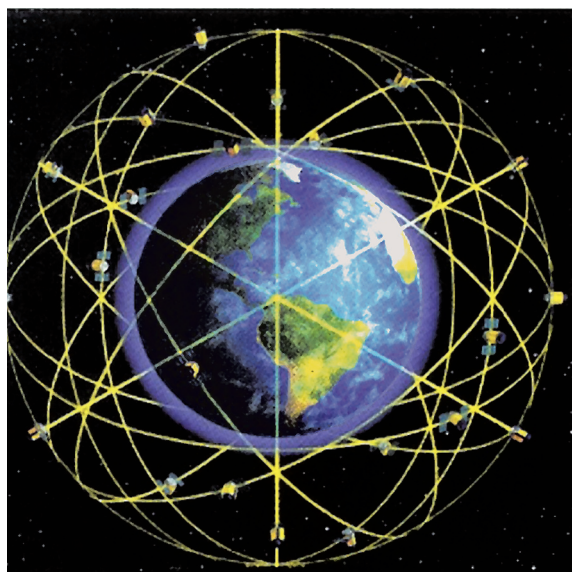


Рис.93. Рой искусственных спутников, окружающих Землю, следящих за вами и передающих огромное количество телевизионной, радио- и иной информации

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ КНИГИ СЕРИИ «БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»

1. *М.П.Бронштейн*. Атомы и электроны
2. *М.Фарадей*. История свечи
3. *О.Оре*. Приглашение в теорию чисел
4. *Опыты в домашней лаборатории*
5. *И.Ш.Слободецкий, Л.Г.Асламазов*. Задачи по физике
6. *Л.П.Мочалов*. Головоломки
7. *П.С.Александров*. Введение в теорию групп
8. *В.Г.Штейнгауз*. Математический калейдоскоп
9. *Замечательные ученые*
10. *В.М.Глушков, В.Я.Валах*. Что такое ОГАС?
11. *Г.И.Копылов*. Всего лишь кинематика
12. *Я.А.Сморodinский*. Температура
13. *А.Е.Карпов, Е.Я.Гик*. Шахматный калейдоскоп
14. *С.Г.Гиндикин*. Рассказы о физиках и математиках
15. *А.А.Боровой*. Как регистрируют частицы
16. *М.И.Каганов, В.М.Цукерник*. Природа магнетизма
17. *И.Ф.Шарыгин*. Задачи по геометрии: планиметрия
18. *Л.В.Тарасов, А.Н.Тарасова*. Беседы о преломлении света
19. *А.Л.Эфрос*. Физика и геометрия беспорядка
20. *С.А.Пикин, Л.М.Блинов*. Жидкие кристаллы
21. *В.Г.Болтянский, В.А.Ефремович*. Наглядная топология
22. *М.И.Башмаков, Б.М.Беккер, В.М.Гольховой*. Задачи по математике: алгебра и анализ
23. *А.Н.Колмогоров, И.Г.Журбенко, А.В.Прохоров*. Введение в теорию вероятностей
24. *Е.Я.Гик*. Шахматы и математика
25. *М.Д.Франк-Каменецкий*. Самая главная молекула
26. *В.С.Эдельман*. Вблизи абсолютного нуля
27. *С.Р.Филонович*. Самая большая скорость
28. *Б.С.Бокштейн*. Атомы блуждают по кристаллу
29. *А.В.Бялко*. Наша планета – Земля
30. *М.Н.Аршинов, Л.Е.Садовский*. Коды и математика
31. *И.Ф.Шарыгин*. Задачи по геометрии: стереометрия
32. *В.А.Займовский, Т.Л.Колупаева*. Необычные свойства обычных металлов
33. *М.Е.Левинштейн, Г.С.Симин*. Знакомство с полупроводниками
34. *В.Н.Дубровский, Я.А.Сморodinский, Е.Л.Сурков*. Релятивистский мир
35. *А.А.Михайлов*. Земля и ее вращение
36. *А.П.Пурмаль, Е.М.Слободецкая, С.О.Травин*. Как превращаются вещества
37. *Г.С.Воронов*. Штурм термоядерной крепости
38. *А.Д.Чернин*. Звезды и физика
39. *В.Б.Брагинский, А.Г.Полнарев*. Удивительная гравитация
40. *С.С.Хилькевич*. Физика вокруг нас
41. *Г.А.Звенигородский*. Первые уроки программирования

42. *Л.В.Тарасов*. Лазеры: действительность и надежды
43. *О.Ф.Кабардин, В.А.Орлов*. Международные физические олимпиады школьников
44. *Л.Е.Садовский, А.Л.Садовский*. Математика и спорт
45. *Л.Б.Окунь*. α , β , γ ... Z: элементарное введение в физику элементарных частиц
46. *Я.Е.Гегузин*. Пузыри
47. *Л.С.Марочник*. Свидание с кометой
48. *А.Т.Филиппов*. Многоликий солитон
49. *К.Ю.Богданов*. Физик в гостях у биолога
50. Занимательно о физике и математике
51. *Х.Рачлис*. Физика в ванне
52. *В.М.Липунов*. В мире двойных звезд
53. *И.К.Кикоин*. Рассказы о физике и физиках
54. *Л.С.Понтрягин*. Обобщения чисел
55. *И.Д.Данилов*. Секреты программируемого микрокалькулятора
56. *В.М.Тихомиров*. Рассказы о максимумах и минимумах
57. *А.А.Силин*. Трение и мы
58. *Л.А.Ашкинази*. Вакуум для науки и техники
59. *А.Д.Чернин*. Физика времени
60. Задачи московских физических олимпиад
61. *М.Б.Балк, В.Г.Болтянский*. Геометрия масс
62. *Р.Фейнман*. Характер физических законов
63. *Л.Г.Асламазов, А.А.Варламов*. Удивительная физика
64. *А.Н.Колмогоров*. Математика – наука и профессия
65. *М.Е.Левинштейн, Г.С.Симин*. Барьеры: от кристалла до интегральной схемы
66. *Р.Фейнман*. КЭД – странная теория света и вещества
67. *Я.Б.Зельдович, М.Ю.Хлопов*. Драма идей в познании природы
68. *И.Д.Новиков*. Как взорвалась Вселенная
69. *М.Б.Беркинблит, Е.Г.Глаголева*. Электричество в живых организмах
70. *А.Л.Стасенко*. Физика полета
71. *А.С.Штейнберг*. Репортаж из мира сплавов
72. *В.Р.Полищук*. Как исследуют вещества
73. *Л.Кэрролл*. Логическая игра
74. *А.Ю.Гросберг, А.Р.Хохлов*. Физика в мире полимеров
75. *А.Б.Мигдал*. Квантовая физика для больших и маленьких
76. *В.С.Гетман*. Внуки Солнца
77. *Г.А.Гальперин, А.Н.Земляков*. Математические бильярд
78. *В.Е.Белонучкин*. Кеплер, Ньютон и все-все-все...
79. *С.Р.Филонович*. Судьба классического закона
80. *М.П.Бронштейн*. Солнечное вещество
81. *А.И.Буздин, А.Р.Зильберман, С.С.Кротов*. Раз задача, два задача...
82. *Я.И.Перельман*. Знаете ли вы физику?
83. *Р.Хонсбергер*. Математические изюминки

84. *Ю.Р.Носов*. Дебют оптоэлектроники
85. *Г.Гамов*. Приключения мистера Томпкинса
86. *И.Ш.Слободецкий, Л.Г.Асламазов*. Задачи по физике (2-е изд.)
87. Физика и...
88. *А.В.Спивак*. Математический праздник
89. *Л.Г.Асламазов, И.Ш.Слободецкий*. Задачи и не только по физике
90. *П.Гнэдиг, Д.Хоньек, К.Райли*. Двести интригующих физических задач
91. *А.Л.Стасенко*. Физические основы полета
92. Задачник «Кванта». Математика. Часть 1
93. Математические турниры имени А.П.Савина
94. *В.И.Белотелов, А.К.Звездин*. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы
95. Задачник «Кванта». Математика. Часть 2
96. Олимпиады «Интеллектуальный марафон». Физика
97. *А.А.Егоров, Ж.М.Раббот*. Олимпиады «Интеллектуальный марафон». Математика
98. *К.Ю.Богданов*. Прогулки с физикой
99. *П.В.Блиох*. Радиоволны на земле и в космосе
100. *Н.Б.Васильев, А.П.Савин, А.А.Егоров*. Избранные олимпиадные задачи. Математика
101. У истоков моей судьбы...
102. *А.В.Спивак*. Арифметика
103. *Я.А.Сморodinский*. Температура (3-е изд.)
104. *А.Н.Васильев*. История науки в коллекции монет
105. *И.Ф.Акулич*. Королевские прогулки
106. Исаак Константинович Кикоин в жизни и в «Кванте»
107. *Г.С.Голицын*. Макро- и микромиры и гармония
108. *П.С.Александров*. Введение в теорию групп (2-е изд.)
109. *А.В.Спивак*. Арифметика-2
110. *П.Г.Крюков*. Лазер – новый источник света
111. *А.Б.Сосинский*. Узлы. Хронология одной математической теории
112. *А.П.Пятаков, П.П.Григал*. Лаборатория на коленке
113. *А.А.Заславский*. Олимпиады имени И.Ф.Шарыгина
114. *С.В.Коновалхин*. Сборник качественных задач по физике
115. *Е.Я.Гук*. Математика и шахматы
116. *Л.К.Белопухов*. Физика внезапного
117. *Н.Б.Васильев, А.А.Егоров*. Задачи всесоюзных математических олимпиад. Часть 1
118. Задачник «Кванта». Физика. Часть 1
119. *Н.Б.Васильев, А.А.Егоров*. Задачи всесоюзных математических олимпиад. Часть 2
120. Задачник «Кванта». Физика. Часть 2
121. *Н.Б.Васильев, В.Л.Гутенмахер, Ж.М.Раббот, А.Л.Тоом*. Заочные математические олимпиады