

Наука
для всех

С. Г. Рубин

УСТРОЙСТВО НАШЕЙ ВСЕЛЕННОЙ



Фрязино
2006

УДК 524
ББК 22.66
Р 82

Рубин Сергей Георгиевич — доктор физико-математических наук, профессор Московского инженерно-физического института.

Область научных интересов — космология, многомерная гравитация, черные дыры.

Рубин С. Г.

Р 82 Устройство нашей Вселенной. — Фрязино: Век 2, 2006. — 312 с. — (Наука для всех).

ISBN 5-85099-166-2

В книге излагаются современные взгляды на происхождение и эволюцию Вселенной. Почему законы природы именно такие, какими мы их наблюдаем? Могли бы они быть другими и к чему бы это привело? Что ждет в будущем мир, в котором мы живем, и возможно ли существование других вселенных?

Для всех, интересующихся проблемами современного естествознания.

УДК 524
ББК 22.66

ISBN 5-85099-166-2

© Век 2, 2006

*Все проще, чем вы думаете,
и одновременно сложнее,
чем вы можете вообразить.*

Иоганн Вольфганг Гете

Книг по космологии уже издано довольно много, но тем не менее интерес к новым публикациям не пропадает. Это связано, во-первых, с быстрым развитием космологии и, во-вторых, с тем, что каждая научно-популярная статья или книга ограничивается определенным набором тем, связанных с предпочтениями авторов. Кроме того, разным читателям интересны разные аспекты проблемы и на разных уровнях обобщения.

Чтение научных статей и книг предполагает априорное хорошее владение предметом. Научно-популярные же издания часто ориентируются на менее подготовленного читателя и ограничиваются перечислением фактов. Это само по себе интересно и действительно может увлечь читателя, но тот, кто интересуется причинами явлений, останется неудовлетворенным. В этой книге я старался не только описывать явления — в конце концов, почти любую информацию легко найти в Интернете, — но и объяснять причины этих явлений. Не всегда это удавалось сделать просто, и тот, кто не хочет вдаваться в математические детали, вполне может их пропускать и двигаться дальше. Этот вариант учитывался при написании книги, и трудные в математическом отношении вопросы изложены в приложениях.

Наиболее важными представляются главы 2, где охарактеризована современная модель рождения нашей Вселенной (Большой взрыв), и 5, где обсуждаются удивительные свойства Вселенной, приведшие к зарождению разумной жизни. В остальных главах изложено современное, на 2005 г., понимание явлений и объектов микро- и макромира, так или иначе связанных с проблемами космологии.

Благодарности

Автор признателен А. Беркову, Е. Григорьеву, Р. Конопличу и В. Решетову за интересные обсуждения и замечания, улучшившие текст книги. Я благодарен также своей семье за моральную поддержку и живой интерес, проявленный к содержательной части текста.

Современная космология — бурно развивающаяся область научных исследований. Это обусловлено удачным стечением обстоятельств: с одной стороны — прогрессом в технике, который привел к резкому росту количества и качества информации об устройстве Вселенной, с другой — множеством новых плодотворных идей в теоретической космологии. Количество научных и научно-популярных статей быстро растет — пропорционально объему получаемой информации.

Особенность космологии как науки об эволюции Вселенной состоит в том, что при разработке новых теоретических моделей приходится иметь дело практически со всеми физическими дисциплинами одновременно. Квантовая теория поля, физика элементарных частиц, ядер и атомов, статистическая физика, гравитация — вот далеко не полный перечень областей знания, взаимосвязи между которыми необходимо учитывать. Кроме того, все новые идеи проверяются на непротиворечивость по отношению к наблюдательным данным и на согласование с уже известными законами. Нередко имеется несколько различных моделей, объясняющих наблюдательные данные, и лишь будущие исследования выявят верную.

Обозначения

В астрофизике массы объектов обычно измеряются в массах Солнца, обозначаемых $M_{\odot}$. Все скорости удобно измерять в скоростях света, так что скорость любой массивной частицы $v < 1$, а всюду в формулах полагается скорость света $c = 1$. Так, энергия покоящейся частицы просто равна ее массе, $E = m$, обе величины измеряются в электрон-вольтах. Связь полной энергии частицы с ее импульсом имеет вид

$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$. Для частиц, массой которых можно пренебречь (ультрарелятивистские частицы, нейтрино, фотоны), используется формула $E = pc$. Постоянную Больцмана k также во всех выражениях считаем равной 1, так что температура тоже измеряется в электрон-вольтах. При этом для оценок полезно помнить, что температура, равная 1 ГэВ, — это примерно 10^{13} К, а применительно к массе 1 ГэВ — примерно $2 \cdot 10^{-24}$ граммов.

Скорость света c , постоянная Планка $\hbar$ и гравитационная постоянная G считаются фундаментальными константами. Из них можно «соорудить» величины с размерностью «длина», «время» и «масса» и измерять все величины в единицах планковской длины, планковского времени и массы Планка:

$$\text{Длина (см): } L_P = \sqrt{\hbar \frac{G}{c^3}} = 1,616 \cdot 10^{-33};$$

$$\text{Время (с): } T_P = \sqrt{\hbar \frac{G}{c^5}} = 5,391 \cdot 10^{-44};$$

$$\text{Масса (г): } M_P = \sqrt{\hbar \frac{c}{G}} = 2,177 \cdot 10^{-5}.$$

Эта так называемая планковская система единиц оказывается удобной в теоретических исследованиях. Читатель, не привыкший к переходу от одних единиц измерения к другим, может не заботиться об этих деталях, а просто следить за самими величинами, поверив, что все переходы сделаны правильно.

Полезно привести таблицу характерных астрономических расстояний.

1 световой год	$0,95 \cdot 10^{18}$ см
1 парсек	$3,1 \cdot 10^{18}$ см
Радиус Земли.	$6,4 \cdot 10^8$ см
Радиус Солнца	$6,9 \cdot 10^{10}$ см
Расстояние от Земли до Луны	$3,8 \cdot 10^{10}$ см
Расстояние от Земли до Солнца	$1,5 \cdot 10^{13}$ см

Расстояние от Земли до ближайшей звезды (Проксима Кентавра ¹)	$4,0 \cdot 10^{18}$ см
Радиус нашей Галактики	$2,3 \cdot 10^4$ парсек
Расстояние до ближайшей галактики (Магеллановы Облака)	$4,6 \cdot 10^4$ парсек
Размер видимой части Вселенной	6 000 мегапарсек, или 10^{28} см

Парсек (пк) — это расстояние, с которого большая полуось земной орбиты видна под углом, равным 1 секунде.

Надо также иметь в виду, что светимости объектов часто нормируются на светимость Солнца, которая составляет $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с, а массы объектов выражаются в массах Солнца, $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г.

Возраст нашей Вселенной составляет примерно 13–14 млрд. лет.

¹ Встречается также написание «Центавра» (от лат. Centaurus).

ИНГРЕДИЕНТЫ ВСЕЛЕННОЙ

С тех пор, как человек стал проявлять интерес к окружающему миру не только с точки зрения основных инстинктов, его понимание природы непрерывно совершенствовалось. Человек узнавал о новых объектах, составляющих мир, в котором мы живем, об их взаимосвязях. Круг знаний постоянно расширялся, но, как заметил еще Пифагор, вместе с тем увеличивалась и область соприкосновения с неведомым. Каждый раз, как только ученым удавалось объяснить какое-либо явление, возникало несколько новых, еще более сложных вопросов. Это напоминало бой былинного богатыря с драконом, у которого после отсечения одной головы вырастают три новые, причем еще более неприятные. К счастью, в науке новые головы-вопросы вырастают не на одном и том же месте. Любая теория, которая является не чем иным, как ответом на очередной вопрос, остается правильной и в дальнейшем. Уточняется лишь область ее применимости. Так постепенно усложняются наши представления о Вселенной, ее устройстве и взаимоотношении частей, ее составляющих.

Долгое время Вселенная рассматривалась как некий контейнер, в который каким-то образом помещены объекты для изучения — частицы, планеты, звезды и т. д. Делом ученых было описание этих объектов и их взаимодействия друг с другом. Первые облачка, бросающие тень на эту идиллическую картину, появились после открытия А. Фридмана, обнаружившего, что стационарное состояние Вселенной неустойчиво и она должна либо расширяться, либо сжиматься. Если, конечно, общая теория относительности Эйнштейна верна. Скорость расширения/сжатия Вселенной оказалась зависящей от

средней плотности вещества. Свойства «ящика» зависят от его содержимого? Странно... Дальнейшие исследования привели к выводу, что вся наша Вселенная родилась около 14 млрд лет назад из пространственной области порядка 10^{-27} см или меньше. А это на 19 порядков меньше размера атома. Понятно, что в такой маленькой области не могло существовать все обилие частиц, составляющих звезды. Следовательно, Вселенная и частицы рождались одновременно! И, конечно же, влияли друг на друга.

Сейчас уже ясно, что наша Вселенная — это не «кастрюля с супом», в которой могло находиться любое содержимое, а сложный организм, все части которого, большие и малые, сложнейшим образом переплетены и взаимообусловлены. Поэтому неудивительно, что космология стала тем оселком, на котором оттачиваются наши знания о природе. Ведь здесь важны и свойства элементарных частиц, и общая теория относительности, и статистическая физика, причем зачастую все одновременно.

Мы живем в удивительное время: предыдущие поколения не представляли себе всю судьбу Вселенной, возможные варианты ее истории, ее прошлого и будущего. Они изучали только то, что видели в данный момент. Лишь сейчас становится понятным общий ход эволюции Вселенной, от момента ее рождения и далее в будущее. Конечно, детали, и существенные детали, еще не ясны, но практически все возможные варианты эволюции нашей Вселенной уже названы.

О здравом смысле и научном подходе

К сожалению, «знание порождает печали», и расплатой за прогресс в науке является отсутствие наглядности. Наш мозг в течение миллионов лет подстраивался к очень специфичным условиям — небольшие скорости, много меньше скорости света, большие тела, для которых квантовые явления несущественны, трехмерное пространство. Однако новые теории базируются на общей теории относительности, квантовой теории и часто — на многомерности пространства. Наука усложнилась настолько, что мозг не в состоянии вообразить новые явления.

Как же отделять зерна от плевел, истинное от ложного, если нельзя опираться на здравый смысл, т. е. на те понятия, которыми наш мозг привык оперировать?

Предположим, что имеется некое явление, которое необходимо объяснить. Это может быть, например, а) ток, текущий по проводам, или б) квазары. Прежде всего вводится исходный постулат, который не доказывается, что честно и признается. В нашем случае для объяснения явления (а) вводится предположение о существовании электронов, а явления (б) — о существовании массивных черных дыр в центрах галактик. Конечно же, постулаты вводятся так, чтобы успешно объяснить конкретное явление.

Но далее начинается самое главное — введенный постулат, во-первых, не должен противоречить никаким известным природным явлениям и, во-вторых, должен предсказывать новые явления, проверяемые экспериментально. Если выводы, вытекающие из утверждения, согласуются с опытными данными, то оно считается верным, несмотря на всю его парадоксальность. С этой точки зрения предположение о черных дырах в центрах галактик является хорошо обоснованным, и довод, что «никто там рядом не был и не видел черную дыру», научным не является. Ведь и электрон никто не видел! Тем не менее предположение о его существовании помогло объяснить множество явлений, и мы просто привыкли к электронам. Наш мозг — «ретроград», и многое, что ему сначала кажется невозможным, со временем становится привычным. Предположение о массивных черных дырах в центрах галактик точно так же объясняет многие явления и, следовательно, должно считаться верным.

Поэтому всякий раз, когда вам хочется воскликнуть: «Этого не может быть!» — подумайте: а почему, собственно? Чему это противоречит? Если только так называемому «здоровому смыслу», то этого уже недостаточно.

Физические сущности настолько переплетены, что если глубоко изучать одну из них, непременно приходится учитывать и все остальные. Как уже говорилось, это особенно относится к космологии, науке о рождении и эволюции Вселен-

ной. Поэтому краткий экскурс в основные направления физики необходим. Начнем с малых мира сего, а самые малые — это, конечно

Элементарные частицы

Основными свойствами частиц являются масса, заряд и спин. Распределение частиц по массам, как кажется, не подчиняется никаким правилам. Заряды же частиц кратны заряду электрона, за исключением кварков, заряд которых кратен $1/3$ заряда электрона. Под понятием «спин» можно понимать внутренний момент вращения частицы. Спин частиц пропорционален постоянной Планка $\hbar$. Оказывается, что свойства частиц кардинальным образом зависят от того, целое или полуцелое число постоянных Планка содержит их спин. Если это число целое (0, 1, 2...), то такие частицы называются бозонами, а если полуцелое ($1/2, 3/2, 5/2 \dots$) — фермионами.

Еще одно существенное различие частиц — по их отношению к сильному взаимодействию. Частицы, участвующие в процессах с сильным взаимодействием, называются кварками (из них состоят все барионы — протон, нейтрон и др.), остальные, не участвующие в сильных взаимодействиях, — лептонами. Ниже в таблице приведены их характеристики. Для кварков приведены также русские названия. Физики обычно пользуются английскими.

Наиболее важными бозонами, т. е. частицами с целым спином, являются фотон, глюоны (их 8), $W^\pm$ -бозоны, Z -бозон и пока еще не открытый гравитон.

В современной теории поля частицы — это мелкомасштабные волны соответствующих полей. Электромагнитное излучение может восприниматься как волна (радиоволны) и как



Рис. 1.1. Электромагнитное поле представляется в виде волны. Быстро осциллирующая волна детектируется как группа фотонов.

Фермионы, спин = $\frac{1}{2}$

Название	Обозначение	Масса, ГэВ	Заряд
Лептоны			
Электронное нейтрино	ν_e	$< 10^{-8}$	0
Электрон	e	0,000511	-1
Мюонное нейтрино	ν_μ	$< 0,0002$	0
Мюон	μ	0,106	-1
Тау-нейтрино	ν_τ	$< 0,02$	0
Тау-лептон	τ	1,7771	-1
Кварки			
u (up – вверх)		0,003	$\frac{2}{3}$
d (down – вниз)		0,006	$-\frac{1}{3}$
c (charm – очарование)		1,3	$\frac{2}{3}$
s (strange – странность)		0,1	$-\frac{1}{3}$
t (top – верх)		175	$\frac{2}{3}$

частица (гамма-кванты). Если длина электромагнитной волны гораздо больше размеров прибора, то она регистрируется им как непрерывная волна – распространяющиеся колебания электрического и магнитного полей. В противоположном случае (малых длин волн) прибор воспринимает свет в виде потока отдельных квантов – фотонов. В этом случае говорят уже не о длине волны, а об энергии фотона.

Известно, что энергия фотона и длина волны обратно пропорциональны друг другу, $E = \frac{hc}{\lambda}$. Так, красный свет имеет длину волны примерно 700 нанометров, чему соответствуют фотоны с энергией 1,8 электрон-вольт. Вселенную пронизывают фотоны различных энергий, в том числе с энергиями в тысячи и миллионы электрон-вольт.

Античастицы

В свое время П. М. Дирак заметил, что уравнения, описывающие движение элементарных частиц, описывают также движение частиц-двойников, обладающих той же массой, но противоположным зарядом. Как обычно, было два пути: либо найти эти частицы в эксперименте, либо искать другие уравнения.

От уравнений отказываться не хотелось — уж больно элегантно они выглядели. К счастью, оказалось, что такие частицы действительно существуют! Каждой частице соответствует своя античастица.

Выяснилось, что все законы природы с очень высокой точностью одинаковы (но не абсолютно) для частиц и античастиц. Характерной и важной для нас особенностью частиц и античастиц является то, что при столкновении они взаимоуничтожаются (аннигилируют). Не бесследно, конечно: закон сохранения энергии и импульса справедлив и в мире элементарных частиц. Чаще всего конечным продуктом аннигиляции являются фотоны и пи-мезоны. Кинетическая энергия частицы и античастицы, а также потенциальная энергия, содержащаяся в их массе, полностью переходят в энергию фотонов. Например, после столкновения двух однограммовых кусочков вещества и антивещества выделилось бы в виде фотонов примерно 10^{15} Дж энергии. Это много. Таким количеством энергии можно приготовить 30 млн. тонн кипятка, в случае нужды.

Понятна и причина того, что античастиц вокруг нас нет: просто все они исчезли при столкновении с частицами. Однако тут же всплывает другой вопрос: а почему тогда остались частицы? Действительно, если основные уравнения для них одинаковы, то и частиц быть не должно, одни фотоны. Вот это уже серьезный вопрос, который не прояснен до конца и поныне. Конечно, существует много вариантов ответа, и позже мы поговорим об одном из них, но какой именно вариант верен, пока неизвестно.

Виды взаимодействий

Нельзя хлопнуть в ладоши одной рукой.

А. Навои

Кроме индивидуальных свойств частиц, необходимо знать форму их взаимодействия с другими частицами и друг с другом. Чтобы создать все многообразие явлений, Природе понадобилось всего лишь четыре вида взаимодействия — слабое, электромагнитное, сильное (ядерное) и гравитационное. Сейчас уже более или менее понятно, что первые три имеют об-

щее происхождение, но в обычных условиях, при низких энергиях, они действуют самостоятельно. Рассмотрим кратко каждое из этих взаимодействий. Начнем с электромагнитного, как наиболее знакомого.

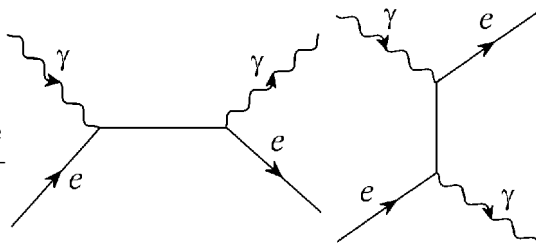
Электромагнитное взаимодействие

В 1873 г. Джеймс Максвелл вывел уравнения, описывающие всю совокупность магнитных и электрических явлений, тем самым показав, что они имеют единое происхождение. Сейчас мы уже понимаем, что все электромагнитные явления так или иначе связаны с обменом фотоном или излучением фотона. Этот вид взаимодействия, несомненно, необходим для образования сложных структур. Атомы и молекулы обязаны своим существованием электромагнитному взаимодействию. Радио и телевидение существуют благодаря тому, что масса фотонов равна нулю и они могут передавать взаимодействие между объектами на значительные расстояния.

Основным актом взаимодействия считается испускание или поглощение одной частицы другой.

Для облегчения работы часто используют диаграммы Фейнмана. Тогда эффект Комптона, т. е. рассеяние фотона на электроне, выглядит следующим образом (рис. 1.2). В первом случае электрон на некоторое время поглощает фотон и затем его излучает, но уже с другим импульсом. Интерпретация второго варианта сложнее. Фотон, или, что то же самое, гамма-квант, тот, что в верхней части рисунка, исчезает, порождая улетающий электрон и виртуальный позитрон. Последний вступает в контакт с прилетевшим электроном, образуя фотон (так называемая аннигиляция электрон-позитронной пары).

Рис. 1.2. Рассеяние фотона (обычно обозначается буквой γ) на электроне (e)



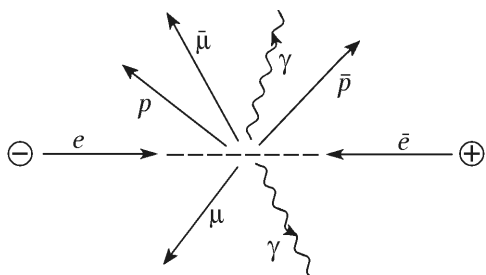


Рис. 1.3. Столкновение электрона и позитрона с энергией, достаточной для рождения гораздо более массивных частиц, в данном случае протона, антипротона, мюона, антимюона и двух фотонов.

Поскольку законы сохранения энергии и импульса никто не отменял, суммарная энергия (импульс) начальных частиц равна суммарной энергии (импульсу) конечных. Отмечу особо, что сохраняется лишь энергия, число же частиц может меняться. Так, на современных ускорителях столкновение двух энергичных частиц, например электрона и позитрона, приводит к рождению сотен новых частиц, и многие из них гораздо массивнее электрона. Часть кинетической энергии сталкивающихся частиц переходит в массу рождающихся (рис. 1.3).

Квантовая электродинамика добилась выдающихся результатов. Например, магнитный момент мюона обычно выражается через некую величину $(g - 2)/2$. Теоретические вычисления дают $(g - 2)/2 = (11\,659\,176 \pm 6,7) \cdot 10^{-10}$, а экспериментальное значение — $(11\,659\,204(7)(4)) \cdot 10^{-10}$. Удивительная точность! Но не все в порядке даже и в этой области.

Посмотрим на процесс, представленный на рис. 1.4. Это уже знакомый нам эффект Комптона, но с небольшой добавкой: электрон перед тем, как улететь, излучает и поглощает

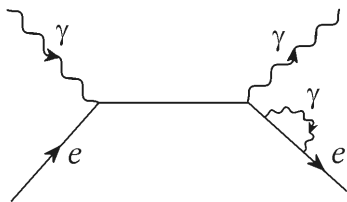


Рис. 1.4. Рассеяние фотона электроном с кратковременным рождением еще одного фотона.

фотон. Время существования последнего мало, поэтому такой фотон называется «виртуальным». Процесс происходит так быстро, что наблюдатель не в состоянии его заметить непосредственно, хотя теория, основанная на хорошо проверенных постулатах, предсказывает существование вирту-

альных частиц. Раз постулаты (законы) написаны, надо следовать им до конца. Так что законопослушный ученый должен научиться вычислять и подобные процессы. Увы, оказалось, что последовательный расчет невозможен из-за возникающих бесконечно больших величин. Так, в расчете процесса рассеяния частиц, изображенного на рис. 1.4, возникает необходимость вычисления интегралов типа $\int_0^\infty dx/x$, которые равны бесконечности. Ученые давно научились обходить эту трудность, но она продолжает висеть дамокловым мечом над теоретиками, прямо указывая на то, что полноценная теория еще не создана.

Гравитационное взаимодействие —

самое слабое из всех. Чтобы представить себе масштаб этой малости, можно, используя закон тяготения Ньютона и закон Кулона, вычислить силу электрического отталкивания двух электронов и силу их гравитационного притяжения. Оказывается, что отталкивание за счет электрических сил в 10^{43} раз больше! Но электромагнитные силы действуют на объекты, обладающие электрическим зарядом, а гравитационные — на любые объекты, обладающие энергией, включая, конечно, и энергию покоя, равную массе, $E = mc^2$ (напомню, что всюду в формулах $c = 1$). Макроскопические структуры обычно не заряжены, и для них гравитационное взаимодействие становится основным.

Слабое взаимодействие

является самым слабым из всех, кроме гравитационного, что не умаляет его влияния на эволюцию Вселенной. Переносчики слабого взаимодействия — Z - и W -бозоны, масса которых на два порядка превосходит массу протона. Пример диаграммы Фейнмана для процесса с участием слабого взаимодействия представлен на рис. 1.5.

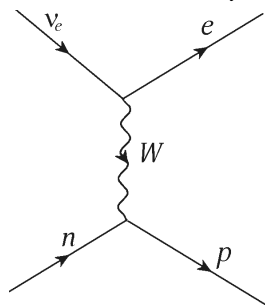


Рис. 1.5. Электронное нейтрино (ν_e) и нейтрон (n) обмениваются W -бозоном и превращаются в электрон (e) и протон (p).

Слабое взаимодействие эффективно только на сверхмалых расстояниях — порядка 10^{-16} – 10^{-17} см.

Нейтрино — частица, сильно обделенная Природой, которая дала ей единственную возможность заявить о себе — через слабое взаимодействие. Поэтому вероятность столкновения нейтрино с другими частицами чрезвычайно мала. И это хорошо — ведь плотность реликтовых, т. е. родившихся в ранний период эволюции Вселенной, задолго до появления звезд, нейтрино равна 100 см^{-3} . Нетрудно подсчитать, что в данный момент внутри вас пролетает примерно 10^8 нейтрино со скоростями, близкими к световой.

Сильное взаимодействие

Для стабильности ядер необходимо сильное притяжение, которое противодействовало бы кулоновскому отталкиванию протонов и удерживало протоны и нейтроны в ядре. Природа обеспечила нас таким взаимодействием, которое назвали попросту — «сильное» (или ядерное). Все барионы, включая хорошо известные протон и нейтрон, состоят из «более элементарных» частиц — кварков, взаимодействие между которыми передается новыми безмассовыми частицами — глюонами.

В отличие от остальных видов взаимодействия, сила взаимодействия между кварками возрастает с увеличением расстояния между ними. Поэтому никому еще не удалось обнаружить отдельный кварк. Кварк может распространяться в среде только в тесной кооперации с другими кварками. Протоны, нейтроны и пи-мезоны как раз и являются примерами подобных коллективов. Сильное взаимодействие таких коллективов на больших расстояниях пренебрежимо мало.

За все приходится платить: ядерные силы доминируют, но только на очень малых расстояниях — порядка 10^{-13} см. Например, мы знаем, что ядра железа стабильны — иначе среди окружающих нас предметов не было бы кастрюль и вилок. Но вот ядра урана уже нестабильны, хотя их размер всего вдвое превышает размер ядра железа. Сильные взаимодействия в ядрах урана уже не могут эффективно противодействовать электрическому отталкиванию протонов ядра.

Модель Вайнберга—Салама. Успехи и проблемы

Наибольшим достижением в физике элементарных частиц является модель Вайнберга—Салама, объединившая сначала слабые и электромагнитные взаимодействия, а затем и сильные. Чтобы проникнуться красотой этой теории, нужно разбираться в довольно сложной математике, что затруднительно в рамках данной книги, но словесное обсуждение представляется необходимым. По значимости модель сравнима с открытием Максвелла, понявшего, что электрическое и магнитное поля не являются самостоятельными сущностями, и написавшего единую систему уравнений для обоих полей. Так, в световой волне происходит непрерывное преобразование электрического поля в магнитное и обратно. Именно поэтому световая волна называется электромагнитной.

Стивен Вайнберг и Абдус Салам пошли дальше. Они не только доказали, что слабое, электромагнитное (а затем и сильное) взаимодействия имеют общее происхождение, но и показали, например, что электрон и нейтрино также являются «двумя сторонами одной медали». Лишь при небольших энергиях и температурах они приобретают разные свойства, что мы и наблюдаем. Кстати, не такие уж эти температуры и «небольшие» — граница проходит в районе 10^{15} ГэВ (примерно 10^{28} К). Кроме того, в модель был включен любопытный механизм появления масс частиц. До этого никто не понимал, почему массы частиц именно таковы, они просто постулировались. Вайнберг и Салам привлекли для объяснения уже известный механизм (Хиггса), который объяснял происхождение масс частиц их взаимодействием с новым гипотетическим «полем Хиггса».

Успехи модели Вайнберга—Салама столь впечатляющи, что она получила название стандартной модели. Пожалуй, это последняя установившаяся модель в физике, предсказания которой были подтверждены экспериментально. Но даже она не является завершенной: некоторые облачка маячат на горизонте, предвещая будущую бурю. Кратко перечислю их.

Теоретическое значение величины $(g - 2)/2$ получено именно в рамках модели Вайнберга—Салама. Замечательное совпа-

дение с экспериментальной величиной, но нетрудно видеть (см. с. 18), что теория и эксперимент немного отличаются друг от друга. Отличие крайне мало, но кто знает, к чему это приведет в дальнейшем?

Модель предсказывала существование новых частиц — W - и Z -бозонов, а также частиц Хиггса, ответственных за массы всех других частиц. W - и Z -бозоны нашли, и именно с теми параметрами, которые предсказывались! Это феноменальный успех модели. Но частицы Хиггса не найдены до сих пор... Интересно, что именно применительно к ним стандартная модель дает очень расплывчатые предсказания. В 2007 г. в ЦЕРНе (Женева) будет запущен ускоритель, на который в числе прочего возлагается миссия по поиску частиц Хиггса.

Еще одна проблема: частицы Хиггса взаимодействуют между собой слишком сильно — константа взаимодействия больше $1/4$. Значит, и квантовые поправки ко всем свойствам этой частицы велики, что не позволяет достоверно говорить о ее свойствах.

Кроме того, в модели имеются аномально малые, по сравнению с естественным планковским масштабом, параметры. Не ясно также происхождение разницы в массах электрона, мюона и тау-лептона. И еще один момент. В данной модели масса нейтрино равна нулю. Сейчас же выясняется, что эта масса хоть и мала, но отлична от нуля...

Похоже, облачка сгущаются в тучи, и существенная коррекция модели необходима.

Квантовая теория

Мы живем в большом мире, в котором все тела движутся по определенным траекториям. Но в конце прошлого тысячелетия был открыт микромир, где правила квантовая теория. В частности, стало понятно, что траектории частиц не являются гладкими, а представляют собой совокупность флуктуаций вокруг среднего движения. То же самое касается и энергии системы: она все время флуктуирует вокруг среднего значения, даже если система изолирована. Это красивая и сложная теория, но нам будет достаточно лишь одного ее следствия, ко-

торый называется *принципом неопределенности Гейзенберга* (или *соотношением неопределенностей*).

Принцип неопределенностей говорит о том, что мы принципиально не можем *точно* измерить пространственную координату частицы x и ее импульс p одновременно. Неопределенность этих величин чрезвычайно мала, поэтому о ней долго не подозревали, но она существует, так что выполняется неравенство

$$x \, p \geq \hbar, \quad (1.1)$$

где $\hbar$ — знаменитая постоянная Планка, одна из немногих фундаментальных величин физики. Это неравенство утверждает, что если импульс частицы измерен с точностью p , то ее координата не может быть измерена точнее величины $x \sim \hbar / p$.

Второе неравенство, которое нам понадобится в дальнейшем, записывается в виде

$$E \, t \geq \hbar \quad (1.2)$$

и связывает неопределенность в измерении энергии системы со временем измерения. Формулы (1.1) и (1.2) относятся к *измерению* физических величин. А что же происходит с ними *на самом деле*? Квантовая теория предсказывает, что флуктуации физических величин действительно существуют, и для их оценки пользуются следующими формулами:

$$x \, p \sim \hbar \quad (1.3)$$

$$E \, t \sim \hbar \quad (1.4)$$

Эти равенства верны «по порядку величины», т. е. истинный результат может отличаться от оценки в несколько раз. Последняя формула означает, что энергия замкнутой системы может претерпевать флуктуации величиной E , но на очень короткое время, порядка $t \sim \hbar / E$.

Приведенные соотношения часто позволяют получать качественные, оценочные результаты, не прибегая к точным, но громоздким уравнениям квантовой теории. Один такой пример изложен в Приложении 1, и из него становится ясно, что электрон не падает на ядро только потому, что в этом случае нарушилось бы фундаментальное соотношение (1.1).

Мы видим, что электрон не поглощается ядром, поскольку подчиняется законам квантовой механики, но и не улетает от него благодаря электрическому притяжению. Без законов квантовой механики и электромагнитного взаимодействия стабильных атомов не существовало бы.

Чтобы увидеть, как работают формулы (1.3) и (1.4), оценим максимальное расстояние, на которое распространяется слабое взаимодействие. Пусть сталкиваются нейтрино и электрон. Из рис. 1.5 видно, что на какое-то короткое время должен родиться W -бозон. Если суммарная энергия нейтрино и электрона гораздо меньше его массы $m_W = 80$ ГэВ, то W -бозон может родиться только на короткое время. Из формулы (1.4) следует, что при флуктуации энергии на величину $E = m_W$ длительность этой флуктуации составляет

$$t = \frac{\hbar}{E} = \frac{\hbar}{m_W}.$$

Поскольку скорость W -бозона не может превышать скорость света, то наибольшая область его влияния имеет размер порядка

$$l \sim t = \frac{\hbar}{m_W} = 10^{-16} \text{ (см)}.$$

Это совпадает с реальным расстоянием, на котором действует слабое взаимодействие.

Мы видим, что соотношение неопределенностей Гейзенберга помогает понять сущность самых разных явлений. В дальнейшем оно будет использовано для оценки эффекта Хокинга — квантового испарения черных дыр.

В Приложении 1 приведены оценки размеров атомов, основанные на принципе неопределенности. Результатом этой оценки является удивительный вывод, что атомы, оказываясь, представляют собой сравнительно разреженную среду. Если ядро увеличить до размера 1 м, то электроны будут находиться на расстоянии 100 км. Получается, что мы состоим в основном из пустоты. Электроны, даже находясь на таком расстоянии от ядра, образуют некое облако и не позволяют

другим атомам проникать внутрь их «сферы интересов», к своему ядру.

Почему же мы не ощущаем квантового поведения? Когда бегун пересекает финишную прямую, мы, казалось бы, можем точно измерить его скорость в этот момент времени. Увы, не все подвластно человеку. Скорость можно измерять очень точно, но эта точность все-таки ограничена снизу принципом неопределенности. Поучительно оценить предел наших возможностей. Пусть масса бегуна $m = 100$ кг (он не претендует на чемпионское звание) и мы хотим определить его скорость в момент финиша. Пусть финишная ленточка имеет толщину $x = 1$ микрон — это 10^{-6} метра, вполне хорошая точность для любительских соревнований. Учитывая соотношение неопределенностей и то, что скорость связана с импульсом обычным образом, $v = p/m$, получим неточность в определении скорости:

$$v \sim \frac{\hbar}{m x} \approx 10^{-30} \text{ (м/с)}.$$

Неудивительно, что мы не замечаем таких мелочей. И это хорошо. Но если массу измеряемого объекта сильно уменьшить — скажем, до массы того же электрона, — то неопределенность в скорости будет уже другой — $v = 100$ м/с! И так, еще раз: если мы хотим измерить положение электрона с точностью 10^{-6} метра, то погрешность в определении его скорости не может быть меньше 100 метров в секунду! Это однозначное предсказание квантовой механики, справедливость которой подтверждена многократно.

Еще одно удивительное явление микромира — туннельный эффект. Оказывается, частицы могут преодолевать энергетические барьеры, даже имея энергию, гораздо меньшую, чем сам барьер. Чтобы представить себе эту удивительную способность частиц, проведем аналогию в макромире — мире больших объектов, к которому мы привыкли. Представим себе тюрьму будущего — обнесенное высокой стеной пространство. Стена достаточно высокая и гладкая, чтобы не оставлять никаких надежд заключенным, они всегда будут оставаться



внутри. Это типичная для макромира ситуация. Теперь добавим к этой безрадостной картине начальника, склонного к садизму. Эта склонность проявляется в том, что заключенным доступны различные средства преодоления стены — ракетные ранцы, например. Но у них имеется одна особенность: как только эти предметы попадают за пределы стены, они через секунду взрываются. При этом взрыв такой силы, что надежд выжить беглецу не остается. Тем не менее возможность преодолеть стену появилась. Можно, воспользовавшись реактивным ранцем, взлететь над стеной и, оказавшись по ту сторону, быстро перекинуть ранец обратно внутрь. После падения вне стен тюрьмы заключенный может пострадать, но так или

иначе цель достигнута. Он преодолел стену благодаря тому, что использовал единственную возможность — на *короткое* время воспользовался устройством, которым долго пользоваться нельзя.

Ну а в микромире имеется формула (1.4), которая как раз и говорит о том, что на короткое время, равное примерно $t = \hbar / E$, энергия частицы может спонтанно увеличиться на величину E . Если, имея такую дополнительную энергию, частица перейдет через энергетический барьер за время, меньшее t , то уже за барьером она отдаст «одолженную» энергию в окружающее пространство.

Конечно, рассмотренная аналогия не абсолютно точна. Посмотрите на рис. 1.5. Здесь легкие частицы обмениваются тяжелой — W -бозоном. Кардинальное отличие состоит в том, что момент побега заключенного может быть заснят фотоаппаратом или даже видеокамерой, а момент перехода W -бозона принципиально ненаблюдаем.

Таким образом, согласно квантовой теории, даже малоэнергичные частицы могут преодолевать высокие барьеры. Это явление обнаружено экспериментально. Оказывается, в микромире квантовая теория позволяет то, что невозможно в макромире.

Поля

Мир частиц, конечно интересен и сложен, но еще более интересен мир полей, успешно используемых для описания различных явлений. Более того, понятие поля стало ключевым в теоретической физике. При упоминании слова «частица» каждый невольно представляет себе маленький шарик, и это часто помогает понять происходящее явление (хотя иногда и мешает). К сожалению, при слове «поле» никаких полезных ассоциаций обычно не возникает, поскольку наше сознание не имело опыта взаимодействия с такими объектами. Тем не менее некоторый опыт уже появился, и можно попытаться прояснить это важнейшее понятие.

Неплохой аналогией являются волны на поверхности озера. Абсолютно ровная, зеркальная поверхность воды не пред-

ставляет особого интереса, поскольку ситуация бедна событиями. Лишь когда подует ветер, появляются волны, поверхность принимает причудливые, изменяющиеся со временем формы. Вне всякого сомнения, движущиеся области поверхности обладают кинетической энергией, которую могут передавать друг другу и окружающей среде.

Кстати, мы уже давно знакомы с одним из полей — электромагнитным. Ведь радиоволны — это не что иное, как распространяющиеся колебания этого поля. Именно изменяющееся поле способно переносить свою энергию и передавать ее приемникам. Отсутствие электромагнитных волн еще не означает, что само электромагнитное поле также отсутствует: так, в конденсаторе сосредоточено постоянное электрическое поле, а неподвижный магнит окружен стационарным магнитным полем. Отметим, что поле имеется в каждой точке пространства. На математическом языке это означает, что поле есть функция координат. Какая именно функция — зависит от свойств поля и объектов, его создающих.

Ну а что же собой представляют частицы — кванты электромагнитного поля (фотоны)? Этот вопрос обсуждался выше: колебания электромагнитного поля — сложное движение, которое иногда выглядит как волна, а иногда — как частица (см. рис. 1.1). Важный вывод заключается в следующем: частицы (фотоны) суть колебания поля (электромагнитного), но отсутствие частиц еще не означает отсутствия самого поля, некоей субстанции, распределенной в пространстве.

Понятие электромагнитного поля оказалось чрезвычайно плодотворным. На «полевом» языке фотоны — колебания электромагнитного поля — эквивалентны мелкой ряби на поверхности воды. В то же время оказываются возможными и другие, не менее интересные явления — большие волны типа цунами, «водовороты», «водопады» и т. д. Как мы видим, понятие «поле» более универсально, чем понятие «частица».

До сих пор мы говорили об электромагнитном поле, как наиболее привычном. Но кроме фотонов, имеются и другие частицы: протоны, *W*-бозоны, пи-мезоны и т. д. Современная физика основывается на утверждении, что каждый сорт час-

тиц соответствует колебаниям своего поля. Но свойства каждого сорта частиц индивидуальны. Электроны отличаются от протонов, нейтрино и тех же фотонов по нескольким параметрам — массе, спину, заряду... Значит, и соответствующие им поля должны различаться по своим свойствам. Дальнейшее уточнение свойств полей уведет нас далеко в сторону. Сейчас же необходимо подвести промежуточные итоги.

Итак, существование электромагнитного поля сомнений не вызывает. Это подтверждается наличием магнитного поля у магнитов и электрического поля у зарядов. Связь между этими полями давно установлена в виде уравнений Максвелла. Эти же уравнения предсказывают существование электромагнитных волн. Часто эти волны воспринимаются детекторами как частицы. Далее делается обратный вывод — если существуют частицы какого-либо сорта, то это означает, что должно существовать поле, колебаниями которого они являются. Трудно смириться с мыслью, что частицы и волны — колебания этого поля — так тесно взаимосвязаны. Но это экспериментальный факт. Так, никто не сомневается, что электроны являются частицами. Но давно известны эксперименты по рассеянию электронов в кристаллах, когда получающаяся дифракционная картина может быть объяснена только исходя из предположения, что пучок электронов обладает волновыми свойствами. Оказывается, электрон — сложный объект, и представление о нем как о «частице» не всегда корректно.

Итак, поле — основной объект теоретической физики. Оно характеризуется своей величиной (одно или несколько чисел), зависящей от координат, точно так же, как электрическое и магнитное поля. *Если мы знаем закон взаимодействия конкретного поля с другими объектами и законы его распространения, то этого вполне достаточно для конструктивной работы с ним. При этом совершенно не нужно знать, «что же это такое на самом деле».* Это очень важный момент. Начните объяснять инопланетянину, что такое, например, записная книжка, не показывая ее. Максимум, что вам удастся, это рассказать о ее свойствах и о том, зачем она нужна. Точно так же и в физике: мы говорим о свойствах поля и о

том, как оно взаимодействует с другими объектами, — большего сделать невозможно. Попробуйте объяснить ребенку, что означает такое привычное свойство, как «масса тела», и вам опять придется описывать свойства, и ничего более. Если нам что-то кажется «понятным», это означает, что мы просто привыкли этим пользоваться.

Кстати, а что же такое масса частицы в действительности? И вообще, как узнать, что перед нами частица, а не какой-либо другой объект, например две частицы? Стандартный путь таков. Измеряются или вычисляются энергия и импульс системы. Затем вычисляется разность $E^2 - p^2$. Если эта разность со временем не меняется, то мы говорим об объекте массы $m = \sqrt{E^2 - p^2}$. Элементарные частицы имеют фиксированные значения масс, которые приводятся во всех справочниках.

Понимание частиц как волн соответствующего поля помогает отвечать на принципиальные вопросы. Действительно, если, например, мюон распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино:

$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu},$$

то почему мюон считается элементарной частицей? Казалось бы, он должен состоять из этих трех, «более элементарных», частиц. На самом деле переносить наш повседневный макроскопический опыт в микромир нужно с большой осторожностью. Процесс распада мюона более правильно трактовать следующим образом: «колебания мюонного поля возбудили колебания электронного и нейтринных полей, при этом колебания мюонного поля затухли».

Итак, возвращаемся к понятию «поле» в теоретической физике. На протяжении всей книги будет достаточно понимать, что это некая функция от пространственных координат, которая может меняться со временем. В качестве конструктивного элемента необходимо задать взаимодействие этого поля с другими полями, форму его кинетической и потенциальной энергии, из которых вытекает его динамическое уравнение. Что такое кинетическая энергия — более или менее понятно: это энергия, связанная с изменением поля со временем. Если величина поля в небольшой области пространства зависит от

времени, то кинетическая энергия этого поля не равна нулю. Если рассматривать колебания поля как частицы, то последние имеют кинетическую энергию обычного вида. А что такое потенциальная энергия поля? Начнем с уже привычной аналогии — поверхности озера, но усложним ситуацию. Предположим, что над поверхностью там и сям возвышаются чаши с водой. Чаши имеют разный размер и расположены на разных высотах. Чтобы заполнить чаши водой, надо было совершить работу. Значит вода в чашах обладает дополнительной энергией. Такая энергия называется потенциальной. Кинетическая же энергия равна нулю, если вода внутри чаш покоится. Потенциальная энергия поверхности воды зависит от высоты, на которую поднята чаша. А от чего зависит потенциальная энергия (или, короче, *потенциал*) какого-либо поля? Очевидно, от величины самого поля. Следовательно, зная величину поля в данной области пространства, можно определить потенциальную энергию этого поля.

Отступление.

Поля и потенциалы

Выберем обозначение для поля. Например, такое: (x, t) . Это означает, что в каждой точке пространства задано число, зависящее от времени.

Если это поле как-то связано с реальностью, то оно должно иметь энергию. Последняя должна зависеть от этого самого поля (x, t) . Точнее, если в очень маленькой области пространства объемом dV мы знаем, чему равно поле, то мы должны указать, как вычисляется его энергия в этой области. Очевидно, что чем меньше объем dV , тем меньше должна быть потенциальная энергия, заключенная в нем: $dE = U dV$ (т. е. dE пропорционально dV). Коэффициент пропорциональности U называется плотностью потенциала, или, кратко, потенциалом, он должен зависеть от поля, т. е. $U(x, t)$. Выбор конкретной функции $U(\)$ — полностью в руках исследователя. Наиболее часто встречающиеся варианты показаны на рис. 1.6.

Здесь можно возразить: «Как это так: что хотят, то и постулируют (подразумевая форму потенциала). Откуда им знать, что это правильно?» На данном этапе ответить, конечно, трудно. Но ведь это только начало длинного пути. Задав форму потенциала, ученый должен объяснить множество явлений, проверить, не противоречат ли его выводы экспериментальным данным. И только после этого, в случае успеха, он скажет:

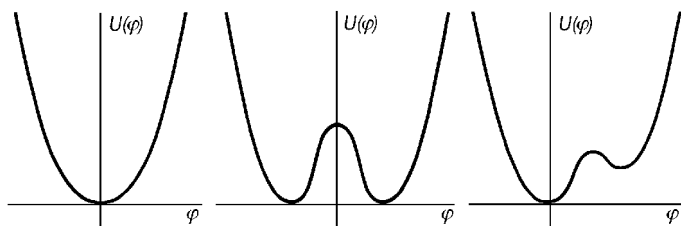


Рис. 1.6. Различные формы потенциалов. Форма первого потенциала — простейшая модель, в которой частицы приобретают массу. Форма второго потенциала используется для моделей с нарушенной симметрией, а форма третьего допускает фазовые переходы первого рода с образованием пузырей истинного вакуума.

«Я не знаю, почему потенциал таков, но я сделал правильный выбор».

Вспомните школьные законы Ньютона. Ведь и про них можно было задать тот же вопрос: «Почему, собственно, они такие, как написано в учебниках?» А ответ все тот же: Ньютон догадался правильно, поскольку предсказания, сделанные на основе этих законов, совпадают с наблюдениями.

Очень часто в научной литературе можно встретить упоминание о *скалярных* полях. Как было сказано выше, каждое поле должно характеризоваться своим набором параметров, чтобы частицы, соответствующие этому полю, имели наблюдаемые характеристики типа массы, спина, заряда. Так вот, скалярные поля предназначены для описания простейших частиц, характеризующихся всего одним параметром — массой. У таких, скалярных, частиц отсутствует, например, спин. Это простейшие частицы. Существуют ли они? Ответ на этот вопрос не так прост. Действительно, таковыми являются, например, хорошо известные пи-мезоны. С другой стороны, когда в современной космологии упоминаются скалярные частицы, имеются в виду не пи-мезоны, а другие гипотетические скалярные частицы.

Почему чаще всего выбираются именно скалярные поля и частицы? Во-первых, их существование предсказывается современными теориями (которые, впрочем, могут оказаться и

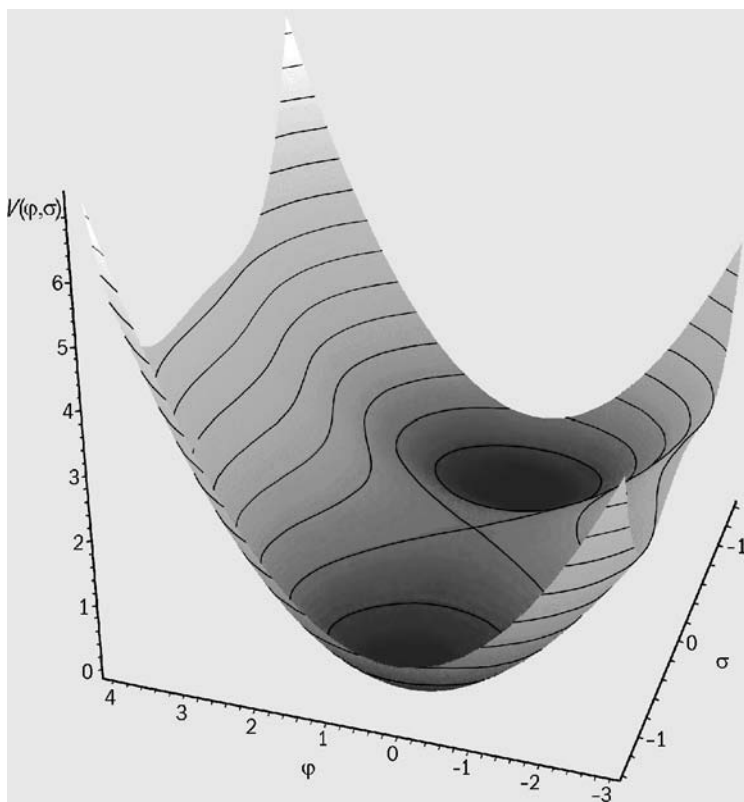


Рис. 1.7. Один из возможных потенциалов, используемых в космологии. Плотность энергии в определенной точке пространства (потенциал) зависит в данном случае от полей ϕ и σ . Зависимость от нескольких гипотетических полей предоставляет дополнительные возможности для объяснения происхождения такой вселенной, как наша.

неверными). Во-вторых, необходимой составляющей стандартной модели Вайнберга–Салама является скалярное поле (названное в честь физика Хиггса, предложившего нетривиальную форму потенциала для этого поля – см. рис. 1.6, средний график). Интересно, что единственное темное пятно этой в целом успешной модели – как раз частицы Хиггса. Они до сих пор не найдены, но авторитет модели Вайнберга–Салама

настолько высок, что мало кто сомневается в их существовании. В-третьих, не менее успешная модель Большого взрыва (так называемая инфляционная модель) также основывается на существовании особого скалярного поля под названием «инфлатон». И, в-четвертых, современные модели настолько сложны, что скалярные поля используются как простейшие, на которых тестируется новая модель. Если результаты оказываются обнадеживающими, то вводятся более сложные поля.

Макрообъекты

Окружающая нас природа есть результат эволюции Вселенной. На начальной стадии основная доля энергии заключалась в полях. Затем, при охлаждении Вселенной, энергия поля перешла в энергию частиц. Дальнейшее уменьшение температуры вело к объединению частиц во все более сложные агломераты. Сейчас мы живем в мире ярких красок благодаря близости к Солнцу, а в ночное время можем невооруженным глазом наблюдать на небе около 6 тысяч звезд. В телескопы можно видеть миллионы галактик, их движение и слияние, взрывы сверхновых звезд, рождение молодых звезд. Галактики содержат миллиарды звезд, при этом для наблюдения доступно порядка 10^{11} галактик, которые и образуют видимую Вселенную. Все это обилие явлений изучает физика, и в частности космология.

Как же ученым, занимающимся астрофизикой и космологией, удастся проверять свои идеи? Ведь звезды находятся далеко. Конечно, с развитием техники приборы стали намного точнее и разнообразнее. Но что этими приборами измерять? И как полученные результаты интерпретировать? Чтобы это понять, нам придется совершить небольшой экскурс в теорию и вкратце познакомиться с основными законами, на которые опираются ученые.

Отступление.

*Связь температуры
с длиной волны света*

Нагретое тело испускает весь спектр длин волн электромагнитного излучения. Излучение с длиной волны 410 нм воспринимается

человеческим глазом как синий цвет, 656 нм — как красный. 

~~создания такого спектра~~ в лаборатории можно нагреть лампу, запы

ненную водородом. Она излучает фотоны, которые, пройдя сквозь призму, попадают на экран и отображаются в виде цветных линий. По яркости линии можно судить о числе излученных фотонов. Расстояния между линиями пропорциональны разнице длин волн.



Рис. 1.8. Спектр атома водорода. Цифры — длина волны в нанометрах

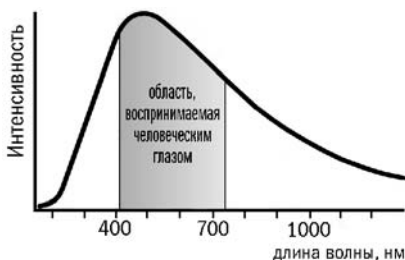
Конечно, форма спектра, по которому можно судить о вкладе определенной длины волны, зависит от температуры и свойств тела. Физики уже давно ввели понятие абсолютно черного тела — системы, которая поглощает все падающее на него излучение. Обратите внимание: излучать-то оно может, и, значит, абсолютно черное тело можно видеть. Солнце — прекрасный пример. Действительно, практически все фотоны, падающие на Солнце, поглощаются им. Но и само оно излучает свет. Конечно, какая-то, очень маленькая, доля падающих фотонов отражается, поэтому Солнце лишь приблизительно можно считать абсолютно черным телом. Спектр фотонов абсолютно черного тела зависит уже только от его температуры. Для нас будет важной наиболее вероятная длина волны электромагнитного излучения тела. Обозначим ее $\lambda_{\max}$. Тогда связь с температурой выглядит особенно просто:

$$\lambda_{\max} \frac{b}{T}, \quad b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ (м} \cdot \text{К)}. \quad (1.5)$$

Формула (1.5) известна как закон Вина.

Интересно подсчитать, излучение с какой длиной волны в основном приходит к нам от Солнца. Учитывая, что поверхность Солнца нагрета до температуры почти 6 000 К, простой расчет по формуле (1.5) дает длину волны $0,5 \cdot 10^{-6}$ м. Это как раз та длина волны, которую лучше всего различают наши глаза. Мы ее чувствуем как «зеленую». Так живая природа приспосабливается, подстраивается под внешние условия.

Рис. 1.9. Зависимость интенсивности излучения с поверхности Солнца (ее температура составляет приблизительно 5 700 К) от длины волны. Интенсивность — число фотонов, излученных в секунду.



Эффект Доплера

В 1842 г. австрийский физик Кристиан Доплер (Doppler) открыл эффект, названный его именем. Он заключается в том, что длина волны, испускаемой источником, зависит не только от свойств источника, но и от его скорости. Для понимания достаточно внимательно рассмотреть рис. 1.10.

Как только очередной «горб» волны появляется из источника, он сразу начинает двигаться от него с характерной скоростью. Следующий «горб» рождается, когда первый уже пролетел некоторое расстояние. Если же источник движется в сторону распространения волны, то расстояние между горбами уменьшится. Но приемник как раз и отличает одну волну от другой по расстоянию между горбами! Поэтому два одинаковых источника создают разные волны с точки зрения приемника. Тот из источников, который движется к приемнику, излучает волны меньшей длины, чем покоящийся. Наоборот, удаляющийся источник создает волны большей длины. Аналогичные рассуждения можно провести, предполагая движущимся приемник, а не источник.

Каждый может убедиться в существовании этого эффекта. Попросите знакомого водителя быстро проехать на машине мимо вас, непрерывно гудя. Во время наибольшего сближения вы почувствуете резкую смену тона гудка — с высокого на низкий. Любая электричка, пролетающая мимо платформы, даст тот же эффект. Вывод таков: частота воспринимаемых волн (в нашем эксперименте — звуковых) зависит не только от внутренних свойств их источника, но и от его скорости.

Астрофизика имеет дело в основном с электромагнитными волнами — рентгеновским излучением, светом, радиоволнами и т. д. Эффект Доплера справедлив и для них (что, собственно, и имел в виду сам Доплер). Наши глаза устроены так, что разные длины волн мы воспринимаем как разные цвета: чем длиннее волна, тем более «красным» нам кажется предмет. Так, девушка, одетая в красное, отличается от старичка, одетого в синее, в частности, тем, что она испускает электромагнитные волны большей длины.

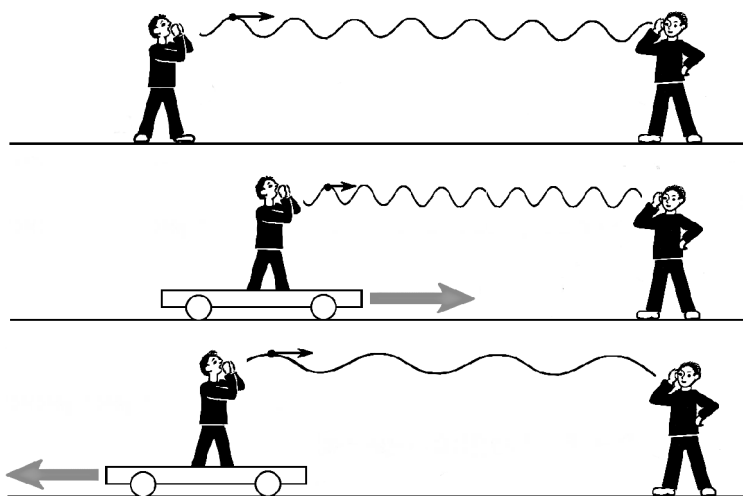


Рис. 1.10. Пояснение к эффекту Доплера.

Используя эффект Доплера, можно, например, определить скорость вращения Солнца (рис. 1.11). Измеряем среднюю длину волны света, летящего от левого края, затем — от правого. Если Солнце вращается, то будет заметно различие, по которому можно найти линейную скорость крайних точек на Солнце. Ну а зная его диаметр, легко находим угловую скорость вращения и период.

Солнце является обычным представителем звезд, каких много. Но и двух в точности одинаковых звезд тоже не найти. Галактики же содержат миллиарды звезд самого разного типа, и похожие галактики должны иметь похожие спектры

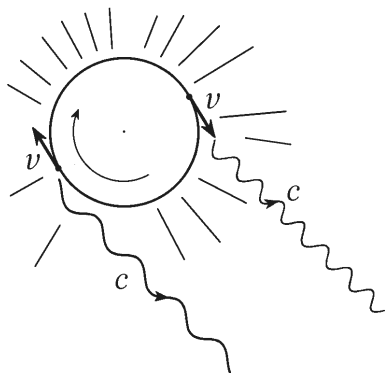


Рис. 1.11. Длины волн, приходящих от диаметрально противоположных точек Солнца, различны.



Рис. 1.12. Сравнение спектров водорода, полученного в лабораторных условиях и от далекой галактики.

излучения. Для самых близких к нам соседних галактик это действительно так, но не для далеких. Чем дальше от нас находится обычная галактика, состоящая из обычных звезд, тем больше ее излучение смещается к красному краю спектра. С этой точки зрения особенно удобен водород, свойства которого одинаковы во всех областях Вселенной. Спектр водорода хорошо известен (см. рис. 1.8). Свет, излученный водородом далеких галактик, смещен в сторону более длинных волн (красное смещение), как показано на рис. 1.12. Общепринятое объяснение — галактики от нас удаляются. Скорость удаления описывается законом Хаббла, одному из важнейших для астрофизиков законов.

Закон Хаббла

Этот закон впервые сформулировал Эдвин Хаббл (Edwin Hubble) в 1929 г. Анализируя скорости близлежащих галактик по красному смещению их света, он обнаружил, что чем дальше от нас находится галактика, тем быстрее она от нас удаляется. Другими словами, скорость галактик прямо пропорциональна расстоянию до них от Земли:

$$v = Hr.$$

Коэффициент пропорциональности — это и есть знаменитая «постоянная Хаббла». В настоящее время она равна 71 км/(с · Мпк) и обозначается « H_0 ». Например, галактика, находящаяся на расстоянии 100 Мпк, удаляется от нас со скоростью 7,1 тыс. км/с.

Вообще говоря, галактики движутся хаотично, и в частности поперек линии наблюдения. Эта так называемая пекулярная скорость не должна учитываться. В законе Хаббла подразумевается радиальная скорость, усредненная по большому числу галактик, находящихся на одинаковом расстоянии от нас. Интересно, что если проследить за движением галактик в прошлое («обратная прокрутка фильма»), то оказывается, что расстояния между ними были совсем другими — чем дальше в прошлое, тем меньше: так был открыт знаменитый «Большой взрыв». Зная постоянную Хаббла, можно также установить момент, когда это произошло, т. е. возраст нашей Вселенной: он составляет примерно 14 млрд. лет.

На рис. 1.13 представлен график, опубликованный Хабблом в 1929 г. Видно, что разброс точек очень велик, и критически настроенный человек вполне мог бы усомниться в правоте автора. Неудивительно, что константа, которая теперь носит его имя, оказалась далекой от действительности — $H_0 = 464 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$. Тем более, что по этой величине восстанавливается время жизни Вселенной: получалось 2 миллиарда лет, но уже тогда было известно, что время существования Земли гораздо больше. Легче поверить в то, что Вселенная стационарна, чем в то, что Земля старше Вселенной.

Вообще-то Хабблу повезло. Свой закон он вывел из наблюдений галактик, отстоящих от нас на 1–2 Мпк. Но на таких расстояниях галактики объединены гравитацией в скопления, и говорить об их разбегании неправомерно. Попутно отмечу, что и Солнечная система, равно как и наша Галактика, не расширяются, будучи едиными, гравитационно связанными системами. Неудивительно, что Хаббл получил значение своей константы на порядок больше правильного, тем более, что в то время размеры Вселенной представлялись сильно заниженными. Так что, говоря о законе Хаббла, надо понимать, что расстояния, для которых он надежно выполняется, достаточно велики — от нескольких мегапарсек и более. Обычно подразумевается усредненное движение скоплений галактик на расстояниях больше сотни мегапарсек.

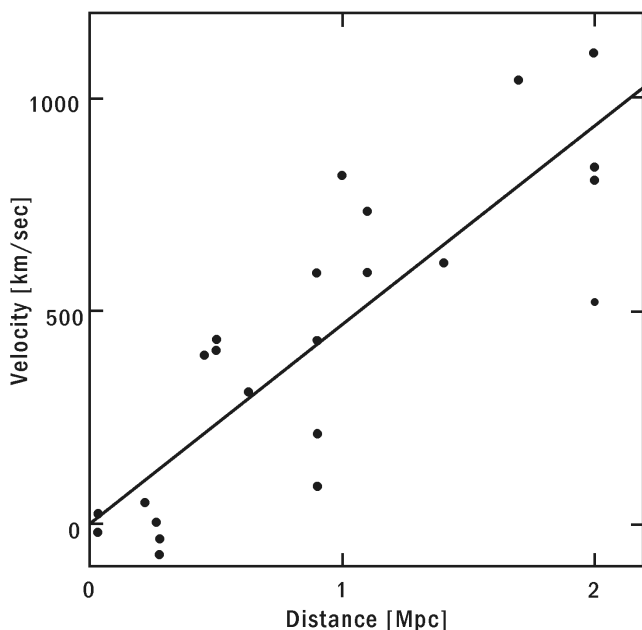


Рис. 1.13. График, опубликованный Хабблом в 1929 г. По оси абсцисс — расстояние (Мпк), по оси ординат — скорость (км/с).

Более точные измерения на гораздо больших расстояниях подтвердили результат Хаббла. На рис. 1.14 представлены данные по сверхновым Ia, полученные Рисом, Прессом и Кишнером (Riess, Press, Kirshner) в 1996 г. Обратите внимание на масштаб расстояний. Да и скорости источников света (фактически — галактик) впечатляют: в 30 тысяч раз быстрее пули.

Итак, закон Хаббла не универсален: отклонения от него заметны на малых расстояниях, меньше нескольких мегапарсек; он выполняется лишь приближенно также на расстояниях порядка размера Вселенной.

До сих пор понятия «расстояние» и «время» употреблялись в общепринятом, интуитивно понятном смысле. Но наш опыт основан на очень узком наборе явлений, связанных в основном с Землей. Астрофизика же имеет дело с такими мас-

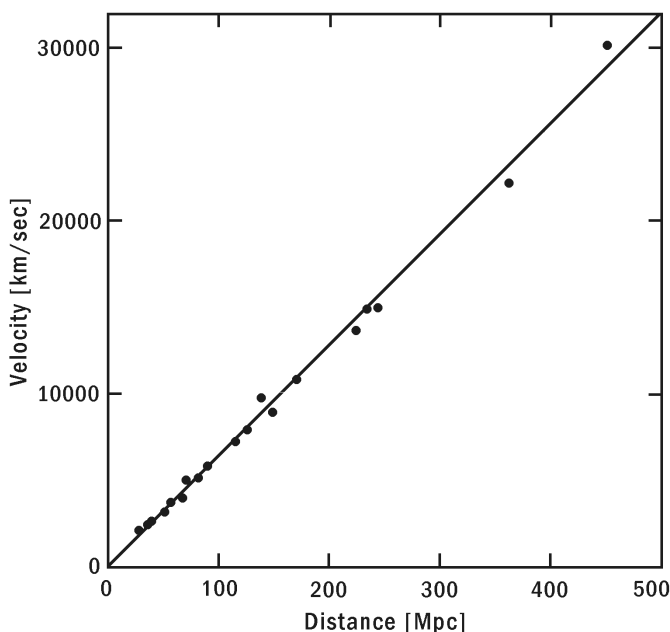


Рис. 1.14. Данные по сверхновым Ia, полученные Рисом, Прессом и Кишнером. По оси абсцисс — расстояние (Мпк), по оси ординат — скорость (км/с).

штабами, при которых существенны эффекты теории относительности. Поэтому надо чуть более точно определить, как мы измеряем время и расстояния.

Будем считать, что каждая галактика имеет свои часы, по которым и должно отсчитываться время в близлежащих областях пространства. Конечно, в начальный момент они были синхронизированы. Синхронизированное по всем галактикам время называется космологическим. Космонавт, прибывший из другого скопления галактик, должен будет немного «подвесить» свои часы, чтобы не опаздывать на деловые встречи в данном скоплении. Стоит отметить, что у этого определения есть некий дефект: ведь сразу после Большого взрыва галактик еще не было — тогда где размещать часы? Их можно было бы размещать, например, в местах повышенной концентрации

частиц, но налет неопределенности остается: ведь если не возникли даже галактики, то уж часы — тем более.

Расстояние до какой-либо далекой галактики — это просто сумма расстояний между соседними галактиками, измеренных одновременно (по космологическому времени). Для этого жители всех галактик, расположенных между нашей и той далекой, должны, предварительно договорившись, измерить расстояние до соседней с ними галактики и сложить результаты. Именно это расстояние фигурирует в законе расширения Хаббла, хотя вполне возможны и другие, не менее полезные определения. В главе 2 мы поговорим об этом подробнее.

Компактные объекты¹

Звезды

Согласно современным представлениям, звезды образуются из плотных газовых облаков. Такое, более плотное, чем обычно, облако может быть, например, результатом столкновения двух разреженных облаков газа. Они бы и разошлись с миром, но гравитационные силы уже начали свою созидательную работу. Под их воздействием частицы газа начинают собираться, центральная часть облака уплотняется. Гравитационное притяжение возрастает. Что же может остановить этот процесс? Оказывается, возрастает не только концентрация частиц, но и их скорость, наподобие скорости камня, падающего на землю под действием силы притяжения. Поскольку температура любого газа связана с кинетической энергией его частиц, то облако в результате сжатия нагревается. Соответственно, в этом звездном котле возрастает и давление. Именно оно не позволяет гравитационным силам сжимать газ еще больше. Облака газа с массой более 0,1 массы Солнца ($\sim 10^{32}$ г) разогреваются до высоких температур, свыше 10^7 К, при которых возможны ядерные реакции, то есть взаимодействие ядер атомов, в результате которого одни ядра превращаются в другие. Сами ядра появились после того, как атомы, из которых состо-

¹ Более подробно эта тема рассматривается в главе 3.

ял газ, под воздействием высоких температур распались на электроны и ядра.

Температура и, следовательно, давление внутри звезды поддерживаются ядерными реакциями, играющими двоякую роль. Они, во-первых, обогащают звезду тяжелыми элементами. Во-вторых, в ходе ядерных реакций выделяется энергия, разогревающая плазму звезды. Давление и плотность плазмы возрастают с приближением к центру: средняя плотность Солнца равна $1,4 \text{ г/см}^3$, т. е. примерно совпадает с плотностью воды, а в центре составляет уже $120\text{--}160 \text{ г/см}^3$.

Время жизни звезды определяется ее массой. Чем больше масса, тем выше давление, плотность и температура внутри и тем эффективнее ядерные реакции сжигают основное топливо — водород. Значит, большие звезды живут меньше, но ярче. Знакомая картина. Обратите внимание на таблицу.

Масса звезды, $M_{\odot}$	Время жизни, лет
50	3–5 миллионов
10	30 миллионов
1,5	3 миллиарда
1,0	10 миллиардов
0,1	1 триллион

Цифры, конечно, приблизительные, но любопытные. Видно, что маленькие звезды, расходующие энергию экономно, действительно живут гораздо дольше. Кроме того, из этой же таблицы видно, как сильно нам повезло: будь наше Солнце всего в 1,5 раза массивнее, оно уже давно прекратило бы существование, и разум на Земле не успел бы возникнуть.

Что же происходит, когда запасы водорода (протонов) в звезде подходят к концу? Если ее масса не очень велика, не более 4 солнечных, то она превращается в белый карлик.

Белые карлики

Итак, водород исчерпался, темп ядерных реакций замедляется, и звезда уже не может сопротивляться гравитационному сжатию. Начинается новый этап в жизни звезды, в результате которого ее размеры стремительно уменьшаются, температу-

ра увеличивается, а часть массы выбрасывается в космос. К этому моменту в звезде уже имеется в достаточном количестве гелий, продукт предыдущих ядерных процессов с участием протонов. Но температуры белого карлика, 11–15 тыс. К, недостаточно для того, чтобы гелий участвовал в ядерных реакциях, выделяя энергию и останавливая дальнейшее сжатие. Плотность плазмы внутри белого карлика достигает величин 10^{10} кг/м³ – обратите внимание: 1 см³ весит 10 тонн. Человек весил бы тысячи тонн, находясь на поверхности такой звезды.

Какие же силы останавливают сжатие? При таких плотностях электроны образуют так называемый вырожденный электронный газ – особое квантовое состояние, при котором все электроны белого карлика «чувствуют» друг друга и образуют единый коллектив – именно он и противостоит гравитационному сжатию.

Со временем белый карлик остывает аналогично раскаленному куску металла, но очень медленно, поскольку его поверхность мала.  ~~Ссылаясь, он постепенно превращается в объект под названием «коричневый карлик».~~ Ну а если начальная масса звезды велика и коллектив электронов не способен препятствовать дальнейшему сжатию под действием гравитационных сил? Тогда образуются

Нейтронные звезды

В нейтронных звездах настолько тесно, что расстояния между протонами и более сложными ядрами сравнимы с размером протона. Электронам уже негде проявлять свои коллективные качества, и они «вдавливаются» в протоны. Образовавшиеся нейтроны и составляют, как нетрудно догадаться, основное содержимое нейтронной звезды. Плотность такой субстанции составляет в среднем 10^{17} кг/м³. Можно сказать, что нейтронная звезда – это атомное ядро больших размеров, хотя на самом деле состояние вещества внутри нее очень сложно. И все-таки усилия ученых уже позволяют описать в общих чертах внутреннее строение нейтронной звезды.

Внешний слой, магнитосфера, состоит из плазмы. В этом слое релятивистские частицы, прилетающие из космоса, дви-

Характеристики некоторых звезд

Параметры	Солнце	Белый карлик	Нейтронная звезда
Масса, $M_{\odot}$	1,0	~ 1	$\sim 1-2$
Радиус, $R_{\odot}$	1,0	$\sim 0,01$	10 км
Светимость, $L_{\odot}$	1,0	$\sim 0,002$	
Средняя плотность, г/см ³	1,41	$\sim 10^6$	$\sim 10^{14}$
Плотность в центре, г/см ³	150	$\sim 10^7$	$\sim 10^{16}$
Температура поверхности, К	5 770	$\sim 30\,000$	10^6

гаются по спиральям вдоль магнитных силовых линий нейтронной звезды и интенсивно излучают электромагнитные волны в рентгеновском диапазоне. Затем идет слой вещества, состоящий из мелких кристаллов. В ячейках каждого кристаллика расположены ядра с атомными массами в интервалах 26–39 и 58–133, а электроны находятся между ними. Плотность в этом слое равна примерно $3 \cdot 10^{12}$ г/см³. Ближе к центру находится третий слой, состоящий из тяжелых ядер, нейтронов и электронов. Его плотность в 10^3 раз больше, чем плотность слоя над ним. В следующем, четвертом, слое ядра распадаются на нейтроны (в основном) — плюс небольшая добавка протонов и электронов. На каждый электрон и протон приходится по 8 нейтронов. В ядре звезды происходят ядерные реакции и рождаются ядра всех известных элементов.

Если масса нейтронной звезды превышает 3 солнечных массы, гравитационные силы преодолевают последний «редут обороны» — состояние, в котором находится нейтронная звезда, — и происходит неудержимое сжатие, рождается черная дыра.

Черные дыры

О черных дырах написано и продолжает писаться столько статей, научных и популярных, что кажется — они исследованы не хуже обычных звезд. Действительно, на уровне популярного изложения все выглядит довольно просто. Имеем «очень-очень массивное» тело, у которого сила гравитации

так велика, что свет не может вылететь с его поверхности. Поэтому оно, тело, и «черное». И любые тела, попав на него, пропадают для нас навсегда. Поэтому оно и «дыра».

Более пристальный взгляд показывает, что не все так просто. Во-первых, нет никакой поверхности. И вообще, черная дыра — пустая вплоть до самого центра, где вещество имеет предельно допустимую плотность 10^{93} г/см³ (планковская плотность). Это означает, что, например, масса черной дыры в $10 M_{\odot}$ сосредоточена в объеме 10^{-59} см³. Размер черной дыры определяется совершенно другой величиной — гравитационным радиусом, который визуальным ничем в пространстве не выделен. Путешественник при пересечении гравитационного радиуса не заметит ничего особенного. Но после этого он уже никоим образом не сможет выбраться наружу и обречен, попав в центр черной дыры, увеличить собой ее массу (килограммов на семьдесят).

Казалось бы, черные дыры способны только потреблять, ничего не отдавая взамен. Но и это не так! Стивен Хокинг теоретически предсказал, что если учесть законы квантовой механики, то оказывается, что черные дыры способны излучать. Правда, это излучение очень слабо. Более того, чем больше масса черной дыры, тем меньше энергии она отдает в окружающее пространство. И тем не менее многие из них ярко светятся, ярче миллиардов солнц. Черные дыры — самые яркие объекты во Вселенной. Происходит это потому, что окружающие черную дыру частицы падают на нее с колоссальным ускорением, излучая фотоны.

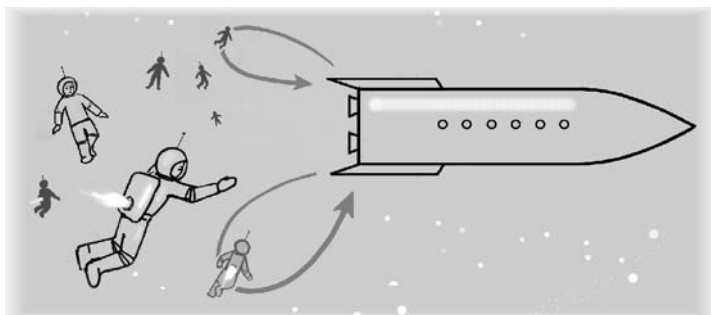
Отступление.

Испускание фотонов движущимися частицами

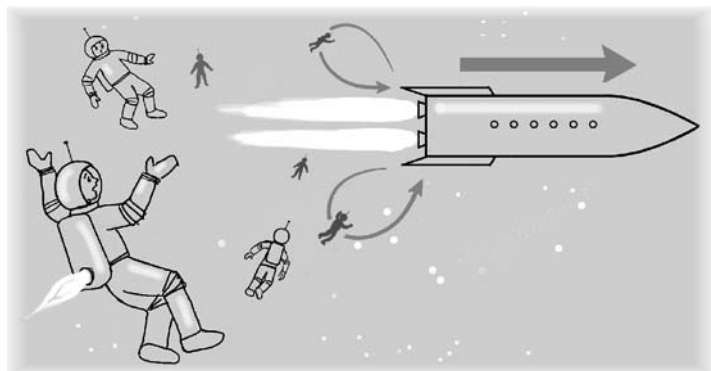
Общепринята точка зрения, согласно которой фотоны, прилетающие к нам из космоса, образуются при ускорении заряженных частиц и их столкновении друг с другом. Можно ли понять, почему ускоряющиеся частицы излучают

фотоны? Конечно, строгое доказательство основывается на уравнениях Максвелла. Здесь же мы проведем аналогию, которая позволит хотя бы дать наглядную картину этого процесса.

Пусть имеется космический корабль с очень большим экипажем. Космонавты непрерывно покидают корабль и возвращаются.



Что произойдет, если корабль вдруг начнет двигаться с возрастающим ускорением? Часть космонавтов отстанет от корабля. Очевидно, что чем больше его ускорение, тем большее количество членов экипажа будет потеряно.



Элементарные частицы окружены облаками фотонов, которые непрерывно излучаются и затем поглощаются этими частицами. При ускорении частицы-«корабля» некоторые фотоны-«космонавты» не успевают перестроиться и отделяются от нее. Далее они летят самостоятельно, и именно их мы воспринимаем как излучение. Если частица движется с большим ускорением, то уже более энергичные фотоны не успевают вернуться обратно. Некоторые из них случайно летят в нашу сторону, и мы наблюдаем более жесткое (коротковолновое) излучение.

Итак, частицы из космоса, падая на черную дыру и сталкиваясь, ускоряются и излучают свет, видимый с Земли.

Вдобавок ко всему, теоретики предсказывают, что некоторые черные дыры могут не быть пустыми. В отличие от обычных черных дыр, в которых вещество сосредоточено в центре, внутри нестандартных черных дыр имеется поле, равномерно распределенное по их внутреннему пространству. Так что черные дыры — источник важнейшей информации и споров — будут еще долго снабжать нас увлекательными сюжетами.

Теперь познакомимся кратко с еще одним объектом во Вселенной, существование которого твердо установлено.

Квazarы

Как я уже писал, черные дыры способны ускорять окружающие частицы своим гравитационным полем. Такая частица излучает электромагнитные волны, которые и выдают местоположение черной дыры. Ясно, что чем массивнее черная дыра и чем больше вокруг нее частиц, тем более ярко будет светиться окружающая область. Так вот, в центрах практически всех галактик находятся сверхмассивные черные дыры с массами в интервале 10^6 – 10^9 солнечных масс! Если вдобавок вокруг них много вещества, то излучение электромагнитных волн становится невероятно интенсивным. Такие объекты видны на расстоянии миллиардов световых лет; они называются квазарами.

Итак, мы познакомились с главными, но, конечно, далеко не всеми действующими лицами грандиозного спектакля под названием «Вселенная». Остались малозаметные «детали». И как часто бывало в физике, именно эти мелкие шероховатости приводят к наиболее значимым физическим теориям.

Скрытая масса (темная материя)

В середине прошлого века стало понятно, что вся видимая, динамично развивающаяся звездная структура составляет лишь малую долю массы вещества Вселенной. Обратимся же к одному из действительно главных действующих лиц — скрытой массе. Она не афиширует своего присутствия, но влияние ее трудно переоценить.

Загадка скрытой массы волнует умы ученых уже не один десяток лет. Все началось с того, что в 1933 г. швейцарский

астроном Фриц Цвикки (Zwicky) определил полную массу группы галактик, измеряя их светимость. Проще говоря, он подсчитал количество звезд в этой группе и умножил это число на среднюю массу звезды. Казалось бы, надежный метод, однако другой способ, основанный на законе всемирного тяготения Ньютона и измерении скоростей звезд, давал гораздо большую величину массы! Этот факт в то время не вызвал особого интереса, и только через четыре десятка лет ученые поняли всю его важность. Сегодня скрытая масса является непременным атрибутом всех космологических моделей эволюции Вселенной.

До сих пор не ясно, что же именно находится в межзвездном пространстве, хотя масса этого «чего-то» примерно в пять раз больше суммарной массы всех звезд. Это удивительное и странное явление показывает, что мы еще далеко не все знаем об окружающем мире. Решение загадки скрытой массы, несомненно, будет крупнейшим открытием, которое может произойти в любой момент. Единственное, что выдает сегодня скрытую массу, — гравитация. Именно гравитационное поле скрытой массы, влияя на движение звезд в галактиках, позволяет определить ее долю в веществе, заполняющем космос.

Кстати, о названии. Английское название этого явления — dark matter, — которое в переводе означает «темная материя», не очень удачно. Если бы эта материя была действительно «темной», то она бы не пропускала свет от звезд. Грустное зрелище представляло бы наше небо, особенно для астрологов. К счастью, эта материя, как раз наоборот, абсолютно прозрачна для света. Поэтому название «скрытая масса» представляется более корректным.

Сейчас уже понятно, что обычной материи, из которой состоят звезды и межзвездный газ, во Вселенной всего около 4%; 25% приходится на скрытую массу и остальные примерно 71% — на темную энергию, о которой мы поговорим ниже.

О составе скрытой массы мнения разделились. Некоторые ученые думают, что скрытая масса состоит из массивных объектов, например черных дыр или коричневых карликов с массой, не превышающей массу Солнца. Такие объекты трудно

обнаружить, даже если их относительно много в нашей Галактике. Другие ученые предполагают, что скрытая масса — это массивные частицы неизвестного типа, практически не взаимодействующие с обычными протонами, электронами, фотонами и т. д. Ну а раз они не взаимодействуют, то не ускоряются и не излучают света, и, следовательно, не видны с Земли.

Поиски скрытой массы

Прежде всего надо определиться с вопросом, где и что искать. «Что» искать, более или менее понятно — некую материю, которая выдает себя только своей гравитацией. А вот где ее искать и какие пространственные области она занимает — не так очевидно. Как она распределена по Вселенной? Расположена ли в галактиках или равномерно разбросана по всему пространству?

Долю скрытой массы в галактике можно определить по поведению светящейся материи — звезд. Именно скрытая масса диктует видимой материи правила игры, а не наоборот. Это и понятно: ее намного больше, а кто больше, тот и прав, как обычно. Скрытая масса способна концентрироваться и там, где видимая материя отсутствует. Удивительно, но и эту часть скрытой массы удалось определить. О том, как это было сделано, — чуть позже.

Интересно сравнить полную массу во Вселенной и массу ее видимой части, в основном звезд. Диаметр видимой части Вселенной составляет примерно $3 \cdot 10^{28}$ см ($\sim 6\,000$ Мпк, или 10 млрд. световых лет). Большая часть видимой материи уже собралась в галактики, и, чтобы определить массу Вселенной, надо «всего лишь» измерить массы всех галактик, которых приблизительно 10^{11} штук и в каждой сверкает по несколько десятков миллиардов звезд. Будем считать, что Солнце — характерный представитель объектов такого типа. Есть менее массивные звезды, есть и более массивные. Для оценки будем считать, что средняя масса звезд совпадает с массой Солнца, а это примерно $2 \cdot 10^{30}$ кг. В результате получаем примерно 10^{52} кг: такова масса всех звезд в видимой части Вселенной. Но масса темной материи раз в 5 больше.

Таким образом, в пространстве нашей Вселенной находится около 10^{53} кг материи неизвестного происхождения. Такая ситуация воспринимается как вызов ученым, и многие из них работают над решением этой проблемы.

Способы поиска невидимок основаны на хорошо известных физических законах.

Эффект линзирования

Оказалось, что скрытая масса образует свои собственные «облака-галактики», которые ничего другого не содержат. Как же можно доказать их существование? В обычных галактиках нам помогают звезды, своим поведением выдающие присутствие скрытой массы. Что же делать, если в интересующей нас области пространства звезды отсутствуют? Ученые вспомнили о эффекте микролинзирования. Раз скрытая масса создает гравитационное поле, это поле должно влиять на движение всех объектов, обладающих энергией. Поэтому гравитационное поле скрытой массы искажает траекторию движения света от далеких источников. Галактики должны выглядеть несколько искривленными, как лицо человека в слегка кривом зеркале.

Эффект линзирования создает ложные изображения и представляет их в искаженном виде. Если гравитирующая масса темного объекта, оказавшегося на пути луча, мала, то отклонение слишком незначительно, чтобы различить отдельные ложные изображения. В этом случае детектор регистрирует небольшой кратковременный всплеск. Изучение таких всплесков и их статистики представляет собой отдельное направление исследований темных объектов.

Одним из препятствий для получения надежных результатов по линзированию было то, что изображение галактики

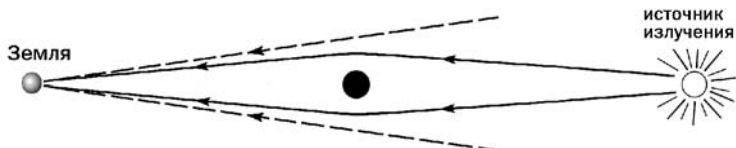


Рис. 1.15. Эффект линзирования.

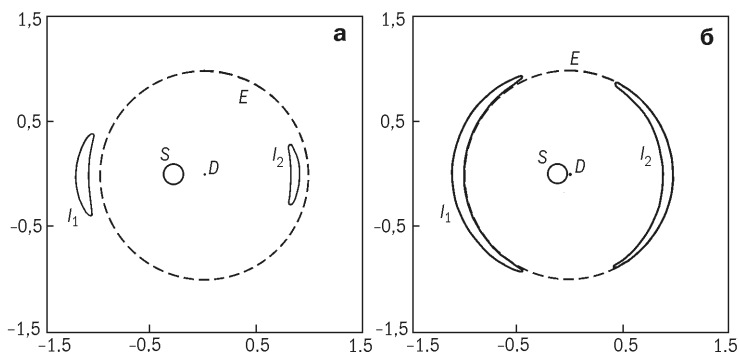


Рис. 1.16. Эффект линзирования создает ложные изображения и представляет их в искаженном виде. Источник света S в виде маленького кружка, например звезда, искажается локальным темным гравитирующим объектом D . Наблюдатель видит два «лунных серпа» вместо звезды. Форма серпов зависит от того, насколько объект D смещен с прямой, соединяющей источник света и наблюдателя.

Рисунок из статьи [18].

изменяется не только из-за влияния скрытой массы, но и при прохождении лучей через атмосферу Земли. Да и сами оптические приборы вносят небольшие искажения. Этой проблемой занялись Дэвид Виттман (David Wittman), Энтони Тайсон (Anthony Tyson) и Дэвид Киркман (David Kirkman) из лаборатории Белл, Ян Делл'Антонио (Ian Dell'Antonio) из Национальной оптической астрономической обсерватории и Университета Брауна и Гэри Бернштейн (Gary Bernstein) из Мичиганского университета, использовавшие 4-метровый телескоп Blanco (Чили). И выход был найден. Изображения ближайших звезд изменяются атмосферой и приборами точно так же, как и далеких галактик, а влиянию удаленной скрытой массой они не подвержены. На основе совместных измерений близких звезд и далеких галактик ученые нашли способ выделять нужную информацию из всей поступающей и получать желаемый результат. Были проанализированы изображения 145 000 очень далеких галактик, чтобы найти искажения, создаваемые скрытой массой. По ним было восстановлено расположение скрытой массы на больших межгалактических масштабах.

Эффект Доплера

Этот эффект уже объяснялся выше. Напомню лишь, что если источник приближается к нам, то мы воспринимаем свет «более голубым», чем если бы источник покоился, если же он удаляется — то «более красным». Чем больше скорость, тем больше эффект доплеровского сдвига. Исследуя спектры звезд, ученые определяют их скорости и не только судят об их движении внутри галактики, но и анализируют перемещения галактик внутри скоплений. Например, если измерения показывают, что свет от одного края какой-либо галактики краснее, а от другого — голубее, то единственное разумное объяснение этого — вращение галактики. Детальный анализ позволяет вычислить скорость объекта на основе эффекта Доплера.

При внимательном изучении вращения галактик была обнаружена одна странность. Скорости движения звезд оказались слишком большими! При такой скорости они должны были бы давно покинуть галактику, поскольку суммарная гравитационная сила всех звезд, как показывали расчеты, была не способна их удержать. Единственным объяснением было предположение о существовании некоей невидимой материи — скрытой массы, которая своим гравитационным полем помогла удерживать звезды от разлета.

Горячие газовые облака

Существование некоторых газовых облаков, таких, например, как на рис. 1.17, можно объяснить только наличием скрытой массы. Действительно, температура газа в облаке определяется по спектру его электромагнитного излучения.

Рис. 1.17. Облако газа не рассеивается только из-за гравитационных сил скрытой массы.



С другой стороны, кинетическая энергия молекул, а значит, и скорость однозначно связаны с температурой:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}T.$$

Следовательно, проанализировав спектральный состав излучения облака, можно определить скорость молекул газа. Оказалось, что она слишком высока, чтобы гравитационные силы всех молекул могли удержать облако от разлета. Необходим дополнительный источник гравитации — скрытая масса.

Носители скрытой массы

Современная наука настолько сложна и разработана, что бессистемные поиски «чего-нибудь новенького» заведомо обречены на неудачу. Чтобы добиться успеха, нужно иметь хоть какое-то представление о том, что ищешь, необходима теоретическая модель, правильность которой и проверяется экспериментально.

Предполагаемых кандидатов на скрытую массу не так уж мало, но их можно разделить на две основные категории: астрономические объекты (MACHOs — Massive Astrophysical Compact Halo Objects — «массивные астрофизические компактные объекты в гало Галактики») и элементарные частицы (WIMPs — Weakly Interacting Massive Particles — «слабо взаимодействующие массивные частицы»). MACHOs — это действительно массивные объекты, состоящие из обычных элементарных частиц. WIMPs — гипотетические частицы, которые практически не взаимодействуют с привычной нам материей.

Астрономам близка идея MACHOs, в то время как физикам, занимающимся микромиром, больше нравится идея WIMPs, что естественно.

Рассмотрим более детально эти два основных класса.

Разнообразие MACHOs

Эти массивные объекты практически не должны светиться. В противном случае их бы давно увидели. Кандидатами на роль MACHOs являются черные дыры, старые нейтронные

звезды, коричневые (темные) карлики (brown dwarfs) и, возможно, белые карлики.

Черные дыры — достойный кандидат. Их существование предсказывается теорией, и некоторые из них уже обнаружены. Некоторая осторожность тем не менее необходима. Во-первых, эти черные дыры не должны быть очень массивными, иначе излучение от падающего на них вещества выдаст их с головой. Во-вторых, их должно быть много, чтобы суммарная масса примерно в 5 раз превышала суммарную массу звезд. И, в-третьих, «маленькие» черные дыры, с массой меньше чем 10^{15} г, могут рождаться лишь в первые моменты существования Вселенной. Их должно быть не слишком много. В противном случае наша Вселенная была бы совершенно другой. Они особенно повлияли бы на синтез ядер в ранней Вселенной, и ее химический состав мог бы сильно отличаться от нынешнего. Удовлетворить этим слегка противоречащим друг другу условиям не так просто, но уже существуют модели, которые позволяют сделать это.

Темные карлики — это не сказочные тролли, а плотные сгустки обычной материи, в основном водорода, с массой значительно меньше солнечной. Их собственные гравитационные поля позволяют им существовать, не распадаясь. Однако эти поля слишком слабы, чтобы создать высокое давление и инициировать термоядерные реакции, характерные для звезд. Но свет звезд — это не что иное, как фотоны, испускаемые сильно нагретым газом. Поэтому отсутствие ядерных реакций означает слабую светимость темных карликов, что позволяет им легко ускользать от внимания астрономов.

Нейтронные звезды — тоже возможный кандидат на скрытую массу. В данном случае интерес представляют старые нейтронные звезды, которые практически не излучают энергии. Другое дело, откуда они могли в таком количестве взяться и когда успели состариться?

Как обнаружить MACHOs?

Если MACHOs практически не светятся, то можно ли их обнаружить вообще? Современные методы исследования позволя-

ют это сделать. Так, с введением в строй телескопа «Хаббл» (Hubble Space Telescope) астрономам удалось обнаружить много темных карликов в нашей и соседних галактиках. Но их оказалось всего 6% от общей массы галактического гало! Может быть, дальнейшие исследования увеличат эту цифру.

Другим способом обнаружить MACHOs является хорошо изученный эффект гравитационного линзирования. В данном случае имеется в виду микролинзирование: если некое несветящееся тело пересекает прямую линию между какой-либо звездой и Землей, то яркость звезды увеличивается. Конечно, все небесные тела движутся относительно друг друга, поэтому увеличение яркости — кратковременный эффект. Но уж если оно обнаружено, то совершенно очевидно, что это «дело рук» какого-то несветящегося объекта, MACHO. Методы гравитационного линзирования настолько усовершенствовались, что позволяют определять также и массу темного объекта. Уже имеются предварительные данные от нескольких научных групп о существовании объектов с массой в интервале от массы Юпитера до массы Солнца.

Есть и другой способ обнаружения MACHOs, опять же связанный с их гравитационным полем. Если астроном обнаруживает, что некоторая звезда вращается вокруг «чего-то невидимого», то совершенно ясно, что обнаружен MACHO. Именно он создает гравитационное поле, в котором и движется его более яркая соседка — звезда. Более того, определив радиус орбиты и скорость вращения (например, при помощи того же Доплер-эффекта), можно найти массу данного объекта.

Неуловимые WIMPs

Другой путь объяснения недостающей массы выбрали физики, изучающие элементарные частицы. Они предположили, что галактическое пространство заполнено частицами особого вида. Их суммарная масса и есть как раз та самая скрытая масса. WIMPs предположительно образовались, когда наша Вселенная была еще очень молодой и горячей.

Почему эти частицы не собираются в плотные объекты, типа темных карликов? Почему мы их не видим? Приходится

предположить, что эти частицы практически не взаимодействуют с другими, обычными частицами и, в частности, не излучают фотонов. По этой же причине они и не собираются в плотные объекты, несмотря на гравитационное притяжение. В плотных объектах скорости частиц не могут быть большими, но чтобы сбросить скорость после разгона в гравитационном поле, надо отдать энергию. Если же частица не взаимодействует с другими частицами и не излучает фотоны, то она энергию не теряет и в результате пролетает центральную область, не задерживаясь в ней. На существование WIMPs указывает только гравитационное взаимодействие. Это необычное свойство WIMPs создает большие трудности для доказательства их существования.

Если эти частицы существуют, то они заполняют всю нашу галактику и непрерывно пронизывают Землю. От обычных частиц, прилетающих из Космоса, нас спасает атмосфера, которая поглощает даже наиболее энергичных представителей. Но WIMPs не взаимодействуют с обычной материей и, следовательно, не задерживаются атмосферой! Каждую секунду нас, возможно, пронизывает примерно 10^{12} этих частиц. К счастью, эти частицы не сталкиваются с молекулами нашего тела по той же причине, что и с молекулами атмосферы, так что мы их просто не замечаем. Они пролетают сквозь нас, не оставляя никакого следа.

Надежда обнаружить WIMPs основана на том, что, возможно, они хоть и слабо, но все-таки взаимодействуют с обычными частицами. Пусть вероятность столкновения крайне мала, но если собрать много обычных частиц вместе, то, возможно, с какой-нибудь из них эта неуловимая WIMP да провзаимодействует. Ведь их должно быть очень много, и если подольше подождать, то столкновение произойдет! Подавляющее большинство этих частиц пролетят незамеченными не только сквозь материал детектора, но и сквозь Землю, однако, возможно, отдельные WIMPs все-таки столкнутся с атомами материала-мишени. Так, проект Бернарда Сэдоле (Sadoulet) и Уолтера Стоквелла (Stockwell) из Беркли предусматривает охлаждение большого куска кристаллического материала почти до

абсолютного нуля. Если через него будут пролетать миллиарды WIMPs, то когда-нибудь произойдет столкновение такой частицы с одним из ядер кристалла. Ожидается, что небольшое тепло, выделившееся при столкновении, будет зафиксировано приборами, что и докажет существование WIMPs. Очевидно, что чем больше кристалл, тем больше в нем атомов и тем быстрее произойдет желаемое событие. Поэтому проект AMANDA предполагает использование в качестве кристалла-мишени антарктического льда. Детекторы будут помещены глубоко в его толщу, что сильно увеличит общий размер мишени и, значит, число столкновений. Но за все приходится платить: температура такой мишени, конечно же, не может быть сильно понижена, что уменьшит чувствительность всей системы.

Скрытая масса – холодная или горячая?

Скрытая масса может, вообще говоря, существовать в двух формах – «горячей» и «холодной». Под холодной скрытой массой (cold dark matter) понимаются WIMPs, которые движутся с нерелятивистскими скоростями (т. е. много меньшими скорости света, так что их масса много больше их кинетической энергии). В распоряжении физиков имеется несколько таких частиц – кандидатов на WIMPs, и все они объединены одним недостатком: существуют лишь в теории. Возможно, это нейтралино – частица, которая просто обязана существовать, как считают многие физики, или аксион – частица с чрезвычайно малой массой и очень слабым взаимодействием.

Горячая скрытая масса (hot dark matter) – это частицы, которые движутся со скоростями, близкими к скорости света. Их масса так мала, что они остаются релятивистскими даже при невысокой температуре Вселенной, начиная с нескольких сот градусов Кельвина. Как показывают расчеты, масса таких частиц должна быть меньше 100 электрон-вольт. Это значит, что они по крайней мере в 5 000 раз легче электрона. Подходящим кандидатом на эту роль являются нейтрино. Со времен своего открытия в 1950-х гг. нейтрино считались безмассовыми. Но прошло время, семья нейтрино выросла (их

теперь три вида) и «приобрела вес» — недавно было доказано, что по крайней мере один из трех видов нейтрино обладает ненулевой массой. И, наконец, оно действительно крайне слабо взаимодействует с другими частицами. Концентрация нейтрино в космосе составляет примерно 100 частиц в кубическом сантиметре, и они вполне могли бы играть роль скрытой массы. К сожалению, модель горячей скрытой массы сталкивается с трудностями при объяснении того, как облака таких нейтрино сжимаются в более плотные объекты. Все, что быстро движется, в кучу собирается плохо.

Но вернемся к холодной скрытой массе. Поскольку WIMPs имеют большую массу, они еще на ранних стадиях развития Вселенной становятся нерелятивистскими и начинают образовывать отдельные облака. Гравитационное поле последних сжимает скрытую массу и, что более важно, притягивает барионы — протоны и нейтроны, то есть обычное вещество, из которого состоит видимый мир. Поэтому галактики формируются довольно рано, что соответствует наблюдениям. Действительно, всего через миллиард лет после Большого взрыва галактики уже существовали. Это было бы трудно объяснить, имея в своем распоряжении только барионы.

Обрадованные успехом, астрофизики решили просчитать дальнейшую эволюцию этих облаков, состоящих преимущественно из скрытой массы. И тут их ждало разочарование. Распределение скрытой массы в кластерах галактик не очень-то соответствовало расчетному. Тем не менее модель холодной скрытой массы, похоже, гораздо ближе к истине, чем горячей.

Возможно, если учесть все эффекты, наблюдательные данные и расчеты придут к согласию, считают одни ученые. Другие же полагают, что разногласий слишком много и надо что-то существенно менять. Неопределенность в свойствах WIMPs позволяет делать различные предположения об их свойствах, чтобы получить разумное согласие с наблюдениями. Так, Штейнхард (Steinhardt) и Спергель (Spergel) предположили, что эти частицы, хотя и «не видят» обычную материю, очень хорошо взаимодействуют друг с другом. Их интенсивные

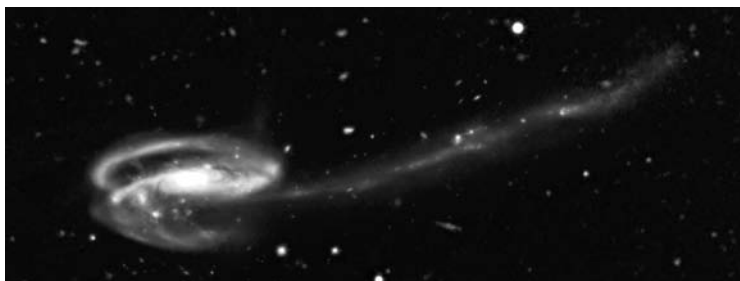


Рис. 1.18. Галактика UGC 10214 («Головастик»). «Хвост» из вещества, по одной из версий, образовался благодаря притяжению невидимой «темной» галактики.

Фото с интернет-страницы <http://nti.freewind.ru/Members/dagrs/life/dag>

столкновения делают облака этих частиц более рыхлыми. Впрочем, последние наблюдения обсерватории «Чандра» ставят под сомнение и эту модель.

Раскрытие загадки скрытой массы чрезвычайно важно для понимания свойств Вселенной. Например, если Вселенная с самого начала после Большого взрыва расширялась равномерно во все стороны, то непонятно, почему отдельные ее части стали конденсироваться и затем превращаться в галактики и звезды. Существует несколько моделей формирования галактик, и присутствие скрытой массы является необходимым составляющей большинства из них.

Проблема скрытой массы имеет и философский аспект. Первоначальная установка о том, что Земля есть центр Вселенной, постепенно корректировалась. Сначала нас информировали, что Земля — обычная планета, обращающаяся около обычной звезды. Потом выяснилось, что наше Солнце находится на периферии самой обычной галактики. Теперь же выясняется, что мы не имеем отношения к основному веществу, заполняющему Вселенную, — скрытой массе.

Мы уже говорили, что, по некоторым данным, существуют галактики без звезд, состоящие только из скрытой массы (темной материи). Более того, вполне возможно, что их гораздо больше, чем обычных галактик, просто мы их пока не видим. Кстати, в этом аспекте очень интересна галактика

UGC 10214, поток вещества из которой зарегистрирован наблюдателями (рис. 1.18). Вещество в состоянии преодолеть гравитационное поле галактики, только если ему в этом «поможет» соседняя галактика: «воровство» материала — обычное дело среди них. Но в данном случае поблизости никаких галактик не видно! Возможно, что галактика рядом все-таки есть, но состоит она из темного вещества, так что проявляет себя только посредством гравитации.

Темная энергия — энергия вакуума?

В представлении людей, не связанных с физикой, вакуум — «это когда ничего нет». Это не совсем так. Согласно более точному определению, вакуум — это состояние, в котором отсутствуют частицы. Есть отдельная проблема, связанная с корректностью определения самого понятия «частица», но в пространстве Минковского, в котором мы живем, об этом можно не беспокоиться. Поскольку энергия заключена именно в частицах, то, резонно полагали все, включая и ученых, нет частиц — нет и энергии. Значит, энергия вакуума должна быть равной нулю.

Вся эта благостная картина рухнула в 1998 г., когда астрономические наблюдения показали, что разбегание галактик немного отклоняется от закона Хаббла. Вызванный этим шок у космологов длился недолго, очень скоро стали появляться статьи с объяснением странного факта. Самой простой и естественной является идея о существовании положительной энергии вакуума. В конце концов, вакуум означает отсутствие частиц, но почему только частицы должны обладать энергией? Возможны и более экзотичные объяснения. Так, модель квинтэссенции предполагает, что мы продолжаем медленно приближаться к минимуму потенциальной энергии некоего гипотетического поля, но еще не достигли его. До сих пор вопрос о происхождении этой энергии остается открытым, а положение дел — темным. Может быть, поэтому, а также по аналогии с темной материей, эту энергию тоже называли «темной».

Эта темная энергия распределена в пространстве на удивление однородно. Подобную однородность, кстати, трудно

было бы реализовать, если бы энергия была заключена в каких-то неведомых частицах: гравитационное взаимодействие таких частиц заставляло бы их собираться в грандиозные комки, подобно галактикам.

Наблюдательные данные указывают на то, что доля темной энергии составляет примерно 70% от полной энергии. Значение открытия темной энергии трудно переоценить, но об этом мы поговорим в следующих главах.

Топологические дефекты

Перечисленными явлениями не исчерпываются возможные сюрпризы Природы. Нам надо быть готовыми к восприятию так называемых «топологических дефектов». Чтобы понять, о чем идет речь, рассмотрим аналогию.

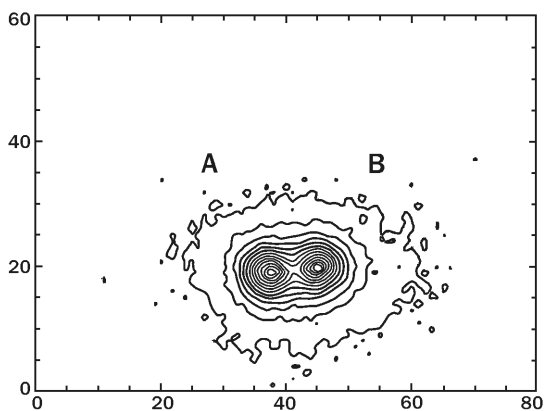
Представьте себе две поверхности, одна из которых — плоскость, а вторая — сфера. Обе поверхности равномерно покрыты волосами, и наша задача состоит в причесывании каждой поверхности. С плоскостью справиться несложно, а вот со сферой возникнут проблемы. Во-первых, заранее ясно, что на всей сфере одновременно этого сделать не удастся. Причесать волосы в одну сторону можно только локально, на небольшом участке. Вторая трудность состоит в том, что даже локально причесать все участки поверхности *одновременно* не удастся. Всегда останется хотя бы одна «макушка», из которой волосы направлены в разные стороны.

Если вернуться к физике, то вполне могут существовать поля, которые невозможно «причесать» во всех локальных пространственных областях одновременно. Множество подобных гипотетических примеров рассмотрено в научной литературе. Поля, как и любые другие материальные объекты, обладают энергией. Разные конфигурации поля очевидно обладают разной энергией. Поэтому в локальной пространственной области, содержащей полевую «макушку», плотность энергии отличается от плотности энергии обычных областей. Такой объект часто называют «ежом», по понятным причинам.

Возможны и более сложные топологические конфигурации полей. Это могут быть, например, «струны» или «стенки».

Рис. 1.19. Одна галактика и два изображения — или две галактики с абсолютно одинаковыми свойствами?

Рисунок из статьи [34]



Струны и стенки небольших размеров если и существовали, то давно исчезли, оставив после себя постепенно затухающие колебания поля, из которого были «сделаны». Впрочем, есть предположения о том, что такие объекты, состоящие сплошь из поля, существуют и вносят вклад в скрытую массу. Тем не менее, как показывают расчеты, создать устойчивые объекты из полевых стенок, а тем более струн, довольно сложно. Помочь могло бы сильное гравитационное поле, но тогда очень вероятно формирование черной дыры. Стенки больших размеров вряд ли будут найдены в нашей Вселенной: уж слишком

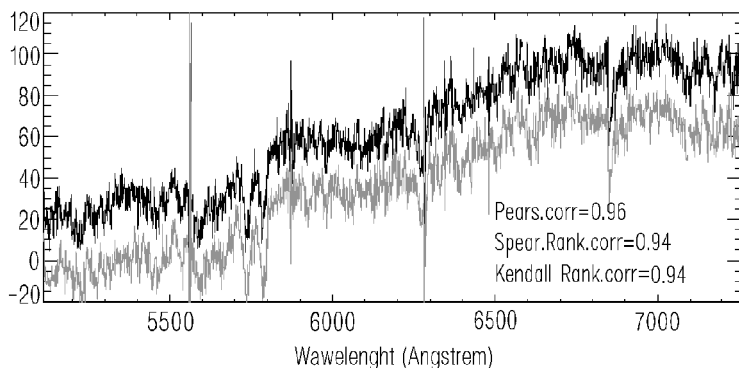


Рис. 1.20. Спектры двух соседних галактик. Не слишком ли они похожи? Рисунок из статьи [34].

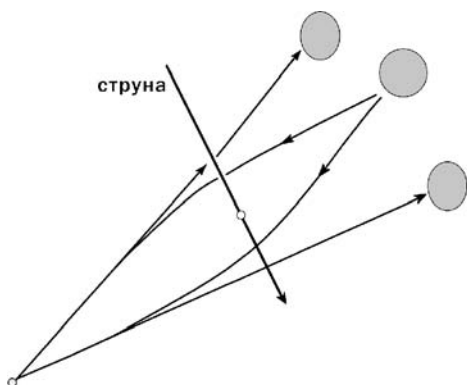


Рис. 1.21. Струна порождает два слабо искаженных объекта.

они заметны и были бы найдены уже давно. Существование длинных струн более реалистично.

Несколько лет назад были получены необычные изображения двух галактик, тесно примыкающих друг к другу, причем их формы казались зеркальным отражением друг друга (рис. 1.19). При анали-

зе спектров этих галактик выяснилось, что они также очень похожи (рис. 1.20). Это уже серьезно. Спектр каждой галактики уникален, как платежная карточка. Два совершенно одинаковых спектра, как и две карточки, одновременно существовать не могут. Вывод напрашивается сам: это изображения либо двух очень похожих галактик, либо одной. Эффект, делающий такое возможным, называется микролинзированием и хорошо известен уже очень давно. Но обычное микролинзирование на точечных объектах обязательно искажает форму галактики. В данном же случае форма сохранялась! Легко понять, что это возможно, только если между галактикой и Землей находится одномерный протяженный объект. В теории такой объект известен — это струна (рис. 1.21). Увы, на этот раз надежды ученых не оправдались: более детальные исследования показали, что это все-таки две похожие галактики.

Про кротовые норы

Конечно, это не реальные ходы в земле, прорытые кротами, а «поэтическое» название, придуманное физиками для обозначения сложных структур, описываемых уравнениями Эйнштейна. Английский вариант тоже не блещет изысканностью — «червоточины» (wormholes). Произошел он от образа нашей

Вселенной как кожуры яблока. Микробы путешествуют по поверхности, а червяки — по тоннелям внутри яблока. Впервые о них серьезно заговорил Дж. Уиллер, а первый математически строгий результат был получен К. Бронниковым. Сразу будем иметь в виду, что кротовые норы еще не обнаружены, поэтому они — сущности гипотетические.

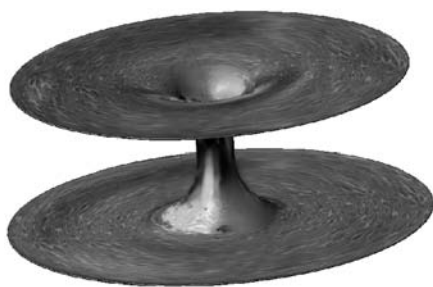


Рис. 1.22. «Кротовая нора», соединяющая два пространства (две вселенные).

Что они собой представляют? По форме они похожи на два водоворота на поверхности воды, соединенные «хвостами» под поверхностью. Аналогично и настоящая кротовая нора представляет собой некую пространственную воронку, соединенную с другой воронкой тоннелем. Воронки могут находиться в разных пространствах, как на рис. 1.22, а могут соединять разные части одного пространства, как на рис. 1.23.

При первом же знакомстве с этими необычными объектами появляется искушение использовать их для дальних путешествий, может быть, даже в другое пространство. Теоретически это возможно, но практически трудноосуществимо. Впрочем, вероятность образования больших кротовых нор, где

Рис. 1.23 «Кротовая нора», соединяющая две локальные области одного и того же пространства. Путь между ними в обычном пространстве может быть гораздо длиннее пути через кротовую нору. Для наглядности наше пространство изогнуто.



мог бы поместиться человек, крайне мала. Во-вторых, есть сильное подозрение, что они и сами по себе неустойчивы. Вход же человека в тоннель может нарушить равновесие и привести к распаду кротовой норы. Отдельный вопрос — где и в каком агрегатном состоянии окажется путешественник в этом случае.

Отступление.
Машина времени

Предположим, что человек может перемещаться по кротовой норе. Тогда далекие пространственные перемещения действительно будут занимать мало времени. Законы физики при этом нарушаться не будут. Еще более захватывающее развитие событий возможно, если поместить один из входов кротовой норы около нейтронной звезды, сильное гравитационное поле которой замедляет ход времени. Оказывается, что при этом сбывается самая фантастическая идея — возможность построения «машины времени». Пройдя кротовую нору, человек оказывается в своем прошлом. Ну а что же с принципом причинности (вошел в первый вход кротовой норы — вышел из второго — попал в свое прошлое — застрелил себя — некому входить в первый вход)? Эту проблему небезуспешно изучает И. Д. Новиков. Поскольку человек — система чрезвычайно сложная, он упростил ситуацию, заменив человека бомбой. Парадокс все равно остается: бомба, вылетев из второго входа в своем прошлом, взрывается, уничтожая себя еще до влета в первый вход. Эта ситуация уже может быть проанализирована на основе известных законов физики, представленных в виде соответствующих уравнений. Ответ оказался очень интересным: это просто невозможно, поскольку противоречит уравнениям физики. Грубая аналогия: нельзя потребовать, например, чтобы брошенный вами камень в поле тяжести Земли пролетел несколько раз по окружности: такая траектория противоречит соответствующим уравнениям. В силу привычки мы этому не удивляемся. Если вернуться к нашей бомбе, то процесс ее самоуничтожения не описывается известными уравнениями и поэтому неосуществим. А что же можно? Например, из второго входа вылетает не бомба, а ее осколок, который, попадая в бомбу, направляющуюся к первому отверстию кротовой норы, взрывает ее. В первое отверстие влетает уже осколки бомбы, один из которых вылетит из второго входа. Парадокса нет. Так что самоубийца пройти сквозь кротовую нору в свое прошлое не может...

ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ВСЕЛЕННОЙ

Как из искры возгорелось пламя

Существуют «вечные вопросы», которые задают себе не только ученые, но и большинство думающих людей. Одним из таких глобальных вопросов является проблема происхождения нашей Вселенной со всеми ее свойствами, которые уже открыли и еще откроют в будущем. Со времени обнаружения космологического расширения стало очевидно, что наша Вселенная родилась примерно 14 млрд. лет назад в результате «Большого взрыва». Но что именно взорвалось? И что было до взрыва? Сейчас космологи продвинулись в понимании этих, казалось бы, неразрешимых вопросов и других тесно связанных с ними проблем. Они также пытаются понять, как наша Вселенная развивалась сразу после Большого взрыва и что произойдет с ней в далеком будущем. Теоретики разрабатывают самые разные и удивительные модели и теории, астрономы открывают новые явления в космосе и уточняют старые. И все вместе пытаются привести к согласию предсказания теории и наблюдения. Общая картина уже вырисовывается, хотя многие проблемы ждут своего объяснения.

Основные проблемы Большого взрыва

В 1964 г. физики Арно Пензиас и Роберт Вилсон, сотрудники лаборатории Белл, занимавшиеся обслуживанием радиоантенны слежения за американским космическим спутником «Эхо» в Холмделе (Нью-Джерси), решили проверить свои научные гипотезы о радиоизлучении некоторых объектов Вселенной.

Антенна была самым чувствительным на тот момент детектором СВЧ-волн, а потому сначала ее надо было правильно построить, чтобы исключить возможные помехи.

Для тестирования была выбрана длина волны 7,35 см, на которой не излучал ни один из известных источников. Работа явно не клеилась, потому что антенна постоянно фиксировала дополнительный необъяснимый посторонний шум, от которого никак не удавалось избавиться. Проверка всех компонентов и даже удаление из дорогостоящей аппаратуры неизвестно как туда попавшего голубиного помета (!) не изменили ситуацию. Шум не зависел ни от направления антенны — это означало, что его источник находится за пределами Земли и земной атмосферы; ни от времени суток — то есть не мог быть связан с Солнцем или планетами. Если бы причина крылась в нашей Галактике, то интенсивность излучения изменялась бы из-за вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, изменяющего направление антенны на те или иные участки космоса. Шум был везде и всегда.

Измеренная на длине волны 7,35 см интенсивность этого радиосигнала оказалась равной интенсивности излучения абсолютно черного тела с температурой около 3 К. Потратив около года на устранение неустранимой помехи, Пензиас и Вилсон поняли, что нашли то, чего не теряли, — реликтовое излучение ранней Вселенной, существование которого было предсказано еще в 1948 г.

Забавно, что в то же время Роберт Дикке и Джим Пиблз из Принстонского университета, расположенного по соседству с лабораторией Белл, вычислили, что такое излучение, если оно действительно существует, должно быть изотропным (не зависеть от направления) и соответствовать температуре излучения абсолютно черного тела с температурой не более 10 К, о чем Пиблз и рассказал на своей лекции в начале 1965 г. Узнавший об этом Пензиас позвонил в Принстон, когда там уже почти смонтировали аппаратуру для практического поиска излучения. Включать ее уже не было смысла.

Теоретическое обоснование открытия взяли на себя принстонцы, но, тем не менее, именно за практическое обнаруже-

ние излучения Пензиасу и Вилсону была присуждена Нобелевская премия 1978 г.

Что же такое реликтовое излучение? Согласно теории Большого взрыва, Вселенная возникла приблизительно 14 млрд. лет назад в результате грандиозного взрыва, создавшего пространство, время и всю материю, которая существует в нашей Вселенной. До возраста приблизительно 300 тысяч лет молодая Вселенная была «кипящим котлом» из электронов, протонов, нейтрино и излучения, которые взаимодействовали между собой и составляли единую среду, равномерно заполнявшую всю раннюю Вселенную. Общее расширение Вселенной постепенно охлаждало эту среду, и когда температура упала до нескольких тысяч градусов, наступило время формирования стабильных атомов. После этой эпохи первоначальное излучение распространялось свободно, поскольку оно почти не взаимодействует с образовавшимися нейтральными атомами. В результате космического расширения это излучение стало куда менее интенсивным, но не пропало совсем. Именно его и обнаружили будущие нобелевские лауреаты.

Реликтовое излучение равномерно заполняет всю Вселенную, и если бы мы могли видеть микроволны, все небо пылало бы с удивительно одинаковой яркостью во всех направлениях. Однородность этого излучения является одной из главных причин, по которой его считают теплом, оставшимся от Большого взрыва. Но как мог локальный источник, каковым являлась тогда Вселенная, создать подобную однородность? Оказывается, «сглаживанию» способствует сам процесс расширения пространства. Чтобы наглядно понять, как это происходит, представьте себе такую большую и очевидную неоднородность, как гора Джомолунгма. Теперь начните мысленно растягивать эту гору в ширину, оставляя высоту неизменной. Если как следует постараться и растянуть ее в ширину, скажем, на миллион километров, то получится почти идеально плоская поверхность: перепад высот в 8 км (высота горы) практически незаметен на таком колоссальном масштабе, поскольку угол наклона поверхности – примерно 10^{-4} градуса. Именно это и происходит при расширении

пространства после Большого взрыва — все неоднородности сглаживаются.

Новорожденная Вселенная прошла стадию чрезвычайно быстрого расширения, названного инфляцией, которая радикально изменила пейзаж. Возникшие после инфляции крошечные изменения в плотности материи в ранней Вселенной должны были оставить «отпечаток» на реликтовом излучении в форме температурных колебаний между различными точками пространства. И эти колебания удалось обнаружить с помощью наблюдений на спутниках COBE («Cosmic Background Explorer», США) и «Реликт-1» (Россия), измеренные значения температуры составляли от 2,7251 до 2,7249 К, то есть отклонение не превышало 0,01% от среднего.

Температурные колебания соответствуют слабым сгущениям материи в ранней Вселенной, которые, как считают, явились прародителями звездных структур, видимых нами сегодня. Теория температурных флуктуаций сложна, поскольку включает множество эффектов. Излучение от крупных пространственных флуктуаций плотности будет иметь немного меньшую температуру, так как фотоны теряют энергию, выбираясь из гравитационной ямы, созданной повышенной плотностью. Более мелкие флуктуации плотности успевают слегка «поджаться» за счет гравитационных сил. Кинетическая энергия частиц немного возрастает (как у камня, падающего на Землю). А поскольку температура пропорциональна кинетической энергии частиц, то более мелкие области оказываются нагретыми. В еще более мелких пространственных флуктуациях плотности давление расширяет эти гравитационно сжатые области, что приводит к их охлаждению. Эти колебания плотности и температуры происходят несколько раз.



Теоретический учет всех эффектов далеко не прост, но результаты расчетов, выполненных на базе инфляционного сценария, дают прекрасное согласие с наблюдательными данными. Если же предположить, что инфляционный период в жизни нашей Вселенной — фикция, то согласия теории и эксперимента добиться не удастся. Тем не менее современные наблюдательные данные указывают на то, что инфляционная модель нуждается в доработке. Насколько серьезными должны быть изменения, покажет время.

В феврале 2003 г. исследователи с помощью космической обсерватории «Вилкинсон» (WMAP) представили новую, гораздо более подробную карту точного распределения температуры реликтового излучения по всему небу (рис. 2.1; обратите внимание, насколько полнее информация 2003 г. по сравнению с полученной всего лишь десятилетие назад). Используя все имеющиеся данные и компьютерное моделирование, исследователи воссоздали картину зарождения и развития Вселенной, установили ее возраст и состав. По их мнению, Вселенной сейчас 13,7 млрд. лет (с точностью до 200 млн. лет).

Долгое время Вселенная, остыв после Большого взрыва, оставалась темной и холодной, ничто не освещало ее. Этот период закончился, когда начали формироваться звезды. Тот факт, что первое поколение звезд, впервые осветивших космос, начало формироваться на очень ранней стадии эволюции Вселенной (спустя всего 200–500 миллионов лет после Большого взрыва), лишний раз подтверждает существование скрытой массы, которая своим гравитационным полем помогала материи концентрироваться и впоследствии формировать первые звезды и галактики.

Расширение Вселенной было обнаружено 70 лет назад, когда наблюдения показали, что свет от более далеких галактик «краснее» света от более близких. Общеизвестным объяснением этого факта является предположение о разбегании галактик. Скорость галактик пропорциональна расстоянию от Земли (закон расширения Хаббла). Кстати, разбегаются не звезды и даже не отдельные галактики, а скопления галактик. Ближайшие от нас звезды и галактики связаны друг с

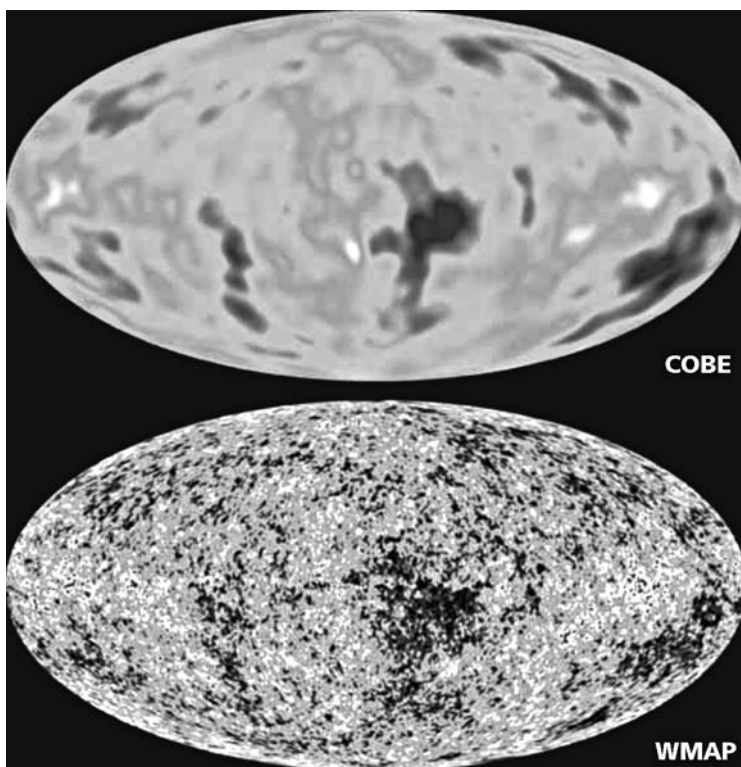


Рис. 2.1. Карты распределения температуры реликтового излучения.
Иллюстрация с сайта http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html

другом гравитационными силами и образуют устойчивые объекты. Это тем более относится к окружающим нас предметам, которые являются еще более прочными объектами.

Возникает резонный вопрос: если, в каком направлении ни посмотри, скопления галактик разбегаются от Земли, то не является ли наша Земля центром Вселенной?! Увы, это не так. Где бы ни находился наблюдатель, он будет видеть все ту же картину: все галактики разбегаются от него. В нашей Вселенной все наблюдатели равны! Понять, почему это так, помогает хорошо известная картинка (рис. 2.2).

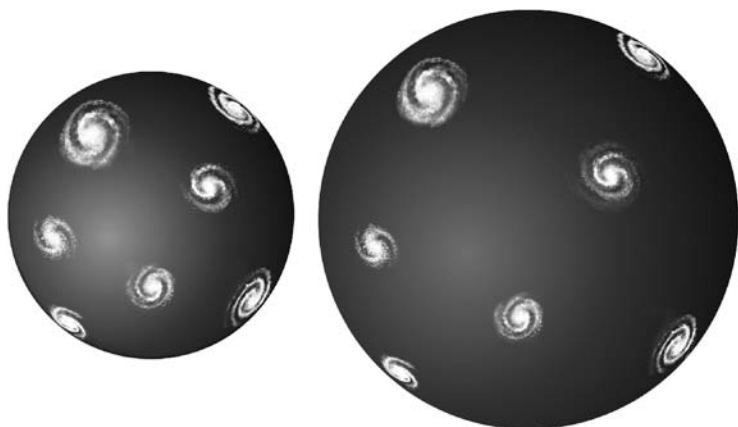


Рис. 2.2. Все расстояния между пространственными точками возрастают пропорционально. В наше время такими точками являются галактики и скопления галактик, которые, будучи гравитационно связанными системами, не расширяются.

Но такой однородный разлет вещества должен иметь начало. Значит, все галактики должны были родиться в одной точке! Расчеты показывают, что это произошло примерно 13–14 млрд. лет назад. Этот удивительный вывод требует серьезной проверки. Например, в момент такого взрыва температура должна была быть очень большой. Конечно, с возрастом остывает все, не является исключением и наша Вселенная. Тем не менее какая-то, пусть небольшая, температура должна оставаться и в наши дни. Как вы уже знаете, доказательство пришло в 1964 г., когда было обнаружено реликтовое электромагнитное излучение с температурой около 3 К. Авторы открытия, А. Пензиас и Р. Уилсон, тем самым подтвердили идею Г. Гамова о том, что на ранней стадии наша Вселенная могла быть очень горячей, настолько, что были возможны ядерные реакции. Именно это открытие, неожиданное для многих ученых, убедило их, что Большой взрыв действительно имел место.

Именно Гамов в 1946 г. первым понял, что в момент рождения Вселенная была горячей. На эту мысль его натолкнул ре-

зультат расчета доли гелия, образовавшегося в результате звездных реакций. Он прекрасно знал о том, что Вселенная возникла примерно 14 млрд. лет назад. Столько же времени (примерно) звезды производили гелий. Полученный результат его сильно удивил: гелия во Вселенной гораздо больше, чем могли произвести звезды! Гамов предположил, что должен быть еще один механизм синтеза гелия, и единственным разумным предположением была идея первичного нуклеосинтеза: образование гелия шло еще до появления первых звезд. Но ядерная реакция, в результате которой образуется гелий, требует высоких температур. Значит, рождение Вселенной происходило с одновременным сильным нагревом ее содержимого.

Теория Большого взрыва позволила объяснить множество проблем, стоявших перед космологами. К сожалению, а может быть, и к счастью, эта теория поставила перед космологами новые вопросы. Вот небольшой их перечень.

- ◆ Что было до Большого взрыва?
- ◆ Почему наше пространство плоское? Под «плоским» обычно понимается пространство любого числа измерений, описываемое геометрией Евклида, которую мы изучали в школе.
- ◆ Если теория Большого взрыва справедлива, то размер Вселенной сейчас должен был быть никак не более 1 см. Тесновато было бы в такой Вселенной!
- ◆ Во время любого взрыва вещество разлетается в разные стороны крайне неравномерно: в одну сторону — больше, в другую — меньше. Но наблюдения показывают, что Вселенная на удивление однородна. Например, отклонение температуры реликтового излучения от среднего значения, как уже говорилось, составляют *одну сотую процента!* Это все равно, как если бы наша Земля имела идеальную форму шара с «горами» не более 40 метров высотой. Для сравнения: диаметр Земли примерно $1,2 \cdot 10^7$ метров. Трудно было бы тогда поверить в случайность ее происхождения.

Температура в первый момент должна быть чрезвычайно высокой, никак не менее 10^{13} К. Что привело к такому нагреву?

Эти и некоторые другие проблемы указывали на то, что теория Большого взрыва неполна. Долгое время казалось, что продвинуться далее невозможно. Тем не менее примерно 25 лет назад благодаря работам советских физиков Е. Глинера, А. Старобинского и американского физика А. Гуса было открыто новое явление — возможность сверхбыстрого расширения Вселенной. Теперь считается общепринятым, что такой период, получивший название «инфляция», имел место на начальной стадии развития нашей Вселенной. Объяснение этого явления основывается на уже хорошо изученных разделах теоретической физики — общей теории относительности Эйнштейна и квантовой теории поля. С одной стороны, это вселяет уверенность в правильности выводов. С другой стороны, остаются нерешенными некоторые вопросы (что, впрочем, тоже хорошо). Например, нет окончательных ответов на вопросы, что такое время и почему наше пространство трехмерное.

Период сверхбыстрого расширения Вселенной

Здесь я попытаюсь дать представление о сущности начального периода жизни Вселенной. Сложность заключается в том, что приходится оперировать такими сверхмалыми и сверхбольшими числами, что наше воображение с трудом их воспринимает. В свое время великий математик Д. Гильберт с грустью сказал о своем бывшем ученике: «Ему не хватило воображения, чтобы стать математиком. Он стал поэтом». Конечно, современные космологи опираются на уравнения, но, тем не менее, воображение играет все большую роль. Мы же с вами будем использовать аналогии для того, чтобы разобраться с начальным периодом Большого взрыва, который называли «инфляцией». Из дальнейшего будут понятны причины такого странного названия¹. Более строгий анализ инфляционного расширения пространства содержится в Приложении 6.

Итак, представьте себе горный склон. Он покрыт снегом, в который вкраплены разнообразные мелкие предметы — камешки, ветки, пыль и т. д. И вот вы, находясь на этом склоне,

¹ Лат. *inflatio* — раздувание.

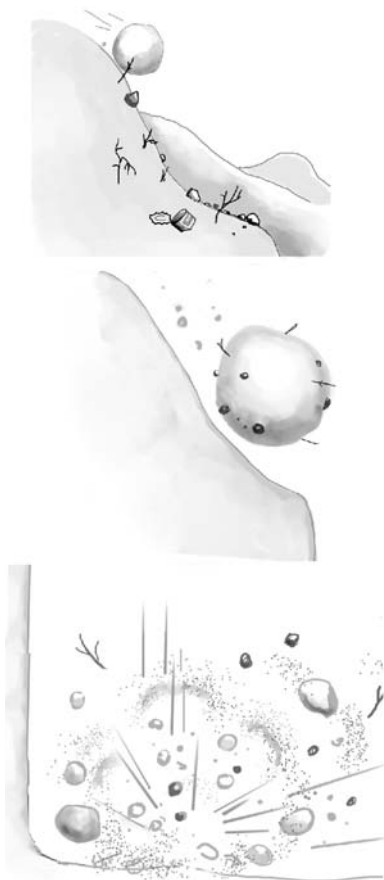


Рис. 2.3. Снежный ком катится с горы и падает в долину.

сделали небольшой снежок и бросили его вниз. Скатываясь, снежок увеличивает-ся в размерах, так как на него налипают новые слои снега со всеми включения-ми. Чем больше размер снежка, тем быстрее он уве-личивается. Очень скоро из маленького и симпатично-го снежка он превратится в огромный ком. Если наш склон заканчивается пропа-стью, то этот ком, конечно, полетит в нее с нарастаю-щей скоростью. Достигнув дна, он ударится о него, и его составные части разле-тятся во все стороны. Из школьной физики извест-но, что кинетическая энер-гия кома частично пойдет на нагрев окружающей сре-ды. Это замечание скоро нам понадобится.

Теперь мы готовы к вос-приятию процесса инфля-ции. Прежде всего физикам пришлось ввести еще одно гипотетическое поле. Назва-

ли его, естественно, «инфлатонным». Оправданием служило то, что мы все равно не знаем состав скрытой массы и темной энергии, а значит, новые поля придется вводить почти навер-няка. Так вот, это инфлатонное поле заполняло собой все про-странство (снег на склоне). Благодаря случайным флуктуаци-ям оно принимало самые различные значения в различных об-ластях. Ничего интересного не происходит, пока случайно не

образуется однородная конфигурация этого поля размером не менее 10^{-33} см. Предполагается, что на таких размерах уже справедливы основные законы физики, известные ученым, что позволяет предсказать дальнейшее поведение системы. Оказывается, что сразу после рождения пространственная область, занятая флуктуацией, начинает очень быстро увеличиваться, а инфлатонное поле стремится занять положение, в котором его энергия минимальна (снежный ком покатился вниз, увеличиваясь в размерах). Такое расширение продолжается примерно 10^{-35} секунды, но этого оказывается достаточно, чтобы размер Вселенной возрос как минимум в 10^{27} раз, и к окончанию инфляционного периода наша Вселенная имеет размер порядка 0,1 см. Инфляция заканчивается, когда инфлатонное поле достигает минимума энергии — дальше падать некуда. При этом накопившаяся кинетическая энергия переходит в кинетическую энергию рождающихся и разлетающихся частиц, происходит нагрев Вселенной. Как раз этот момент воспринимается нами как Большой взрыв.

Горка, о которой говорилось выше, может иметь гораздо более сложный рельеф — несколько разных минимумов, долины внизу и всякие кочки. Снежные комки расположены на всех склонах горы, выше и ниже. Каждый комок может случайным образом скатиться в любой из минимумов, например по другую сторону склона. Точно так же и квантовые флуктуации, зародыши будущих вселенных, возникают, имея различные начальные свойства. Естественно, и свойства вселенных также специфичны, могут отличаться друг от друга, и свойства нашей Вселенной удивительнейшим образом приспособлены к тому, чтобы в ней возникла разумная жизнь. Другим вселенным повезло меньше. Эта тема обсуждается в последних главах.

Еще раз хотелось бы подчеркнуть, что описанный удивительный процесс рождения нашей Вселенной «практически из ничего» опирается на строго научные расчеты. Тем не менее у всякого человека, впервые знакомящегося с инфляционным механизмом, описанным выше, возникают вопросы. Ниже я попытаюсь прояснить положение дел.

Основные вопросы к инфляции

[?] № 1. *Наша Вселенная состоит из множества звезд, не говоря уж о скрытой массе. Значит, полная энергия Вселенной сейчас очень велика. Как вся эта энергия могла сосредоточиться в первоначальном объеме порядка 10^{-99} см³? Или закон сохранения энергии не работает?*

О т в е т. Во Вселенной существуют не только материя, но и гравитационное поле. Известно, что энергия последнего отрицательна и в точности уравнивает энергию, заключенную в частицах, планетах, звездах и т. д. Закон сохранения энергии выполняется, и суммарная энергия такова, какой была в самом начале, когда наша Вселенная только что родилась, т. е. практически равна нулю.

[?] № 2. *Как все эти частицы, из которых состоят звезды, могли поместиться в столь малом первоначальном объеме?*

О т в е т. А они и не помещались. Частицы интенсивно рождались в тот период, когда инфлатонное поле достигло минимума своей потенциальной энергии, т. е. как раз в момент Большого взрыва.

[?] № 3. *Нетрудно подсчитать, что поле расширялось со скоростью, большей скорости света. Как же так? Или мы наконец опровергли Эйнштейна?*

О т в е т. Ничего страшного не случилось. Быстрее скорости света не могут двигаться лишь материальные тела в непосредственной близости от наблюдателя. В данном же случае перемещалась воображаемая, нематериальная граница той области, где родилась флуктуация.

[?] № 4. *Почему окружающая среда не сопротивляется расширению области, в которой мы живем? Должны были возникнуть колоссальные силы противодействия, и в результате расширение окажется незначительным!*

О т в е т на этот вопрос — самый сложный и неожиданный. Общая теория относительности утверждает, что физическая картина, которую видит наблюдатель, кардинально зависит от того, где он находится и как движется. Так вот, описанная выше картина справедлива только для наблюдателя, находящегося внутри этой области. Этот наблюдатель никогда

не узнает, что происходит вне пространственной области, в которой он находится. Другой наблюдатель, смотрящий на эту область снаружи, никакого расширения не обнаружит. В лучшем случае он увидит лишь небольшую флуктуацию, которая по его часам исчезнет почти мгновенно! Даже самое изощренное воображение отказывается воспринимать такую картину. И все-таки она верна! По крайней мере, так считают современные ученые, черпая эту уверенность в уже открытых законах природы, правильность которых многократно проверена. Эти же рассуждения являются основой ответа и на следующий вопрос.

[?] № 5. *А куда же делось это поле, со всеми своими флуктуациями, сейчас?*

О т в е т. Никуда не делось. Продолжает существовать и флуктуировать. Но только мы, внутренние наблюдатели, не в состоянии этого увидеть: ведь для нас маленькая область превратилась в колоссальную Вселенную, границ которой не может достигнуть ни один сигнал с Земли! В нашей Вселенной это поле также присутствует. Вполне возможно, что темная энергия как раз и состоит из инфлатонного поля, находящегося в минимуме своего потенциала.

Странные наблюдатели

Итак, наша Вселенная возникла в какой-то момент времени в виде крошечной, но очень быстро расширяющейся области. Размер Вселенной изначально должен быть больше 10^{-33} см для того, чтобы выполнялись известные нам физические законы, да и сами понятия пространства и времени имели смысл. В этом случае мы можем (мысленно!) пронумеровать точки пространства, находящиеся на одинаковом расстоянии. В дальнейшем, конечно, нумерация точек сохраняется. Например, точка номер 1923 всегда будет точкой номер 1923. Теперь посадим в каждую точку по наблюдателю (опять же мысленно — ведь в тот момент температура была около 10^{33} K) и попросим одного из них, основного, посылать в окружающее пространство сигналы со скоростью света. Остальных же попросим присылать сигналы в ответ.

В первый момент основной наблюдатель, послав сигнал, получит ответ от всех наблюдателей. Удовлетворенный результатом, он делает перерыв на обед, после чего рассылает сигналы еще раз. К своему удивлению он обнаружит, что самые дальние наблюдатели *не ответили!* Хотя обедал он недолго — всего-то около 10^{-43} секунды. Мысленно проклиная халатность дальних наблюдателей, он посылает сигнал еще раз. Теперь число ответивших еще уменьшилось! Основной наблюдатель, начиная понимать, что дело не в халатности, посылает сигналы снова и снова. И каждый раз с грустью отмечает, что область, из которой приходит ответ, становится все меньше. Конечно, мы не в состоянии провести реальный эксперимент, но уравнения, правильность которых проверялась неоднократно, дают именно такую картину.

Какой же вывод наш наблюдатель может сделать? Вариантов для выбора у него не много. Например, напрашивается заключение, что расстояния между этими пронумерованными точками возрастают. Оказывается, что такой неожиданный вывод не противоречит никаким законам природы. Более того, он подтверждается современными наблюдениями — ведь разбегание галактик — это не что иное, как увеличение расстояния между пронумерованными объектами.

Что же мы имеем в результате? Расстояние между пронумерованными точками возрастает, в то время как номера точек остаются, конечно, неизменными. Поэтому в космологии понятие расстояния между точками-объектами можно характеризовать как физическим расстоянием, увеличивающимся со временем, так и космическим, или координатным, под которым подразумевается просто исходная нумерация точек.

Чтобы понять разницу между физическим и координатным расстоянием, рассмотрим аналогию, которая неплохо соответствует действительности. Предположим, что в океане дислоцируется группа кораблей, и их цель — исследовать окружающее пространство. Корабль № 0 остается на месте, остальные расплываются по различным направлениям как можно быстрее. Капитану одного из кораблей хочется произвести благоприятное впечатление на начальство, и он ревниво

следит за успехами других кораблей. Он просит своего подчиненного докладывать об их местоположении, причем ему важно не само расстояние, а во сколько раз пути, пройденные соперниками, больше или меньше его пути, т. е. расстояния до корабля № 0. Поэтому ему достаточно получить сообщение типа «корабль № 6 — на расстоянии 0,9», чтобы понять, насколько отстал соперник. Это и есть полный аналог сопутствующей (координатной) системы отсчета.

Но вот ситуация изменилась: увлекшись борьбой, капитан перестал смотреть вперед и налетел на скалу. Корабль затонул, команда с капитаном — на шлюпках, надвигается гроза. Теперь уже капитану не до соперников, наоборот, ему надо знать, к какому из кораблей ближе всего грести. И вот здесь ему понадобится уже расстояние в метрах. Именно это расстояние называется «физическим».

Мы видим, что одно и то же пространство удобно описывать в разных системах отсчета, в зависимости от конкретной задачи. Вернемся теперь к расширяющейся Вселенной.

Координатное расстояние фиксировано раз и навсегда и не меняется со временем. Задать его можно, например, так: точка 0 — в произвольном месте пространства, которое затем считается центром, точка 1 — на небольшом произвольном расстоянии r от нее, точка 2 — на таком же расстоянии r от точки 1 и т. д. Обозначим координатное расстояние буквой r , а физическое — буквой R . Координатное расстояние безразмерно — это просто набор пронумерованных точек. В первый момент эти расстояния связаны соотношением $R = a_0 r$, где величина a_0 зависит от выбранных единиц измерения физического расстояния — сантиметры, парсеки и т. д. Но со временем физическое расстояние изменяется, как мог бы сообщить нам наш наблюдатель. В этом случае связь между R и r может быть записана в виде

$$R(t) = a(t) r. \quad (2.1)$$

Коэффициент пропорциональности $a(t)$ называется масштабным фактором и играет важнейшую роль в космологии. В начальный момент времени $a(t=0) = a_0$.

С момента рождения Вселенная увеличилась примерно в 10^{60} раз. Эта цифра — приближенная. Поэтому и расчеты, основанные на ней, могут различаться на два-три порядка, в зависимости от выбранной модели и некоторых неопределенностей в деталях рождения. Если для героини мыльной оперы это обычное дело, то в космологии, науке, претендующей на центральную роль в современной физике, такая неопределенность — досадный дефект. Можно ли как-то улучшить ситуацию? Оказывается — да, и довольно простым способом. Можно воспользоваться тем, что современный размер Вселенной определен с неплохой точностью и составляет примерно $R_0 = 10^{28}$ см. Как видно из формулы (2.1), $R_0 = R(t_0) = a(t_0)r$, и, следовательно

$$R(t) = R_0 \frac{a(t)}{a(t_0)}.$$

Здесь t_0 — это просто современный возраст Вселенной, примерно 14 млрд. лет. Теперь мы избавились от неопределенной величины r и, зная зависимость масштабного фактора от времени, можем определять физический размер Вселенной на любой момент. Удобно ввести безразмерную величину $a(t) = a(t)/a(t_0)$, которую часто называют также масштабным фактором. В данный момент времени t_0 , когда читается эта книга, $a(t) = 1$.

Итак, размеры нашей Вселенной менялись по закону

$$R(t) = R_0 \cdot a(t). \quad (2.2)$$

Зависимость масштабного фактора от времени различна в разные периоды жизни Вселенной. Во времена, когда образовывались звезды, масштабный фактор возрастал со временем как

$$a(t) = \frac{t}{t_0}^{\frac{2}{3}}. \quad (2.3)$$

Происходило это на так называемой «пылевой» стадии, которая характеризуется практически нулевым давлением в космическом пространстве. Плотность энергии при этом определяется массой частиц. Следует помнить, что все без исключения формулы справедливы для случая однородной среды. На

пылевой стадии, особенно после появления галактик, космос однороден лишь в среднем, причем усреднять надо по масштабам порядка 100 Мпк. Но была и более ранняя стадия, когда частицы двигались со скоростями, близкими к скорости света. На этой, радиационно-доминированной, стадии расширение шло помедленнее, по закону

$$a(t) = \frac{t}{t_0}^{1/2}. \quad (2.4)$$

Радиационно-доминированная стадия уступила место пылевой, когда Вселенной исполнилось примерно $5 \cdot 10^{11}$ секунд. По формулам (2.2–2.4) читатель всегда может определить размер Вселенной в требуемый момент времени.

С открытием в 1998 г. темной энергии стало понятно, что мы живем в период, когда доминирует энергия в чистом виде. Это означает, что свойства нашего пространства на больших расстояниях совершенно необычны, — см. Приложение 2, а также обсуждение в разделе «Прогнозы на будущее».

Красное смещение

Непосредственно наблюдать расширение пространства можно благодаря галактикам. Галактики — это те самые наблюдатели, которых мы поместили внутрь Вселенной почти сразу после ее рождения. Только, в отличие от вымышленных наблюдателей, галактики — реальные объекты. Они излучают электромагнитные волны, которые детектируются и анализируются на Земле. В частности, как уже говорилось, чем дальше от нас расположена галактика, тем сильнее спектр излучаемых ею электромагнитных волн смещен к красному краю. Естественным объяснением этого явления является разбегание галактик. Ведь если источник света удаляется от нас, то, согласно эффекту Доплера, длина волны света возрастает, что интерпретируется нами как «покраснение» объекта.

Конечно, закон разбегания галактик выполняется лишь в среднем. В течение своей жизни каждая галактика взаимодействовала с соседками, и поэтому скорости у них отличаются

друг от друга и от среднего значения. Столкновение с соседями, как мы знаем, может приводить и к гораздо более серьезным последствиям, но о них — в другой главе. Поэтому, кроме средней скорости, галактики имеют собственную скорость в пространстве, которая называется пекулярной. И она не такая уж маленькая. Например, наша галактика несется в пространстве со скоростью 620 км/с. Для сравнения: скорость пули обычно не превышает 1 км/с. Заодно напомним, что скорость движения нашего Солнца вокруг галактического центра примерно вдвое меньше — 370 км/с, а скорость нашей планеты под названием Земля — и того меньше: она (и мы вместе с ней) плетется вокруг Солнца со скоростью 29 км/с.

Есть и другая интерпретация «покраснения» электромагнитного излучения — с использованием все того же расширения физического пространства. Для далеких галактик именно она является физически более корректной по сравнению с объяснением, использующим эффект Доплера. Вспомним, что длина волны определяется расстоянием между соседними гребнями. Но из-за физического расширения пространства это расстояние должно точно так же увеличиваться пропорционально все тому же масштабному фактору $a(t)$! Следовательно, длина волны электромагнитного излучения меняется по закону $\lambda(t) = \lambda_0/a(t)$. Астрономы обычно пользуются величиной

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda(t)} - 1, \quad (2.5)$$

называемой «красным смещением». Очевидно, что она однозначно выражается через масштабный множитель

$$z = \frac{1}{a(t)} - 1. \quad (2.6)$$

Поскольку масштабный множитель и температура среды, а точнее, температура реликтового излучения, также связаны простой формулой

$$a = \frac{T_0}{T}, \quad (2.7)$$

то знание одного только масштабного фактора z дает много полезной информации. Это и размер Вселенной на тот момент, и ее температура, и средняя плотность вещества. Это также и расстояние до объекта, испустившего свет, который дошел до нас только сейчас.

В 2004 г. был обнаружен квазар при $z = 6$. Используя приведенные выше формулы, нетрудно убедиться, что квазар, что бы под этим словом ни скрывалось, испустил свет, когда Вселенная была в 7 раз меньше по размеру, в 7 раз «горячее». Плотность Вселенной была соответственно в $7^3 = 343$ раза выше нынешней. Самый далекий на данный момент квазар найден при величине $z = 6,43$, возраст Вселенной на момент излучения им света был равен 0,88 млрд. лет, размер Вселенной тогда составлял 0,14 от современного, сейчас же расстояние до этого квазара составляет целых 13 млрд. световых лет.

Кроме красного смещения, вызванного линейным перемещением источника, астрономам известно и гравитационное красное смещение, обусловленное «покраснением» квантов в процессе преодоления мощного гравитационного поля звезды. Для обычных звезд его величина совсем незначительна и эквивалентна скорости убегания всего в несколько десятков километров в секунду. Однако для нейтронных звезд этот эффект уже существен. В частности, для источника EXO 0748-676, по данным рентгеновской обсерватории XMM-Newton, гравитационное красное смещение z достигает 0,35. Кстати, у открытого первым и поэтому знаменитого квазара 3C 273 величина z составляет всего 0,158.

Формулы, приведенные выше, просты, но очень полезны при качественном анализе. Например, они позволяют оценить время, когда образовывались галактики, а точнее, их скопления. Характерный размер скопления – примерно 3 Мпк, расстояние между ними – порядка 30 Мпк. Раньше, согласно закону Хаббла, дистанция между скоплениями галактик была меньше, и при $z \rightarrow 10$ они сливались в единое целое. Значит, именно при $z \rightarrow 10$ скопления галактик начали формироваться.

Здесь можно было бы возразить: если закон расширения Хаббла справедлив, то и размеры самих скоплений галактик в

прошлом должны быть меньше, и предыдущая оценка сомнительна. Но — и с этим тоже не поспоришь — законы выполняются далеко не всеми. Скопления галактик не подчиняются закону расширения Хаббла, поскольку являются гравитационно связанными объектами, так же как не расширяются Солнечная система, планеты и атомы.

Молодые годы

Из жареных бараньих костей, остающихся от передней или задней лопатки, хорошо варить на другой день суп с кореньями, брюквой и перловой крупой.

Е. Молоховец

Сразу после рождения Вселенная продолжала расти и охлаждаться. Кстати, а почему Вселенная охлаждается? Вспомним, что электромагнитное излучение характеризуется своей длиной волны. Последняя связана с температурой: чем больше средняя длина волны излучения, тем меньше температура — см. формулу Вина и текст в Отступлении на с. 35. Но немного выше уже говорилось о том, что расширение пространства «растягивает» электромагнитную волну. Значит, в расширяющемся пространстве и температура должна уменьшаться.

Пока температура высока, никакие интересные структуры образоваться не могут. С уменьшением температуры постепенно появляются все более сложные объекты — барионы, ядра атомов, атомы, протозвезды, планеты, разумная жизнь — вот такая цепочка выстраивается при охлаждении Вселенной со временем.

Рождение барионов

Вначале вещество имело столь высокую температуру, что кварки не могли объединиться в адроны. К моменту времени 10^{-4} с Вселенная охладилась настолько ($T = 10^{12}$ K), что слияние кварков в адроны стало возможным. Произошел *кварк-адронный фазовый переход* с образованием адронов и антиадронов, интенсивно взаимодействующих между собой. Основными составляющими Вселенной в это время, помимо лептонов (в ос-

новном электронов и мюонов) и фотонов, стали нуклоны (протоны и нейтроны), а также античастицы всех перечисленных.

Эти опасные античастицы

Кварки объединяются в протоны и нейтроны (бариосинтез), и пространство оказывается заполненным уже знакомыми частицами — протонами, нейтронами, электронами, нейтрино и фотонами, а также, что важно, их античастицами. Свойства частиц и античастиц практически идентичны. Казалось бы, и количество их должно быть одинаковым сразу после инфляции. Но тогда все частицы и античастицы взаимно уничтожились бы, и строительного материала для галактик и для нас с вами не осталось! Однако здесь нам, разумным (хочется верить) обитателям Вселенной, сильно повезло. Природа позаботилась о том, чтобы частиц было немного больше, чем античастиц. Мы существуем только благодаря этой мизерной разнице, меньшей на 9 порядков по сравнению с числом частиц! А реликтовое излучение — это как раз следствие аннигиляции частиц и античастиц.

На начальном этапе энергия излучения была очень велика, но благодаря все тому же расширению пространства и, как следствие, его охлаждению эта энергия быстро убывала. Сейчас плотность энергии реликтового излучения составляет $0,25 \text{ эВ/см}^3$, что на 4 порядка меньше энергии, заключенной в материальных частицах.

Есть множество моделей и механизмов, объясняющих, как такое нарушение симметрии между частицами и античастицами могло появиться. Все они требуют применения математического аппарата, неуместного здесь. Поэтому рассмотрим модель, которая слишком проста, чтобы полностью соответствовать истине, однако позволяет понять основную идею.

Итак, мы хотим разобраться, каким образом законы, одинаковые для частиц и античастиц, приводят в конечном итоге к различной их концентрации. Заодно неплохо бы понять, каким образом первоначальная разница оказалась такой маленькой: разница между числом барионов и числом антибарионов на 9 порядков меньше числа барионов. Обычные,

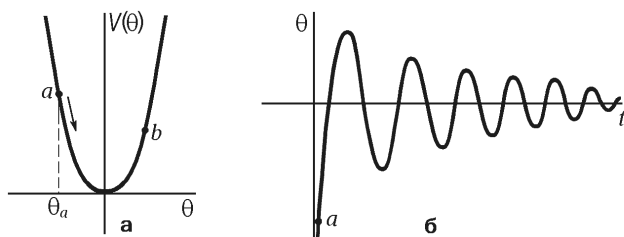


Рис. 2.4. а) Барионы рождаются там, где поле < 0 , а антибарионы — где > 0 . Если поле внутри небольшой пространственной области имеет величину, отмеченную точкой a , то, скатываясь, оно достигнет точки b , расположенной ниже точки a ; б) затухающие со временем колебания поля порождают как частицы, так и античастицы.

уже установленные законы не позволяют этого сделать, поэтому приходится вводить новое поле, которое одинаково взаимодействует как с частицами, так и с античастицами. Обозначим его буквой ϕ . Потенциальную энергию этого поля выберем в простейшей форме: $V(\phi) = a \cdot \phi^2$ (рис. 2.4).

Еще одно замечание. Поле должно взаимодействовать с обычными частицами, такими, например, как электроны и их античастицы — позитроны. Тогда ничто не запрещает этому полю порождать как частицы, так и античастицы. В главе 1 мы уже обсуждали вопрос о том, что частица (например, мюон) может исчезнуть, оставив после себя несколько других. То же самое происходит и с полем: оно может отдать часть своей энергии частицам, которые и остаются существовать далее. Энергия поля при этом слегка уменьшается.

Ну а теперь вспомним, что в момент рождения нашей Вселенной ее плотность энергии была очень велика. Значит, и наше предполагаемое поле должно иметь высокую энергию, например такую, как в точках a или b . Конечно, энергия поля сразу начнет уменьшаться, стремясь к минимуму. Точно так же шарик не лежит неподвижно на стенке ямы, а стремится попасть на ее дно. Ничто не запрещает части энергии поля перейти в рождающиеся частицы. А физика — наука простая: все, что явно не запрещено, то имеет право на существование.

Ну хорошо, частицы могут рождаться сразу после рождения Вселенной. Но как сделать, чтобы античастиц было *немного* меньше? Оказывается, что совсем несложно организовать взаимодействие таким образом, чтобы частицы рождались при движении поля по левой ветви параболы, а античастицы — по правой. Ситуация продолжает быть симметричной: ни частицы, ни античастицы не имеют изначального, заложенного в модели преимущества. Квантовая флуктуация, зародыш нашей Вселенной, может возникнуть как на левой ветви, так и на правой с одинаковой вероятностью.

Момент истины наступает именно при рождении нашей Вселенной. Если мы живем во Вселенной, случайно родившейся на левой ветви, то происходило следующее. Поле начинает двигаться вниз и порождать частицы. Затем оно «проскакивает» положение минимума и забирается на правую ветвь параболы, но часть его энергии уже отдана частицам, и оно поднимается ниже начального значения. Поэтому, когда начинается движение обратно к минимуму потенциальной энергии, поле порождает античастицы в меньшем количестве. Эти затухающие колебания продолжаются довольно долго, и суммарное количество частиц, конечно, не будет совпадать с количеством античастиц — просто потому, что своим рождением на левой ветви потенциала Вселенная нарушила симметрию теории. Это именно то, чего мы и добивались! Кстати, если бы Вселенная случайно родилась на правой ветви, то у нас доминировали бы античастицы. Мы состояли бы из античастиц, но, конечно, называли бы их «частицами».

Мы видим, что случайное нарушение симметрии между частицами и античастицами — Вселенная случайно родилась на левой ветви, а не на правой — приводит к асимметричным результатам, даже если законы одинаковы. Оказывается, важны не только законы, но и начальные условия. Если бы наша Вселенная случайно родилась в минимуме потенциала, никакого движения поля не было бы, барионы и антибарионы не рождались, и сейчас пространство было бы пустым.

Напоследок — два небольших замечания. Вышеописанный сценарий действительно может быть реализован, но с несколь-

ко более сложным потенциалом [17; 28]. Тем не менее основная идея именно такова. И, конечно же, это не единственный механизм нарушения симметрии между частицами и античастицами. За последние пару десятилетий открыто много других вариантов. Какой из них реализовался в нашей Вселенной — покажет будущее.

Появление гелия

Постепенно температура Вселенной упала до 10^9 – 10^{10} К. К этому моменту возраст Вселенной составлял примерно 1 минуту. Только теперь протоны и нейтроны, оставшиеся после аннигиляции с антипротонами и позитронами, могут объединяться в ядра дейтерия, трития, гелия и лития. Это происходит благодаря ядерным реакциям, хорошо изученным в эксперименте. Считается, что физические процессы одинаковы во все времена и во всей наблюдаемой части Вселенной, поэтому мы можем уверенно предсказывать, сколько и каких элементов появится в дальнейшем. Так, оказалось, что около 98% гелия, существующего в природе, образовалось в первые секунды после Большого взрыва (первичный нуклеосинтез).

Согласно расчетам Г. Гамова, количество гелия, которое могли выработать все звезды за время существования Вселенной, составляет менее 1% от суммарной массы остальных ядер, что никак не похоже на те 24–25%, о которых говорят все наблюдения.

Космологический нуклеосинтез

Из самого названия следует, что это процесс образования ядер различных химических элементов. В момент зарождения Вселенной температура была настолько высокой, что были возможны любые ядерные реакции. В частности, ядра тяжелых химических элементов, например кислорода, никеля, железа, рождались, правда с малой вероятностью, при слиянии легких атомных ядер. Но при высоких температурах энергия окружающих частиц велика, и при столкновениях они с легкостью разрушали только что появившиеся ядра. При низких температурах ядра становятся стабильными — энергии напе-

тающих частиц недостаточно для их разрушения. Но тогда энергии протонов и нейтронов может оказаться недостаточно, чтобы создавать даже легкие ядра! Поэтому в истории Вселенной период, когда более легкие ядра образовывались, но не разрушались, мог отсутствовать вообще. Тем не менее такой период существовал. Длился он недолго, хотя и этого вполне хватило: за первые 3 минуты было создано большинство ядер гелия, окружающего нас.

Теперь понятно, почему основными продуктами ядерных реакций в ранней Вселенной были водород, ядро которого состоит просто из одного протона, и гелий, ядро которого содержит 2 протона и 2 нейтрона. Образовалось также немного дейтерия, гелия-3 и лития. На большее у молодой Вселенной сил не хватило.

Охлаждение привело не только к тому, что энергии частиц оказывалось недостаточно для образования более тяжелых ядер, но и к уменьшению вероятности слияния частиц в ядра: с расширением пространства концентрация частиц уменьшается и вероятность их столкновения становится малой. Кстати, это означает, что первые звезды должны были состоять в основном из водорода и гелия. Похоже, что этот вывод подтверждается наблюдениями: самые старые звезды содержат менее 0,001% остальных элементов. Доля тяжелых элементов в более молодых звездах типа Солнца составляет около 2%.

Несколько слов о гелии, ${}^4\text{He}$. Создать его в таком количестве было не так просто. Для этого необходимо, чтобы столкнулись одновременно 4 частицы — 2 протона и 2 нейтрона, что маловероятно, либо два ядра дейтерия. Именно дейтерий служит источником первичного гелия, который рождается согласно реакции



У дейтерия, в отличие от гелия, небольшая энергия связи, 2,2 МэВ, и его легко не только создать, но и разрушить согласно реакции, идущей в обе стороны:



Отступление.
Энергия связи

Разобраться в этом понятии поможет следующая аналогия. Представьте себе упругую горизонтальную поверхность типа батута. На ней расположены два

массивных шара. На рис 2.5 а шары находятся на большом расстоянии друг от друга и почти не взаимодействуют. Каждый создает свою ямку. Чем глубже ямка, тем меньше энергия шара. Если же оба шара

окажутся в непосредственной близости (рис. 2.5 б), то их совместные усилия создадут более глубокую общую ямку. Следовательно, они будут иметь энергию, отличную от суммарной энергии в случае, когда они не взаимодействовали. Разница этих энергий и называется энергией связи. Она может быть как положительной, так и отрицательной. Поскольку энергия системы обычно стремится к минимуму, во втором случае частицы стремятся образовать единую систему — стабильное ядро.

Рис. 2.5. Нередко частицы стремятся свалиться в общую яму, «выкопанную» ими самими. Для освобождения из плена им необходима дополнительная энергия, которая называется энергией связи.

Мир частиц и атомных ядер не так прост, как мир шаров на батуте. Частицы, находясь в связанном состоянии, в ядре, окружены областью повышенной плотности потенциальной энергии, как на рис. 2.6. На рис. 2.6 б изображено неустойчивое ядро. Частицы преодолевают потенциальный барьер за счет своих квантовых свойств, ядро распадается.

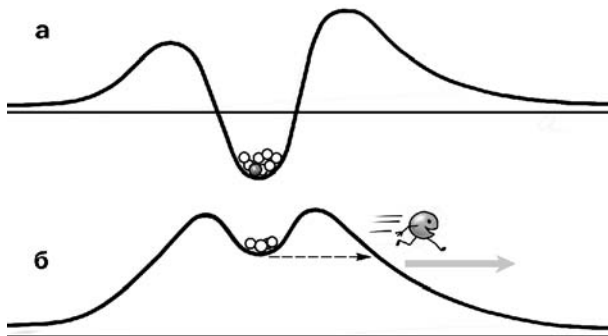
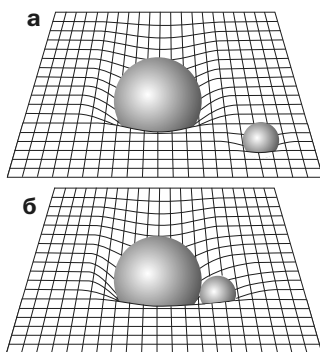


Рис. 2.6. Устойчивое и неустойчивое (метастабильное) ядро.

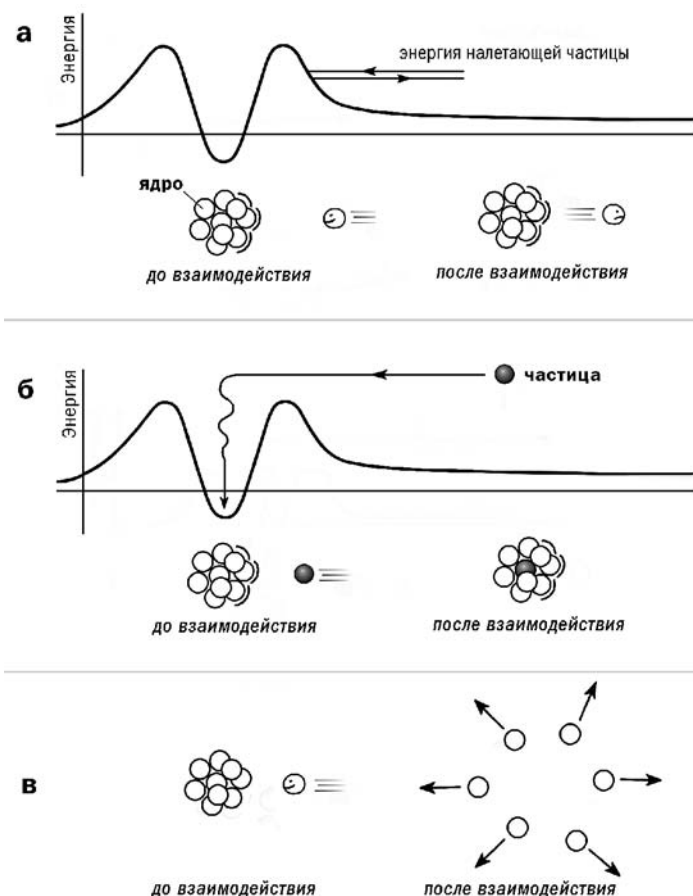


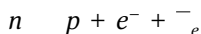
Рис. 2.7. Взаимодействие частиц разных энергий с ядрами.

На рис. 2.7 поясняется связь энергии налетающих частиц с результатом ядерной реакции. Рис. 2.7а иллюстрирует процесс с малоэнергичной налетающей частицей, когда реакция не меняет структуры сталкивающихся объектов. На рис. 2.7б изображена частица, имеющая достаточно энергии, чтобы преодолеть потенциальный барьер. Отдав часть своей энергии частицам ядра, она уже не в состоянии вылететь. Ядро изменилось качественно. Рис. 2.7в представляет ситуацию, когда налетающая частица имеет слишком боль-

шую энергию. Известно, что чрезмерно энергичные действия могут привести к нежелательному результату. В мире частиц — аналогичная ситуация: вместо создания нового, более сложного ядра разрушено ядро, созданное ранее.

Поэтому температура Вселенной должна опуститься низко, до 0,1 МэВ, чтобы образующийся дейтерий не разрушался. Казалось бы, температуре достаточно быть меньше энергии связи дейтерия, чтобы основная доля фотонов была не в состоянии его разрушить. Но температура характеризует только среднюю энергию фотонов. Доля энергичных фотонов может быть очень малой, но никогда не равна нулю. Конечно, чем меньше температура, тем меньше доля энергичных фотонов, но в нашем случае энергичных фотонов все еще слишком много. При температурах выше 2,2 МэВ их количества хватает, чтобы продолжать разрушать дейтерий и поддерживать его низкую концентрацию.

Сразу возникает еще одна проблема. Дейтерий образуется при столкновениях протонов и нейтронов. Но последние нестабильны. Если бы время жизни нейтронов было порядка 10^{-6} с — характерное время жизни нестабильных частиц, — то к нужному моменту они давно бы распались. Как следствие, не образовались бы дейтерий и гелий. Вселенная сейчас выглядела бы по-другому. Нам повезло, что нейтрон распадается за счет слабого взаимодействия по схеме



и время его жизни — около 15 минут. Поэтому он в состоянии дожить до того времени, когда Вселенная охладится настолько, чтобы дейтерий не разрушался.

Есть и другая причина уменьшения концентрации нейтронов с температурой. Действительно, соотношение между числом протонов и нейтронов в ранней Вселенной определяется разностью их масс $m = m_n - m_p \approx 1,3$ МэВ и сильно зависит от температуры. Эта зависимость определяется распределением Больцмана, хорошо известным и проверенным в статистической физике:

$$\frac{n_p}{n_n} = \exp \left(-\frac{m}{T} \right).$$

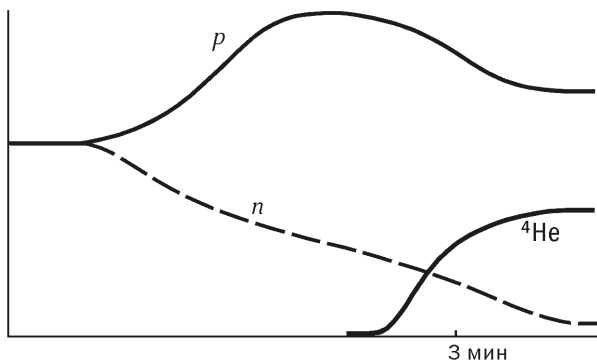


Рис. 2.8. Изменение со временем концентрации протонов p , нейтронов n и гелия ${}^4\text{He}$.

При высоких температурах, когда $m \leq T$, число нейтронов и протонов примерно одинаково, как следует из формулы. Разница в их плотностях начинает проявляться, когда $m \geq T$, и концентрация нейтронов стремится к нулю с уменьшением температуры. Поэтому гелий должен успеть образоваться до того, как нейтронов станет слишком мало. Рис. 2.8 иллюстрирует качественную сторону всего сказанного. Наиболее эффективно ядерные реакции с образованием легких ядер начинают протекать, когда температура упадет до 10^9 К.

Природе пришлось проявлять изощренную выдумку, чтобы создать наблюдаемое количество гелия, так что вряд ли такое его обилие является случайностью. Но с другой стороны, где гелий так уж необходим? Единственное, где он может потребоваться, — это ядерные реакции внутри звезд. Конечно, гелий появляется также в результате самих этих ядерных реакций, но его начальная концентрация может сильно повлиять на весь ход процесса внутри звезд, а значит, и на свойства звезд. А это уже важно для нас с вами.

Итак, Природа серьезно потрудились, чтобы запастись гелием пораньше, до появления звезд. Как мы увидим в главе 5, это не единичный случай.

В ранней Вселенной частицы взаимодействовали друг с другом интенсивно, прямые и обратные реакции, пример

которых приведен выше, были одинаково часты, и количество частиц каждого сорта сохранялось в течение некоторого времени. По мере остывания Вселенной ситуация менялась, и менялась по-разному для разных частиц. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Интенсивность взаимодействия частиц определяется частотой столкновений между ними, которая, в свою очередь, зависит от скорости частиц и их концентрации. Но это еще не все. Даже находясь рядом, частицы могут и не вступить во взаимодействие: вероятность реакции зависит также от видов частиц и от их энергии. Возьмем для примера нейтрино. Вероятность реакции с ним очень мала. Значит, нейтрино должно пролететь большое расстояние и повстречать на своем пути множество частиц, чтобы наконец вступить в реакцию с одной из них.

На ранней стадии эволюции Вселенной, когда ее размеры еще малы и, следовательно, концентрация частиц высока, нейтрино с легкостью находит партнеров для участия в реакции. С расширением Вселенной концентрация частиц, равно как и их энергия, уменьшаются, вероятность реакции также становится все меньше. Наступает момент, когда реакции с нейтрино практически прекращаются. Конечно, происходит это не мгновенно, но достаточно резко. Вспомним: ведь за счет все того же расширения Вселенной частицы разбегаются (как скопления галактик сейчас). Поэтому, пока нейтрино долетит до частицы, с которой ему суждено вступить в реакцию, та успеет удалиться от него за счет расширения пространства. Если эти два расстояния равны, то нейтрино никогда не догонит частицу. В расширяющейся Вселенной Ахилл действительно может не догнать черепаху!

Ну а раз реакции с нейтрино прекратились, то их число с этого момента не меняется. Говорят, что происходит «отщепление» нейтрино. Для нейтрино такое отщепление произошло раньше, чем для фотонов, поэтому температура реликтовых нейтрино сейчас чуть меньше — 2 К. Фотоны практически перестают «замечать» частицы после образования нейтральных атомов. Начиная с этого момента частицы и фото-

ны живут независимо друг от друга. Вселенная становится прозрачной для электромагнитных волн, каковыми и являются фотоны. Когда говорят о температуре Вселенной, подразумевается температура именно этих — реликтовых — фотонов.

Первичные флуктуации — причина зарождения галактик

Итак, сразу после рождения Вселенная прошла инфляционный период развития: все расстояния стремительно увеличивались (с точки зрения внутреннего наблюдателя). С другой стороны, понятно также, что плотность энергии в разных точках не может быть в точности одинаковой — какие-то неоднородности всегда присутствуют. Предположим, что в одной из областей энергия немного больше, чем в соседних. Сначала эта область невелика, но раз все размеры быстро растут, то и размер этой области тоже должен расти! После окончания инфляционного периода эта разросшаяся область будет иметь чуть больше частиц, чем окружающее ее пространство, а ее температура будет отличаться от средней. (Причины отличия объясняются на с. 70. Повышенная плотность частиц создает гравитационную яму, из которой фотоны выбираются, потратив часть своей энергии.)

Именно с открытием флуктуаций температуры, а значит, и плотности вещества появилась еще одна захватывающая возможность — объяснить, как начали формироваться галактики. Если материя распределена в пространстве равномерно, то гравитация, как буриданов осел, не будет «знать», в каком направлении применить свои силы. Чтобы гравитация сжимала материю, необходим исходный зародыш — область с повышенной плотностью материи. Но как раз области с избытком энергии и порождает инфляция! Теперь гравитационные силы «знают», на что воздействовать, — на более плотные области, созданные во время инфляционного периода. Под действием гравитации эти, изначально чуть-чуть более плотные, области будут сжиматься, и именно из них в будущем образуются звезды и галактики.

Придя к выводу о неизбежности появления таких областей, сторонники инфляционной теории обратились к экспериментаторам. «Надо бы обнаружить флуктуации температуры», — требовали они. И в 1992 г. это было сделано! Как уже говорилось, практически одновременно российский спутник «Реликт-1» и американский COBE обнаружили флуктуации температуры. Мы знаем, что современная Вселенная имеет температуру 2,7 К, а найденные учеными отклонения температуры от среднего составляли примерно 0,00003 К! Неудивительно, что такие отклонения было трудно обнаружить раньше. Так инфляционная теория получила одно из своих подтверждений.

Если бы Вселенная расширялась в точном соответствии с фридмановскими моделями, она была бы идеально однородной и изотропной. В современной теории происхождения крупномасштабной структуры предполагается, что в ранней Вселенной космологический принцип выполнялся почти строго не только на самых больших, но и на малых масштабах, существовали лишь слабые отклонения от однородности и изотропии: в некоторых местах плотность была чуть выше или чуть ниже, чем в среднем. По мере расширения Вселенной контраст между плотными и разреженными областями возрастал, что в конечном итоге и привело к формированию современной структуры.

Механизм, приводящий к усилению неоднородностей, называется гравитационной неустойчивостью. Впервые он был изучен выдающимся английским физиком и астрофизиком Джеймсом Джинсом еще в начале XX в. Идея сводится к следующему. Рассмотрим одну из неоднородностей, где плотность вещества слегка повышена по сравнению со средней плотностью молекулярного облака. На материю, находящуюся на границе этого сгущения, действуют две силы (рис. 2.9). Одна из них — направленная внутрь сгущения сила тяготения, стремящаяся сжать сгусток вещества. Вторая — сила упругости, направленная вовне; ее создает перепад давления внутри и вне сгустка (разумеется, внутри сгустка давление повышено). Эволюция неоднородности определяется тем, какая из

этих двух сил больше. Если сила упругости превышает силу тяготения, для качественного рассмотрения эволюции сгущения тяготением можно пренебречь. Действие нескомпенсированной силы упругости приводит к тому, что сгущение начинает расширяться. Это расширение не прекращается, когда плотность веще-



Рис. 2.9. Гравитационные силы пытаются сжать облако газа.

ства внутри и вне неоднородности выравнивается, так как вещество продолжает двигаться вонне по инерции, сжимая вещество вокруг, и с течением времени на месте сгущения окажется разрежение вещества, а вокруг него образуется область повышенной плотности. Это вторичное сгущение также со временем начнет расширяться, сжимая окружающее вещество, и т. д. Таким образом, неоднородность плотности превращается в волну сжатия и расширения вещества, т. е. в звук. Если же побеждает сила тяготения, то сгущение начинает сжиматься. Зачастую единое газовое облако спонтанно распадается на несколько отдельных сжимающихся облаков меньшего размера. Более подробно этот вопрос обсуждается в Приложении 3.

Состав Вселенной до первых звезд

На соленую воду, приготовленную для варки в ней колдунов, вареников, макарон, лазанок, овощей, рыбы берется на каждые 3 стакана воды по полной чайной ложечке соли.

Е. Молоховец

Как же выглядела Вселенная до появления первых звезд, какие объекты содержала? Очевидно, что благодаря первичному нуклеосинтезу она была заполнена частицами. Кроме того, вполне возможны и более сложные объекты. Краткая информация о составе состоит в следующем.

1. Количество барионов (в основном это протоны, нейтроны, а также небольшая доля лития) во Вселенной составляет $\sim 10^{80}$ штук, т. е. наша Вселенная «весит» $\sim 10^{56}$ г. Электронов ровно столько же, сколько и протонов, — суммарный заряд Вселенной считается равным нулю. Нейтронов примерно вчетверо меньше, чем протонов.

2. Антивещество если и присутствует, то в гомеопатических дозах, его доля меньше 10^{-4} по сравнению с веществом. Тем не менее не исключена возможность, что несколько тысяч звезд нашей Галактики состоят из антивещества [25]. Проверить это на расстоянии очень трудно — ведь «антизвезды» светят тем же светом, что и обычные. Небольшое количество антипротонов и позитронов регистрируется детекторами космических лучей. Такие простые частицы антиматерии вполне могут рождаться во взрывах сверхновых, и поэтому их появление никого не удивляет. Вот если бы обнаружилось хотя бы одно ядро, пусть самое легкое, — антигелия! Образование ядер из античастиц обычным образом слишком маловероятно, и поэтому обнаружение даже одного ядра антигелия будет означать, что антизвезды существуют. Сейчас предпринимается попытка построить детектор, способный обнаружить антигелий в космических лучах.

3. Космический вакуум заполнен реликтовыми фотонами, т. е. фотонами, которые остались от тех жарких денечков, когда Вселенная была молодой и горячей. Число реликтовых фотонов в 10^9 больше, чем число нуклонов.

4. Скрытая масса (темная материя) — по массе в несколько раз больше, чем масса нуклонов. Проявляется только за счет гравитации. Ее основная роль — помочь нормальным частицам (протонам, электронам и т. д.) собраться в галактики и звезды.

5. Струны самого разного типа — вполне возможны. Чем меньше размер струн, тем большее их количество имеется после окончания инфляции. Струны — объекты неустойчивые. Они очень быстро распадаются, в основном на волны того поля, из которого были «сделаны». К нашему времени выживают лишь струны космологических масштабов, т. е. размером

со Вселенную. В отличие от частиц, названных выше, струны — объект гипотетический. Согласно многим моделям, они могут быть в космическом пространстве, но не обязательно.

6. Домённые стенки — это сложные полевые конфигурации, которые могут родиться в период инфляции, согласно многим современным моделям. Стенки, так же как и струны, быстро распадаются, и мы их вряд ли обнаружим. Впрочем, замкнутые стенки больших размеров в случае их появления коллапсировали в первичные черные дыры [22].

7. Первичные черные дыры. Раньше многие полагали, что черные дыры могут появляться только в результате коллапса звезд. Естественно, масса таких черных дыр должна быть сравнима с массой коллапсировавшей звезды. Потом стало понятно, что маленькие черные дыры могут рождаться при сжатии случайных сгустков скрытой массы задолго до образования звезд. Но чем больше масса сгустка, тем меньше вероятность его случайного появления. Поэтому-то такие первичные черные дыры считались маленькими. Здесь критическим становится эффект, открытый С. Хокингом: черные дыры медленно испаряются. Причем чем больше масса, тем медленнее. Расчеты показывают, что черные дыры массой 10^{15} г испаряются за 14 млрд. лет, т. е. за время жизни Вселенной. Это означает, что первичные черные дыры меньших масс уже испарились, а больших — еще существуют в крайне малых количествах. Но оказывается, что замкнутые полевые стенки также способны коллапсировать в черные дыры, при этом масса последних теоретически ничем не ограничена. Возможно, что часть черных дыр, находящихся в центрах галактик, как раз такого происхождения.

8. Какую же картину увидел бы наблюдатель, окажись он в те времена в нашей Вселенной? Оказывается — ничего, кроме яркого, однородного фона! Пока протоны и электроны не объединились (рекомбинировали) в атомы водорода, Вселенная непрозрачна для фотонов. Фотон, испущенный в каком-либо процессе, начинает, конечно, двигаться прямолинейно, но встречает на своем пути множество заряженных частиц — протонов и электронов — и охотно взаимодействует с ними.

При этом импульс фотона, а значит, и направление его движения случайным образом меняется. Движение фотона становится похожим на движение броуновской частицы, и фотон движется внутри ограниченной области, там, где он был рожден. Но со временем происходят две вещи — температура Вселенной падает, и при 4 000 К электроны и протоны рекомбинируют в нейтральные атомы. Кроме того, длина волны фотонов со временем увеличивается, и к моменту образования атомов последние взаимодействуют с фотонами как единые нейтральные объекты. Фотоны же крайне неохотно взаимодействуют с нейтральными объектами, поэтому их прямолинейному движению уже ничего не мешает. Вселенная становится прозрачной.

Закон Хаббла

Используя формулу (2.1), мы можем обосновать закон Хаббла. Предположим, что два наблюдателя находятся на координатном расстоянии r и посмотрим, с какой скоростью один удаляется от другого. Физическое расстояние есть $R(t) = a(t)r$, и, значит, скорость их разбегания вычисляется просто:

$$v(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \frac{da(t)}{dt} r = H(t) a(t) r = H(t) R(t).$$

Видно, что скорость удаления наблюдателей действительно пропорциональна физическому расстоянию, но коэффициент пропорциональности, измеряемый в км/(с · Мпк), зависит от времени. Лишь приближенно эту величину можно считать постоянной и равной современному значению:

$$H(t) \approx H(t_0) \quad 71.$$

Здесь, как обычно, t_0 — 14 млрд. лет — время жизни Вселенной. Можно ли найти временную зависимость «постоянной» Хаббла, а точнее, параметра Хаббла? Зная закон, по которому изменяется масштабный фактор со временем

$$a(t) = C t^{\frac{2}{3(1-w)}}$$

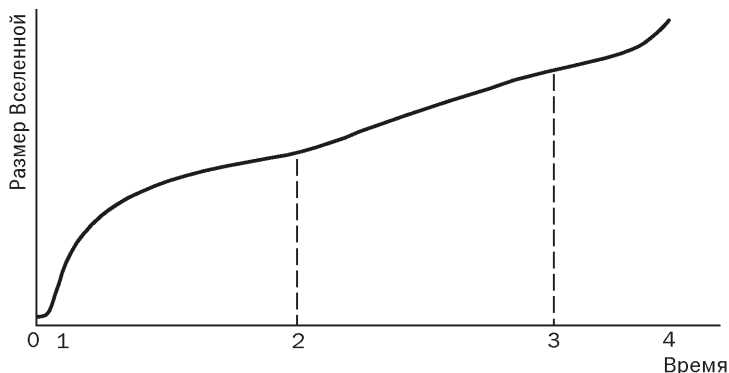


Рис. 2.10. Схематичный график, иллюстрирующий расширение Вселенной со временем. Интервал 0–1: инфляционная стадия, рост от 10^{-27} см до 0,1 см за 10^{-35} с. Интервал 1–2: стадия доминирования излучения, размеры растут пропорционально $t^{1/2}$. Точка 2 отвечает периоду 10 тыс. лет, размер Вселенной в 10 000 раз меньше нынешнего. Интервал 2–3: стадия доминирования материи (вклад фотонов в среднюю плотность энергии мал по сравнению с вкладом от частиц). Размеры растут пропорционально $t^{2/3}$. Точка 3 обозначает время ~ 9 млрд. лет. Размер Вселенной примерно в 1,5 раза меньше нынешнего. Интервал 3–4: стадия доминирования темной энергии. Размеры растут по экспоненте с очень маленьким показателем.

(вывод приведен в Приложении 4), можно легко найти такую зависимость:

$$H(t) = \frac{1}{a(t)} \frac{da(t)}{dt} = \frac{2}{3(1-w)t}.$$

Параметр Хаббла уменьшается со временем. Другой параметр, w , тоже меняется со временем, но довольно медленно. Сначала он равнялся $1/2$, затем $2/3$, а в данный период — примерно $-0,8$. Определив параметр Хаббла в настоящий момент, по этой формуле можно вычислить время жизни Вселенной. Стоит напомнить, что эта формула справедлива, когда можно пренебречь вкладом темной энергии.

Как уже обсуждалось выше, энергия заключена не только в частицах, но и в таких объектах, как поля. Поэтому не должно быть особенно удивительным, что пространство без

частиц, т. е. то, что мы обычно называем вакуумом, может обладать энергией, содержащейся в равномерно распределенных полях. В таком пространстве, пространстве де Ситтера, связь плотности энергии и импульса имеет необычный вид: $p = -$ т. е. давление отрицательно и параметр $w = -1$. Сейчас идет интенсивный сбор наблюдательных данных, которые помогли бы определить истинное значение параметра w . Если $w = 0$, то мы находимся в «пылевой» стадии, когда средняя плотность энергии во Вселенной обусловлена суммарной массой частиц. Именно это и предполагалось весь прошлый век. Если же $w = -1$, то наша Вселенная представляет собой пространство де Ситтера. Согласно наблюдательным данным, есть все основания считать, что $w < -0,8$. Никакое обычное вещество не в состоянии обеспечить такую странную связь плотности энергии и давления. Этому условию удовлетворяет предположение о том, что основной вклад в энергию вносит гипотетическое стационарное поле, для которого $w = -1$. Впрочем, у космологов заготавливаются варианты на случай, если окажется, что $w < -1$.

Реликтовое излучение

С открытием реликтового излучения началась новая эра в космологии, и поэтому было бы справедливо поговорить об этом феномене подробнее. Из предыдущего обсуждения мы знаем, что реликтовое излучение — это электромагнитные волны, равномерно заполняющие все пространство. Распределение этого излучения по длинам волн таково, как если бы оно создавалось абсолютно черным телом с температурой $T = 2,73$ К. А как менялась температура в прошлые эпохи и на что мы можем рассчитывать в будущем? Оказывается, что температура реликтового излучения и масштабный фактор связаны простой формулой:

$$T(t) \sim \frac{1}{a(t)}. \quad (2.26)$$

Это значит, что когда Вселенная была, например, в 3,62 раза меньше, то она была в 3,62 раза горячее. Формула выглядит просто, но за ней скрывается много интересной физики.

Отступление.
*Температура
и расширение Вселенной*

Прежде всего решим, можно ли использовать понятие температуры в данном случае. Ведь Вселенная расширяется, а значит, нестационарна, в то время как понятие температуры можно корректно ввести только для стационарных систем.

В статистической физике обычно рассматривается система, состоящая из многих подсистем, находящихся в равновесии. Это означает, что динамические макроскопические параметры системы не меняются со временем. Тогда равновесное распределение подсистем, в нашем случае фотонов, по энергиям описывается каноническим распределением

$$P \sim e^{-E/T}, \quad (2.27)$$

которое дает вероятность обнаружить фотон с энергией E и от времени, естественно, не зависит. Напомню, что с самого начала постоянная Больцмана $k = 1$, и температура измеряется в электрон-вольтах.

К счастью, Вселенная расширяется в основном не так быстро, и фотоны, интенсивно взаимодействуя, успевают перейти в (почти) равновесное состояние. Исключение составляет лишь самый ранний и короткий этап эволюции Вселенной, который сейчас не важен. Значит, каноническим распределением пользоваться можно на протяжении почти всей эволюции Вселенной, в любой момент времени. Это означает, что вероятность найти фотон с энергией $E(t)$ всегда будет иметь вид

$$P \sim e^{-\frac{E(t)}{T(t)}}, \quad (2.27a)$$

где $T(t)$ — температура в момент времени t .

Существует несколько определений понятия температуры, и все они, конечно, согласуются друг с другом. Общепринятым определением является такое: температура — это мера кинетической энергии, связанной с хаотическим движением атомов и молекул тела. Беда в том, что в нашем случае тело как таковое отсутствует. Более того, могут отсутствовать атомы и молекулы. Поэтому придется пользоваться другим, простым и достаточно корректным определением: температурой называется то, на что делится энергия в показателе экспоненты. Читателю придется поверить, что это более абстрактное определение эквивалентно предыдущему в простых случаях.

Нашей задачей является доказательство связи (2.26). Для этого посмотрим, что происходит с энергией фотона с течением времени. Проще всего представить вместо фотонов с энергией E электромагнитную волну с длиной волны λ и обычной связью:

$$E = \frac{2}{\lambda} \hbar c.$$

Вспоминаем, что расстояние между любыми двумя точками увеличивается пропорционально масштабному фактору $a(t)$. Значит, и длина волны (т. е. расстояние между двумя ее «горбами») изменяется так же:

$$(t) = a(t) .$$

Следовательно, энергия фотона $E(t)$ уменьшается пропорционально масштабному фактору: $E(t) \frac{2 \hbar c}{(t)} \frac{E}{a(t)}$. Подставляя это выражение в формулу (2.27а), получаем

$$P \sim e^{\frac{E}{a(t)T(t)}} .$$

Сравнивая эту формулу с формулой (2.27), видим, что $T(t) = T/a(t)$, т. е. формула (2.26) доказана. Начальный момент времени, при котором выбирается температура T , довольно произволен, но удобно выбирать период рекомбинации, когда Вселенная становится прозрачной, но температура реликтовых фотонов, т. е. температура излучения, еще совпадает с температурой плазмы. В этот период температура составляла 3 000–4 000 К, а концентрация реликтовых фотонов — примерно $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. В настоящее время концентрация реликтовых фотонов равна в среднем 411 см^{-3} , а распределение фотонов по энергиям прекрасно описывается обычным распределением Планка с температурой 2,73 К.

Итак, когда говорят о температуре Вселенной, имеется в виду температура излучения, а точнее — температура тела, находящегося с этим излучением в тепловом равновесии. Температура газовых облаков может быть самой разной, в зависимости от обстоятельств.

С расширением пространства температура излучения, заполняющего все пространство, падает. На языке частиц — происходит уменьшение энергии и импульса фотонов. А как же ведут себя энергия и импульс обычных частиц — электронов, протонов, да и любых других массивных тел? Со школьной скамьи мы знаем, что невзаимодействующая частица (или тело) будет двигаться с постоянной скоростью по прямой. Оказывается, это справедливо только в статическом пространстве! В расширяющемся пространстве скорость частицы уменьшается, даже если на нее не действуют никакие силы. Подробное обоснование можно найти в Приложении 5.

Сейчас же попытаемся разобраться с сохранением энергии. Действительно, если энергия массивных частиц и фотонов со временем уменьшается, то куда пропадает их энергия?

Как обычно, полезно провести аналогию с известным явлением. Представьте себе массивное облако газа в межзвездном пространстве, масса которого, скажем, несколько сот масс Солнца. Внутри находятся звезды. Где-то в середине облака происходит взрыв звезды (это у них, звезд, обычное дело), и частицы газа начинают разлетаться во все стороны. Сначала они летят от центра с большой скоростью, инициированной взрывом. При этом гравитационные силы облака как целого тормозят частицы, в точности так же, как тормозится камень, брошенный с Земли вверх. Гравитационное поле совершает работу, и энергия частиц уменьшается, как и энергия подброшенного камня. Энергия же гравитационного поля увеличивается, так что суммарная энергия сохраняется.

Похожая ситуация — в случае расширяющейся Вселенной. Большой взрыв придал энергию частицам и безмассовым фотонам, обусловив их разлет, а гравитационные силы тормозят их. Происходит перекачка энергии частиц в энергию гравитационного поля.

Почему же мы не замечаем этого эффекта в повседневной жизни? Почему, например, самопроизвольно не тормозятся спутники? Причин две. Во-первых, сейчас расширение пространства происходит слишком медленно, чтобы заметно влиять на скорость частиц. Во-вторых, наше пространство можно считать однородным лишь приближенно. На масштабах порядка 100 Мпк и менее распределение вещества неоднородно. Оно образует гигантские гравитационно связанные объекты типа скоплений и сверхскоплений галактик, внутреннее пространство которых, конечно, не расширяется. Так что второй закон Ньютона справедлив на масштабах скоплений галактик и менее.

Можно спросить: где у Вселенной находится тот центр, из которого повылетали частицы? Но ответ прост, и речь об этом у нас уже шла. Посмотрите на раздувающийся шар на рис. 2.2 и мысленно проследите движение точек назад по

времени: все точки сближаются. В начале этой главы рассказано о моменте зарождения Вселенной и указан даже ее первоначальный размер — примерно 1 мм (вещество при этом еще не родилось). Так что каждый может считать, что Вселенная родилась именно внутри него, и будет прав. Впрочем, как и все остальные.

Прогнозы на будущее

Чем желать смерти врагу, лучше пожелай долгой жизни себе.

Туркменская пословица

Что же ждет нашу Вселенную в дальнейшем? Еще несколько лет назад имелось всего две возможности. Если плотность энергии во Вселенной мала, то Вселенная будет вечно расширяться и постепенно остывать. Если же плотность энергии больше некоторого критического значения, то стадия расширения сменится стадией сжатия. Вселенная будет сжиматься в размерах и нагреваться. Значит, одним из ключевых параметров, определяющих развитие Вселенной, является средняя плотность энергии. Инфляционные модели предсказывали, что плотность энергии должна быть равна критической. А астрофизические наблюдения до 1998 г. говорили о том, что плотность энергии составляет примерно 30% от критической. Апологетов инфляционной теории это не очень смущало. Они отмахивались от оппонентов и говорили, что недостающие 70% «как-нибудь найдутся». И они действительно нашлись! Это большая победа теории инфляции, хотя найденная энергия оказалась такой странной, что вызвала больше вопросов, чем разрешила проблем. Как мы уже знаем, похоже, что эта энергия заключена в (почти) статическом поле.

Как же была обнаружена эта необычная энергия?

В астрономии используются так называемые стандартные свечи — объекты, светимость которых хорошо известна. Точнее, определена светимость большого числа объектов этого типа. Наиболее часто используется класс сверхновых звезд. Если такая сверхновая обнаружена, то расстояние до нее можно определить, сравнивая ее наблюдаемую светимость с из-

вестным средним значением. Сверхновые — очень яркие объекты, видимые на больших расстояниях. Оказалось, что измеренная с помощью сверхновых скорость расширения пространства на больших расстояниях слишком велика! Из уже сказанного мы знаем, что скорость расширения пространства зависит от свойств вещества, его заполняющего. Но в данном случае никакое обычное вещество не в состоянии исправить ситуацию. Что-то очень необычное должно заполнять нашу Вселенную. Эту субстанцию назвали темной энергией.

На данный момент нет ясности, что же представляет собой темная энергия. Важным параметром, по которому можно судить об основных ее свойствах, является величина $w = p/\rho$ — отношение давления к плотности энергии. Когда, говоря о свойствах вселенной, произносят слово «пыль», подразумевают такое состояние среды, в котором давление равно нулю. В этом случае $w = 0$. У всех материальных объектов, окружающих нас, давление больше нуля. Это просто означает, что если в герметичную жестяную банку добавлять какой-либо газ или жидкость, она в конце концов лопнет. Если бы давление было отрицательным, то банка в конечном счете смялась бы.

Каков же параметр w для темной энергии? Выше (с. 104) уже приводилось ограничение, полученное из наблюдательных данных: $w < -0,8$. Дальнейшие усилия астрофизиков позволяют сузить этот интервал и выделить подходящие космологические модели из множества существующих. Так, если $w = -1$, то это будет означать, что минимально возможная плотность энергии в нашей Вселенной не равна нулю. Такая ситуация реализуется, если предположить, что пространство заполнено однородным стационарным полем. Такое состояние часто называют «вакуумом», поскольку частицы, т. е. колебания этого поля, отсутствуют. Конечно, частицы других видов — электроны, протоны... — могут присутствовать, но вклад их в плотность энергии мал. Интервал $-1 < w < -0,8$ может быть объяснен моделями с общим экзотическим названием «квинтэссенция». Если же окажется, что $w < -1$, то придется вплотную заняться исследованием так называемых фантомных полей, кинетическая энергия которых отрицательна.

Здесь назрело обсуждение стратегии, которой по обыкновению придерживается современная космология. Читателю может показаться, что космология, да и вся теоретическая физика, из науки превращается в набор спонтанных, слабо связанных между собой предположений. Отсутствуют стройность и последовательность, присущие, например, квантовой механике и обеим теориям относительности. С этим трудно не согласиться. Единственное, что можно сказать в пользу такой «стратегии», — только она и эффективна в сложных ситуациях! В том, что сейчас ситуация в космологии сложна и поэтому крайне интересна, читатель, надеюсь, уже не сомневается.

Кстати, сама Природа непрерывно использует эту стратегию. Так, все особи определенного вида животных хоть немного, да отличаются друг от друга. Особи с позитивными на данный момент отличиями размножаются быстрее. Смена внешних условий не застанет данный вид врасплох — в его распоряжении всегда найдутся особи с позитивными свойствами, отвечающими новым условиям. Таким образом, вид сохраняется и развивается благодаря наличию особей с разными свойствами в каждый конкретный момент. Второй пример. Если вы последите в микроскоп за движением амебы, то увидите, что она непрерывно выдвигает свои ложноножки в разные стороны. После анализа собранной информации она выбирает направление движения. Много ложноножек было выдвинуто зря, но если бы не они, то амеба двигалась бы, скорее всего, в неверном направлении.

Абсолютно то же самое происходит и с научной стратегией: создается множество моделей, теорий и сценариев, каждый из которых может оказаться как правильным, так и неправильным. Правильной теорией окажется только одна, все остальные канут в небытие вслед за флогистоном и моделью Солнечной системы Птолемея. Вся интрига состоит в том, что никто не знает априори, которая из теорий окажется верной. Но если не создать набор разных теорий, то не будет создана и та единственная, которая реализовалась в нашей Вселенной. Ученым приходится переработать тонны руды, чтобы най-

ти единственный драгоценный камень. Такая стратегия уже приносит успех. Отдельные фрагменты теории постепенно превращаются из «возможных» в «вероятные» и (более или менее) «надежные». Истинный ученый, создавая свою собственную теорию, осознает все сказанное выше и предлагает способы проверки и опровержения своей теории, чем и отличается от лжеученых.

Но вернемся к обсуждению темной энергии. Все новые теории базируются на наблюдательных данных, которые не обязательно верны на сто процентов. Например, возможно, что ближние и удаленные сверхновые принципиально различаются по свойствам, и поэтому сравнение их светимостей неточно. Действительно, свет от далеких сверхновых, которые мы видим сейчас, был испущен миллиарды лет назад, когда состав окружающей материи был несколько другим — не было тяжелых элементов, например. Да и сами сверхновые имели другой химический состав. Не исключено также, что уравнения Эйнштейна все-таки не совсем точны, и мы как раз и наблюдаем эффект отклонения от них.

Однако предположим наиболее вероятное: темная энергия существует. Тогда вариантов ответа на вопрос о будущем нашей Вселенной становится больше. Ответ сильно зависит от того, какая теория, объясняющая скрытую энергию, является правильной. Если правильным является простейшее объяснение и энергия вакуума положительна и не меняется со временем, то Вселенная уже никогда не сожмется, и нам не грозит перегрев. Но за все хорошее приходится платить. В этом случае, как показывают расчеты, мы в будущем никогда не сможем достичь *всех* звезд. Более того, количество звезд, видимых с Земли, будет уменьшаться, и через 10–20 миллиардов лет в распоряжении человечества останется всего несколько соседних галактик, включая нашу галактику Млечный Путь и соседнюю туманность Андромеды. Человечество уже не сможет увеличиваться количественно, и придется заняться своей качественной составляющей. В утешение можно сказать, что несколько сотен миллиардов звезд, которые будут доступны нам в будущем, — это тоже немало.

Впрочем, понадобятся ли нам звезды? 20 миллиардов лет — большой срок. Ведь за какие-нибудь несколько сот миллионов лет жизнь развилась от трилобитов до современного человека. Так что наши далекие потомки будут по внешнему виду и возможностям отличаться от нас еще больше, чем мы от трилобитов.

Что же сулит им еще более отдаленное будущее, по прогнозам ученых? Ясно, что звезды будут тем или иным способом «умирать», но будут образовываться и новые звезды. Этот процесс тоже не бесконечен: примерно через 10^{14} лет во Вселенной останутся лишь слабосветящиеся объекты — белые и темные карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Они превратятся в безжизненные объекты с почти нулевой температурой. Да и те будут понемногу испаряться благодаря квантовым эффектам (см. ниже), исчерпав все запасы своей энергии. Испарение частиц происходит благодаря туннельному эффекту, обсуждавшемуся в главе 1. Частицы будут вылетать с остывшего объекта так же, как они вылетают из ядер, преодолевая потенциальный барьер. Вероятность вылета крайне мала, но это означает лишь большую длительность процесса. Кроме того, остывшие объекты будут тормозиться за счет трения о частицы, заполняющие космическое пространство. Опять же, эффект незначителен, но на больших интервалах времени существен. В конце концов практически все объекты окажутся внутри черных дыр.

Что может разрушить черную дыру? Любые наши попытки сделать это лишь увеличат ее массу. Но «ничто не вечно под луной»! Квантовые процессы приводят к тому, что черные дыры хотя и медленно, но излучают частицы. Значит, их масса постепенно уменьшается. Черные дыры должны исчезнуть через 10^{100} лет.

Что же останется? Останутся элементарные частицы, расстояние между которыми будет намного превосходить размеры современной Вселенной — ведь все это время Вселенная расширялась! Так что нашим потомкам предстоит либо изменить физические законы Вселенной, либо перебраться в другие вселенные. Сейчас это кажется невероятным, но хочется

верить в возможности человечества, как бы оно, человечество, ни выглядело в будущем. Времени у него достаточно.

Кстати, возможно, уже сейчас мы, не ведая того, создаем новые вселенные! Действительно, для того, чтобы в очень маленькой области возникла вселенная, необходимо, чтобы на первой стадии прошел инфляционный процесс. А он, в свою очередь, возможен только при высоких плотностях энергий. Но вспомним, что экспериментаторы уже давно создают такие области, сталкивая частицы на ускорителях... И хотя искусственно создаваемые плотности энергии еще очень далеки от инфляционных, вероятность создания вселенной на ускорителе уже не равна нулю. Может быть, люди уже создали много вселенных, не ведая того. К сожалению, мы являемся тем самым «удаленным наблюдателем», для которого время жизни возникшей вселенной мало, и «влезть и посмотреть», что там происходит, невозможно. Но не исключено, что та вселенная по свойствам будет похожа на нашу. И там уже написан текст, сходный с тем, который вы держите в руках.

Похоже, что наступает «золотой век» космологии. Ученые в состоянии объяснить большинство свойств нашей Вселенной, начиная с момента 10^{-42} секунды до настоящего времени и далее. Они могут также проследить образование галактик и довольно уверенно предсказать будущее Вселенной. Тем не менее ряд «мелких» проблем еще остается нерешенным. Это прежде всего сущность скрытой массы (темной материи) и темной энергии. Кроме того, существует слишком много моделей, объясняющих, почему наша Вселенная содержит больше частиц, чем античастиц. Хотелось бы определить-ся в конце концов с выбором модели.

Как учит нас история науки, обычно именно «мелкие недоделки» и открывают дальнейшие пути развития, так что будущим поколениям будет чем заняться. Кроме того, более глубокие вопросы уже стоят на повестке дня. Почему наше пространство трехмерно? Почему все константы в природе словно «подогнаны» так, чтобы возникла разумная жизнь? И что же такое гравитация и как ее объединить с квантовой механикой? Ученые уже пытаются ответить и на эти вопросы.

История Вселенной: основные вехи

Время	Температура излучения, К	Примечания
10^{-43} – 10^{-37} с	Больше 10^{26}	Инфляция.
10^{-6} с	Больше 10^{12}	Плазма из кварков, глюонов, электронов и их античастиц.
$3 \cdot 10^{-5}$ с	10^{12} – 10^9	Кварки и глюоны образуют протоны и нейтроны.
10^{-4} с — 3 мин	10^{12} – 10^9	Образование ядер дейтерия, гелия и лития.
15 тыс. лет	10^4	Равенство плотности энергии материи и излучения.
300 тыс. лет	4 000	Образование атомов из легких ядер и электронов. Вселенная становится прозрачной для фотонов.
15 млн. лет	300	Ничего особо примечательного, кроме того, что температура космоса была комнатной, комфортной для человека.
1–3 млрд. лет	20	Образование первых звезд и галактик
3 млрд. лет	10	Образование тяжелых ядер во взрывах первых звезд; появление звезд следующего поколения.
3–15 млрд. лет	3	Появление планет и разумной жизни.
10^{14} лет	Далее	Перестали рождаться новые звезды.
10^{37} лет	очень холодно	Все слабосветящиеся объекты истощили свою энергию. Остались черные дыры и элементарные частицы.
10^{100} лет		Все черные дыры испарились. Разреженный газ стабильных элементарных частиц — электроны, три сорта нейтрино и, возможно, протоны.

Ну и, конечно, оставим место для неожиданностей! Не надо забывать, что такие основополагающие открытия, как расширение Вселенной, наличие реликтовых фотонов и энергия вакуума, были открыты, можно сказать, случайно и не ожидалась ученым сообществом.

Многомерное пространство

Одним из многообещающих направлений в теоретической физике является идея многомерности нашего мира. На первый взгляд, вопрос «почему пространство, в котором мы живем, четырехмерно (три пространственные координаты + одна временная)?» выглядит странным. Ученые, казалось бы, должны изучать природу, а не копаться в причинах появления ее свойств. Тем не менее на данном этапе развития науки оказываются осмысленными и такие вопросы. Особенно остро проблема возникновения Вселенной с заданными свойствами встала после осознания чрезвычайно малой вероятности зарождения разумной жизни. Эта тема подробно обсуждается в главе 5. Здесь же мы коснемся одной проблемы – числа измерений нашего пространства.

Как уже обсуждалось в начале книги, в физике плодотворным является следующий подход. Выдвигается некое нетривиальное предположение – Н. Бор считал, что идея должна быть достаточно безумной, чтобы оказаться перспективной. Затем из начального постулата выводятся следствия, проверяемые экспериментально. Если противоречий не возникает, то идея имеет право на существование. Если она при этом еще и проливает свет на уже известные явления и предсказывает новые, то внимание ученого сообщества к ней возрастает. С идеей многомерности нашего пространства ситуация именно такова.

Итак, будем исходить из предположения, что наше пространство многомерно, т. е. к обычным четырем измерениям имеется некое количество дополнительных измерений. Полное число измерений фиксировать не будем, оставляя свободу для маневра. Сразу возникает вопрос: почему мы не чувствуем дополнительных измерений? Существует два ответа на него. Один ответ известен давно, с момента появления первой, пятимерной, модели Калуцы–Клейна в 1920-е гг., и состоит в очевидном предположении о компактности (малости) дополнительных измерений. Так, существа, проживающие в пространстве, изображенном на рис. 2.11, будут уверены, что живут в скучном двумерном пространстве, если



Рис. 2.11. Лента Мебиуса воспринимается мелкими существами на ее поверхности как обычная плоскость.

толщина ленты мала по сравнению с их собственным размером.

Другая возможность была придумана около 20 лет назад и состоит в следующем. Предположим, что дополнительные измерения — «большие», но мы живем на некоторой четырехмерной поверхности, «чувствуя» лишь свои четыре измерения (рис. 2.12). Такие подпространства называются «бранами».

Обе гипотезы испытывают в данный период становления некоторые трудности, ответ на которые будет критичным для них. В компактных теориях типа Калуцы—Клейна не ясен механизм компактификации дополнительных пространственных измерений. Почему именно четыре измерения разрослись до колоссальных размеров, а остальные так и остались маленькими? В моделях мира на бране — целых две проблемы, возможно, связанных друг с другом. Первая — какой механизм выделяет подпространство (брану) из остального пространства? Вторая — как удерживать частицы, из которых мы состоим, от вылета с браны? Если это невозможно, то частицы рано или поздно вылетят с браны в основное пространство, и наша Вселенная исчезнет в буквальном смысле этого слова.

Идея многомерности пространства активно используется и при построении других теорий. Например, М-теория, являющаяся наследницей различных теорий суперструн, не содержит явных дефектов лишь в пространстве 11 измерений. Эта математически сложная и красивая теория считается основным претендентом на будущую свехтеорию. По крайней мере так считают те, кто ее развивает. Основным объектом

здесь являются не частицы, а струны — одномерные объекты — и те же браны. Согласно этой теории, замкнутые микроскопические струны мы воспринимаем как элементарные частицы просто потому, что эти объекты слишком малы и мы не можем разглядеть их структуру. Столкновение двух замкнутых струн мы описываем как взаимодействие частиц. Но теоретически возможны и другие, более сложные конфигурации, такие, как макроскопические струны.

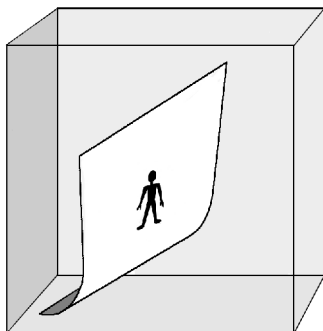


Рис. 2.12. Мир на бране.

Общее, что объединяет два, казалось бы, не связанных направления теоретической мысли — «струнное» и «бранное», — многомерность пространства, в котором они действуют. Более того, похоже, что эти два направления постепенно сближаются. Это и понятно, если представлять себе струну как одномерную брану. Рассматриваются струны, взаимодействующие с бранами в многомерном пространстве. Вполне возможно, что основной базой будущей теории будет служить исключительно идея многомерия, а «струнное» и «бранное» направления окажутся плодотворными и важными, но частными следствиями.

Есть и еще по крайней мере одна привлекательная сторона идеи многомерного пространства. Она позволяет понять, каким образом в природе появились различные виды частиц. Почему, например, имеется три и только три сорта лептонов? Почему имеется только одно электромагнитное поле, а не несколько? И почему оно вообще существует?

Конечно, можно не задаваться этими вопросами, а просто ограничиться изучением их свойств. Но значит, надо создавать дополнительные исходные постулаты, в то время как наука стремится минимизировать их число. И здесь может помочь предположение о многомерности пространства. До

полного понимания еще далеко, но пояснить сказанное можно на примере первой модели — модели Калуцы—Клейна.

Отступление.

Можно ли материю сделать из геометрии?

Обычно геометрия пространства описывается метрическим тензором, при помощи которого можно определять интервал между событиями. В четырехмерном пространстве он представляет собой симметричную квадратную матрицу 4×4 , т. е. с 4 столбцами и 4 строками, вот такую:

$$\begin{matrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{matrix}$$

Именно компоненты метрического тензора, например g_{23} , описывают различные гравитационные эффекты. Если же пространство имеет 5 измерений, то его метрический тензор является уже матрицей 5×5 :

$$\begin{matrix} & & & & g_{15} \\ & & & & g_{25} \\ & & & & g_{35} \\ & & & & g_{45} \\ 4 & 4 & & & \\ g_{51} & g_{52} & g_{53} & g_{54} & g_{55} \end{matrix}$$

Предполагается, что «кусочек» тензора, обозначенный как 4×4 , по-прежнему описывает гравитационные эффекты. А что же делают компоненты g_{15} , g_{25} , g_{35} , g_{45} , g_{55} ? (Про величины типа g_{51} можно не беспокоиться, поскольку матрица симметрична.) Они, конечно, отвечают за гравитацию в дополнительном измерении, но если это измерение компактно, то мы его просто не замечаем и воспринимаем новые компоненты g_{15} , g_{25} , g_{35} , g_{45} , g_{55} просто как новые поля. Но частицы — это колебания полей, так что, возможно, частицы суть проявление дополнительных компактных измерений. Кстати, компоненты g_{15} , g_{25} , g_{35} , g_{45} представляют собой 4-вектор и могут интерпретироваться как векторное поле. Компонента g_{55} интерпретируется как скалярное поле. Частицы скалярного поля интенсивно ищут на современных ускорителях, поскольку на них базируются стандартная модель элементарных частиц (Модель Вайнберга — Салама нуждается в скалярных частицах Хиггса), а также стандартная космологическая модель (включающая инфляционный период, для которого нужно скалярное поле — инфлатон).

Мы видим, что возможности многомерного пространства практически неисчерпаемы, и они ждут своих первооткрывателей. Экспериментальное доказательство существования дополнительных измерений испытывает значительные трудности. Если дополнительные измерения имеют размер порядка 10^{-17} см, то есть надежда на строящийся в Европе ускоритель. Кроме того, может оказаться, что эффект может проявиться как отклонение от обычной связи энергии и импульса частицы, $E = \sqrt{p^2 + m^2}$, различимое при сверхвысоких энергиях.

В первой главе уже обсуждались основные объекты, населяющие галактики. Сейчас подходящий момент для более пристального взгляда на их содержимое. Кажется, что для нас самым важным ингредиентом являются звезды — с них и начнем.

Звезды — основной объект

Самыми заметными действующими лицами на небосклоне являются звезды. Именно они служат источниками электромагнитного излучения, нагревающего окружающее пространство. Определенная доля излучения (или, что то же самое, фотонов, квантов света) звезды распространяется точно в направлении нашей планеты. Через некоторое время свет достигает Земли, и тогда мы узнаём о существовании этой звезды.

Почему же звезды светятся? Многие из вас нагревали металлический прут на огне, и все знают, что прут с повышением температуры начинает светиться. Сначала он становится красным, а при дальнейшем нагревании интенсивность света увеличивается, одновременно металл становится все более светлым. Это происходит потому, что нагрев тела есть просто передача дополнительной энергии частицам, его составляющим. Частицы начинают двигаться все быстрее, сталкиваться все интенсивнее. Столкновения, как обычно, приводят к перераспределению энергии, часть которой передается облетающим фотонам. Вот этот поток фотонов мы и видим как свечение. Сначала, когда температура невелика, а значит, и кинетическая энергия частиц мала, энергия фотонов, образующихся при столкновении частиц, также мала. Человече-

ский глаз устроен так, что фотоны малых энергий он воспринимает как красный свет. Но при дальнейшем нагреве кинетическая энергия частиц металла возрастает, и они начинают излучать все более энергичные фотоны и во все большем количестве. Когда поток фотонов разных энергий попадает на сетчатку глаза, то он воспринимается как белый свет.

Кстати, чем еще можно детектировать фотоны, не имея приборов под рукой? Если поднести ее, т. е. руку, к такому пруту — не касаясь его, — то мы почувствуем тепло. Это фотоны поглощаются кожей, передавая ей энергию. Если прут нагрет слабо, то вылетающие из него фотоны имеют маленькую энергию, и глаз не в состоянии их увидеть, но рука вполне в состоянии почувствовать их присутствие. Так что природа наделила человека сразу двумя детекторами фотонов! Солнечный загар — это изменение пигментации кожи при ее бомбардировке фотонами.

Но вернемся к звездам. Очевидно, что их температура высока, раз они излучают фотоны в видимом диапазоне длин волн. Фотоны, рожденные внутри звезды, не в состоянии пробиться сквозь толщу плазмы, из которой состоит звезда, и до нас долетают только фотоны, рожденные на ее поверхности. Значит, температура звезды, определенная с Земли, является температурой ее наружных слоев — фотосферы. Конвективные потоки внутри звезды уменьшают перепад температур, но он все-таки остается очень большим. Температура поверхности Солнца — звезды, вокруг которой обращается наша планета, — составляет примерно 5 700 К. Интервал температур обычных звезд — от 3 000 до 30 000 К.

Звезды различают по светимости. Такая классификация несколько условна, но общепринята и удобна. Самые яркие звезды условно называют звездами 1-й звездной величины; светимость звезд 2-й звездной величины в 2,512 раза меньше, чем 1-й, и т. д. Невооруженный глаз в состоянии различить звезды 6-й звездной величины.

Светимость является важной, но не единственной характеристикой звезды. Звезды различаются также и по своему химическому составу. Исследования показали, что есть звезды,

в которых доля тяжелых элементов в десятки раз меньше, чем у обычных звезд. Понять причину такой «несправедливости» довольно просто, если принять во внимание, что эти звезды находятся в сферической составляющей галактик. Изначально галактика представляет собой облако газа и первых звезд, имеющее небольшую скорость вращения вокруг некоторой оси. При столкновении частиц происходит диссипация энергии, но момент импульса сохраняется, в результате чего частицы располагаются в диске, плоскость которого перпендикулярна оси вращения (как кольца у Сатурна). Так что первые звезды, произведя тяжелые элементы, взрываются, их вещество постепенно оседает в галактическом диске и собирается в новые звезды. На протяжении жизни нашей галактики пройдено уже несколько таких циклов. Старые же звезды, которые сохранились со времен образования галактики, слабо взаимодействуют с окружающей средой и поэтому не оседают в галактический диск. Но в старых звездах и не могло быть тяжелых элементов! Ведь они родились, когда в природе ничего тяжелее гелия не существовало. Интересно, что иногда встречаются звезды с избытком одного из элементов, например кремния, железа, марганца, углерода и т. д.

Химический состав звезд можно определять по спектрам, а как определять массы звезд? Незаменимым инструментом в подобных случаях являются двойные звезды. При пролете одной звезды мимо другой возможны три варианта развития событий: небольшое изменение траекторий звезд, их столкновение с разрушением и, наконец, взаимозахват. Кроме того, очень часто двойные звезды образуются в момент активного звездообразования из молекулярных облаков, так что число их не так уж мало.

Детальный анализ движения двойных звезд говорит о многом, и в частности о массах их компонентов. Естественной единицей измерения массы звезд является масса Солнца, равная примерно $2 \cdot 10^{33}$ г. Оказалось, что массы звезд варьируются в пределах от 0,1 до 100 солнечных масс. Как выяснили астрономы, звезды не очень склонны жить в одиночестве. По-видимому, большинство из них образует пары — двойные

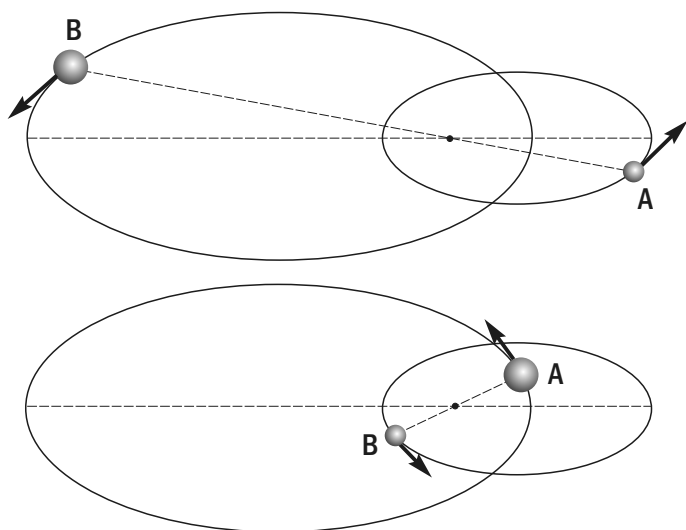


Рис. 3.1. Геометрия движения двойных звезд.

звезды, а некоторые — и более многочисленные семьи, так называемые кратные звезды.

Как же определить, является источник света кратной звездой или нет? В телескоп не всегда можно различить, сколько их там — одна или две: слишком мало расстояние между ними. Один из признаков того, что звезда является двойной, — переменность ее блеска. Обычно одна звезда не такая яркая, как ее соседка, и когда, обращаясь вокруг их общего центра, она заслоняет более яркую, суммарный поток света в сторону Земли уменьшается. Конечно, и спектры звезд различны, что также помогает астрономам, да и эффект Доплера от движения обеих звезд вокруг их общего центра сказывается.

Двойные звезды — полезный для исследователей «инструмент». Например, измерить массу одиночной звезды практически невозможно. Интенсивность ее блеска и спектр, единственная информация, доступная нам, конечно, зависят от массы, но хотелось бы иметь независимую экспертизу. А вот

благодаря двойным звездам это удастся сделать. В соответствии с третьим законом Кеплера,

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_A + M_B).$$

Здесь T — период обращения, a — большая полуось орбиты одной звезды (например, имеющей массу M_A) относительно другой (имеющей массу M_B). При этом начало отсчета связывается со звездой, относительно которой измеряется положение соседки. На рис. 3.1 изображены различные положения звезд относительно друг друга. Большая полуось — наибольшее расстояние АВ между звездами. Независимое экспериментальное определение периода обращения звезд и расстояния от них до центра масс позволяет однозначно получить массу каждой звезды.

Двойные звезды называют также переменными. Первая переменная звезда — Алголь (Персея) — была открыта в 1669 г. итальянским астрономом Монтанари. Период Алголя составляет 2 суток 20 часов и 49 минут.

Солнце

Повернись лицом к Солнцу и все твои тени останутся сзади.

Пословица народа маори (Полинезия)

Солнце — обычная звезда. Более того, его размеры и масса вряд ли впечатлят пришельцев с других звезд, поскольку есть звезды и побольше. Например, размер звезд Бетельгейзе и Антарес в сотни раз больше размера Солнца. Внутри VV Цефея поместилась бы Солнечная система с орбитами планет до Юпитера включительно. Средняя же плотность сверхгигантов чрезвычайно мала — в тысячи раз меньше плотности воздуха. Поэтому их масса лишь в 30–40 раз больше массы Солнца. Единственное, что выделяет Солнце среди других звезд, — это близость к нам. Всего 150 млн. километров отделяет нас друг от друга. Это расстояние свет пролетает за 8 минут.

Изучая Солнце, мы узнаём много интересного о строении большинства звезд. Ведь кроме фотонов Солнце излучает мно-

го других элементарных частиц — протоны, электроны, нейтрино. Все они приносят нам бесценную информацию о процессах, происходящих на Солнце. Заряженные частицы — протоны и электроны, — а также фотоны должны рождаться в фотосфере, чтобы не быть задержанными внешними слоями Солнца. Конечно, и над фотосферой, толщина которой около 300 км, имеется слой, называемый хромосферой, но его плотность мала, и он не является препятствием для вылетающих частиц. Кстати, и фотосфера не может похвастаться плотностью: ее плотность более чем в тысячу раз меньше, чем у воздуха. Именно в фотосфере образуются солнечные пятна — области пониженной температуры с сильным магнитным полем. А что происходит в недрах Солнца? Ясно, что там должны идти ядерные реакции, поскольку только они способны выделять такое количество энергии в течение миллиардов лет. Можно даже теоретически предсказать, какие именно. Но как это проверить? На помощь приходят незаметные нейтрино.

Нейтрино крайне слабо взаимодействуют с частицами и поэтому, родившись глубоко под поверхностью Солнца, легко преодолевают сопротивление среды и долетают до Земли. Но по этой же причине их очень трудно детектировать. Тем не менее детекторы нейтрино существуют, и они привели к удивительному открытию. Оказалось, что электронных нейтрино мало по сравнению с теоретическими предсказаниями. Ученые хорошо понимали, какие ядерные реакции должны идти внутри звезд, их предсказания подтверждались наблюдениями. Так, температура в центре Солнца предсказывается с точностью в несколько процентов. Но в результате этих реакций рождаются не только фотоны, но и нейтрино. А вот их-то число и не совпадало с тем, что детектировали экспериментаторы. Единственный выход из этого тупика — предположить, что масса нейтрино не равна нулю, хотя и очень мала — примерно в 500 тысяч раз меньше массы самой легкой частицы, электрона. Тогда возможны так называемые «нейтринные осцилляции» — электронные нейтрино по дороге от Солнца до Земли превращаются в мюонные, и наоборот. Но детектируются именно электронные нейтрино! Неудивительно, что их не

хватало. Похоже, это предположение оправдывается, так что можно говорить о хорошем понимании процессов, происходящих внутри Солнца.

Еще одним подтверждением этого послужила недавно разрешенная проблема с неоном. Долгое время ученым казалось, что если их расчеты верны, то неона, влияющего на конвекцию внутри Солнца, должно быть втрое больше, чем давали наблюдения. Последние исследования звезд устранили это противоречие: видимо, неона действительно втрое больше.

Интересно оценить, какую массу теряет наше Солнце за счет излучения света. Поток световой энергии на Землю составляет $\sim 10^3$ Дж/(м² · с). Теперь мы можем вычислить энергию, проходящую через сферическую поверхность с Солнцем в центре и радиусом, равным расстоянию от Земли до Солнца ($R = 150$ млн. км):

$$E = 4 \pi R^2 \cdot 10^3 \text{ (Дж/с)}.$$

Но это как раз та энергия, которую излучает Солнце в секунду! Потеря же массы составляет

$$M = \frac{E}{c^2} \approx 3 \cdot 10^9 \text{ (кг/с)}.$$

Итак, наше Солнце каждую секунду «худеет» на миллиард килограммов вещества. Хорошая диета. Эти цифры будоражат воображение, но давайте посмотрим, какую энергию выделяет 1 кг солнечного вещества. Поделив излучаемую энергию E на массу Солнца, получим всего лишь $\sim 10^{-4}$ вт/кг. Килограмм солнечного вещества производит энергии в миллион раз меньше, чем обыкновенная стоваттная лампочка! Такое медленное тепловыделение обусловлено участием слабого взаимодействия в ядерных реакциях на Солнце. В отсутствие слабого взаимодействия звезды сгорали бы практически мгновенно. Но почему тогда температура лампочки явно меньше, чем поверхности Солнца? Дело в том, что температура произвольной системы зависит не только от поступающей энергии, но и от энергии, выделяемой этой системой через поверхность наружу. Так, когда человек хочет согреться, он уменьша-

ет скорость отвода тепла с поверхности своего тела, надевая теплую одежду. В силу чисто геометрических законов объем, а значит, и масса тел растет пропорционально кубу характерного размера, а поверхность тел — пропорционально его квадрату. Поэтому у Солнца отношение поверхности к массе на много порядков меньше, чем у лампочки, а значит, и охлаждение за счет радиации в окружающую среду затруднено и гораздо менее эффективно, что приводит к повышению температуры внутри него.

Как же было доказано, что звезды и Солнце — это сходные объекты? Оказывается, это можно сделать, используя спектры электромагнитного излучения звезд. Под спектром излучения понимается, грубо говоря, количество фотонов с различными энергиями, вылетающих из звезды в единицу времени. Конечно, спектры звезд индивидуальны, как ушная раковина человека. Но и похожи они так же! Их так же трудно спутать с чем-нибудь другим, как и человеческое ухо.

По спектрам излучения было установлено, что обычная звезда, а точнее, ее внешняя оболочка, состоит на 70% из водорода и на 27% — из гелия. На все остальные элементы приходится не более 3%.

Эволюция звезд

Наш путь извилист, но перспективы светлые.

Мао Цзэдун

В ходе эволюции звезды от ее рождения до смерти можно выделить три основных этапа. На первом этапе газо-пылевое облако начинает сжиматься под действием собственных гравитационных сил. Совсем не обязательно всему облаку сжиматься к одному центру. Чаще всего сжимается лишь некоторая область, в которой по тем или иным причинам увеличилась плотность газа. Это может происходить, например, из-за возникновения гравитационно неустойчивости системы либо столкновения встречных потоков газа внутри облака. Молекулы газа, ускоряясь при движении к центру, сталкиваются, передавая свою кинетическую энергию другим молекулам и тем

самым нагревая среду. Вначале из-за того, что вещество прозрачно для инфракрасного излучения с длиной волны больше 10 мкм, тепловая энергия эффективно удаляется из облака, и нагрев и рост давления незначительны. Газ продолжает движение к центру. Плотность образующегося сгустка газа быстро увеличивается, что приводит к уменьшению его прозрачности. Теперь тепло не выходит из системы, и сгусток газа начинает нагреваться. Зарождение звезды началось.

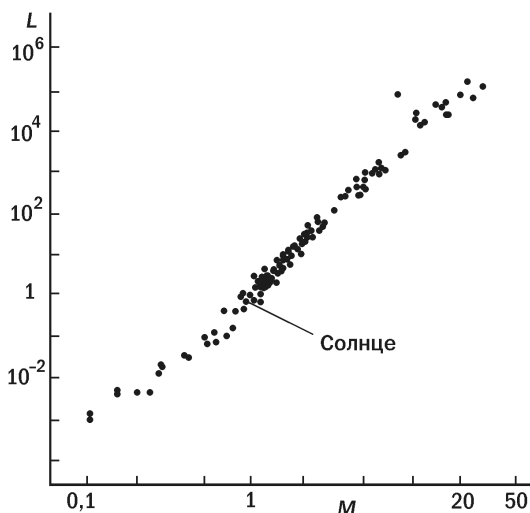
Второй этап наступает, когда температура в центре протозвезды повышается до нескольких миллионов градусов, когда начинаются первые ядерные реакции. Протозвезда превращается в молодую звезду. Выделяющаяся в результате ядерных реакций энергия компенсирует затраты звезды на излучение с ее поверхности. Вместе с температурой растет и давление, которое теперь в состоянии противодействовать гравитационному сжатию.

Сколько же времени тратит звезда на свое рождение? Ответ зависит от массы «младенца». Более массивные рождаются быстрее. Например, Солнце рождено 30 млн. лет, а в 3 раза более массивные — всего 100 тыс. лет. Красные же карлики, масса которых на порядок меньше солнечной, рождаются 100 млн. лет, но и живут гораздо дольше. Причина такой разницы очевидна — медленное сжатие маломассивных газовых облаков. Массивная же звезда иногда формируется так быстро, что оказывается окруженной своей газовой оболочкой — газопылевым коконом. Пример подобного образования — объект Беклина—Нейгебауэра в туманности Ориона. Температура кокона составляет 600 К, хотя светимость звезды внутри него примерно в 2 тысячи раз больше солнечной. Излучение звезды понемногу разрушает кокон.

В начале прошлого века астрономы Холм, Рассел, Герцшпрунг и Эддингтон установили приблизительную связь между светимостью звезд и их массой и построили диаграмму «масса—светимость».

Как видно, судьба звезды, время ее жизни и светимость в основном зависят от ее массы. Чем больше масса, тем сильнее гравитационные силы сжимают внутреннюю часть звез-

Рис. 3.2. Зависимость светимости звезд от их массы. Светимость выражена в величинах светимости Солнца, масса — в солнечных массах.



ды, тем интенсивнее там идут ядерные реакции, а значит, и выше температура поверхности типичной звезды. Хотелось бы иметь количественную оценку этого качественного вывода. Из наблюдательных данных, представленных на рис. 3.2, можно извлечь информацию о связи светимости и массы звезды. Видно, что точки приближенно ложатся на прямую линию в логарифмическом масштабе, т. е.

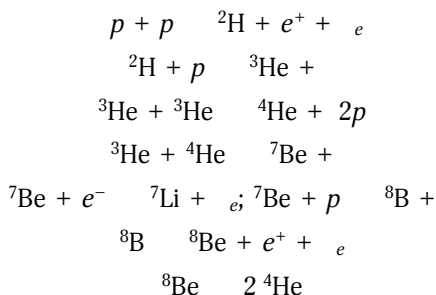
$$\ln L \sim x \ln M + C. \quad (3.1)$$

Неизвестные параметры x и C легко определить из рисунка. А именно, очевидно, что $L = 1$ при $M = 1$ и $L = 10^4$ при $M = 10$. Подставляя эти пары чисел в уравнение (3.1), получаем оценку для параметров C и x : $C = 0$, $x = 4$. Значит, светимость звезды пропорциональна четвертой степени ее массы, $L \sim M^4$. Это грубая оценка. На самом деле показатель степени варьируется в зависимости от возраста звезды, зависит от скорости конвективных потоков внутри нее, ее химического состава и множества других, более тонких деталей. По закону Стефана—Больцмана излучаемая энергия, т. е. светимость, пропорциональна той же четвертой степени температуры, $L \sim T^4$. Значит, температура поверхности звезды пропорциональна ее массе: $T \sim M$.

Подчеркну еще раз, это лишь удобная оценка. Кроме того, все сказанное относится к сформировавшейся звезде «средних лет», которой еще можно не думать о смерти. Такие звезды, с возрастом от 5 до 10 миллиардов лет, находятся на главной последовательности, т. е. близко к прямой на рис. 3.2.

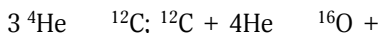
Что же происходит внутри звезд за это время и какие ядерные реакции разогревают их?

Первыми вступают в реакции отдельные протоны, ядра водорода. Ниже приведена основная, протон-протонная цепочка реакций, в результате которой звезда постепенно обогащается тяжелыми элементами. Начав с одного водорода, ядерные реакции порождают литий, гелий, бор и бериллий. Конечно, появляются только ядра элементов, но когда они попадут в холодную среду, «сбежавшие» когда-то электроны присоединятся к ним, образуя соответствующие элементы. Символы e^- и e^+ означают электрон и позитрон, p — протон, ν_e — электронное нейтрино, γ — фотоны.



Протон-протонный цикл — медленный, и именно он поддерживает свечение звезды большую часть ее жизни, которая обычно длится примерно 10 млрд. лет для обычных звезд типа нашего Солнца. Кстати, Солнце прожило примерно половину этого срока. Через 5 млрд. лет оно превратится в красный гигант и взорвется. Более массивные звезды живут меньше, но судьба их ярче. Это и понятно: бурная жизнь приводит к ранней старости. Дело в том, что когда запасы водорода подходят к концу, маленькие звезды типа Солнца после взрыва превращаются в белые карлики. Массивные же звезды лишь

сжимаются под действием гравитации, и когда температура достигает 10^8 К, становится возможной новая реакция, когда при столкновении ядер гелия рождаются углерод и кислород:



Именно так образовался углерод, из которого мы состоим, и кислород, которым мы сейчас дышим. Далее рождаются ядра все более тяжелых элементов, например азота, меди, железа, так необходимых человеку в быту. Чем более массивна звезда, тем меньше она живет, но тем больше температура внутри нее и тем более тяжелые элементы в ней образуются.

Необходимо отметить важнейшую роль слабого взаимодействия. Уже в первой, основной реакции протон-протонного цикла появляется нейтрино, которое ни в каких других взаимодействиях, кроме слабого, не участвует. Но слабое взаимодействие всегда маловероятно, а значит, ядерные реакции с участием нейтрино происходят медленно, что очень кстати. Во-первых, благодаря медленным темпам горения звезда существует долго и температура в ее ядерном котле поддерживается постоянной длительное время, давая возможность появиться элементам, более тяжелым, чем водород. Во-вторых, появившиеся нейтрино свободно проходят через звезду, не давая обратных реакций, что могло бы опять же уменьшить выход тяжелых элементов, так необходимых нам.

Когда в ходе ядерных реакций водород оказывается исчерпан, ядро сжимается, и при температуре $2 \cdot 10^8$ К начинаются ядерные реакции с участием гелия, который превращается в углерод и кислород с небольшой примесью более тяжелых элементов. В результате внутреннее давление возрастает настолько, что внешние слои удаляются от центра и увеличиваются в размерах. Звезда уходит с главной последовательности и превращается в красный гигант. Температура его поверхности не превышает 3 000 К. Затем, если звезда была массивной, она взрывается, а небольшие звезды типа нашего Солнца после сброса внешних слоев превращаются в белые карлики.

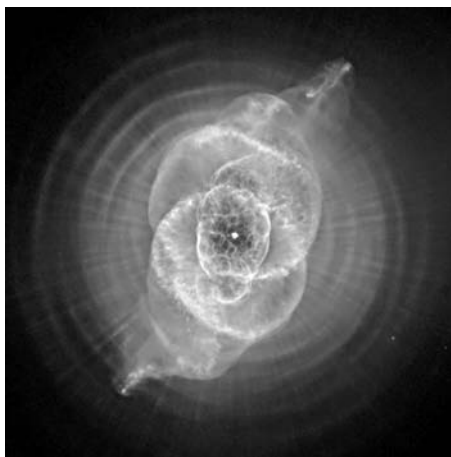


Рис. 3.3. Туманность «Кошачий глаз» (NGC 6543) — одна из наиболее известных планетарных туманностей, конечная стадия эволюции звезды типа Солнца.

Фото с интернет-страницы

<http://www.astronet.ru:8105/db/msg/1208195>

Последняя стадия эволюции звезды тесно связана с ее массой. Так, звезда с массой $M < 5-10 M_{\odot}$ оставляет после себя белый карлик с массой порядка одной солнечной массы и разлетающееся облако газа (планетарную туманность).

Более массивные звезды, с массами $M < 20-40 M_{\odot}$, в конце своего существования взрываются, образуя так называемые сверхновые. В центре взрыва остается нейтронная звезда с мас-

сой до $3 M_{\odot}$. Звезды большей массы после взрыва оставляют после себя черные дыры еще большей массы.

Сверхновые

Звезды на протяжении всей своей жизни излучают энергию, которая высвобождается в результате ядерных реакций. Этот процесс не может длиться вечно. Оканчивают свой путь звезды по-разному. Звезды типа нашего Солнца и еще менее массивные, пройдя стадию красного гиганта, постепенно угасают, превращаясь в белые карлики. Здесь же речь пойдет о массивных звездах, смерть которых представляет феерическое зрелище — колоссальный выброс энергии, увеличивающий светимость звезды в миллионы раз. Звездам с массой в несколько солнечных масс уготована подобная участь.

Какие же процессы внутри звезды предшествуют этому? После того, как звезда образовалась, основным источником

Основные этапы жизни звезды

Основной компонент ядерной реакции	Температура в центре, К	Плотность в центре, кг/м ³	Длительность этапа
Водород	$4 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^6$ лет
Гелий	$2 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$ лет
Углерод	$6 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	600 лет
Неон	$1,2 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	1 год
Кислород	$1,5 \cdot 10^9$	10^{10}	6 месяцев
Кремний	$2,7 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	1 день
Коллапс ядра			0,2 секунды
Взрыв ядра			

энергии являются ядерные реакции, в результате которых водород превращается в гелий. Когда весь водород выгорает, температура в ядре звезды поднимается до $2 \cdot 10^8$ К, и становятся возможными новые ядерные реакции, переводящие гелий в кислород и неон. Внешняя оболочка сильно увеличивается в размерах, звезда входит в стадию красного гиганта. Энергия продолжает выделяться, а температура — расти. После достижения температуры 10^9 К неон начинает превращаться в магний и кремний, запуская целую цепочку ядерных реакций, в результате которых образуются тяжелые элементы. Все эти процессы сопровождаются повышением температуры до нескольких миллиардов градусов.

Появление ядер железа — тревожный симптом для звезды. Непосредственно после этого протоны и электроны объединяются в нейтроны с испусканием нейтрино. Образуется компактное ядро, состоящее в основном из нейтронов, с массой чуть больше массы Солнца. Это быстрый процесс, и резкое уменьшение объема ядра сопровождается большими потоками нейтрино, которые, слабо взаимодействуя со средой, уносят энергию из звездной «печки», уменьшая тем самым ее температуру и давление. Теперь гравитационным силам сжатия ничто не препятствует, и внешняя оболочка, лишенная поддержки изнутри, устремляется к центру. Ее удар о внутреннее ядро приводит к резкому выделению энергии,

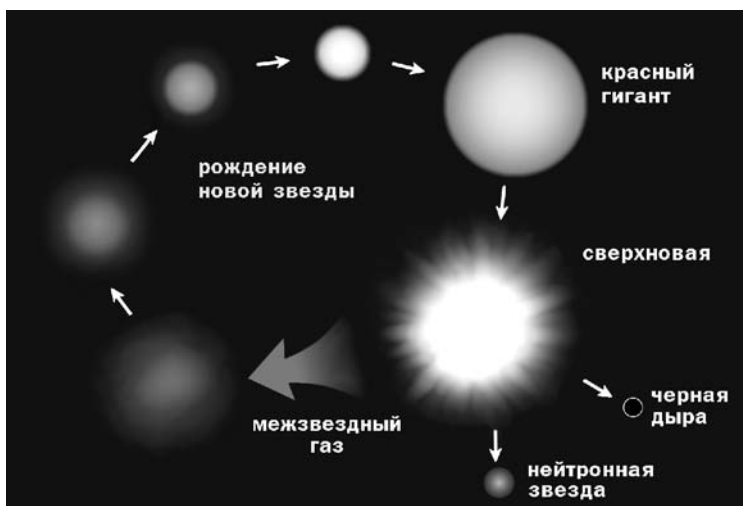


Рис. 3.4. Круговорот вещества в галактиках. Типичная молодая звезда рождается в газовом облаке, долго находится в квазистационарном состоянии, как наше Солнце сейчас, после истощения водорода переходит в стадию красного гиганта. Последний в конце концов взрывается, поставляя тяжелые элементы в окружающее пространство и пополняя газовые облака ядрами тяжелых химических элементов.

которая передается внешним слоям звезды. За секунду выделяется энергия порядка 10^{46} Дж, излучаемая в спокойном состоянии за миллиарды лет. Наружные слои, составляющие значительную часть звезды, разлетаются со скоростью примерно 10 000 км/с. На небе вспыхивает яркий объект — сверхновая. Разлетающееся вещество содержит тяжелые элементы, наработанные звездой за миллиарды лет ее существования и так необходимые нам для создания цивилизации и ее атрибутов — от футбольных мячей до косметики. Потoki нейтрино также устремляются от центра взрыва, и их остановить уже невозможно — они разносят весть о смерти звезды по всей Вселенной. Подобный нейтринный поток от взрыва сверхновой был зафиксирован в 1987 г.

Значительная часть массы звезды рассеивается в окружающем пространстве, образуя области, нагретые до миллио-

на градусов. Наиболее известным остатком вспышки сверхновой является Крабовидная туманность. Эту сверхновую наблюдали китайские и японские астрономы в 1054 г. В течение 23 дней она была видна даже днем. В дальнейшем блеск звезды угасал, но даже невооруженным глазом ее можно было наблюдать еще почти два года.

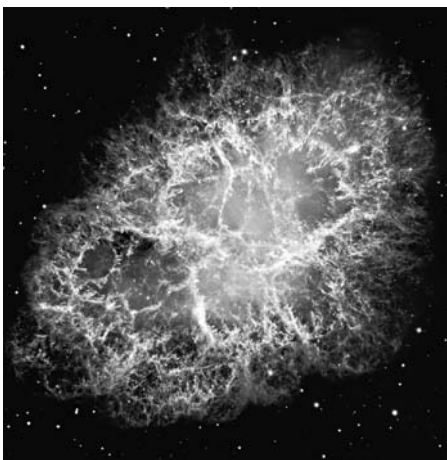


Рис. 3.5. Крабовидная туманность.

Внешняя часть оболочки звезды, сталкиваясь с окружающими звездными частицами, порождает ударные волны, которые, в свою очередь, порождают высокоэнергичные частицы. Таков один из механизмов образования космических лучей высоких энергий.

Еще один механизм появления сверхновых типа Ia связан с аккрецией¹ (падением) вещества обычной звезды на поверхность белого карлика в двойных системах. Темп аккреции резко возрастает, когда звезда-донор исчерпывает водород и начинаются ядерные реакции с участием гелия. При этом размеры звезды многократно увеличиваются, она превращается в красный гигант, и его вещество поглощается белым карликом. Когда масса перетекшего вещества становится слишком большой, т. е. масса белого карлика превышает предельно допустимое значение, происходит коллапс этого вещества по сценарию, напоминающему описанный выше для сверхновых: в поверхностном слое белого карлика происходит термоядерный взрыв, и сброс накопившейся оболочки регистрируется нами как вспышка новой звезды. В телескоп

¹ Лат. *accretio* — приращение, увеличение.

виден всплеск светимости с дальнейшим постепенным угасанием. Индийский ученый Чандрасекар рассчитал предельное значение массы белого карлика — примерно 1,4 солнечной массы.

Белые карлики похожи друг на друга, а значит, и светимости сверхновых типа Ia сходны. Поэтому, кстати, по ним удобно измерять расстояния (светимость обратно пропорциональна квадрату расстояния).

Очень полезным для земных ученых оказался уже упоминавшийся взрыв сверхновой в 1987 г. Детектор нейтрино, расположенный глубоко в шахте в Японии, зарегистрировал сразу десяток событий — так экспериментаторы называют возникновение искомой ситуации в детекторе. Общение с коллегами, работающими с телескопами, прояснило ситуацию. Оказывается, ими тоже был отмечен всплеск электромагнитного излучения от сверхновой. Когда ученые сверили часы, оказалось, что нейтрино опередили свет на несколько часов. Именно столько времени понадобились свету, чтобы пробиться сквозь газ вокруг сверхновой, его породившей.

Сверхновые поставляют тяжелые элементы в космическое пространство, что хорошо для будущих цивилизаций, но они же сжигают ближайшие планеты, что опасно для нашей. Поэтому будем радоваться тому, что сверхновые — редкое явление, происходящее в нашей Галактике примерно раз в 200 лет. Это очень приблизительная цифра. По другим оценкам, сверхновые вспыхивают каждые 50 лет.

Белые карлики

Белые карлики — распространенный тип слабосветящихся звезд. В нашей галактике они составляют несколько процентов от общего числа звезд — около 10^{11} . Это компактные объекты, размером с Землю. Температура внутри них невысока, так что ядерные реакции не протекают. Запасенная энергия постепенно уменьшается за счет излучения электромагнитных волн. Температура поверхности белых карликов колеблется в пределах от 5 000 К у старых, «холодных» звезд до 50 000 К у молодых и «горячих». Массы белых карликов не превосходят

1,4 массы Солнца (предел Чандрасекара), хотя плотность вполне приличная — 10^6 – 10^7 г/см³.

Белые карлики не так просты и скучны, как это может показаться на первый взгляд. Действительно, если ядерные реакции не идут и температура невысока, то откуда берется высокое давление, сдерживающее гравитационное сжатие вещества? Оказывается, что решающую роль играют квантовые свойства электронов. Под действием гравитации вещество сжимается настолько, что ядра атомов проникают внутрь электронных оболочек соседних атомов. Электроны уже не принадлежат конкретным ядрам, а вольны летать по всему пространству внутри звезды. Ядра же образуют плотно связанную систему наподобие кристаллической решетки. Далее происходит самое интересное. Хотя в результате излучения в окружающее пространство белый карлик остывает, средняя скорость электронов не уменьшается. Это связано с тем, что, согласно законам квантовой механики, два электрона, имея полуцелый спин, не могут находиться в одном состоянии (принцип Паули). Значит, число различных состояний электронов белого карлика не может быть меньше числа электронов. Но понятно, что число состояний уменьшается с уменьшением скоростей электронов. В предельном случае, если бы скорость всех электронов стала равной нулю, все они оказались бы в одном состоянии (точнее — в двух, с учетом проекции спина). Поскольку электронов в белом карлике много, то и состояний должно быть много, а это обеспечивается сохранением их скоростей. Ну а большие скорости частиц создают большое давление, противодействующее гравитационному сжатию. Конечно, если масса объекта слишком велика, гравитация преодолет и этот барьер. В Приложении 7 оценивается предельная масса белого карлика.

Открытие белых карликов относится к началу XIX в., когда Фридрих Вильгельм Бессель, наблюдая за Сириусом, обнаружил, что он движется не по прямой, а «слегка по синусоиде». Примерно десять лет наблюдений и размышлений привели Бесселя к выводу, что рядом с Сириусом находится вторая звезда, оказывающая на него гравитационное воздействие.

Предсказание Бесселя подтвердилось после того, как А. Кларк в 1862 г. сконструировал телескоп с объективом диаметром 46 см, на тот момент самый большой телескоп в мире. Для проверки качества линзы его направили на Сириус — самую яркую звезду. В поле зрения телескопа появилась еще одна звезда, неяркая, которую и предсказывал Бессель.

Двойная система Сириус А и Сириус В заинтересовала астрономов. Мы же повнимательнее присмотримся к неяркой звезде Сириус В. Светимость Сириуса В в 300 раз меньше светимости Солнца, а температура составляет 8 000 К, т. е. существенно больше солнечной (5 700 К). Этого оказывается достаточно, чтобы определить размеры Сириуса В. Поскольку светимость L пропорциональна поверхности звезды S (очевидно) и температуре поверхности T в четвертой степени (закон Стефана–Больцмана), то из предыдущего вытекает следующее соотношение:

$$\frac{L_{\text{Sirius}}}{L_{\odot}} \frac{S_{\text{Sirius}} T_{\text{Sirius}}^4}{S_{\odot} T_{\odot}^4} \sim \frac{1}{300}.$$

Следовательно, площадь поверхности Сириуса В однознач-но выражается через площадь поверхности Солнца:

$$S_{\text{Sirius}} = S_{\odot} \frac{L_{\text{Sirius}}}{L_{\odot}} \frac{T_{\odot}^4}{T_{\text{Sirius}}^4}.$$

Простые вычисления по этой формуле приводят тому, что радиус Сириуса В должен быть около 20 000 км. Это, в свою очередь, означает, что плотность вещества, из которого состоит эта звезда, очень высока, поскольку оказалось, что ее масса составляет 95% массы Солнца. Так был открыт первый белый карлик, плотность вещества которого составляет 10^5 г/см³.

Большинство белых карликов являются одним из последних этапов эволюции нормальных, не очень массивных звезд. Звезда, исчерпав запасы ядерного горючего, переходит в стадию красного гиганта, теряет часть вещества, превращаясь в белый карлик. При этом наружная оболочка — нагретый газ — разлетается в космическом пространстве; с Земли она

наблюдается как туманность. За сотни тысяч лет такие туманности рассеиваются в пространстве, а их плотные ядра, белые карлики, постепенно остывают. Со временем они должны превратиться в коричневые (черные) карлики — сгустки материи с температурой окружающей среды. Правда, как показывают расчеты, на это может потребоваться множество миллиардов лет.

Очевидно, что открытие коричневых карликов затруднено их слабой светимостью. Один из коричневых карликов находится в созвездии Гидры. Его блеск составляет лишь 22,3. Уникальность открытия заключается в том, что ранее обнаруженные коричневые карлики входили в двойные системы, именно поэтому их и могли обнаружить, а этот — одиночный. Его нашли только благодаря близости к Земле: до него всего 33 световых года.

Предполагается, что нынешние коричневые карлики — это не остывшие белые (слишком мало времени прошло), а недоразвившиеся звезды. Как известно, звезды рождаются из газо-пылевого облака, причем одно облако порождает несколько звезд разной массы. Если сжимающийся сгусток газа имеет массу в 10–100 раз меньше солнечной, образуются коричневые карлики. Они довольно сильно разогреваются силами гравитационного сжатия и излучают в инфракрасном диапазоне. Ядерные реакции в коричневых карликах не происходят.

Нейтронные звезды

Как уже говорилось, белые карлики представляют собой очередной, фактически последний этап жизни звезды: ядерное горючее исчерпано, внешняя оболочка эффектно сброшена, и на месте звезды остается лишь ее плотная и горячая «сердцевина». Собственные гравитационные силы сжимают ее, но сжатию противостоит внутреннее давление, обусловленное в конечном итоге принципом Паули.

Что же происходит при увеличении массы всей системы? Ведь массы звезд варьируются в широких пределах. Поэтому и в конце эволюции звезд остаются «сердцевинки» самых разных масс. Гравитационные силы сжатия пропорциональны

массе и поэтому растут вместе с ней. Начиная с некоторой массы давление электронов оказывается не в состоянии противостоять гравитации, и вместо белого карлика возникает еще более плотное тело — нейтронная звезда. Давление внутри нейтронной звезды настолько высоко, что электроны, образно говоря, «вдавлены» в протоны, и в результате звезда оказывается состоящей в основном из нейтронов — отсюда и название.

Давайте оценим основные параметры нейтронной звезды и затем обратимся к наблюдательным данным. Прежде всего — плотность. Обычное вещество, из которого состоит все нас окружающее и мы сами, имеет плотность $\sim 5 \text{ г/см}^3$. При этом одно ядро атома размером $\sim 10^{-13} \text{ см}$ отстоит благодаря электронной оболочке от другого на расстояние $\sim 10^{-8} \text{ см}$. Но если электроны отсутствуют, то ничто не мешает ядрам сблизиться на минимально возможное расстояние. При этом ядра заполняют весь объем, в котором раньше находилось лишь одно ядро, а это примерно 10^{-24} см^3 (объем атома). Объем же самого ядра составляет $\sim 10^{-39} \text{ см}^3$. Очевидно, что плотность вещества увеличится в $10^{-24}/10^{-39} = 10^{15}$ раз и станет равной примерно $5 \cdot 10^{15} \text{ г/см}^3$. А это 5 миллионов тонн...

Теперь можно оценить и размер нейтронной звезды. Если ее масса равна двум солнечным, т. е. $4 \cdot 10^{33} \text{ г}$, то, имея такую высокую плотность, она должна поместиться в объеме $\sim 10^{18} \text{ см}^3$. Объем пропорционален кубу размера, отсюда размер нейтронной звезды — примерно 10^6 см , т. е. 10 км. Наши оценки оказываются близкими к общепринятым, полученным после всесторонней обработки наблюдательных данных: плотности нейтронных звезд составляют приблизительно $10^{14} - 10^{15} \text{ г/см}^3$, а радиус $r_n \sim 10 \text{ км}$.

Отступление.
*Параметры
 нейтронной звезды*

Интересно, что независимую теоретическую оценку параметров нейтронной звезды мы можем получить так же, как это было сделано для белого карлика в Приложении 7. В роли электронов в нейтронной звезде выступают барионы. Как видно из формул (П 7.1, П 7.2), оценки для числа барионов (П 7.3) и массы остаются прежними, а размер оказывается существенно меньше. Под-

ставляя в формулу (П 7.4) массу бариона (протона или нейтрона) получим, аналогично формуле (П 7.5), оценку радиуса нейтронной звезды — 2,7 км.

О внутренней структуре нейтронной звезды мы уже говорили в главе 1 (с. 44). На поверхности расположен слой вещества с плотностью до 10^6 г/см³ (сравните с плотностью железа — ~ 7 г/см³) и температурой до 10^6 К. Далее следует слой, обладающий кристаллической структурой с плотностью 10^9 кг/см³. Плотность третьего слоя, состоящего из тяжелых элементов, еще в 1 000 раз больше. Еще ближе к центру находится слой, состоящий в основном из нейтронов, — плотность его так высока, что ядра теряют свою индивидуальность, как люди в толпе. В центре нейтронной звезды, похоже, и нейтроны теряют свою индивидуальность, образуется кварк-глюонная плазма. Конечно, никто внутрь нейтронной звезды не залезал, и все сказанное — предположения ученых, но предположения, обоснованные уравнениями и частично проверенные эффектами, происходящими на поверхности.

Обнаружение нейтронных звезд представляет некоторую проблему. Ядерные реакции внутри нее отсутствуют, значит, нет и излучения света. Остаются два варианта, один из которых уже известен читателю. Если нейтронная звезда находится в двойной системе вместе с обычной, то движение видимой звезды выдает существование нейтронной соседки. Вторым же способ основан на необычном эффекте, о котором и стоит поговорить.

В 1967 г. в Кембридже начал работу радиотелескоп, который позволил открыть нечто совершенно новое — пульсары, источники мощного излучения, интенсивность которых быстро менялась со временем. Первые серии импульсов имели период 1,34 секунды, а длительность — 0,3 секунды. После того, как были отброшены все версии типа помех, создаваемых земными устройствами, и сигналов от внеземных цивилизаций, остался единственный вариант — естественное происхождение источников импульсов. Пристальное внимание военных к этому феномену привело к тому, что большинство ученых узнало о пульсарах лишь через год. Открытие новых

пульсаров с другими периодами между импульсами подтвердило предположение относительно их природы. Сейчас известно несколько сотен пульсаров. Типичный период изменения их блеска составляет 1 секунду.

Уже в первой статье о пульсарах, в 1968 г., было высказано предположение, оказавшееся правильным, что пульсары — это быстро вращающиеся нейтронные звезды. Вообще-то астрономам уже были известны звезды, блеск которых менялся со временем, и даже такие, у которых это изменение было строго периодичным. Их называют цефеидами, так как первая подобная звезда была обнаружена в созвездии Цефея. Но период изменения блеска цефеид — месяцы, что несравненно больше периода пульсаров.

Что же заставляет предполагать, что нейтронная звезда и пульсар — это одно и то же? Прежде всего на эту мысль наталкивает странное совпадение скорости вращения нейтронной звезды и периода пульсаров. Оценим период вращения нейтронной звезды, образовавшейся из звезды типа Солнца. Закон сохранения момента импульса при сжатии сводится в данном случае к равенству

$$\frac{R^2}{T} = \frac{r_n^2}{T_n}, \quad (3.2)$$

где T_n — период вращения нейтронной звезды, радиус которой мы оценили раньше, $r_n \sim 10^4$ м. Параметры Солнца известны: радиус $R = 7 \cdot 10^8$ м и период вращения вокруг оси $T = 25$ суток.

Теперь на основе равенства (3.2) получаем период вращения нейтронной звезды $T_n = (r_n/R)^2 T \sim 0,004$ секунды. Несколько маловато для средних значений в 1 секунду, полученных на основе наблюдений, но обнадеживает то, что получен действительно маленький временной интервал, совсем не характерный для космоса. Ну а приблизить нашу оценку к наблюдаемой не очень сложно. Например, можно учесть, что большая доля момента импульса уносится внешней оболочкой при взрыве сверхновой, когда образуется нейтронная звезда. Кстати, пульсар в Крабовидной туманности делает более

30 оборотов в секунду, что уже близко к нашей оценке, а в созвездии Лисички был обнаружен пульсар с периодом 0,00155 с.

С происхождением столь короткого периода пульсаций мы разобрались. Теперь, чтобы окончательно разобраться с пульсарами, дело за малым: надо «всего лишь» понять, как создаются мощные потоки фотонов. Для этого самое время подключить еще одно «действующее лицо» — магнитное поле. Хорошо известно, что даже слабое магнитное поле Земли в состоянии направлять потоки космических заряженных частиц к магнитным полюсам. Обратное тоже верно: частицы вылетают преимущественно в вдоль прямой, проходящей через магнитные полюса.

Для нейтронных звезд, как и для квазаров, поставщиком материала служит окружающая среда. Вещество, находящееся поблизости от нейтронной звезды, притягивается ею настолько интенсивно, что частицы приобретают колоссальную кинетическую энергию. Верхний слой нейтронной звезды состоит из плазмы, которая пронизана мощным магнитным полем. Заряженные частицы, двигаясь по спиралям вдоль магнитных силовых линий к нейтронной звезде, оказываются в конце концов на одном из магнитных полюсов. Их кинетическая энергия передается поверхности, нагревая ее, поэтому температура у полюсов очень высока. Наиболее горячие области имеют площадь около 1 км^2 . Светимость же пропорциональна температуре в четвертой степени, поэтому неудивительно, что именно с полюсов излучение наиболее сильно. Узкую направленность излучению придает все то же магнитное поле. Все частицы, отклонившиеся от генерального направления, направляются магнитным полем нейтронной звезды в противоположный полюс (рис. 3.6). Таким образом, многие нейтронные звезды служат источником узконаправленного излучения энергичных частиц. Образующиеся колоссальные струи раскаленной плазмы и фотонов — джеты (англ. «jet» — «струя») во все большем количестве детектируются с Земли.

Вращение звезды сообщает вылетающим частицам дополнительную энергию, позволяющую преодолеть ее гравитаци-

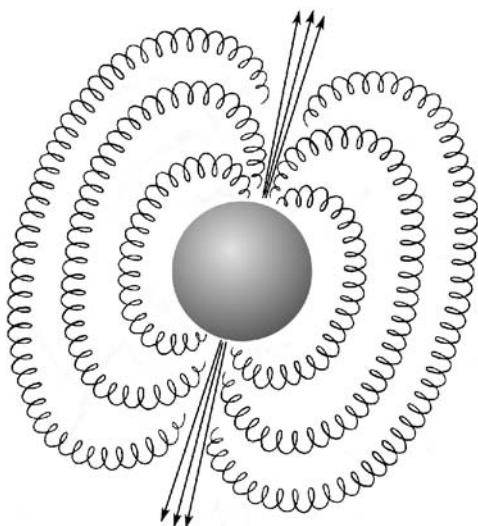


Рис. 3.6. Схематичное изображение движения заряженных частиц в магнитном поле нейтронной звезды.

онное поле. Это подтверждается тем, что период пульсаров со временем уменьшается, а источником потерь кинетической энергии вращения может быть только энергия вылетающих частиц.

Оценим величину магнитного поля нейтронной звезды. Это важно, поскольку слабое поле не в состоянии изменять траекторию энергичных частиц. Примем, что звезда ранее, до превращения в красный гигант и коллапса (быстрого сжатия), имела магнитное поле $B = 10^{-4}$ Тл, обычное для рядовых звезд. Магнитное поле звезды есть сумма магнитных полей ядер, ее составляющих. Сжатие звезды приводит к увеличению концентрации ядер и, соответственно, к увеличению суммарного магнитного поля. Площадь поперечного сечения нейтронной звезды меньше сечения Солнца в $(r_n/R)^2 \sim 10^{10}$ раз. Магнитное поле вблизи поверхности должно возрасти по крайней мере во столько же раз. На самом деле магнитное поле усиливается в 10^{12} раз, достигая значений $10^8 - 10^9$ Тл. Это колоссальная величина. Именно поэтому магнитное поле нейтронной звезды в состоянии управлять потоками высокоэнергичных частиц.

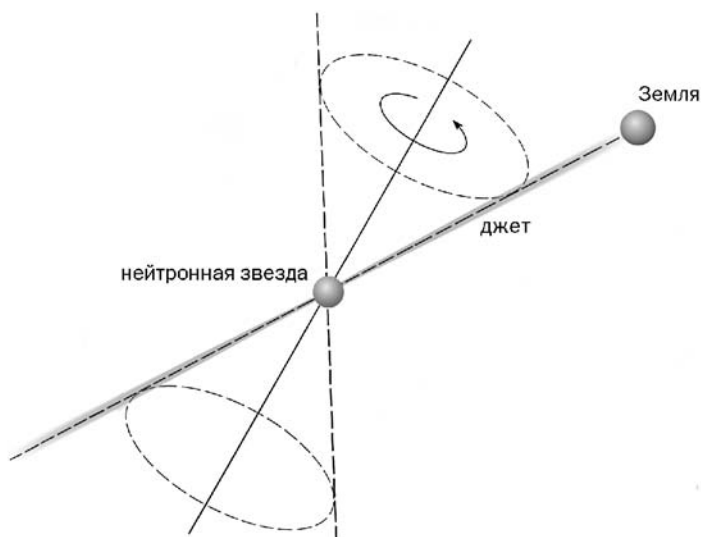


Рис. 3.7. Джет нейтронной звезды описывает в пространстве гигантский конус.

Итак, высокоэнергичные частицы вылетают вдоль прямой, соединяющей полюса этого гигантского быстро вращающегося магнита. Они образуют колоссальные струи раскаленной плазмы и фотонов — джеты. Именно эти фотоны, испущенные нейтронной звездой, мы и воспринимаем как пульсар. Ну а переменность блеска объясняется просто. Магнитные полюса не обязаны лежать на оси вращения. Если они не совпадают с ней, то направление джета описывает конус (рис. 3.7). Мы видим пульсар в те моменты, когда он «смотрит» прямо на Землю. В следующий момент он уже «отвернулся» от нас, и фотоны, им испущенные, пролетают мимо Земли. Если по каким-либо причинам поток вещества на поверхность нейтронной звезды увеличивается, то наблюдаются вспышки излучения в рентгеновском диапазоне. Такие объекты называются барстерами.

До сих пор мы говорили о пульсарах, излучающих в радиодиапазоне, но обнаружены также и рентгеновские пульсары.

Они находятся в двойных системах, и энергия фотонов черпается из аккреции на нейтронную звезду вещества, перетекающего на нее со второго компонента пары — яркой звезды.

Теперь понятно, что «мотором» пульсара служит нейтронная звезда, возникающая в качестве остатка взорвавшейся звезды. Взрывы же звезд, сверхновые, оставляют после себя долгоживущие туманности. Именно в них и следует искать пульсары. Действительно, многие туманности содержат в центре нейтронные звезды. Но не все. Во-первых, вместо нейтронной звезды может образоваться малозаметный белый карлик либо черная дыра. Во-вторых, взрыв сверхновой может быть асимметричным, и тогда нейтронная звезда на большой скорости удаляется с места происхождения. Ну и, конечно же, в-третьих, джет пульсара может не быть направлен на Землю, и в этом случае пульсар существует незаметно для землян.

Массивные черные дыры

За последние годы окрепла убежденность в наличии массивных черных дыр (с массой от миллиона до миллиарда солнечных масс) в центрах большинства галактик. А вот как они там оказались — не совсем ясно. Чтобы понять это, а заодно лишний раз убедиться, что это действительно черные дыры, необходимо собрать как можно больше информации о процессах, проходящих в ближайшей окрестности подобного объекта. Если черная дыра находится в центре галактики с большой плотностью вещества, то это вещество начинает «засасываться» черной дырой. При этом гравитационные силы настолько велики, что заставляют падающее вещество интенсивно сталкиваться и излучать фотоны. Именно это излучение и выдает присутствие черных дыр. Интересный парадокс: черные дыры, оказывается, могут быть самыми яркими объектами во Вселенной!

Именно наличие мощнейшего излучения во всем диапазоне длин волн — от радиоволн до гамма-квантов — и заставляет думать, что в центрах галактик находятся массивные черные дыры. Кроме того, уже обнаружены отдельные звезды,

расположенные близко от черных дыр и очень быстро обращающиеся вокруг них.

Как уже упоминалось в главе 1, классическая черная дыра не содержит внутри себя распределенного по пространству вещества. Вся масса сосредоточена в центре, в микроскопической области с гигантской, планковской плотностью. Именно такую структуру теоретически исследовал К. Шварцшильд в начале XX в. Он понял, что пространственно-временная структура вблизи черной дыры кардинально отличается от структуры пространства Минковского, к которому мы так привыкли. Это различие начинается на некотором расстоянии, называемом гравитационным радиусом, или радиусом Шварцшильда. Из расчетов следовало, что величина радиуса прямо пропорциональна массе черной дыры:

$$r_g = 2GM.$$

Если бы черная дыра была равномерно заполнена веществом, то массе был бы пропорционален объем, а не радиус. Так что черная дыра — действительно странный объект.

Теоретически черные дыры способны не только поглощать окружающую их материю, но и излучать частицы всех видов (так называемое «хокинговское испарение»). Это квантовый эффект, величину которого мы в состоянии оценить. Прежде чем улететь от черной дыры, частица должна родиться, получив от черной дыры энергию и импульс. Квантовая механика утверждает, что импульс частицы, рождающейся в локальной области, в данном случае — «где-то рядом» с черной дырой, не может иметь строго определенного значения. Неопределенность импульса оценивается по формуле:

$$p \sim \frac{\hbar}{l},$$

где l , неопределенность координаты, характеризующей частицу, в нашем случае естественно приравнять гравитационному радиусу, поскольку невозможно более точно указать координаты рождения частицы. Кроме того, это единственный параметр подходящей размерности в нашей задаче. Из выше-

сказанного получаем оценку импульса частиц, излучаемых черной дырой:

$$p \sim \frac{\hbar}{r_g} \quad \frac{\hbar}{2GM} \sim \frac{1}{M}.$$

Из этой формулы видно, что чем больше масса черной дыры, тем менее энергичные частицы она излучает. Аналогичным образом можно оценить время излучения частицы, для простоты — фотона, у которого импульс и энергия особенно просто связаны: $p = E$. Принцип неопределенности, записанный в виде $t \cdot E \sim \hbar$, в данном случае интерпретируется следующим образом: частица со средней энергией E рождается черной дырой в течение времени t . Следовательно, за 1 секунду излучается в виде частиц энергия $I \sim \frac{E}{t}$. Подставляя сюда выражения, написанные выше, получаем интенсивность излучения:

$$I \sim \frac{E}{t} \sim \frac{E^2}{\hbar} \sim \frac{p^2}{\hbar} \sim \frac{\hbar}{4G^2 M^2} \sim \frac{Const}{M^2}.$$

Константа для нас не так важна, как факт обратной пропорциональности квадрату массы черной дыры. Итак, энергия, излученная черной дырой в виде частиц, тем меньше, чем больше ее масса.

Единственным источником энергии для рождающихся частиц служит сама черная дыра. Значит, ее масса со временем уменьшается. Давно подсчитано, что черные дыры с массой меньше 10^{15} г и рожденные во время Большого взрыва, не дожили до наших дней. Они испарились, излучив всю свою энергию и подогрев Вселенную. Повышение температуры не должно быть очень большим, дабы не повлиять на первичный барио- и нуклеосинтез. В далеком будущем именно этот неприятный эффект испарит все черные дыры. А сейчас его влияние в большинстве случаев пренебрежимо мало, но стоит подчеркнуть: чем меньше масса черной дыры, тем больше интенсивность излучения и энергия вылетающих из нее частиц. Чем меньше одиночная черная дыра, тем лучше ее видно!

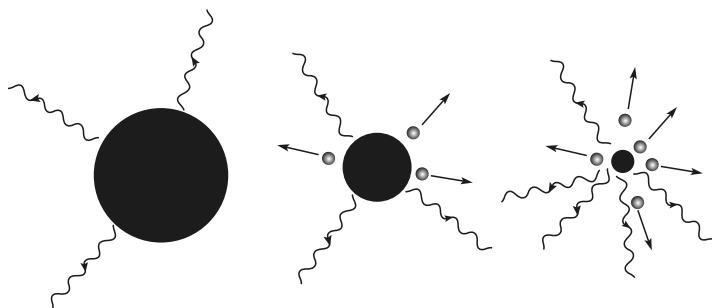


Рис. 3.8. Большая, средняя и маленькая черные дыры. Чем меньше черная дыра, тем больше поток частиц от нее и все больше видов частиц с большими массами.

Итак, черная дыра излучает со временем все интенсивнее. Этот процесс испарения заканчивается мощнейшим всплеском излучения частиц всех видов. Фотоны, являясь полнопроводными частицами, также излучаются, и вполне возможно, что некоторые фотоны, прилетающие на Землю, являются посланцами небольших черных дыр.

Вся эта картина, и так не очень простая, усложняется по крайней мере одним обстоятельством. При теоретическом предсказании свойств черной дыры предполагается, что вся ее масса находится внутри ее гравитационного радиуса, а окружающее пространство — пусто. В действительности вокруг черных дыр витает вещество в самых разных формах: плазма из заряженных частиц, фотоны, планеты, звезды. Все они под действием гравитации стремятся к черной дыре и пересекают ее гравитационный радиус, с точки зрения сопутствующего наблюдателя, т. е. наблюдателя, движущегося вместе с частицами. Но с точки зрения далекого

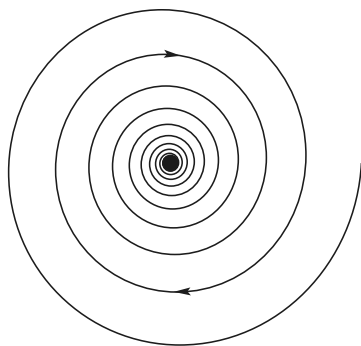


Рис. 3.9. Траектория фотона, притягиваемого черной дырой.

наблюдателя частицы приближаются к горизонту, каковым является гравитационный радиус, бесконечно долго. На рис. 3.9 изображена траектория фотона с точки зрения далекого наблюдателя. Фотон будет двигаться по траектории, все теснее прижимающейся к гравитационному радиусу. Судьба всех остальных частиц аналогична.

Какова же масса черной дыры? Надо ли при подсчете массы учитывать эти подлетевшие частицы? Полной ясности нет до сих пор.

Последней, но не по значению, проблемой остается происхождение сверхмассивных черных дыр. Если черные дыры звездных масс давно предполагались учеными как последняя стадия жизни массивных звезд, то с черными дырами массой в миллионы солнечных все не так просто. Возможно несколько вариантов.

Первый вариант — самый естественный. Звезды и небольшие черные дыры постепенно теряют скорость и «оседают» к центру галактики. Там они и сливаются в очень массивную черную дыру. Недостатком такого сценария является сложность объяснения существования черных дыр в ранний период, когда звезды еще только формировались. Последние могли не успеть потерять достаточно энергии, чтобы образовать черную дыру в центре молодой галактики.

Второй вариант — слияние черных дыр промежуточных масс (начиная с 1 000 солнечных). Похоже, что они действительно существуют, по крайней мере интерпретация наблюдательных данных благосклонна к ним. Такие черные дыры за счет динамического трения могут сравнительно быстро опуститься в центр и образовать черную дыру подходящих размеров. Модель хорошая. Единственное темное облачко — проблема с возникновением черных дыр промежуточных масс.

Отступление.

Немного о динамическом трении

Предположим, что массивное тело движется среди множества покоящихся объектов с малой массой, взаимодействуя с ними на расстоянии. Маленький объект после

пролета поблизости от него массивного тела приобретет некие энергию и импульс, а массивное тело соответственно потеряет. Потери

массивного тела будут незначительны по сравнению с его запасами, но таких потерь будет много, пропорционально концентрации легких объектов. Поэтому массивное тело будет плавно, но непрерывно терять энергию и импульс.

Рассуждения были проведены для покоящихся малых тел, но справедливы и для хаотично движущихся, что более реалистично. При этом некоторые малые тела будут догонять массивное и *передать* ему импульс и энергию, а не наоборот, как предполагалось. Но встречные малые тела будут *отбирать* импульс и энергию. Нетрудно сообразить, что встречных тел будет больше, чем обгоняющих, так что импульс и энергия массивного тела будут все-таки уменьшаться.

Еще один вариант — массивные первичные черные дыры. Вообще, именно черные дыры могут играть важную роль на начальной стадии формирования галактик, собирая материю своей мощной гравитацией. Новые открытия сверхмассивных черных дыр на далеких расстояниях прибавляют уверенности в этом. Такая связь закономерно вызывает вопрос о том, что появилось сначала — галактика или черная дыра. Последние данные указывают на то, что именно черные дыры могут быть причиной формирования галактик. Дальнейшие исследования должны прояснить ситуацию, и в обозримом будущем мы поймем, что появилось раньше: «курица» (галактика) или «яйцо» (массивная черная дыра). Впрочем, Космос — не птицеферма, и ответ может оказаться неожиданным. Например, оба варианта сосуществуют.

Механизм рождения массивных первичных черных дыр

Современные модели инфляции широко используют потенциалы сложной формы, с несколькими минимумами. При этом появляется любопытная возможность образования черных дыр задолго до того, как зажглись первые звезды.

На рис. 3.10 изображен гипотетический потенциал инфляционного поля с двумя минимумами. Пространственная область, схематично нарисованная слева, заполнена полем, величина которого отмечена черной точкой на кривой потенциала. Во время инфляции эта область, как и все остальные, быстро увеличивается в размерах. Кроме того, поле внутри

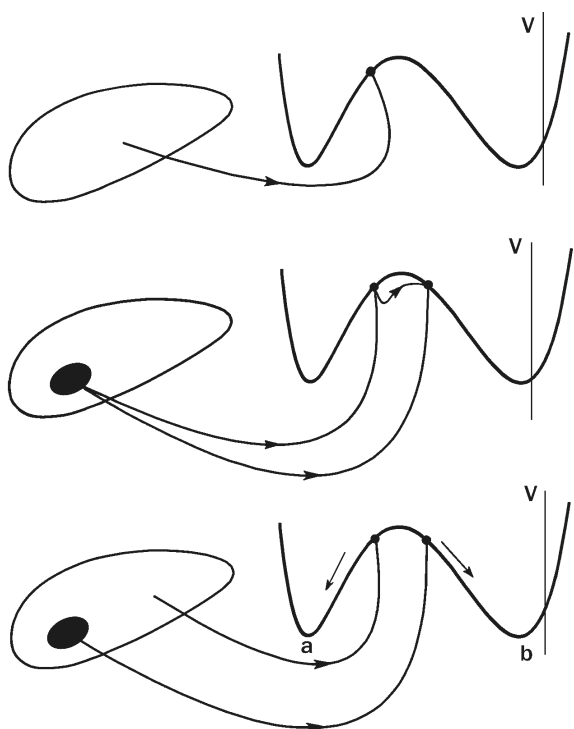


Рис. 3.10.
Квантовое
рождение
полевой
стенки.

области меняется со временем случайным образом за счет квантовых флуктуаций. На среднем рисунке показано, что поле внутри подобласти, закрашенной черным, может случайно оказаться по другую сторону «холма» — максимума потенциала. Затем инфляция многократно увеличит размер этой маленькой области. Когда инфляция закончится, поле начнет быстро скатываться к минимуму потенциала, как шарик с горки. Но в то время, как поле в основной области скатывается к своему минимуму, точке «а» на нижнем рисунке, поле внутри подобласти движется к другому минимуму, «b».

На рис. 3.11, I показано возможное расположение в пространстве обеих областей после того, как поле скатилось в соответствующие минимумы. Расширение пространства во время инфляции многократно увеличило размеры обеих облас-

тей. Поскольку основная пространственная область и ее подобласть увеличились в одинаковое число раз, последняя осталась внутри основной области. Теперь обширная область занята полем «а», в то время как меньшая область содержит поле «b». Ясно, что если мы пойдем (мысленно) из внутренней области наружу в любом направлении, т. е. из одного минимума в другой, то обязательно побываем в точке, где потенциал максимален. Значит, маленькая область окружена замкнутой поверхностью с повышенной плотностью энергии. Возникла так называемая замкнутая полевая стенка.

Дальнейшая эволюция происходит следующим образом. Стенка, обладая избытком энергии, стремится в энергетически наиболее выгодное состояние: она, как мыльный пузырь, приобретает сферическую форму и сжимается (рис. 3.11, II). (Если бы внутри мыльного пузыря не было воздуха, он делал бы то же самое.) Судьба маленькой стенки малоинтересна: она сжимается к центру, происходит столкновение разных ее областей друг с другом, и в результате вся ее энергия переходит в разлетающиеся волны поля, из которого она состоит.

Совсем другая ситуация с большими стенками. Сжимаясь, они доставляют колоссальную энергию в небольшой объем пространства. Эта энергия удерживается гравитационным полем, и образуется компактный объект (рис. 3.11, III). Более подробный анализ показывает, что такие объекты — черные дыры — образуются целыми «семьями», кластерами (рис. 3.12). Как видно, никаких звезд для образования этих массив-

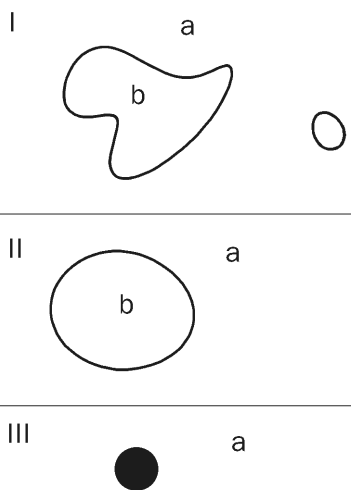


Рис. 3.11. Большие стенки схлопываются в массивные черные дыры, маленькие — исчезают, оставив после себя затухающие колебания поля.

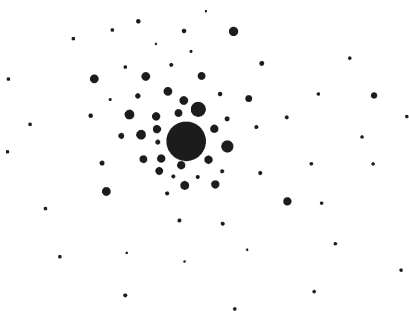


Рис. 3.12. Примерно так мог бы выглядеть кластер массивных первичных черных дыр задолго до появления первичных звезд.

ных первичных черных дыр не требуется! Наоборот, именно такой кластер черных дыр способен создать гравитационную яму и собрать там достаточное количество барионов, из которых затем и образуются звезды. Уже имеются сведения об одиноких сверхмассивных черных дырах, в окружающем пространстве которых отсутствует светящееся вещество. Это мож-

но рассматривать как подтверждение механизма образования массивных черных дыр, рассмотренного выше.

Возможна и другая точка зрения: черные дыры и звезды образуются практически одновременно и по одному и тому же сценарию. Облака водорода и темной материи сжимаются под действием гравитационных сил. Малые облака образуют звезды, а большие — массивные черные дыры.

Джеты

Джеты сопутствуют жизнедеятельности массивных черных дыр в центрах галактик. Но, поскольку они сами являются источниками рентгеновского излучения и, значит, непосредственно видны с Земли, о них стоит поговорить отдельно.

Джеты довольно распространены в космосе — вспомним пульсары. Черные дыры, магнитное поле вокруг которых еще больше, чем вокруг нейтронной звезды, также служат источником джетов. О механизме образования джетов в общих чертах говорилось при обсуждении нейтронных звезд, поэтому скажем здесь об их астрономических наблюдениях.

Современные обсерватории открывают всё новые джеты, вылетающие из центров галактик. Так, ядро хорошо изученной активной галактики Кентавр А образует мощный джет,

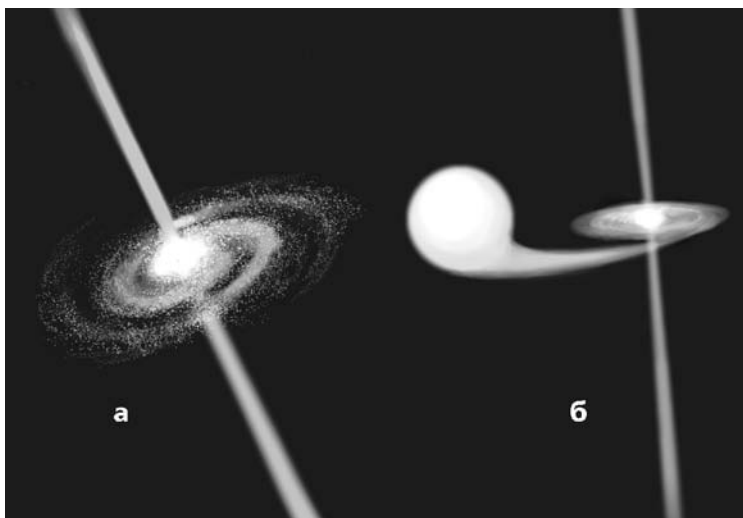


Рис. 3.13. Характерные джеты: а) джет от сверхмассивной черной дыры в центре галактики; б) джет от черной дыры в двойной системе. Вещество со звезды-компаньона перетекает на черную дыру.

состоящий из частиц высоких энергий. Видимый его размер — примерно 4 000 световых лет. Джет испускается сверхмассивной черной дырой, находящейся в центре галактики. Большая часть рентгеновского излучения генерируется при его столкновении с межзвездным газом. Впечатляющие фотографии джетов можно легко найти в Интернете.

Вот еще несколько примеров. С помощью обсерватории «Чандра» астрономы обнаружили в далеком квазаре PKS 1127-145 огромный рентгеновский джет протяженностью более миллиона световых лет, а также рентгеновское затмение, вызванное галактикой, расположенной между Землей и квазаром. Эти два результата дают новую информацию о сверхмассивной черной дыре в центре квазара, а также о содержании кислорода в далекой галактике миллиарды лет назад. Джет является результатом взрывной активности, имевшей место 10 млрд. лет назад вблизи сверхмассивной черной дыры в центре галактики. Он хорошо виден в рентгеновском

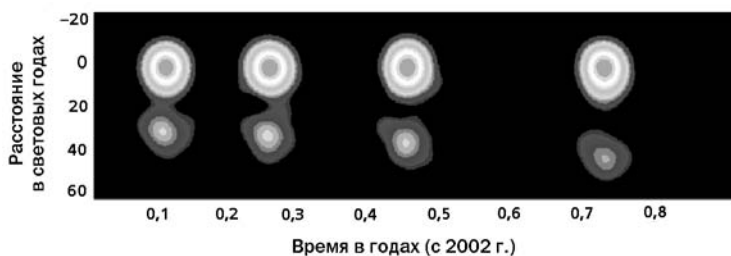


Рис. 3.14. Последовательные изображения источника излучения на протяжении года. Нетрудно оценить кажущуюся скорость источника — примерно 25 скоростей света.

(По: Piner B. G. et al. [30]).

диапазоне потому, что составляющие его частицы сталкиваются с реликтовыми фотонами, передавая им часть энергии. Размер джета и его неоднородность говорят о том, что активность сверхмассивной черной дыры была довольно длительной и перемежающейся, возможно, вследствие слияния других галактик с родной галактикой квазара.

Другой результат, полученный при исследовании этого же джета, — затенение в рентгеновских лучах, вызванное промежуточной галактикой. На своем пути к Земле рентгеновские лучи от квазара PKS 1127-145 проходят через галактику, расположенную на расстоянии около 4 млрд. световых лет от Земли. Атомы различных элементов в этой галактике поглощают часть рентгеновских лучей и тем самым ослабляют их поток. Изучив спектры поглощения, астрофизики смогли определить, что количество кислорода в затеняющей галактике составляет только 20% от его количества в нашей галактике — Млечном Пути. Это очень интересное открытие. Оно лишний раз подтверждает современные представления о том, что такие элементы, как кислород, кремний и сера, нарабатываются внутри звезд во время термоядерного нуклеосинтеза и рассеиваются при взрывах. Со временем благодаря этим врывам галактики обогащаются кислородом и другими элементами, необходимыми для возникновения планет и существования жизни. То, что далекая галактика содержит ма-

ло кислорода, хорошо согласуется с этой картиной, поскольку мы видим ее еще молодой. Так смерть одних структур (звезд) является условием появления других (людей).

Иногда при наблюдении за джетами создается впечатление, что скорость струи превышает скорость света. Это вызывает недоумение: ведь бытует мнение, что ничто не может двигаться со скоростью, большей скорости света. На самом деле быстрее скорости света нельзя передавать лишь энергию. Например, когда гильотина опускается, перекрестие подвижного и неподвижного ножей может двигаться с любой скоростью, в зависимости от угла наклона одного из них. Аналогичная ситуация и с кажущимися «сверхсветовыми» джетами, причем имеется по крайней мере два объяснения. Первое состоит в том, что на джет, поперек него, надвигается газовое облако. Если какая-либо часть облака пересекает джет, она нагревается и начинает излучать фотоны. Следующая часть входит в зону действия джета чуть позже и начинает излучать чуть позже — к этому моменту предыдущая область вышла из зоны действия джета и перестала светиться. Наблюдателю кажется, что горячая область перемещается с большой скоростью, иногда превышающей скорость света. Это в точности «гильотинный» эффект. Второе объяснение более сложно. Оно основано на эффектах специальной теории относительности и изложено в Приложении 8.

Квазары

Квазары, открытые всего 40 лет назад, не на шутку озадачили ученых своей феноменальной яркостью свечения и компактностью размеров. И только недавно астрофизикам удалось понять, откуда эти «динозавры Вселенной» черпают энергию, необходимую для того, чтобы сиять на звездном небе с такой удивительной яркостью.

«Ненужное» открытие

В 1960 г. астрономы Т. Мэттьюз и А. Сендидж, работая на 5-метровом телескопе, расположенном на горе Паломар в Калифорнии, обнаружили ничем не примечательную, еле заметную в

любительский телескоп звездочку 13-й величины в созвездии Девы. И именно из этой «искры» возгорелось пламя!

Все началось с того, что в 1963 г. Мартином Шмидтом было обнаружено, что этот объект (по каталогу ЗС 273) имеет очень большое красное смещение. Значит, расположен он чрезвычайно далеко от нас и очень ярко. Расчеты показали, что ЗС 273 находится на расстоянии 620 мегапарсек и удаляется со скоростью 44 тыс. км/с. Обычную звезду с такого расстояния не увидишь, а на большую звездную систему, типа галактики, квазар (такое название получили эти объекты), будучи очень маленьким, был не похож.

В том же 1963 году ЗС 273 был отождествлен с мощным радиоисточником. Радиотелескопы тогда не были столь точны в определении направления на источник радиоволн, как сейчас, поэтому звездные координаты квазара ЗС 273 были определены путем наблюдения его покрытия Луной в обсерватории Паркском в Австралии. Таким образом, перед астрофизиками предстал совершенно необычный объект, ярко сверкавший в видимом и радиодиапазоне электромагнитных волн. На данный момент обнаружено уже более 20 тысяч таких звездоподобных объектов, часть из которых хорошо видна также в рентгеновском и радиодиапазоне.

Московские астрономы А. Шаров и Ю. Ефремов решили выяснить, как менялась светимость ЗС 273 в прошлом. Они нашли 73 фотографии этого объекта, самая ранняя из которых датировалась 1896 г. Оказалось, что объект ЗС 273 несколько раз менял свою яркость почти в 2 раза, а иногда, например в период с 1927 по 1929 гг., в 3–4 раза.

Надо сказать, что феномен переменной яркости был обнаружен еще раньше. Так, исследования, проведенные в Пулковской обсерватории в 1956 г., показали, что ядро галактики NGC 5548 достаточно сильно изменяет со временем свою яркость. Теперь специалисты понимают всю важность этого наблюдения, но несколько десятилетий назад ученые были убеждены, что излучение от ядер галактик в оптическом диапазоне обеспечивается исключительно миллиардами находящихся там звезд, и даже если несколько тысяч из них по ка-

ким-то причинам погаснут, то с Земли этого заметно не будет. Значит, рассуждали ученые, большинство звезд в ядре галактики должны были бы «мигать» синхронно! Это казалось невозможным, поскольку управлять подобным оркестром не под силу ни одному дирижеру. Таким образом, именно из-за своей абсолютной непонятности это открытие и не привлекло к себе особого внимания.

Дальнейшие наблюдения показали, что изменение интенсивности излучения с периодом несколько месяцев — для квазаров явление обычное, и размер области излучения не превосходит расстояния, которое проходит свет за эти самые несколько месяцев. А для того, чтобы изменения во всех точках области происходили одновременно, нужно, чтобы информация о начинающемся изменении успела дойти до всех точек. Понятно, что материя квазара излучает свет не по команде, а в силу происходящих на нем процессов, но факт синхронности изменения условий и величины излучения указывает на компактность данного квазизвездного объекта. Поперечник большинства квазаров, по-видимому, не превышает одного светового года, что в сотни тысяч раз меньше размеров галактики, а светят они при этом порой как целая сотня галактик.

В спектре излучения квазара представлены все длины волн, регистрируемые современными детекторами, — от радиоволн до жесткого гамма-излучения с энергией квантов в несколько тераэлектронвольт. Тем не менее название «квазар» произошло от английского «quasar» («quasi-stellar radio source») — «звездopodobный источник радиоволн». Объяснение этого факта простое: в начале 1960-х гг. квазары были впервые обнаружены именно в радиодиапазоне. На данный момент лишь у 1% квазаров выявлено заметное излучение энергии в виде радиоволн. Теперь часто можно встретить обозначение «QSO» («quasi-stellar objects») — звездopodobные объекты. Дальнейшие исследования показали, что квазар гораздо больше звезды и даже Солнечной системы. По космическим меркам это все равно ничтожно мало — ведь излучает он как множество галактик. При этом яркость квазаров существенно

меняется за время от суток до месяцев, что совершенно не свойственно обычным галактикам.

Квазары, являющиеся одними из самых древних образований, родились почти одновременно со Вселенной, то есть примерно 13 млрд. лет назад. Причем они не только крайне удалены от нашей Галактики — согласно закону расширения Хаббла (чем дальше от нас объект, тем быстрее он удаляется) расстояние между нами продолжает неуклонно увеличиваться. Так вот, наиболее далекие квазары «убегают» от нас со скоростью, всего на 5% меньшей скорости света.

Квазар — яркая черная дыра?

Всякий, кто стремится пожить на чужой счет, обязательно кончает плохо!

Мао Цзэдун

Как это обычно и бывает, сразу после обнаружения квазаров начались попытки введения новых законов физики, хотя поначалу непонятно было даже, из какого же именно вещества они состоят, столь необычным был спектр их излучения. Впрочем, прошло совсем немного времени, и химический состав излучающих областей квазаров был опознан по спектральным линиям известных химических элементов. Оказалось, что водород и гелий в квазарах идентичны земным, вот только спектры их излучения сильно смещены в красную сторону из-за большой скорости убегания источников.

На сегодняшний день наиболее распространена точка зрения, согласно которой квазар — это сверхмассивная черная дыра, втягивающая в себя окружающее вещество (аккреция). По мере приближения к черной дыре заряженные частицы разгоняются, сталкиваются, что приводит к сильному излучению света. Если черная дыра при этом имеет мощное магнитное поле, то оно дополнительно закручивает падающие частицы и собирает их излучение в тонкие пучки — джеты, разлетающиеся от полюсов.

Под действием мощных гравитационных сил, создаваемых черной дырой, вещество устремляется к центру, но движется при этом не по радиусу, а по сужающимся окружностям, т. е.

по спирали. При этом закон сохранения момента импульса заставляет вращающиеся частицы двигаться все быстрее по мере приближения к центру черной дыры, одновременно собирая их в аккреционный диск, так что вся «конструкция» квазара чем-то напоминает Сатурн с его кольцами. В аккреционном диске скорости частиц очень велики, их столкновения порождают не только электромагнитное излучение, но и энергичные фотоны с более короткими длинами волн (рентгеновское излучение). При столкновениях энергия частиц и скорость кругового движения уменьшаются, они приближаются к черной дыре и поглощаются ею. В центре аккреционного диска температура достигает 100 000 К. Эта область излучает рентгеновские лучи. Чуть дальше от центра температура немного ниже — примерно 50 000 К, там излучается ультрафиолет. С приближением же к границе аккреционного диска температура падает, и в этой области происходит излучение электромагнитных волн все большей длины, вплоть до инфракрасного диапазона.

Часть заряженных частиц направляется магнитным полем к полюсам черной дыры. Там происходят сложные динамические процессы столкновения частиц на фоне мощного вращающегося магнитного поля черной дыры. В результате некоторая доля частиц вылетает из полюсов с околосветовой скоростью. Так образуются наблюдаемые учеными джеты, длина которых достигает 1 млн. световых лет. Частицы в джете сталкиваются с межзвездным газом, излучая радиоволны, которые также улавливаются детекторами, расположенными на Земле.

Отступление.

Предел Эддингтона

Массивная черная дыра сама по себе излучает электромагнитные волны благодаря эффекту, открытому Хокингом. Как мы видели, для больших черных дыр это излучение настолько слабо, что в нашем случае не играет никакой роли. Если же вокруг черной дыры появляется заряженное вещество, то оно устремляется к ней, излучая фотоны. Чем больше вещества вокруг и чем более массивна черная дыра, тем больше фотонов испускается при аккреции. Существует ли предел интенсивности излучения, или количество излучаемой энергии может быть сколь угодно большим?

Оказывается, существует естественный предел, названный в честь ученого, впервые исследовавшего эту проблему, пределом Эддингтона. Физически ситуация довольно понятная. Чем больше ускоряющихся частиц движется к центру, тем интенсивнее суммарное излучение от них, тем больше фотонов летит от центра. При этом они охотно сталкиваются со встречными заряженными частицами и тормозят их движение к центру. Больше фотонов — больше торможение. Наступает момент, когда притяжение частиц черной дырой почти уравнивается их торможением фотонами. Поток частиц стремительно уменьшается. Значит, имеется предел интенсивности излучения.

Выражение для эддингтоновского предела светимости компактных объектов можно получить, если приравнять гравитационную силу F_G , действующую на окружающее вещество со стороны черной дыры, и силу F_{ph} , с которой улетающие фотоны удерживают вещество от падения на центр,

$$F_G = F_{ph}. \quad (3.3)$$

Гравитационная сила $F_G = \frac{GMm_p}{r^2}$. Обратите внимание, что в большом объеме окружающей плазмы есть как протоны, так и электроны, связанные друг с другом кулоновскими силами. Сила тяготения, действующая на протоны, вносит основной вклад (масса протона примерно в 2 000 раз больше массы электрона), и можно учитывать только ее.

Сила давления *улетающих* фотонов, другими словами, сила трения, вычисляется не так легко. Ясно, однако, что эта величина должна быть пропорциональна величине взаимодействия фотонов с плазмой. Интересно, что, согласно точным расчетам, эта величина гораздо больше для электронов, чем для протонов. Возникает любопытная ситуация: на небольшую область плазмы действуют две противоположные силы: сила притяжения действует в основном на протоны, а сила торможения — на электроны. Не разделяются же они благодаря кулоновскому притяжению между ними. Очевидно также, что сила торможения пропорциональна числу улетающих фотонов в секунду и их средней энергии. Значит, $F_{ph} \sim L$, где L — светимость объекта, в данном случае черной дыры. (*Светимость — энергия, уходящая со всей поверхности в секунду.*) После вычислений с использованием равенства (3.3) можно получить максимальную светимость объекта за счет аккреции окружающего вещества:

$$L_{Edd} \approx 10^{38} \frac{M}{M_\odot} \text{ (эрг/с)}.$$

Светимость черных дыр с массами 10^7 – 10^9 солнечных масс, согласно этой формуле, должна составлять 10^{45} – 10^{47} эрг/с, что как раз и наблюдается у квазаров.

Не надо забывать и о том, что свет от далеких квазаров приходит к нам сильно «покрасневшим». Для количественного определения степени покраснения астрономы используют параметр z . Выражение $z + 1$ показывает, во сколько раз увеличилась длина волны электромагнитного излучения, дошедшего от источника (квазара) до Земли. Так, если появляется сообщение, что обнаружен квазар с $z = 4$, то это означает, что ультрафиолетовое излучение с длиной волны 300 нанометров регистрируется на Земле как инфракрасное излучение с длиной волны 1 500 нанометров. Причем для исследователей это большая удача, ведь ультрафиолетовая часть спектра поглощается атмосферой, и в иной ситуации эти линии никогда бы не наблюдались. Здесь же длина волны за счет красного смещения увеличивается — как будто специально для того, чтобы лучи прошли сквозь земную атмосферу и были зарегистрированы приборами.

Согласно другой, менее популярной точке зрения, квазары — это первые молодые галактики, и мы просто наблюдаем процесс их зарождения. Впрочем, существует и промежуточный, хотя вернее было бы сказать «объединенный», вариант гипотезы, согласно которому квазар — это черная дыра, поглощающая вещество формирующейся галактики.

Так или иначе, но предположение о сверхмассивных черных дырах в центрах галактик оказалось плодотворным и способным объяснить многие свойства квазаров. Например, масса черной дыры, находящейся в центре типичной галактики, составляет 10^6 – 10^{10} солнечных масс, и, следовательно, ее гравитационный радиус варьируется от $3 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^{10}$ км, что согласуется с приведенной выше оценкой размеров квазаров.

Новейшие данные также подтверждают компактность объектов, из которых исходит свечение. Например, пятилетние наблюдения позволили определить орбиты 6 звезд, обращающихся около центра излучения в нашей галактике. Одна из

них недавно пролетела со скоростью 9 000 км/с на расстоянии всего 8 световых часов от черной дыры.

Как только вокруг черной дыры появляется материя в любой форме, черная дыра начинает излучать энергию, поглощая вещество. На начальной стадии, когда формировались первые галактики, вокруг черных дыр было много вещества, являвшегося для них своеобразной «пищей», и черные дыры светились очень ярко — вот они, квазары! Кстати, энергии, которую средний квазар излучает за секунду, хватило бы для обеспечения Земли электричеством на миллиарды лет. А один рекордсмен, с номером S 50014+81, излучает свет в 60 тысяч раз интенсивнее всего нашего Млечного Пути с его сотней миллиардов звезд!

Когда вещества в окрестности центра становится меньше, свечение ослабевает, тем не менее ядро галактики продолжает оставаться самой яркой ее областью (это явление, называемое «активным галактическим ядром», астрономам известно давно). Наконец настает момент, когда черная дыра поглощает из окружающего пространства основную часть вещества, после чего излучение почти полностью прекращается и черная дыра становится тусклым объектом. Но она ждет своего часа! Как только в окрестностях появится новое вещество (например, при столкновении двух галактик), черная дыра засияет с новой силой, с жадностью поглощая окружающие частицы межзвездного газа, звезды и планеты. Так что стать заметным квазару удастся только за счет своего окружения. Современная техника уже позволяет различить вокруг далеких квазаров отдельные звездные структуры, являющиеся питательной средой для ненасытных черных дыр.

Впрочем, в наше время, когда столкновения галактик редки, квазары возникать не могут. И судя по всему, это действительно так: почти все наблюдаемые квазары находятся на очень существенном удалении, а значит, прилетающий от них свет был испущен очень давно, еще в те времена, когда рождались первые галактики. Именно поэтому квазары иногда называют «динозаврами Вселенной», намекая не только на их крайне почтенный возраст, но и на то, что они, образ-

но говоря, «вымерли», хотя свет от них продолжает лететь сквозь пространство.

Нежелательные соседи

Столь мощные источники лучистой энергии, как квазары, — опасные соседи, поэтому нам, землянам, можно только радоваться тому обстоятельству, что в нашей Галактике и в ближайшем скоплении галактик они отсутствуют. Их обнаруживают в основном на самом краю видимой части нашей Вселенной, в тысячах мегапарсек от Земли. Но тут волей-неволей возникает естественный вопрос: а не противоречит ли это наблюдение распространенному мнению об однородности Вселенной? Как получилось, что в одних галактиках квазары существуют, а других — нет? Для того, чтобы ответить на эти вопросы, необходимо вспомнить, что свет от наблюдаемых нами квазаров летел миллиарды лет. А это означает, что взору землян квазары предстают в «первозданном» виде, такими, какими они были миллиарды лет назад, и сегодня они, скорее всего, уже утратили свою былую силу. Следовательно, те галактики, которые сейчас расположены недалеко от квазаров, «видят» сильно ослабевшие источники света. Но тогда, если Вселенная однородна, то же самое должно относиться и к нашей Галактике! Нам остается повнимательней присмотреться к ближайшим космическим структурам в попытке отыскать объекты, напоминающие остывшие квазары, квазары-призраки. И такие объекты действительно существуют — это сверхмассивные черные дыры в центрах галактик.

Переменная яркость

Наиболее яркие квазары испускают каждую секунду столько же световой энергии, сколько сотня обычных галактик типа нашего Млечного Пути (это примерно 10^{42} ватт). Чтобы обеспечить выход такого количества энергии, черная дыра каждую секунду поглощает массу, равную массе Земли, за год же «съедается» около 200 солнечных масс. Подобный процесс не может проходить бесконечно долго: когда-нибудь окружающее

вещество иссякнет, и квазар либо перестанет функционировать, либо же станет излучать относительно слабо.

Итак, свечение квазара со временем уменьшается, но что же может заставить его время от времени увеличивать яркость? Чтобы понять механизм этого процесса, вспомним, что черная дыра поглощает любую материю, а не только элементарные частицы. В галактике же, центр которой занят черной дырой, особого порядка нет. Конечно, в целом звезды обращаются вокруг центра, но всегда есть звезды-одиночки или их небольшие скопления, которые нарушают заведенный порядок. Они-то и бывают «наказаны», захватываясь и съедаясь черной дырой. При этом, если звезда «проглатывается» целиком, без предварительного разрушения, то света выделяется мало. Причина состоит в том, что как бы звезда ни была велика, ее суммарный электрический заряд равен нулю. Фотоны же излучаются только заряженными объектами. Поэтому-то не разрушившаяся звезда при втягивании в черную дыру излучает мало света. Она медленно теряет энергию и момент импульса, испуская в окружающее пространство в основном гравитационные волны и постепенно приближаясь к черной дыре. Но если звезда при подходе к шварцшильдовскому (гравитационному) радиусу черной дыры, прохождение которого закрывает путь обратно навсегда, разрушается приливными силами, то дополнительное излучение может быть очень заметно. После поглощения нарушителя порядка свечение квазара возвращается к норме.

В Приложении 9 оценивается величина приливных сил, при которой планеты и звезды могут быть разрушены.

Поставщики информации

Разобравшись в общих чертах с устройством квазаров, ученые пытаются использовать их в качестве инструмента для исследования Космоса. Например, наблюдая эффект микролинзирования, можно попробовать обнаружить темные объекты с массой, примерно равной массе Земли. Они выдают себя, отклоняя свет квазара так, что мы видим как бы кратковременное увеличение его блеска. Если такие тела будут

обнаружены, то, возможно, будет решена проблема темной материи.

Сейчас для многих ученых открытие нового квазара означает открытие новой черной дыры. Так, изучение недавно открытого квазара с красным смещением $z = 6,43$ указывает на то, что черная дыра, сердце квазара, очень массивна — примерно миллиард масс Солнца. Следовательно, массивные черные дыры появились очень рано. Этот вывод крайне важен для космологии.

Очень любопытными оказались спектры электромагнитного излучения квазаров. Поскольку светятся не сами черные дыры — сердце квазара, — а поглощаемое вещество, то по спектрам удастся установить химический состав вещества, падавшего на конкретную черную дыру десятков миллиардов лет назад. Оказалось, что в нем уже были тяжелые элементы! Но тяжелые элементы рождаются в ходе ядерных реакций в звездах. Значит, первые звезды появились очень рано — примерно через 500 млн. лет после Большого взрыва. Эта информация заставила специалистов внести коррективы в модели образования галактик.

Родственники

По мнению ученых, галактики, в центрах которых находятся большие черные дыры, могут обуславливать существование таких различных для наблюдателя объектов, как квазары, активные галактические ядра, сейфертовские галактики и радиогалактики, а также блазары. Сейфертовскими называются галактики, в видимой области спектра похожие на обычные спиральные галактики, но с очень активными ядрами; мощность их излучения к тому же сильно меняется со временем, указывая на происходящие в них грандиозные процессы. Радиогалактики являются огромными эллиптическими галактиками с мощным излучением в радиодиапазоне.

Все зависит от того, под каким углом их видит наблюдатель и насколько интенсивна аккреция. Если черная дыра расположена к Земле «ребром» аккреционного диска, то окружающее вещество экранирует ее центральную часть, смягчая

излучение, т. е. делая его более длинноволновым. Мы воспринимаем такой объект как радиогалактику, поскольку максимум излучения находится в радиодиапазоне. Если же на наблюдателя направлен один из джетов (пучок высокоэнергичных элементарных частиц) активного ядра какой-либо галактики, то виден блазар — источник жесткого гамма-излучения переменной яркости.

Планеты

Теория формирования планетной системы вокруг молодой звезды развита довольно хорошо, и в том, что у звезд есть планеты, сомнений нет. Со времен Лапласа и Канта принято считать, что планеты формируются из того же газового облака, что и звезда, вокруг которой они обращаются. Тем не менее все не так просто. Оказывается, планеты зарождаются в виде агломератов камней и льда, которые затем начинают сливаться с образованием протопланет все больших размеров. Интересно было бы посмотреть на такое столкновение — ведь их скорость составляет 10–40 км/с. На Марсе и Меркурии обнаружены гигантские кратеры — шрамы от столкновений, есть они и на Земле. И только затем вокруг планет появляется газовая оболочка.

Приводим для справки характеристики планет Солнечной системы. Все величины отнесены к параметрам Земли.

Планеты Солнечной системы

Планета	Наименьшее удаление от Солнца	Масса	Диаметр	Продолжительность года
Меркурий	0,312	0,055	0,382	0,240
Венера	0,730	0,815	0,949	0,615
Земля	1,000	1,000	1,000	1,000
Марс	1,405	0,107	0,532	1,880
Юпитер	5,037	317,938	11,209	11,862
Сатурн	9,164	95,181	9,449	29,458
Уран	18,60	14,531	4,007	84,015
Нептун	30,31	17,135	3,883	164,788
Плутон	30,09	0,002	0,180	247,697

Кроме того, имеются кометы, астероиды, а также множество астероидов за границей Плутона (пояс Койпера).

Очевидно, должны быть планеты и у других звезд. Но как их разглядеть? Планеты находятся сравнительно близко от звезды, и свет последней сильно мешает обнаружению таких тусклых объектов, как они. Основные методы косвенного обнаружения планет вокруг звезд — это эффект Доплера и эффект затмения звезды. Эффект Доплера основан на том, что звезда и планета движутся вокруг общего центра масс. Изменение скорости движения звезды из-за влияния планеты — не более нескольких десятков метров в секунду. Тем не менее измерения электромагнитных спектров настолько точны, что позволяют выявить этот эффект по небольшим смещениям спектральных линий. Скорость звезды — источника излучения — немного меняется со временем, что приводит к периодическому сдвигу всех частот спектра. Кстати, и наша Земля движется не вокруг Солнца, а вокруг их общего центра тяжести, так что в споре Коперника и Птолемея неправы оба, но Коперник — «в гораздо меньшей степени»: центр масс системы Солнце—Земля лежит глубоко внутри Солнца. Если же около звезды есть и другие планеты, то ситуация усложняется.

Еще один способ обнаружения планет вокруг других звезд — использование эффекта «затмения». Обращаясь вокруг звезды, планета может время от времени оказываться на прямой, соединяющей эту звезду и Землю, что приведет к небольшому периодическому ослаблению блеска звезды. Блеск звезды уменьшается совсем немного — на тысячные доли, и тем не менее современные приборы способны зафиксировать этот эффект.

Недавно американским астрономам удалось разглядеть планеты, находящиеся вне Солнечной системы. Сведения о планетах в созвездиях Пегаса и Лиры были получены в инфракрасном диапазоне с помощью космического телескопа Spitzer. Планеты, напоминающие Юпитер, состоят из газа, нагретого до 700 °C, и обращаются на небольшом расстоянии от своих звезд. Это — первые планеты, обнаруженные непосредственно. По косвенным признакам астрономам с 1995 г.

было известно о существовании более сотни планет. Все они являются газовыми гигантами типа Юпитера и находятся к своим звездам ближе, чем Меркурий к Солнцу. Еще один пример. Астрономы обнаружили планету типа нашего Сатурна около звезды HD 149026, похожей на наше Солнце. Период обращения планеты вокруг звезды составляет 2,87 дня (сравните с земными 365 днями). Сейчас одной из важнейших задач является обнаружение планет земного типа.

Судьба планетной системы непосредственно связана со звездой, в районе которой она обитает. Звезда типа нашего Солнца на последней стадии эволюции превращается в красный гигант, размер которого примерно равен радиусу земной орбиты. Меркурий и Венера исчезнут внутри Солнца, Марс, Юпитер и более далекие планеты не пострадают. Судьба Земли неопределенна, хотя условия на ней в любом случае станут непригодными для жизни. Недавно астрономы обнаружили планету около белого карлика, доказав, что планета (но не ее население) может пережить взрыв своей звезды.

Итак, что происходит с планетами, понятно. А каково влияние планет на красный гигант во время его расширения? Рассмотрим эту ситуацию на примере Земли и Солнца. Когда Солнце превратится в красный гигант, Земля может оказаться внутри него. При этом температура среды составляет около 2 000 К, а плотность — 10^{-12} г/см³. Скорость звука в газовой среде красного гиганта составляет примерно 3,5 км/с, что намного меньше орбитальной скорости Земли (29 км/с). Поэтому Земля, двигаясь со сверхзвуковой скоростью, создает ударную волну и нагревает газ до 10 тыс. К. Это уже высокая температура, и электромагнитное излучение такого газа можно было бы зарегистрировать удаленными приборами.

В 2002 г. звезда V838 Единорога испытала подряд три вспышки с интервалом в несколько месяцев. Одна из интерпретаций этого явления состоит в том, что при переходе к стадии красного гиганта звезда поглотила одну за другой три планеты, обращавшиеся на близких орбитах.

Возможно также и чисто механическое влияние планет на красные гиганты. Например, такая планета, как Юпитер, спо-

собна значительно увеличить скорость вращения красного гиганта. Ведь если размер звезды, превратившейся в красный гигант, увеличился в 100 раз, то ее момент инерции — в 100^2 раз, а значит, благодаря закону сохранения момента импульса угловая скорость ее вращения уменьшится в те же 100^2 раз. Но момент импульса орбитального движения Юпитера в 100 раз превышает момент импульса звезды, поэтому ускорение вращения за счет поглощения планеты будет значительным.

Следующий эффект — это обогащение красного гиганта изотопами типа лития-6. Этот изотоп быстро выгорает в ядерных реакциях, и в старых звездах его концентрация ничтожна. Но внутри планет литий способен сохраняться. После испарения планеты внутри красного гиганта литий может попасть в его атмосферу и будет обнаружен по спектрам излучения.

Межзвездная среда

У читателя может создаться впечатление, что звезды и планеты движутся в абсолютной пустоте. Это не так: межзвездная среда заполнена многочисленными обитателями, хотя и не такими яркими. Тем не менее эти «серые мышки» космоса многочисленны и разнообразны. Нередко они вырастают до «серых кардиналов», оказывая влияние на основные процессы, происходящие в галактиках. Основными компонентами, из которых состоит межзвездная среда, являются газообразные водород и гелий, газовые облака, пыль, магнитные поля, реликтовые фотоны и нейтрино, а также космические лучи. Кроме того, возможно существование еще не открытых слабо взаимодействующих частиц, образующих скрытую массу. Их количество должно быть велико, поскольку их вклад в массу галактик должен в несколько раз превышать вклад от всех звезд.

Межзвездный газ внутри галактик не может похвастаться высокой плотностью — примерно 1 атом в 1 см^3 (мы дышим воздухом, плотность которого $\sim 3 \cdot 10^{19}$ молекул в 1 см^3). И все-таки плотность газа между галактиками еще в миллион раз меньше. Химический состав газа очень похож на состав

звезд, что неудивительно — ведь звезды миллиарды лет взрывались, поставляя входившие в их состав элементы в космическое пространство. В тех же областях, где температура межзвездного газа мала, можно ожидать объединения атомов в молекулы. Действительно, в космосе присутствуют молекулы водорода, окиси углерода, воды, аммиака, формальдегида, этилового спирта и даже глицина — одной из 20 аминокислот, входящих в состав белков. Обнаружены, однако, и массивные облака газа с температурой около 10^8 К. Они, конечно, уже ионизированы.

Во второй половине XX в. были открыты облака молекулярного водорода, масса которых составляла миллион солнечных масс. Их размеры колеблются от 1 парсека (10 солнечных масс) до 100 парсек с массой в миллионы масс Солнца. Именно эти облака, по современным представлениям, являются колыбелью новых звезд. Если в таком облаке образовалась повышенная концентрация газа, то гравитационные силы сжимают газ, заставляя молекулы двигаться в центр с ускорением. Столкновения молекул газа становятся все более частыми, энергия столкновения — все большей. В какой-то момент начинаются ядерные реакции с выделением энергии, что знаменует собой рождение новой звезды. Даже если новорожденная звезда и не видна непосредственно, ее обнаруживает инфракрасное излучение пыли, нагретой этой звездой. В год в галактике в среднем рождается десяток звезд.

Области антиматерии

Одной из основных нерешенных космогонических проблем является, как это ни удивительно, само существование звезд. Дело в том, что, с точки зрения теории элементарных частиц, свойства частиц, из которых состоят звезды, и античастиц практически идентичны. Тогда почему же все вещество во Вселенной состоит только из частиц? Объяснений много, о чем говорилось в главе 2, но общепризнанного нет. Некоторые из них допускают существование относительно небольших областей антиматерии. Их поиски уже ведутся,

имеется и обоснование причин их возникновения. Обнаружить такие области можно по процессу аннигиляции на ее границе.

Из главы 2 мы знаем, что аннигиляция, т. е. взаимное уничтожение частицы и античастицы с образованием других частиц, например фотонов, происходила на раннем этапе жизни нашей Вселенной. Сохранившиеся реликтовые области антиматерии могли бы быть обнаружены по потокам фотонов, летящих от них на Землю. Энергия такого фотона зависит от типа аннигилирующих частиц. В данном случае проще всего детектировать фотоны от аннигиляции электронов и позитронов. Вся их энергия, заключенная преимущественно в их массе, конвертируется в 2 фотона. Энергия фотонов оказывается фиксированной и равной массе электронов, по 0,511 МэВ каждый. Вообще, один из пиков на рентгеновском спектре различных источников ($\sim 0,5$ МэВ) почти всегда ассоциируется с аннигиляцией электронов и позитронов. Кстати, если этот процесс происходит вблизи источника сильного гравитационного поля, например у поверхности нейтронной звезды, то хорошо заметно гравитационное красное смещение фотонов, вырвавшихся из мощнейшего поля тяготения. Если аннигиляция происходит на большом удалении от Земли, то приходится учитывать и космологическое красное смещение. Так что встреча мира и антимира, возможно, постоянно происходит в нашей Вселенной, просто мы пока ничего знаем об этих драматических событиях.



Рис. 3.15. Механизм свечения областей антиматерии в космосе, если, конечно, таковые существуют.

Космические лучи

Не бойся медлить — бойся остановиться.

Китайская пословица

Землю непрерывно бомбардируют потоки частицы высоких энергий, прилетающие к нам из космического пространства. Эти потоки не совсем удачно назвали космическими лучами. В основном они состоят из таких стабильных частиц, как протоны, электроны, фотоны и нейтрино, но есть и примесь антипротонов, позитронов и различных ядер. Сейчас идет интенсивный поиск легких антиядер. Обнаружение даже одного ядра антигелия будет означать, что в нашей галактике имеются звезды из антивещества — другим способом их не создашь. Расчеты показывают, что вероятность образования такого ядра при обычном столкновении частиц слишком мала.

Хотя космические лучи изучаются более 60 лет, непонятного осталось много.

Важным моментом является и то, что некоторые частицы имеют колоссальную энергию, вряд ли в обозримом будущем достижимую на ускорителях. Такие частицы особенно интересны: во-первых, непонятно, какой природный ускоритель смог разогнать их до таких энергий, и, во-вторых, немаловажно их взаимодействие с частицами детекторов — при таких-то энергиях много чего необычного может родиться!

Максимальные энергии частиц в космических лучах — порядка 10^{20} эВ. А это 10 джоулей, уже вполне солидная энергия — 30 таких элементарных частиц, и можно вскипятить 1 грамм воды. Но это — предельные энергии для космических частиц.

Очевидно, что чем меньше энергия частиц, тем больше таких частиц прилетает из космоса. Зависимость числа частиц от энергии довольно хорошо измерена. Мы же рассмотрим две основные проблемы — механизмы ускорения частиц до колоссальных энергий и парадокс Грейзена—Зацепина—Кузьмина (ГЗК, Greisen—Zatsepin—Kuzmin, GZK).

Обсудим сначала эффект ГЗК. Все начинается с простого замечания — протоны, двигаясь в космическом пространстве, сталкиваются с реликтовыми фотонами. Энергия этих фото-

нов очень мала — порядка $2 \cdot 10^{-4}$ эВ, поэтому и вероятность столкновения, и потеря энергии обычно пренебрежимо малы. Но чем больше энергия летящего протона, тем вероятнее его взаимодействие с реликтовыми фотонами и тем оно сильнее. Вспомните, во что превращается ласковый ветерок, когда вы высовываете руку из окна быстро движущегося поезда. При энергиях протонов $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ (предел ГЗК) они так быстро теряют энергию в столкновениях с реликтовыми фотонами, что просто не могут долетать до нас из других галактик, не потеряв львиной доли своей энергии. Но мы их наблюдаем! В чем же дело? Может быть они рождаются внутри нашей галактики? Не похоже, поскольку поток таких протонов изотропен, а галактика имеет явно выраженные диск и ядро. Остаются внегалактические источники. Это серьезная проблема, на решение которой направлены значительные силы ученых. Что же предлагается?

А. Нейтрино — единственные частицы, которые в состоянии долетать до нас из других галактик без потери энергии. Непосредственно этот вариант не проходит, но некоторое усложнение приводит к цели. Прилетевшее нейтрино может провзаимодействовать внутри галактики с какой-либо гипотетической частицей, из которых, например, состоит скрытая масса Галактики, и до Земли долетают уже частицы — результаты реакции. Чтобы повысить вероятность подобных процессов, делаются дополнительные предположения с использованием теории струн и дополнительных пространственных измерений. Кроме нейтрино, рассматриваются и другие варианты: например, распады различных массивных объектов, которые образовались сразу после окончания инфляции и равномерно распределены по Галактике.

Б. Струны. При самопересечении струны вполне возможно появление энергичных частиц.

В. Пара из монополя и антимонполя¹ при аннигиляции дает нужный результат. Увы, более детальные расчеты показали, что в галактике таких пар на 10 порядков меньше, чем нужно.

¹ Монополь — гипотетический магнитный заряд.

Г. Сверхтяжелые частицы, родившиеся на заре Вселенной и медленно распадающиеся со временем. Заодно они вносят вклад в скрытую массу. Здесь трудности связаны с объяснением механизма рождения таких частиц и объяснением их очень неохотного распада.

Д. Нарушение соотношения между энергией частицы массы m и ее импульсом $E = \sqrt{p^2 + m^2}$, вытекающее из специальной теории относительности. Несмотря на то, что деятельность по опровержению специальной теории относительности сильно дискредитирована профанами, серьезные ученые рассматривают и этот вариант. Возможно, предполагают они, обычная связь импульса частицы и ее энергии при таких высоких энергиях уже не выглядит так просто. Конечно, они имеют обоснования этой идеи в рамках современной теории многомерной гравитации (пока не подтвержденной).

Обратимся теперь к проблеме ускорения космических частиц до высоких энергий. Наиболее популярным является механизм Ферми, основанный на «отражении» частиц от быстро движущихся магнитных полей, хаотически расположенных в межзвездном пространстве. Кроме того, мощные магнитные поля возникают при взрывах сверхновых. Чтобы понять суть этого механизма, простого на идейном уровне, рассмотрим нерелятивистскую частицу, влетающую в *покоящуюся* область магнитного поля. Поскольку сила Лоренца, создаваемая магнитным полем, направлена все время перпендикулярно скорости, частица начинает двигаться по окружности. Совершив поворот, она возвращается в область, где магнитное поле отсутствует. Таким образом, магнитное поле отражает частицу в направлении, противоположном первоначальному. При этом энергия частицы сохраняется, если пренебречь ее излучением. Итак, встретив неподвижную область магнитного поля, частица меняет свою скорость на точно такую же, но движется в противоположном направлении.

Ускорение частиц возникает при встрече с областью магнитного поля, движущейся *навстречу* частице. Поскольку мы уже хорошо представляем динамику частицы в неподвиж-

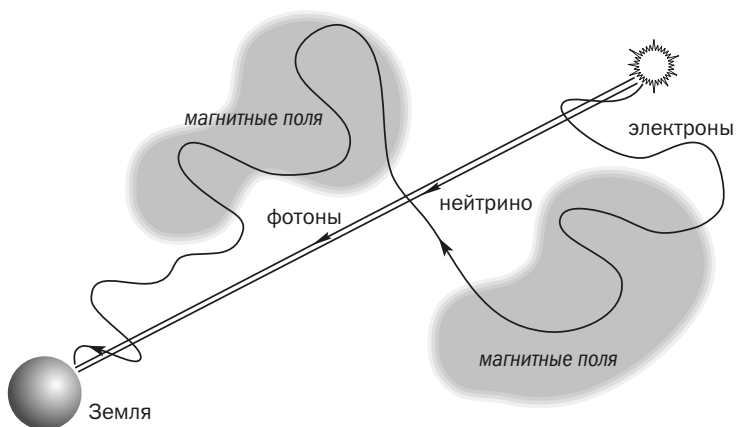


Рис. 3.16. Траектории частиц от космического источника. Показаны частицы, в конце концов попавшие на Землю.

ном поле, перейдем в систему отсчета, в которой магнитное поле покоится. Скорость частицы v в этой системе получается простым преобразованием Лоренца:

$$v = (v - V_{\text{magn}}) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}.$$

Здесь v — скорость частицы в системе отсчета, связанной с магнитным полем, V_{magn} и v — наблюдаемые с Земли скорости магнитного поля и влетающей в это поле частицы. Как уже件件件, после вылета из неподвижного магнитного поля частица будет иметь скорость $-v$. Возвращаясь в исходную систему, получаем скорость частицы после столкновения:

$$v = \frac{(v - V_{\text{magn}}) + V_{\text{magn}}}{1 - \frac{v V_{\text{magn}}}{c^2}}.$$

Поскольку лоренц-фактор > 1 , скорость частицы после столкновения со стенкой, движущейся навстречу, увеличится.

Конечно, если магнитные поля в межзвездном пространстве движутся хаотично, то некоторые магнитные поля будут двигаться *от* частицы, а не *навстречу* ей. Анализ, подобный предыдущему, показывает, что в этом случае частица после столкновения замедлится. Но встречных полей больше по

чисто кинематическим причинам. (Нетрудно проверить это экспериментально. Вы идете вниз по эскалатору метро и считаете людей, стоящих справа, а значит, движущихся с вами в одном направлении. Одновременно считаете число людей, стоящих на другом эскалаторе и движущихся вместе с ним вверх, вам навстречу. Последних будет больше, чем первых, при равной концентрации людей на эскалаторах.) Таким образом, хаотически движущиеся в космическом пространстве магнитные поля ускоряют частицы.

Существуют и другие хорошо известные механизмы ускорения частиц, например ударные волны при взрыве сверхновых. Более того, последние наблюдения за сверхновыми указывают на то, что именно они производят наиболее энергичные частицы. Есть и необычные варианты. Например, не так давно была обнаружена двойная система голубой гигант—пульсар. В то время как первый снабжает окружающее пространство частицами, излучающими в оптическом диапазоне, второй, благодаря мощному магнитному полю, ускоряет частицы до энергий в несколько тераэлектронвольт.

В космических лучах особенно важными для наблюдений являются фотоны. Обычно фотоны высоких и сверхвысоких энергий называют гамма-квантами. Их изучению посвящено целое направление исследований — гамма-астрономия.

Гамма-вспышки

Гамма-астрономия не только разрешает старые загадки, но и ставит новые. Так, по сегодняшний день нет единого объяснения происходящим примерно раз в сутки мощным всплескам гамма-излучения. Еще в 1960-е гг. эти всплески были зафиксированы американскими военными спутниками, предназначенными для слежения за ядерными и термоядерными взрывами. Искали мощное излучение от испытания атомных бомб потенциального противника, а обнаружили следы космических катастроф.

Есть много предположений о возможных механизмах генерирования мощных гамма-вспышек, когда выделяется невообразимое количество энергии. Наиболее популярна гипотеза,

согласно которой так заканчивают свое существование двойные системы, состоящие из нейтронных звезд или черных дыр. Такая парочка совершенно незаметна в оптическом диапазоне. Только когда, потеряв благодаря излучаемым гравитационным волнам вращательную энергию, компаньоны падают друг на друга, выделяется огромное количество энергии, излучаемой в том числе и в гамма-диапазоне. Обычно эта энергия — порядка 10^{41} эрг/с, но случается, что и 10^{45} эрг/с, что неплохо сравнить со светимостью Солнца, равной $2 \cdot 10^{33}$ эрг/с. Находятся они на расстояниях 10–14 млрд световых лет, т. е. взрывы происходили в те времена, когда зародались первые звезды. Интересно, что если бы при взрыве энергия распространялась во все стороны равномерно, то ее источник не имел бы объяснения с точки зрения современных законов — уж слишком большая энергия требуется. Скорее всего, эти взрывы являются узконаправленными, как дже-ты от нейтронных дыр, но намного более мощными.

Как же определили расстояние до вспышек гамма-излучения? На таких расстояниях надежным (хотя и не очень точным) методом является использование красного смещения. Но для его использования требуется знание длины волны испущенного света, а не только того, который улавливается детекторами. Но если природа вспышки неизвестна, то нельзя ничего сказать и об испускаемом свете. Круг замкнулся. Тем не менее астрофизики нашли выход. Гамма-вспышка нагревает окружающие газовые облака, они начинают светиться. Но в те времена облака состояли из водорода и гелия, спектр излучения которых хорошо известен. Вот с их-то помощью можно узнать расстояние до облаков, а значит, и до их соседа, так эффектно взорвавшегося.

Как это часто бывает, информацию о происходящем сообщали соседи.

Однако первый надежно идентифицированный источник гигантской вспышки 5 марта 1979 г. оказался SGR-пульсаром («Soft Gamma Ray» — «мягкие гамма-лучи»), периодически вспыхивающим в рентгеновском диапазоне. Причем находится он даже не в нашей галактике, а в ее соседке — Большом

Магеллановом Облаке. Только вот сегодняшние нерегулярные вспышки намного мощнее того страшного взрыва, что был зафиксирован в 1979 г.

Современные детекторы гамма-излучения способны регистрировать фотоны с энергиями порядка 100 млрд. электрон-вольт. Наилучшие результаты достигаются при выводе этих детекторов в космос, поскольку энергичные фотоны (гамма-кванты) порождают в атмосфере множество вторичных частиц. Впрочем, эти ливни частиц, образующиеся в атмосфере, также поставляют ученым информацию о частицах, их породивших.

Одно из преимуществ фотонов по сравнению с заряженными частицами состоит в том, что фотоны движутся практически по прямой от источника к детектору. Это дает возможность установить местонахождение космического источника. Заряженные же частицы сильно отклоняются в межзвездном пространстве магнитными полями, имеющими довольно запутанную структуру (см. рис. 3.16). Поэтому даже если заряженная частица вылетела по направлению к Земле, это совсем не означает, что она туда попадет. Лишь самым энергичным частицам удастся долететь до Земли по почти прямой траектории. Имеются, конечно, и нейтральные частицы, нейтрино, которые не отклоняются в магнитных полях. К сожалению, их очень трудно, хотя и возможно, регистрировать.

Галактики

Все объекты, о которых говорилось выше, — это одна большая система, связанная гравитационными силами (кроме, конечно, космических лучей) и называемая галактикой. Современным телескопам доступны примерно 10^{10} – 10^{11} галактик, в каждой из которых — миллиарды звезд. Известный многим Млечный Путь (от древних греков: *galaktikós* — млечный), видимый как слабо светящаяся полоса на ночном небе, — не что иное, как наша Галактика, на окраине которой мы и находимся.

Первым упоминаемым в литературе каталогом звезд был каталог Гиппарха. До последнего времени он считался полностью утерянным, но был недавно обнаружен на глобусе, кото-

рый держит на плечах статуя Атланта Фарнезе¹ (рис. 3.17). В середине XIX в. первым, кто понял, что туманные пятнышки, наблюдаемые в телескопы, — это гигантские сборища звезд, был англичанин Уильям Парсонс. В 1784 г. французский астроном Шарль Мессье составил первый каталог из 108 туманных объектов, доступных для наблюдений на инструментах того времени. Объекты, вошедшие в каталог Мессье, обозначают буквой М с порядковым номером. Так, например, М31 — обозначение туманности Андромеды. Лишь 11 объектов из этого каталога оказались газовыми туманностями, остальные — шаровыми и рассеянными скоплениями и галактиками.



Рис. 3.17. Атлант Фарнезе.

В 1920-х гг. Эдвин Хаббл, наблюдая за цефеидами в туманности Андромеды, пришел к выводу, что она является внегалактическим объектом, и тем самым доказал существование галактик. Более того, оказалось, что сами галактики входят в скопления галактик размером в несколько мегапарсек, а также в сверхскопления размером в несколько десятков мегапарсек. Но раз есть скопления, должны быть и пустоты. И они действительно существуют, их характерный размер — 100 Мпк. Поэтому когда говорят об «однородности Вселенной», подразумевают, что это так, только начиная с размеров в 100–200 Мпк.

Можно ли вообще говорить об однородности видимой части Вселенной, если существуют такие колоссальные неоднородности?

¹ Римская статуя II в. н. э., установленная около 1550 г. на вилле кардинала Алессандро Фарнезе. Ныне хранится в одном из музеев Неаполя.

родности? Для ответа на этот вопрос вспомним, что размер всей Вселенной составляет $\sim 6\,000$ Мпк, а также то, что объем пропорционален кубу размера. Теперь ясно, что таких ячеек размером в сотню мегапарсек в видимой части Вселенной содер­жится как минимум 27 000. Для статистических расчетов более чем достаточно.

В 1929 г. Хаббл сделал одно из величайших открытий в космологии: обнаружил явление разлета галактик (точнее, скоплений галактик) и, следовательно, увеличение расстояния между всеми скоплениями галактик.

Свет от галактик практически не поглощается межзвездной средой, конечно, если на его пути не попадется какое-нибудь газо-пылевое облако. Именно поэтому исследование излучения от далеких галактик позволяет не только приблизиться к видимым границам Вселенной, но и выяснить, что же происходило на самом раннем этапе ее существования, когда галактики, которые нас окружают, еще только формировались. Сейчас многих из них уже не существует — за миллиарды лет произошло множество событий: галактики рождались, разбегались и сливались, поглощая друг друга и образуя новые. Судя по всему, Млечный Путь, галактика, в которой мы живем, через несколько миллиардов лет сольется со своей ближайшей соседкой — туманностью Андромеды.

Как уже говорилось, галактики образуют скопления и сверхскопления. Так, наша Галактика (пишется с большой буквы), Млечный Путь, соседняя галактика — туманность Андромеды и еще 34 более мелкие галактики входят в состав так называемой Местной группы, размером порядка миллиона парсек.

Конечно, все галактики неповторимы, тем не менее их условно разделили на несколько видов. Наиболее распространенными являются спиральные галактики. Они имеют центральное ядро, состоящее из близко расположенных звезд, и плоский диск, также из звезд. Именно в таком диске и находится наше Солнце. Сферические или эллипсоидальные галактики — более старые. Их размеры колеблются от одного до сотен килопарсек. Было обнаружено и множество совершенно

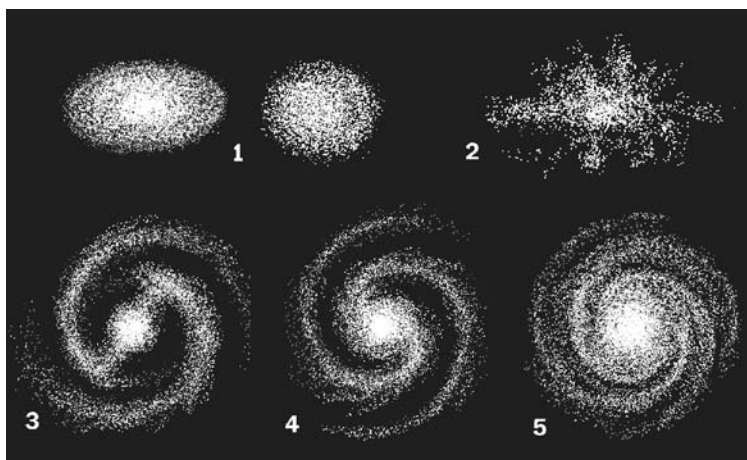


Рис. 3.18. Типы галактик: 1 — эллиптические; 2 — неправильная, 3–5 — спиральные.

бесформенных галактик, они были введены в классификацию под названием «неправильные» (irregular). Существенную часть их массы составляет межзвездный газ. Соотношение числа галактик разных типов выглядит примерно так: спиральных — 50%; эллиптических — 20%; неправильных — 10%.

Напомню, что в центрах большинства галактик расположены черные дыры с массами от миллиона до миллиарда солнечных масс. Вещество центральной части — газ, звезды, планеты — засасывается черной дырой. Ускорение заряженных частиц, создаваемое гравитационными силами, велико, поэтому падающее вещество интенсивно излучает фотоны. Наша Галактика также содержит в своем центре черную дыру массой 3 миллиона солнечных масс, что было надежно установлено, в частности, по измерениям орбит звезд, излучающих в инфракрасном диапазоне и находящихся близко к центру.

Нашему Солнцу участь быть поглощенным черной дырой пока не грозит. Во-первых, мы находимся далеко от нее, во-вторых, обращаемся вокруг центра, и закон сохранения момента импульса не позволяет нам сменить орбиту на более близкую.

Обсудим причины возникновения вращения галактик. Без него все звезды давно осели бы в центре галактики, образовав черную дыру колоссальных размеров, что неприятно. Раньше, когда галактики только образовывались, размер нашей Вселенной был намного, раз в 20, меньше, и галактики находились в непосредственной близости друг от друга. Сейчас, кстати, среднее расстояние между ними порядка 1 мегапарсека. А в те времена, сталкиваясь «боками», галактики обменивались и энергией, и моментом импульса, так что, разбегаясь, они вращались в разные стороны. (Кстати, вся эта благостная картина — не окончательно установленная истина.)

Из сказанного ясно, что направления вращения галактик совершенно случайны, и если сложить моменты импульса всех галактик, то должен получиться точный ноль. Пока же, судя по наблюдательным данным, нуля не получается. Возможно, это означает, что наша Вселенная вращается как целое. Но даже если это и так, ее угловая скорость ничтожно мала, так что на материале школьных учебников это не отразится.

Близкими родственниками квазаров, как уже говорилось, видимо, являются сейфертовские галактики и радиогалактики. Возможно, что все это разнообразие типов — просто различные этапы эволюции галактик.

Млечный Путь

Наши представления о Галактике развивались постепенно, начиная с 1920-х гг., когда Шепли впервые установил, что Солнце находится далеко от центра Галактики.

Наша Галактика, Млечный Путь, является достаточно большой: диаметр ее диска — около 10^5 световых лет, масса — примерно от 750 миллиардов до триллиона солнечных масс. В нее вносят вклад межзвездный газ, газо-пылевые облака, скрытая масса, ну и, конечно, звезды. Количество звезд также определено довольно приблизительно — от 200 до 400 миллиардов. Масса межзвездного газа составляет около 10% от массы всех звезд.

Все объекты обращаются вокруг общего центра масс, названного галактическим центром. Наша Солнечная система

расположена во внешних областях Галактики, на расстоянии 28 тысяч световых лет от галактического центра и 20 световых лет от плоскости диска. Расположение Солнца не очень удобно для изучения центральных областей Галактики: их закрывают звезды, находящиеся в диске и более близкие к центру. Так, если в окрестностях Солнца, в диске, одна звезда приходится на 16 кубических парсек, то в центре Галактики в одном кубическом парсеке находится 10 000 звезд.

К сожалению, в области, где расположено Солнце, довольно много межзвездного вещества, поглощающего свет и делающего звездный диск почти непрозрачным для видимого света в некоторых направлениях, особенно в направлении ядра Галактики. Если бы не это поглощение, ее центр производил бы яркое впечатление на землян. Поэтому для изучения наиболее интересной центральной области приходится оглядываться на соседей. В частности, туманность Андромеды, галактика М31, — прекрасный объект для наблюдений, поскольку она находится вблизи от нас, а плоскость ее диска наклонена по отношению к нам. Немаловажно и то, что она похожа на нашу Галактику. Наблюдения позволили обнаружить более сотни точечных источников рентгеновского излучения. Как считают астрофизики, часть из них может быть черными дырами промежуточных масс, т. е. от 100 до $10^5 M_{\odot}$.

Галактика состоит из диска, гало и ядра. Ядром, или балджем, называется наиболее компактная область в центре Галактики. Здесь предполагается существование массивной черной дыры. В галактическом диске сосредоточены основная масса звезд, большинство молекулярных облаков, большинство нейтронных звезд и других остатков сверхновых. В диске же рождаются новые звезды. Гало имеет приблизительно сферическую форму и содержит наиболее древние звезды, появившиеся еще при рождении Галактики. Часто они собираются в шаровые скопления. Скорость вращения диска и гало различна, диск вращается побыстрее.

Именно звезды диска нашей Галактики образуют знаменитый Млечный Путь, который мы видим как светящуюся полосу, тянущуюся через все небо. Наше Солнце движется вокруг

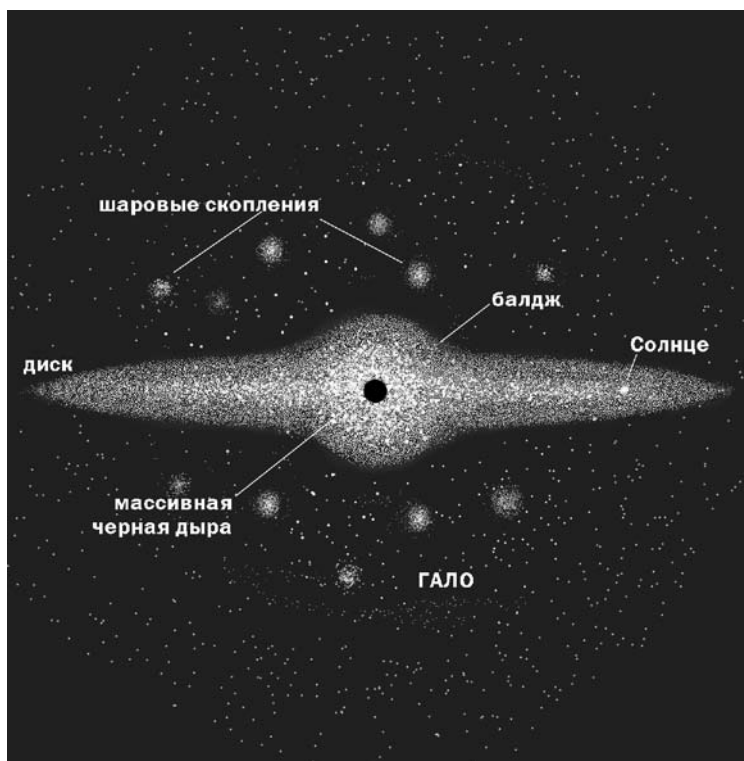


Рис. 3.19. Схематичное изображение Галактики.

галактического центра по почти круговой орбите со скоростью приблизительно 250 км/с, а это в 300 раз больше скорости пули. Но даже при такой скорости мы вместе с Солнцем делаем один оборот приблизительно за 220 миллионов лет. Солнечная система за время своей жизни совершила около 20 оборотов.

Определение возраста Галактики — одна из забот астрономов. А как все-таки определить возраст галактик независимыми методами? Могла ли наша Галактика родиться, скажем, миллион лет назад? Известно несколько методов, и все они не противоречат друг другу. Например, определяя кон-

центрацию радиоактивных химических элементов и зная период их полураспада, удалось найти возраст самых старых горных пород на Земле — около 3,8 млрд лет. Возраст самых древних метеоритов — 4,56 млрд лет. Недавно был предложен интересный метод определения возраста галактик — по содержанию бериллия в звездах шаровых скоплений. Он основан на том, что концентрация бериллия растет со временем благодаря ядерным реакциям внутри звезд. Наши знания об этих ядерных реакциях позволяют теоретически вычислить концентрацию бериллия в любой момент времени. Сравнение теории и наблюдательных данных позволяет оценить возраст звезды.

Интересны, конечно, наиболее старые звезды, а они находятся в шаровых скоплениях. Обычно эти скопления содержат 10^4 – 10^5 звезд, плотность которых плавно падает с удалением от центра скопления. Влияние на них галактического диска, в котором расположена основная масса звезд, мало, и шаровые скопления практически не меняют своих свойств с момента рождения. Поэтому для исследования лучше всего использовать шаровые скопления в гало. Определив по содержанию бериллия возраст самых старых звезд, можно оценить возраст шарового скопления, а значит, и Галактики. Были выбраны две звезды из шарового скопления NGC 6397. Их возраст оказался равным $13,6 \pm 0,8$ млрд. лет, т. е. близок к возрасту нашей Вселенной. Возраст же галактики не может быть меньше возраста входящих в него звезд.

Итак, наша Вселенная, наша Галактика и некоторые звезды имеют примерно одинаковый возраст в 14 млрд. лет.

Эволюция галактик

Устоявшегося мнения о механизмах зарождения галактик и об их эволюции пока не существует. Согласно наиболее распространенной иерархической модели, первыми структурами, которые сформировались в ранней Вселенной, были маленькие протогалактики, массы которых составляли всего несколько тысяч солнечных масс. Появляется все больше доказательств того, что главными движущими силами эволюции галактик и



Рис. 3.20. Взаимодействующие галактики. Снимок сделан камерой космического телескопа «Хаббл».

Фото с интернет-страницы

<http://astro.pu.ru/astro/win/gallery/photo.asp?ID=172>

причиной их разнообразия являются взаимодействие и столкновение галактик друг с другом.

При этом не следует думать, что столкновение двух галактик будет представлять собой бесчисленные столкновения между входящими в них звездами. На самом деле вероятность столкновения двух звезд очень незначительна, потому что размеры звезд пренебрежимо малы по сравнению со средним расстоянием между ними. Но пространство между звездами заполнено газом и пылью, и именно эти компоненты взаимодействуют, когда галактики сталкиваются. Гравитационное взаимодействие приводит к нарушению структуры



Рис. 3.21. Взаимодействующие спиральные галактики. Снимок сделан камерой космического телескопа «Хаббл».

Фото с интернет-страницы
<http://astro.pu.ru/astro/win/gallery/photo.asp?ID=174>

газопылевой среды и перемешиванию вещества галактик. Ну и, конечно, к хаотизации движения звезд.

При столкновении газовых облаков происходит их интенсивное сжатие, возникают ударные волны. После того, как газ сжался, гравитационные силы сжимают его все больше, что приводит к образованию в галактиках новых звезд. Светимость этих звезд высока в первые несколько миллионов лет, поэтому их обнаружение является наиболее очевидным признаком произошедшего столкновения двух галактик.

Взаимодействие галактик радикально влияет на их структуру. Например, две спиральные галактики могут слиться и сформировать эллиптическую. Большие галактики поглощают маленькие, увеличивая свой размер.

Все эти процессы длятся миллионы лет — не так уж много по астрономическим масштабам, но человеческой жизни не хватит на то, чтобы зафиксировать все стадии этого процесса. Для того чтобы увидеть его динамику, нужно наблюдать несколько пар взаимодействующих галактик в различные моменты их слияния и затем составить последовательность изображений во времени. А можно провести компьютерное



Рис. 3.22. Взаимодействие двух спиральных галактик, известных как «Мышки» из-за их длинных «хвостов». «Хвосты» образуются вследствие различия гравитационных сил, действующих на ближнюю и дальнюю стороны каждой галактики. Они уже проходили одна сквозь другую и, вероятно, будут сталкиваться снова и снова, пока не сольются. Снимок сделан камерой космического телескопа «Хаббл».

Информация с интернет-страницы <http://www.astronet.ru/db/msg/1176649>

моделирование столкновения и сравнить результат с наблюдениями. Конечно, чтобы создать модель, наиболее близкую к действительности, надо оперировать сотнями миллиардов «точек»-звезд. Такие системы великоваты даже для современных компьютеров, но обычно достаточную точность дает и гораздо меньшее число «точек». Сейчас ученые уже взялись за моделирование эволюции всей Вселенной — с момента образования и до наших дней.

Многие активные галактики также являются частью взаимодействующих или сливающихся двух или нескольких галактических систем. Такое взаимодействие всегда изменяет распределение межзвездного газа и пыли в галактиках. Гигантские облака молекулярного газа и пыли устремляются, сталкиваясь друг с другом, к центральным областям галактик, где в результате начинается мощный процесс формирования звезд или возникает активное галактическое ядро. Рождение звезд из газопылевых облаков происходит и сейчас. В нашей Галактике появляется в среднем несколько новорожденных в год. Родившиеся звезды образуют рассеянные скопления и

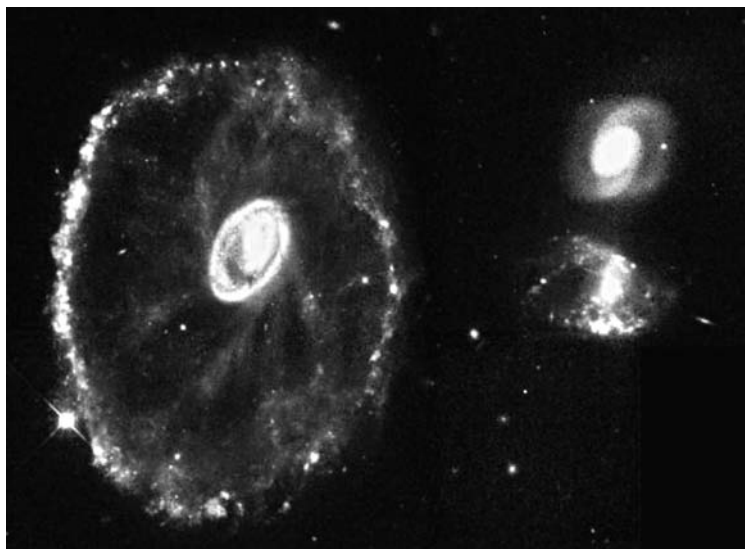


Рис. 3.23. Галактика Колесо телеги, образовавшаяся в результате прохождения меньшей галактики через большую. «Ободок» имеет в диаметре 100 тысяч световых лет, в нем находятся очень яркие массивные звезды: от точки столкновения стала распространяться волна звездообразования, подобно тому, как разбегаются волны по поверхности воды. Большая галактика вначале, скорее всего, была спиральной, похожей на нашу.

Информация с интернет-страницы <http://www.astronet.ru/db/msg/1165439>

звездные ассоциации — слабо связанные группы по $\sim 10^2 - 10^3$ штук. Они постепенно рассеиваются в пространстве.

Многие из очень далеких, а следовательно, очень старых галактик носят следы разрушения, что свидетельствует о том, что в ранней Вселенной столкновения галактик были скорее правилом, чем исключением. Численные расчеты показывают, что большинство скоплений галактик уже прошло через несколько таких столкновений. Наша Галактика тоже является результатом слияния небольших галактик. Да и сейчас карликовая галактика пытается присоединиться к нашему Млечному Пути, а еще 8 близкорасположенных карликовых галактик сольются с ним через некоторое время. Через несколько

миллиардов лет произойдет столкновение между Млечным Путем и нашей соседкой, галактикой Андромеды, находящейся от нас на расстоянии двух миллионов световых лет.

Впрочем, новейшие исследования спектров галактик поставили под сомнение эту стройную картину. Действительно, если большие галактики возникли в процессе слияния маленьких, то возраст звезд в больших и маленьких галактиках должен быть примерно одинаков. Но похоже, что это не совсем так! Большие галактики, по крайней мере шаровые скопления внутри них, состоят из старых звезд, появившихся около 13 млрд. лет назад. Будущие исследования должны уточнить картину.

Характерной чертой активных галактик является переменность их блеска. Сначала астрономы даже путали их с переменными звездами, но, оценив расстояние по красному смещению, поняли, что одиночная звезда просто не была бы видна. Так, переменная звезда в созвездии Тельца оказалась галактикой, излучающей в радиодиапазоне. По-видимому, переменность блеска галактик объясняется теми же причинами, что и переменная яркость квазаров: случайным увеличением плотности вещества около массивной черной дыры в центре галактики.

ИНСТРУМЕНТАРИЙ

Цель оправдывает средства.

Н. Макиавелли

Астрофизика еще совсем недавно была наукой, в которой наблюдения и выводы имели довольно-таки неопределенный характер. Но благодаря совершенствованию средств наблюдения ситуация очень быстро меняется. Новая техника наблюдений позволила гораздо более детально рассмотреть многие объекты на небе и сравнить результаты наблюдений, сделанных в разных частотных диапазонах. Точность и разнообразие измерений возросли многократно. И произошло это очень своевременно, поскольку мысль теоретиков не стояла на месте. Более того, различные модели, объясняющие строение Вселенной, размножались, как кролики в Австралии. Теперь же благодаря многократно возросшей полноте и точности получаемой информации удастся отделить зерна от плевел или, по крайней мере, определить более верное направление поиска истины.

Астрономия преобразилась с середины XX века, когда прогресс физики и техники дал ей новые приборы и инструменты, позволяющие вести наблюдения в самом широком диапазоне волн — от метровых радиоволн до гамма-лучей, длины волн которых составляют миллиардные доли миллиметра. В результате мы имеем нарастающий поток информации о космических явлениях. Фактически все крупнейшие открытия последних лет — результат современного развития новейших областей астрономии, которая сейчас превратилась по истине во всеволновую.

Современная техника стала настолько совершенной, что позволяет изучать свойства галактик, находящихся на рассто-

яниях вплоть до 13–14 млрд световых лет. Именно столько лет летел свет, испущенный галактикой, перед тем как попасть в детектирующее устройство. Но наша Вселенная сама родилась 14 млрд лет назад. Значит, мы теперь в состоянии наблюдать первые галактики, возникшие в ранней Вселенной. Мы видим галактики такими, какими они были в молодости. Кстати, сейчас, в момент наблюдения, видимая исследователем галактика находится в совершенно иной точке пространства, а возможно, и не существует вовсе — скорее всего, она уже давно слилась с другой галактикой, образовав более крупную систему.

Чем ближе к нам галактика, тем меньше времени надо свету, чтобы преодолеть расстояние до нас. Например, если мы *в данный момент* видим две галактики, одну на расстоянии 7 млрд. световых лет, а другую — 12 млрд. световых лет, то свет от второй был испущен на 5 млрд. лет раньше, и мы видим ее соответственно более юной. Наблюдая галактики на все более далеких расстояниях, мы имеем дело со все более молодыми объектами и таким образом изучаем всю временную историю нашей Вселенной.

Детекторы электромагнитного излучения — важнейшие инструменты для изучения свойств космоса. Длины волн варьируются в широких пределах: радиоволны, оптический диапазон, рентгеновское излучение, жесткое гамма-излучение, фотоны сверхвысоких энергий. Для исследования этих диапазонов электромагнитного спектра, обладающих различной спецификой, применяются совершенно разные детекторы. Но бесценную информацию можно получить не только при изучении электромагнитных волн. Частицы также несут на себе печать космических процессов, их породивших. Кстати, фотоны сверхвысоких энергий могут детектироваться приборами, предназначенными для космических частиц типа протонов и электронов.

Какие же возможности находятся в распоряжении современных астрономов и космофизиков? Попробуем как-то классифицировать их, хотя четкой границы часто не существует. Одно и то же устройство не в состоянии одинаково успешно

обнаруживать частицы любых энергий, так что, характеризуя прибор, обычно указывают интервал энергий, в котором детектор наиболее эффективен.

Еще одно существенное различие между детекторами — их расположение относительно поверхности Земли. Детекторы могут быть размещены в космосе, на поверхности Земли и под землей. Каждое расположение имеет свои достоинства и недостатки: так, наземный детектор может быть сделан очень большим, а детектору в космосе не мешает земная атмосфера; подземный детектор способен регистрировать слабовзаимодействующие частицы типа нейтрино — все остальные частицы поглощаются толщей Земли над и под ним.

Конечно, подобная классификация — вещь несколько условная. Например, в какой раздел попадает идея использования в качестве детектора нейтрино одного из спутников Юпитера? Дело в том, что детектирование нейтрино представляет особую проблему. Они настолько редко взаимодействуют с веществом, что, например, наша Земля не является для них препятствием. Поэтому нейтринные детекторы должны быть как можно более массивными: тогда среди множества нейтрино, пролетающих через детектор, найдется какое-нибудь, которое столкнется с ядром материала детектора. Мысль использовать космические тела в качестве детектора серьезно обсуждается в научной литературе. Масса такого спутника Юпитера, как Европа, достаточно велика, чтобы нейтрино сверхвысоких энергий (порядка 10^{21} эВ) иногда сталкивались с атомами, из которых он состоит. Излученные в столкновении фотоны предполагается улавливать «фланирующими» неподалеку исследовательскими станциями. Еще одним преимуществом такого метода является низкая температура спутника.

Слишком высокая температура — вообще один из главных врагов экспериментаторов. Высокая температура детектора означает большую скорость частиц, его составляющих. Значит, при столкновении частиц детектора друг с другом возрастает вероятность имитации события, которое ищут экспериментаторы. Таким образом, температурные эффекты — один из источников фона, событий, которые честный

Характеристика диапазонов электромагнитного излучения

Название диапазона	Длины волн	Энергия кванта
Радиоволны	2 мм — 10 км	
Инфракрасное излучение	760 нм — 2 мм	
Видимый свет	400–760 нм	1,6– 3 эВ
Ультрафиолетовое излучение	10–400 нм	3–100 эВ
Рентгеновское излучение		100 эВ — 100 кэВ
Гамма-излучение		> 100 кэВ

экспериментатор должен исключить из рассмотрения. И далеко не всегда это сделать легко. Так вот, у Европы, спутника Юпитера, температура ледяного покрова 90 К, в то время как у детектора, расположенного в антарктическом льду, — около 240 К. Существенная разница.

Детекторы электромагнитного излучения

Радиотелескопы

Приемники электромагнитного излучения в радиодиапазоне, каковыми являются радиотелескопы, служат источником бесценной информации. Поскольку чем больше длина волны света, тем слабее он взаимодействует со средой, в радиодиапазоне можно разглядеть то, что скрывается за космической пылью и молекулярными облаками.

Излучение от далеких объектов, падающее на параболическое «блюдо» радиотелескопа, отражается от него и попадает на дипольную антенну, расположенную в фокусе. Длины волн электромагнитного излучения, с которыми работают наземные радиотелескопы, лежат в интервале от 0,2 до 30 см, что много больше оптического диапазона. Поэтому, чтобы разглядеть детали, отражатель радиотелескопа должен быть гораздо больше зеркала или линзы оптического телескопа.

Иногда несколько одинаковых радиотелескопов работают совместно. Расстояние между ними может быть довольно большим, что эффективно увеличивает полезную площадь поверхности. Сейчас надежды астрофизиков связаны с радиотелескопом VLBI (Very Long Baseline Interferometer — «интерферо-

метр с очень большой базой»). Его части находятся на нескольких континентах, что позволяет различить объекты с угловым размером 0,001 . Направленный на Луну, он позволил бы различать предметы размером с автомобиль.

Инфракрасные телескопы

Это телескопы, работающие с излучением в интервале длин волн от 10^{-4} до 0,2 см. Основная проблема для них — фоновое излучение, поскольку волны этого диапазона интенсивно излучаются всеми телами на Земле. Чтобы снизить уровень помех, эти телескопы и все приборы, с ними связанные, стараются охладить до как можно более низких температур жидким азотом или даже жидким гелием. Помехой является также атмосфера Земли, что заставляет размещать аппаратуру на высоких горах.

Некоторые телескопы, работающие в инфракрасном диапазоне

Название обсерватории	Местонахождение	Размер, м	Дата запуска
UKIRT (United Kingdom Infrared Telescope — Инфракрасный телескоп Великобритании)	Мауна-Кеа, Гавайи	3,8	1978 г.
FIRST (Far Infra-red Space Telescope — Космический телескоп для дальней инфракрасной области)	В космосе	3,0	Начнет работу в 2007 г.
NASA IRTF	Мауна-Кеа, Гавайи	3,0	С 1979 г.
SIRTf (Space Infrared Telescope Facility; переименован в Spitzer Space Telescope)	Орбита вокруг Солнца	0,85	2003 г.
ISO	Околоземная орбита	0,6	1995 г.

Оптические телескопы

На протяжении веков единственным источником сведений о звездах и Вселенной для астрономов был видимый свет. Наблюдения с применением оптических телескопов уже принесли и продолжают приносить бесценную информацию. И это при том, что из всего многообразия видов электромагнитного

Сведения о некоторых телескопах

Название обсерватории	Местоположение	Размер зеркала, м	Примечание
Keck	Мауна-Кеа, Гавайи	10,0	36 зеркальных сегментов
Keck II	Мауна-Кеа, Гавайи	10.0	
Hobby-Eberly	Маунт Фаукс, Техас	9.2	
Subaru	Мауна-Кеа, Гавайи	8,3	
VLT (Very Large Telescope — Очень большой телескоп)	Серро Параналь, Чили	8,2	Интерферометр из 4 приемников
Gemini North	Мауна-Кеа, Гавайи	8,1	Дают полный обзор небесной сферы
Gemini South	Серро Пачон, Чили	8,1	
Next Generation Space Telescope (Космический телескоп следующего поколения)	Гало Галактики	7–9	Запустят в 2007 г.
Hale	Маунт-Паломар, Канада	5,0	Лучший из предыдущего поколения (1950–1990 гг.)
New Technology (Новая технология)	Серро Ля Сийа, Чили	3,5	
Hooker	Маунт-Вилсон, Канада	2.5	С его помощью было открыто расширение Вселенной
Hubble Space Telescope («Хаббл»)	Околосветовая орбита	2.4	Установлен на спутнике

излучения, испускаемого небесными телами, используется очень небольшой интервал длин волн, соответствующий возможностям человеческого глаза, — от 400 до 700 нанометров.

Исследования космоса в оптическом диапазоне начались очень давно, еще в те времена, когда человек просто разглядывал звезды. Это пассивное созерцание было достаточно продуктивным и не только позволяло предсказывать лунные и солнечные затмения, но и помогло сформулировать основные законы небесной механики. Однако истинным началом астрономии стало изобретение Галилеем телескопа.



Рис. 4.1. Телескопы «Кек I» и «Кек II» на горе Мауна-Кеа (Гавайи).
Фото с интернет-страницы <http://www.zavasek.narod.ru/telescope.html>

Первый оптический телескоп был фактически просто подзорной трубой. Современные телескопы, используемые в астрономии, сильно усовершенствовались и отличаются от своих предков как внешним видом, так и конструкцией. Лишь сама идея осталась неизменной — концентрация лучей света, собранных с большой площади линзы или зеркала, на небольшом участке, где находится детектор. Эти уникальные приборы, созданные совместным трудом ученых, инженеров и программистов, позволяют разглядеть такие объекты и получить информацию о таких космических явлениях, существование которых ранее и не предполагалось. Им мы обязаны тем прорывом в космологии и понимании устройства Вселенной, который происходит на наших глазах.

Детекторы рентгеновского и гамма-излучения

Все чаще астрономам приходится выносить свои приборы в космос. Причина проста: наблюдения с Земли коротковолнового электромагнитного излучения в чистом виде невозможны, поскольку электромагнитные волны поглощаются атмосферой тем сильнее, чем меньше их длина. Ультрафиолетовые лучи

ослабляются воздухом гораздо эффективнее, чем видимый свет. Рентгеновское и гамма-излучение затухают еще сильнее и практически не достигают поверхности Земли. Избавиться от этого крайне нежелательного эффекта можно, только разместив приборы в открытом космосе. Космическое пространство настолько пустынно, что наша тонкая 10-километровая атмосфера для космических лучей равнозначна миллиардам световых лет межгалактического пространства. Впрочем, и наблюдения с земной поверхности могут рассказать ученым много интересного о космических лучах, но об этом чуть позже.

Первые исследования в гамма-диапазоне были проведены в 1962 г., когда ракета подняла детектор в верхние слои атмосферы¹. Измерения длились всего три минуты, но и этого времени хватило, чтобы обнаружить совершенно новый необычный объект, который позднее идентифицировали как нейтронную звезду. В 1960-е гг., до начала регулярных исследований с помощью специальных рентгеновских обсерваторий «Ухуру» и «Эйнштейн», было известно всего два источника рентгеновского и гамма-излучения — Крабовидная туманность и странная звезда Скорпион X-1. В настоящее время детекторы гамма-излучения установлены на многих спутниках, и они, летая в безвоздушном пространстве, ведут непрерывный мониторинг дальнего космоса. Запуски двух новых рентгеновских обсерваторий: «Чандра» (Chandra), принадлежащей NASA, и «Ньютон» (XMM-Newton) Европейского космического агентства — позволили получить качественно новую информацию об источниках рентгеновского излучения в космосе. Обсерватория GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) должна быть запущена в 2005 г. Она предназначена для регистрации фотонов с энергией 20–300 МэВ.

Рентгеновская и гамма-астрономия сегодня являются одним из важнейших инструментов в изучении космоса. Количество открытых источников жесткого электромагнитного излу-

¹ Во времена «холодной войны» ученым из МГУ удалось убедить военных при испытательных пусках баллистических ракет разместить на них детекторы вместо макетов ядерных боеголовок. Всего было запущено четыре установки разных модификаций. Подробнее см. [7]. — *Примеч. ред.*



Рис. 4.2. Космическая обсерватория «Чандра».

Иллюстрация с сайта <http://chandra.harvard.edu>

чения все время растет. Причем это не обычные спокойные звезды, которым, чтобы быть достаточно яркими в рентгеновском диапазоне, надо было бы иметь температуру поверхности, равную многим миллионам градусов, а разные экзотические объекты, в том числе и находящиеся на самом краю Вселенной. Большинство обнаруженных сегодня источников гамма-излучения имеют нетепловую природу и связаны с различного рода нестационарными и взрывными процессами.

Электромагнитные волны с длиной меньше 300 нм полностью поглощаются атмосферой Земли, поэтому детекторы для их регистрации должны доставляться в самые высокие слои атмосферы или устанавливаться на спутниках. Но вот вопрос: если это так сложно и наверняка дорого, то нужны ли такие детекторы? Ведь у нас уже есть телескопы для больших длин волн. Оказывается, нужны, и очень. Дело в том, что каждая точка пространства во Вселенной имеет свою температуру. В основном это, конечно, температура реликтового излучения, равная 2,73 К, но есть звезды, есть квазары, горячие облака водорода, есть черные дыры, испускающие джеты, есть, наконец, и гамма-всплески. Интервал температур в этих источниках достигает миллионов градусов. Любая нагретая область

испускает свет самых разных длин волн — одних больше, других меньше. Ну а максимум интенсивности излучения, согласно закону Вина, приходится на длину волны, однозначно связанную с температурой: чем выше температура некоторой области пространства, тем меньше длина волны преобладающего излучения. Поэтому горячие точки Вселенной излучают преимущественно в коротковолновой части спектра.

Кроме того, наблюдения в рентгеновском диапазоне информативнее, чем в видимой области спектра, при помощи обычных телескопов. Например, излучение самых разных длин волн поступает к нам от центральной области Галактики, содержащей черную дыру. Согласно законам электродинамики, чем с большим ускорением движется заряженная частица, тем более энергичные кванты света она испускает. Но ускорение тем больше, чем ближе частица к черной дыре, — следовательно, более энергичные фотоны прилетают к нам из непосредственной ее окрестности. Исследуя спектральный состав излучения, можно оценить массу черной дыры, ее заряд и скорость вращения.

В рентгеновском диапазоне спектра излучают объекты, нагретые до температур порядка 1 млн. градусов, — например, горячие облака газа в межгалактическом пространстве.

Наиболее коротковолновое электромагнитное излучение называют гамма-лучами. Их характеризуют уже не длиной волны, а энергией отдельного кванта в электрон-вольтах. Длина волны такого излучения много меньше размеров атомов. Твердая поверхность зеркала телескопа не является помехой для гамма-лучей, они не фокусируются, поэтому основная функция телескопа применительно к ним не выполняется. Для их регистрации используются скintилляторы, в которых квант порождает вторичные фотоны меньших энергий и электроны. Измерив суммарную энергию вторичных частиц, можно оценить энергию прилетевшего гамма-кванта. Часто детектор нацелен на регистрацию отдельных гамма-квантов.

На практике получение внятного результата обычно затрудняют различные досадные детали, и достижение цели превращается из рутины в сложный, творческий процесс. Как

узнать, что вызвало каскад вторичных частиц: гамма-квант или энергичная заряженная частица, прилетевшая из космоса? Какую часть вторичных частиц улавливает детектор (очевидно, что не 100%)? Достаточно ли быстро срабатывает сцинтиллятор? Каково направление движения гамма-кванта? Вот лишь небольшая доля вопросов, которые должны решить экспериментаторы.

Разрешающая способность обсерватории «Чандра» настолько высока, что, например, в галактике NGC 6240 удалось обнаружить не одну, а целых две массивные черные дыры на расстоянии всего 3 000 световых лет друг от друга. Их возможное слияние будет захватывающим зрелищем для наших потомков. Недавно эта же обсерватория обнаружила мощный источник гравитационных волн в нашей Галактике: система J 0806 представляет собой два белых карлика, они на расстоянии всего 80 тыс. км обращаются вокруг общего центра масс. Период обращения уменьшается на 1,2 миллисекунды за год. Очевидно, что гравитационные волны уносят энергию из системы. Правда, эти волны еще не обнаружены, но теоретические расчеты на основе стандартной ОТО дают именно такой результат. Так что данное наблюдение обсерватории можно считать косвенным обнаружением гравитационных волн.

Некоторые звезды заканчивают свое существование взрывом, после которого остается плотный, слабо светящийся объект и горячее, расширяющееся и медленно остывающее газовое облако. Оно излучает фотоны самых разных энергий, включая рентгеновский диапазон. Данные, полученные обсерваторией «Чандра», настолько точны, что позволяют определять скорости различных частей этого облака: оказалось, например, что некоторые области остатков сверхновой E 0102-72 в Малом Магеллановом Облаке движутся в нашу сторону. Но волноваться не стоит — газ дойдет до нас через миллионы лет, остывшим и разреженным. Слабо светящейся объект, остающейся после взрыва, — это, как правило, нейтронная звезда или черная дыра.

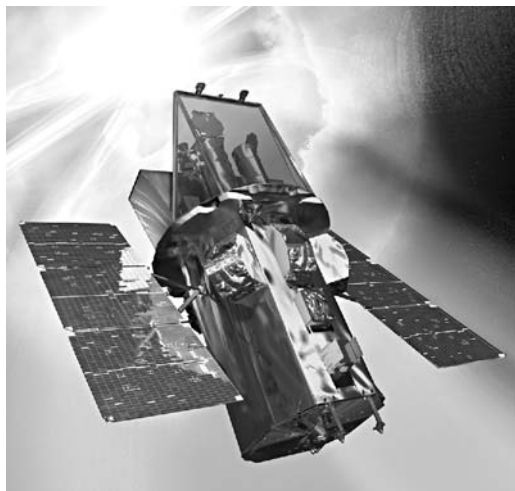
Обсерватория «Чандра» обнаружила в скоплении 47 Тукана неожиданно много экзотических звездных систем. Вообще

говоря, «нормальные» звезды излучают преимущественно в оптическом диапазоне. Чтобы излучение стало более жестким, нужны особые условия. Такие условия создаются в двойных звездах, состоящих из нормальной звезды и компактного объекта: белого карлика, нейтронной звезды или черной дыры. В этом случае частицы из нормальной звезды, захваченные ее соседом, движутся с колоссальным ускорением и излучают фотоны различных энергий. Если «захватчик» — нейтронная звезда, то при ударе о ее поверхность излучается дополнительная энергия. У черной дыры твердая поверхность отсутствует, а значит, нет и дополнительного излучения: это один из способов отличить черную дыру от нейтронной звезды. Раз в скоплении 47 Тукана оказалось немало двойных звезд, активно излучающих в рентгеновском диапазоне, значит, там много черных дыр или нейтронных звезд. Вместе с тем выяснилось, что в скоплении, похоже, нет большой центральной черной дыры. «Большой», точнее «сверхмассивной», обычно называется черная дыра с массой не менее миллиона солнечных масс. Так что дыры с массой порядка солнечной вполне могут образовывать двойные системы с нормальными звездами.

Один из спутников NASA с научной аппаратурой был запущен в конце 2004 г. Назвали его в честь птички «Стриж» (Swift). Это охотник за гамма-вспышками, очередной загадкой Вселенной. Мощнейшее излучение приходит из случайных точек пространства, в случайные моменты времени, длится секунды, иногда пару минут, затем его интенсивность резко снижается. Впервые такие вспышки были обнаружены военными спутниками «Вэла» в 1968 г. Поскольку данные, полученные военными, были опубликованы только в 1973 г., можно лишь представить себе, что происходило на закрытых дискуссиях в Пентагоне. Видимо, первое возбуждение быстро прошло, когда стало понятно, что это излучение не приходит ни с поверхности Земли, ни из атмосферы, ни даже из Солнечной системы. Когда стало ясно, что вспышки происходят где-то в Галактике, американские военные, видимо, решили, что «вряд ли русские добрались до Галактики», и отдали доселе секретные данные ученым для дальнейшего анализа. Через некоторое время ста-

Рис. 4.3. Спутник NASA «Swift», предназначенный для исследований космического гамма-излучения.

Иллюстрация с сайта <http://swift.sonoma.edu>



ло понятно, что вспышки никак не связаны и с нашей Галактикой. В противном случае они происходили преимущественно в галактическом диске, где расположено большинство звезд, либо в шаровых скоплениях. Возможно, причиной гамма-всплесков являются взрывы звезд, сверхновые. Если образующийся джет направлен в сторону наблюдателя, то он видит мощную вспышку, если нет — то «обычную» сверхновую. Еще один вариант — слияние нейтронных звезд либо черных дыр.

За такое короткое время трудно определить направление, чтобы направить туда мощные телескопы. Цель «Стрижа» — успеть определить направление на гамма-вспышки. Он непрерывно сканирует небо детектором гамма-лучей. При обнаружении вспышки «Стриж» быстро разворачивает свои телескопы — рентгеновский и оптический — и исследует событие. Очень похоже на стрижа в полете, мгновенно меняющего направление, чтобы поймать мошку, — поэтому так и назвали¹.

Конечно, существуют и более мощные обсерватории, чем «Стриж», но все они медлительны. Они хороши там, где нужна

¹ Дополнительную информацию можно найти на сайтах: <http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift>; <http://grb.sonoma.edu>.

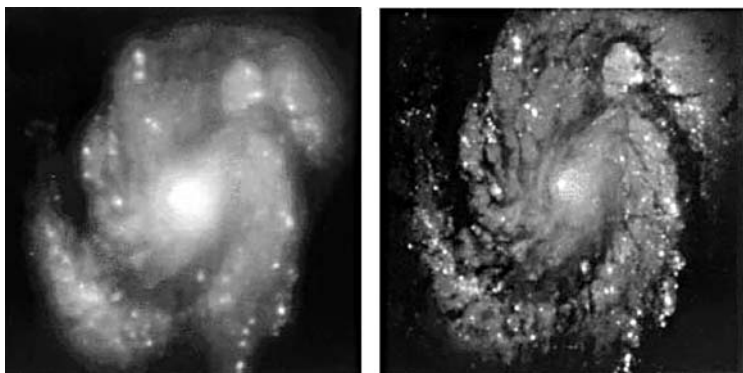


Рис. 4.4. Постоянный прогресс в технике, и в частности наладка телескопа «Хаббл», позволяют улучшать качество снимков.

точность, а не скорость. Так, космическому зонду «Ньютон» требуется около 8 часов, чтобы настроиться на определенный объект, а обсерватории «Чандра» — и вовсе 20 часов.

Способность «Стрижа» быстро концентрироваться в нужном направлении уже принесла результаты. Например, гамма-всплеск GRB 050502B, наблюдавшийся 2 мая 2005 г. в созвездии Льва, длился 17 секунд. Ученые уже свыклись с существованием таких одиночных кратковременных взрывов с испусканием гамма-излучения и создали различные модели взрыва сверхновой, их описывающие. Теперь все они должны



Рис. 4.5. Так видели астрономы звезду Мельник-34. Слева — наилучшее изображение звезды с наземной обсерватории, в середине — та же звезда, сфотографированная телескопом «Хаббл» до юстировки оптики, справа — после.

быть пересмотрены, поскольку «Стриж» через 8–9 минут зафиксировал еще один взрыв в рентгеновском диапазоне, в сотню раз мощнее предыдущего. Это означает, что теория, рассматривающая сверхновые как причину гамма-вспышек, еще далека от завершения.

Насколько впечатляюще меняется качество информации за десятилетие, можно убедиться на примере знаменитого телескопа «Хаббл» (рис. 4.4). Посмотрите на два изображения галактики — до и после 1993 г. (в этом году были устранены проблемы с оптикой). Видно, насколько улучшилось изображение. Теперь можно разглядеть, насколько мало яркое пятно в центре галактики. Еще один пример приведен на рис. 4.5.

Кванты-гиганты

Первая космическая обсерватория «Ухуру» получила свое имя от единицы измерения потока рентгеновских квантов, пролетающих через один квадратный сантиметр за секунду. Однако оказалось, что наряду с непрерывным потоком, измеряемым миллиардами гамма-квантов в секунду, существуют особенные кванты, которые лишь изредка падают на нашу Землю. Речь идет о частицах с энергиями измеряемыми миллиардами гигаэлектрон-вольт. Это могут быть и заряженные частицы, как, например, протоны и электроны, так и нейтральные гамма-кванты. Для их исследования нужны специальные усилия и обсерватории нового класса.

Главная проблема состоит в том, что частицы, непосредственно прилетевшие из космоса, поверхности Земли не достигают. Одна высокоэнергичная прилетевшая частица, сталкиваясь с ядрами атомов, входящих в состав молекул воздуха, вызывает поток новых частиц разных видов. Те, в свою очередь, на пути к поверхности сталкиваются с другими молекулами воздуха и также порождают новые частицы. Таким образом, одна очень энергичная частица, прилетевшая из космоса, генерирует широкий атмосферный ливень из разнообразных частиц. Регистрируя такой каскад, можно определить тип частицы, инициировавшей этот ливень, и ее энергию.

По всему миру разбросано достаточно много таких обсерваторий, одна из которых, HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy), расположена на Канарских островах. Она занимается регистрацией и анализом широких атмосферных ливней, состоящих из частиц, порождаемых высокоэнергичными космическими частицами. В распоряжении ученых имеются различные приборы, размещенные на площади несколько сотен квадратных метров. Они детектируют вторичные заряженные частицы и фотоны, попадающие на поверхность Земли. HEGRA способна регистрировать частицы сверхвысоких энергий, недоступные для детекторов, выведенных в космос.

Где и в каких природных ускорителях порождаются столь энергичные компоненты космических лучей, мы пока не знаем, но факт остается фактом — по космосу гуляют столь энергичные странники, что при столкновении с молекулами атмосферного газа они порождают лавину из миллионов вторичных элементарных частиц. Фиксируя этот ливень частиц, можно определить не только энергию и направление прилета, но тип исходной частицы. Интерес к высокоэнергичным компонентам космических лучей обусловлен еще и тем обстоятельством, что земные ускорители пока не могут разогнать частицы до столь больших энергий, и космос в данном случае может помочь в разгадывании тайн микромира [7].

Нейтринные детекторы

То, что нейтрино очень слабо взаимодействуют с любыми частицами, создает трудности при проектировании нейтринных детекторов, но это их свойство имеет и положительную сторону: они приносят неискаженную информацию о далеких и, значит, давних событиях. Фотоны, проходя сквозь галактики и облака межзвездного газа, в той или иной мере поглощаются; заряженные частицы, попадая в магнитное поле галактик, меняют свою траекторию. И только нейтрино, как и фотоны, распространяются строго по геодезической, т. е. по прямой, в присутствии гравитационного влияния галактик и скрытой массы (см. рис. 3.16). По сравнению с фотоном у нейтрино есть несомненное преимущество — оно легко проходит сквозь газо-

вые и молекулярные облака, но у есть и уже упомянутый недостаток: его трудно «поймать» в детекторе. Чтобы получить результат, нужно много частиц-мишеней.

Итак, чтобы детектировать нейтрино, нужны как можно бóльшие массы вещества, принадлежащего детектору, и вдобавок оно должно быть как можно более холодным, чтобы температурные флуктуации не слишком мешали идентификации событий. Поэтому возникла идея взять за основу уже существующий лед на полюсах Земли и «окружить» их детекторами. Один такой детектор, АМАНДА, уже работает в Антарктике. Он способен детектировать нейтрино с энергиями не больше 10^{15} эВ. Будущие детекторы поднимут планку до 10^{18} эВ.

Что же происходит в детекторе после того, как одно из многих нейтрино, пролетая, столкнется с нейтроном? В этом случае образуются высокоэнергичные электрон и протон, которые летят быстрее света в воде или во льду. Возникает хорошо известный эффект Черенкова¹, по которому и определяют параметры прилетевшего нейтрино. Хотелось бы детектировать и антинейтрино, но это не так просто. Антинейтрино взаимодействует с протоном, а не с нейтроном, образуя энергичные нейтрон и позитрон. Детектировать такой нейтрон можно по его воздействию на материал детектора, для чего он, в свою очередь, должен столкнуться с ядрами атомов, из которого состоит детектор, и передать им свою энергию. Но нейтрон слабо взаимодействует с ядрами и может вылететь из детектора незамеченным, что нежелательно. Канадские физики из нейтринной обсерватории (Sudbury Neutrino Observatory, SNO) нашли остроумное решение проблемы: они просто растворили 2 тонны обычной (но чистой) соли, NaCl, в рабочем веществе своего детектора, втрое увеличив его чувствительность.

Сама нейтринная обсерватория SNO находится на глубине 2 км в шахте по добыче никеля. Одной из основных ее задач является детектирование солнечных нейтрино. Но есть и другие нейтрино, которые рождаются в атмосфере Земли, когда

¹ Излучение света при движении в веществе заряженных частиц со скоростью, превышающей скорость света в этом веществе.

в нее влетает энергичная частица, чаще всего электрон или протон. Как выделить нейтрино, пришедшие именно от Солнца? Как уже говорилось, Земля прозрачна для нейтрино. Значит, все нейтрино, кроме солнечных, будут приходить в детектор со всех сторон равномерно. Направление их движения определяется по движению вторичных частиц. Направление же солнечных нейтрино меняется в течение суток на 360° из-за вращения Земли.

Идея, аналогичная добавке NaCl, но еще более эффективная, была предложена для повышения чувствительности другого нейтринного детектора — Супер-Камиоканде в Японии. Рабочим веществом ему служит 50 000 т сверхчистой воды, помещенной на глубину 100 м в шахте Камиока Мозуми. Эти сто метров земли служат естественным барьером для всех космических лучей, кроме нейтрино, — вот где пригодилось то, что нейтрино редко взаимодействуют с веществом! В Японии были те же проблемы с детектированием антинейтрино, что и в Канаде. Но там было предложено добавить в воду 100 тонн трихлорида гадолиния (GdCl_3), что должно во много раз повысить эффективность детектора. Это связано с тем, что вероятность взаимодействия нейтрона с ядром гадолиния очень велика. Именно на этом детекторе было установлено, что разность масс мюонного и электронного нейтрино лежит в интервале от 0,03 до 0,1 эВ. Это замечательное открытие означает, что по крайней мере один сорт нейтрино должен иметь ненулевую массу, и стандартная модель элементарных частиц Вайнберга—Салама должна быть модернизирована.

Лайман-альфа лес

Ученые используют любые — законные — способы для получения новой и подтверждения уже известной информации. Один из любопытных эффектов — Lyman Alpha Forest (читается «Лайман¹ альфа форест»). Сам эффект состоит в следую-

¹ Теодор Лайман (1874–1954) — американский физик, автор трудов по оптике и спектроскопии. Именем Т. Лаймана названа серия линий в спектре поглощения атома водорода.

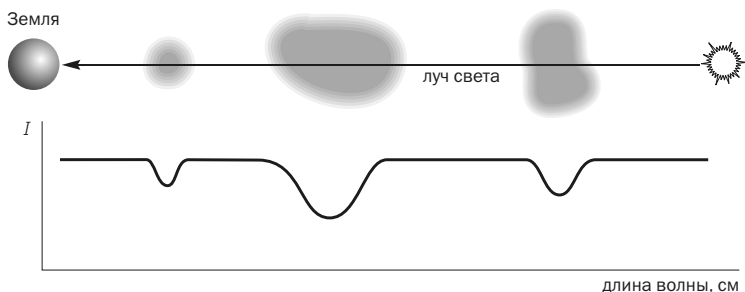


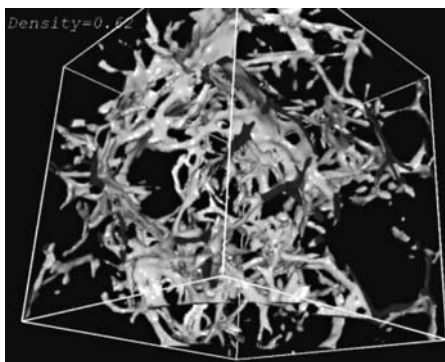
Рис. 4.6. На графике отложена интенсивность одной линии спектра, соответствующей переходу L .

щем. Предположим, на большом расстоянии от нас находится источник электромагнитного излучения с широким диапазоном длин волн. Фотоны, перед тем как попасть на Землю, проходят на своем пути через несколько облаков водорода. Часть фотонов поглощается — в основном фотоны, способные перевести электрон в атоме водорода с основного уровня на первый; этот переход обозначается L (Лайман альфа). В наборе пришедших на Землю фотонов они будут отсутствовать, и в спектре, регистрируемом прибором, обнаружится «провал» в соответствующем месте (рис. 4.6).

Второй хорошо известный эффект — это красное смещение: энергия фотона со временем уменьшается из-за космологического расширения. Благодаря этому эффекту облака,

Рис. 4.7. Одна из компьютерных моделей распределения лайман-альфа-облаков на расстоянии, соответствующем красному смещению, равному 3.

Иллюстрация с интернет-страницы
<http://sai.msu.ru/apod/ap980224.html>



встречаемые лучом света на разных расстояниях, будут поглощать уже фотоны, которые в свое время родились, имея бóльшие энергии. Сколько облаков на своем пути встретит поток фотонов, столько линий поглощения будет в спектре. «Лесом» (forest) образно называют набор этих линий. По их расположению можно судить о расстояниях до облаков и источника излучения.

Так одни научные открытия (в данном случае дискретность уровней энергии атомов) служат основой для совершенно других открытий.

КОНСТРУКТОР ВСЕЛЕННЫХ

Я хочу знать, как Бог создал этот мир. Мне неинтересно то или иное явление, спектр того или иного элемента. Я хочу знать Его мысли, остальное — детали.

А. Эйнштейн

В предыдущих главах мы познакомились с основными этапами жизненного пути нашей Вселенной и узнали об основных законах, которым подчиняется Природа. Конечно, далеко не все законы уже открыты, многие еще ждут своего часа. Развитие науки идет широким фронтом во многом благодаря прорыву в космологии, использующей достижения всех научных направлений. Это и неудивительно — ведь космология призвана объяснить свойства всей Вселенной, начиная с момента ее рождения. Поэтому в этой быстро развивающейся области может быть востребован специалист в любой области физики.

Сейчас как раз подходящий момент остановиться и подумать о более глубоких проблемах, а именно: к чему, собственно, ученые должны стремиться? Очевидный ответ «к объяснению законов природы» слишком абстрактен и удовлетворяет уже далеко не всех. Обсуждаются вопросы типа «можно ли объяснить все законы природы?», «почему выполняются именно эти законы, а не другие?», и, наконец, «почему законы вообще выполняются?». Предположим, мы пришли к цели и создали окончательную «Теорию всего». В современной научной литературе такая возможность обсуждается и даже введена устоявшаяся аббревиатура TOE, по-английски «Theory Of Everything». Что она собой должна представлять и на чем должна быть основана? Похоже, есть три основных варианта.

А. Законы созданы неким высшим разумом для каких-то своих целей. Ведь создают же ученые питательную среду в пробирках и чашках Петри для размножения микробов. И цели их совсем не те, о которых думали бы микробы, будь они разумными.

Б. Законы природы строго выводятся из начального единого постулата и просто не могут быть другими. Вся история науки видится как приближение к этому постулату.

В. Существует много вселенных с различными законами, и мы живем в одной из них. Этот подход приобретает все больше сторонников, но является ли он конструктивным?

Вариант А возможен. Не очень ясно, правда, как этот разум не разрушился из-за высоких температур в момент рождения Вселенной. Кроме того, первоначальный размер был чрезвычайно мал, порядка 10^{-1} см. Тем не менее с развитием науки появляются дополнительные возможности. В главе, посвященной поиску разума во Вселенной, мы поговорим об этом. Поэтому будем осторожны и предположим, что такая возможность существует. Но в таком случае разработка идеи высшего разума скорее должна принадлежать богословам. Ученый должен исходить из противоположной предпосылки — об отсутствии сверхразума. Предположим обратное — ученые верили бы, что законы природы были созданы высшими существами. Тогда науки просто не существовало бы. Действительно, с точки зрения такого ученого, например, то, что яблоки падают на Землю, — это просто «свойство такое», введенное сверхразумом, и у нас не было бы сейчас теории тяготения. Орбиты планет? Тоже «свойство такое». И никогда люди не увидели бы связи между этими явлениями, не могли бы предсказывать траектории небесных тел. Не было бы вообще никаких теорий, да и науки в целом: сверхразум объясняет все! Итак, вариант А исключить нельзя, но оставим его богословам и философам. Удел ученого — исследовать природу, *предполагая*, что вариант А неверен. Для него остается выбор между вариантами Б и В.

Вариант Б. Найти теорию, объясняющую устройство мира, — достойная задача. Но даже в такой «окончательной тео-

рии» должны быть исходные постулаты. Например, в М-теории, одной из современных теорий, претендующей на многое, предполагается, что пространство на самом деле имеет 10 измерений (в некоторых моделях — 11 и 26). Конечно же, следующие поколения ученых будут пытаться сделать следующий шаг, который бы объяснял, почему пространство имеет именно 10 измерений и из чего состоят объекты такого многомерного мира. «Все опять повторится сначала». Ну что же, быть всегда в пути — не самая плохая участь. Только выбрав ее, надо понимать, что эта дорога имеет начало, но не имеет конца. Путь, пройденный нами до сих пор, короче того пути, который предстоит пройти, и так будет всегда. И всегда будет оставаться вопрос: почему изначальные постулаты таковы, что в результате множества метаморфоз становится возможным существование разумной жизни? Насколько серьезен этот вопрос, читатель поймет после ознакомления с этой главой. И тогда на повестку дня выходит

Вариант В. Как бы вы отнеслись к человеку, разрабатывающему теорию, с помощью которой он собирается объяснить конкретное число — массу нашей планеты Земля? Подчеркну: не рассчитать, а вывести из первоначальных постулатов. Наверное, вы бы попытались объяснить ему, что планет много, что каждая образуется в результате множества случайностей. Короче, что такой теории не существует, просто есть много вариантов, а человечество реализовалось на одном из них, оказавшемся благоприятным. Но где гарантия, что, например, с массой электрона ситуация не аналогична? Может быть, вселенных много, в каждой из них — своя масса электрона, а мы случайно оказались в одной из них? Конечно, и в этом подходе возникает много вопросов — где эти вселенные расположены, почему у них свойства разные и т.д. Кроме того, если «все возможно», то зачем изучать конкретную вселенную? Не будем ли мы напоминать червячков, живущих на одном из яблок и с увлечением обсуждающих цвет, топологию и размеры их яблока-вселенной? И невдомек им, что вокруг них — яблоневый сад. Тем не менее все больше доводов в пользу именно варианта В. И, как мы увидим, на

вопросы о свойствах нашей вселенной-яблока также стоит отвечать. Эта глава и посвящена их обсуждению.

Антропный принцип

Проблема множественности вселенных тесно связана с так называемым антропным принципом (АП). Исторически сложилось так, что имеется целых две его версии. Слабый АП — предполагается, что законы природы «таковы, каковы они есть, и больше никаких», а разумная жизнь возникает там, где для нее есть условия. Например, на данный момент считается, что наша Вселенная родилась 14 млрд. лет назад и будет существовать вечно. Почему же мы живем в данную эпоху, относительно близко к моменту ее рождения? Просто потому, что звезд с нужным химическим составом десятков миллиардов лет назад не было и спустя несколько десятков миллиардов лет не будет. Разумная жизнь нашего типа станет невозможна.

Сильный АП предполагает, что сами законы природы и параметры типа гравитационной постоянной, массы электрона и т. д. таковы, что должна возникать разумная жизнь.

Сейчас становится все более очевидным, что оба принципа утверждают практически одно и то же. Как мы уже знаем после открытия инфляционного механизма, наша Вселенная — не единственная. Наоборот, по-видимому, существует много, а скорее, бесконечно много вселенных. Если их свойства варьируются в широких пределах, то говорят о Метавселенной (английский термин — *multiverse*) — ансамбле вселенных. Ну а жизнь возникает в «гостеприимных» вселенных, где законы природы подходят для появления и жизни разумных существ.

Надо сказать, что среди ученых наблюдается широкий разброс мнений об антропном принципе: от категоричного «это не наука» с подробным перечнем доводов, через равнодушные («мне нет до этого дела, я изучаю конкретный физический процесс в нашей вселенной, а информация о других вселенных все равно недоступна»), до восторженных отзывов.

Однако прежде всего необходимо определить, что такое «разумная жизнь». Довольно общее определение можно найти

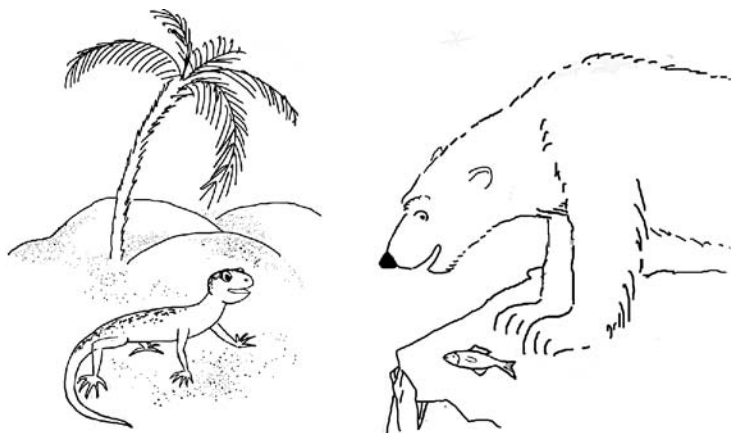
у Энгельса: «жизнь — это способ существования белковых тел». Но только ли белковая жизнь возможна? Существует множество определений феномена жизни, но для нас более важным является прилагательное «разумная». Интуитивно понятно, что разумом, способностью к анализу, может обладать лишь достаточно сложная структура. Оказывается, что создание условий для появления и поддержания в рабочем состоянии таких структур — сложнейшая задача. Какими свойствами должна обладать вселенная, чтобы это стало возможным? Обсуждению этих вопросов и посвящена настоящая глава. Хотелось бы подчеркнуть, что обсуждаются внешние условия, необходимые для существования разума, а не детали его возникновения.

Определение понятия «разум» — не менее сложная задача, чем определение понятия «жизнь». Способность к мышлению? Но что такое мышление? Неотъемлемым свойством разумной жизни является ее способность к обмену информацией с внешней средой. Конечно, как и для всякого краткого утверждения, возможны пограничные случаи, с которыми непонятно, что делать. Например, человек в коме — живая структура или нет? Хочется верить, что да, хотя информацией со средой он явно не обменивается. А автопилот на самолете — разумный или нет? Дискуссия может длиться бесконечно, но прекратим ее, определив, что *структура считается разумной, если она существует благодаря обмену информацией*. Это достаточно емкое определение. Так, автопилот или телефонный автоответчик хотя и обмениваются информацией, но их существование от этого напрямую не зависит.

Для приверженцев антропного принципа очень убедителен был результат, полученный С. Вайнбергом с использованием сильного антропного принципа в 1987 г. Он рассуждал так. Предположим, что все параметры нашей Вселенной подогнаны так, чтобы появился разум. Для этого нужны галактики, а чтобы галактики могли образовываться, плотность энергии вакуума не должна превышать некоторого значения. Напомним, что вакуум означает всего лишь отсутствие частиц. При этом допускается, что пространство заполнено статичным

полем любой природы. Поля встречаются в теории на каждом шагу, и не очень понятно, почему их энергия должна равняться нулю, как это предполагалось раньше. Вайнберг указал интервал, в котором надо искать эту плотность энергии вакуума, и все, в общем, забыли про это. Но в 1998 г. плотность энергии вакуума была обнаружена и определена! Ее значение попало в интервал, предсказанный Вайнбергом. Замечательный результат с точки зрения сторонников антропного принципа. Но не противников, которые могут сказать: «На основе того наблюдательного факта, что существуют галактики, получен результат, который подтвердился. Прекрасно, но при чем здесь разумная жизнь?» И будут по-своему правы.

Одна из возможных формулировок антропного принципа звучит так: Вселенная такова, какой мы ее видим, поскольку в ней существуем мы, то есть наблюдатели, способные задаться вопросом о свойствах Вселенной. При других параметрах во Вселенной невозможны сложные структуры и жизнь в известных нам формах. Кажется все-таки, что эта формулировка слишком сильная. Следуя этому утверждению, например, белые медведи полагали бы, что жизнь возможна только в тех райских уголках Вселенной, где земля сплошь покрыта снегом, ночь длится полгода, а в воде водятся полезные для здоровья тюлени и рыба. А как же иначе? Ведь в противном



случае не было их, наблюдателей! Думаю, что ящерица, проживающая где-нибудь в Сахаре, с ними не согласилась бы.

Видимо, следует допускать существование вселенных с другим набором параметров и законов, в которых, тем не менее, существует жизнь, пусть и не похожая на нашу. Жизнь в какой-то мере может приспосабливаться к различным внешним условиям. Интересно, в какой мере? Не может ли оказаться, что разум возникает почти при любых условиях? Неудивительно тогда, что и наша Вселенная обзавелась разумной жизнью.

Мы условились под «разумной жизнью» понимать структуры, существующие благодаря обмену информацией. Чтобы определить долю вселенных, где возможны такие структуры, не обязательно создавать их все на практике. При наличии хорошего компьютера в будущем люди смогут моделировать вселенные с разными свойствами и следить, не возникнут ли там интересные структуры. После сотни-другой попыток станет понятно, какова доля вселенных, заселенных разумом. Мое мнение — доля таких вселенных мизерна, но главное, что она не равна нулю.

Идея множественности Вселенных позволяет естественным образом объяснить удивительно точный подбор параметров, произведенный природой. Поясню это утверждение на примере. Пусть имеется тысяча-другая хаотически разбросанных островов в океанах. Подавляющее их большинство непригодно для жизни и поэтому безлюдно. Но несколькими островам повезло: они покрыты растительностью и находятся в теплых и спокойных широтах. Поэтому никто не удивится, узнав, что на этих нескольких (из тысяч!) островах живут люди. А теперь встанем на точку зрения туземцев. Они, конечно, ничего не знают о других тысячах островов и, будучи философически настроенными, будут восхищаться устройством своего мира и подмечать его замечательные свойства, позволяющие им безбедно существовать. И поражаться, насколько хорошо свойства мира подобраны для их удобства. В точности, как мы это делаем относительно нашей Вселенной.

Сейчас уже многие ученые, занимающиеся космологией, склоняются к мысли о множественности вселенных. Разраба-

тываются идеи, объясняющие различие их свойств и предсказывающие вероятность появления вселенных, сходных с нашей. Беда в том, что эти вселенные нам недоступны в принципе. По крайней мере, с точки зрения современной науки. Поэтому на снисходительный вопрос о проверке этой идеи ее апологеты ответа, в общем, не имеют.

Любопытная картина вырисовывается, если посмотреть на эту ситуацию с другой стороны. Количество статей, посвященных устройству нашей Вселенной, очень велико, и каждый день появляются новые. Все они отличаются друг от друга, иначе бы их не публиковали. Но правильных, адекватно описывающих нашу Вселенную, — малая доля, если они вообще есть. Просто потому, что в нашей Вселенной реализовано какое-то одно предположение, остальные, соответственно, неверны. Значит, львиная доля статей, описывающих основы мира, не имеет отношения к действительности. Но раз эффективность так мала, надо ли продолжать исследования? Ответ — да, ради тех немногих, правильных. Ведь деревья каждый год рассеивают множество семян — только ради тех единиц, которые прорастут и превратятся в новые деревья. Грустная ситуация для ученых, чьи идеи окажутся невостребованными в нашей Вселенной. Если же Мета вселенная существует, то, скорее всего, найдется какая-либо вселенная со свойствами, предполагаемыми автором любой научной гипотезы. Следовательно, *любая научная статья правильно описывает некоторую вселенную.*

Посмотрим же, так ли сложно создать или найти вселенную, в которой есть условия для зарождения разумной жизни. По правде говоря, далее я попытаюсь показать, что подобрать подходящую вселенную не просто сложно, а чрезвычайно сложно.

Для простоты будем ориентироваться на разумную жизнь нашего типа, т. е. на существ из молекул и атомов, обитающих на планетах, которые находятся около звезд. Нужно «всего лишь», чтобы существовали эти самые звезды, планеты и атомы. Как мы вскоре увидим, обеспечить условия их существования далеко не просто.

Создаем Вселенную

Рисуя ветку, надо слышать, как свистит ветер.

Тин Нун

Предположим, что нам предоставлена возможность построить свою собственную вселенную, подобно тому, как дети строят целые города из конструкторов типа «Лего». Воспользовавшись тем, что в нашем распоряжении неограниченные ресурсы, сконструируем не какой-нибудь скучный мир, а Вселенную, населенную живыми существами. К сожалению, имеется одно ограничение: заказывать необходимые ингредиенты на «складе» можно только до начала работы. Вмешиваться и изменять правила игры по ходу действия нельзя, и если что не так, придется начинать все сначала. Поэтому нам надо внимательно продумать последствия нашего выбора, чтобы достичь цели — построить Вселенную с разумной жизнью в ней.

Прежде всего необходимо затребовать подходящее пространство. Не обойтись также и без теории относительности и квантовой теории. Значит, понадобятся такие фундаментальные константы, как скорость света « c » и постоянная Планка « $\hbar$ ». Мы вправе выбирать их значения по своему усмотрению, но давайте благоразумно оставим их такими, как в нашей Вселенной.

Из главы 1 мы знаем, что стандартная модель элементарных частиц содержит примерно 20 параметров.



Стандартная космологическая модель также содержит порядка 15 параметров. Старания теоретиков направлены, в частности, на создание теории, в которой эти параметры определялись бы «естественным образом» из единой теории. Но сейчас такой теории нет, и мы спокойно можем подбирать значения параметров по своему усмотрению. Надо с самого начала иметь в виду, что выбирать значения параметров придется с осторожностью. Например, как мы увидим в дальнейшем, если массу нейтрона взять всего лишь на 1% меньше, то ядра, а значит, и атомы станут нестабильными, а вселенная — унылой, без звезд и планет.

Какую же выбрать размерность пространства? Уже давно известно, что подходит только трехмерное пространство. Если число измерений больше 3, то не удастся удержать планеты около звезд — нет стационарных орбит. Если пространство имеет всего два измерения, то трудно обеспечить жизнеспособность сложной структуры.

Кроме того, пространство должно быть достаточно большим, чтобы вместить много планет и звезд. Но, как мы знаем из главы 2, большое пространство возникает, только если в самом начале происходила инфляция — его сверхбыстрое расширение. Для осуществления инфляции и для создания в дальнейшем звезд и планет нам потребуется гравитационное поле, которое характеризуется ньютоновской постоянной G . Инфляционный период может быть обеспечен благодаря динамике поля нового типа, названного инфлатонным. Но при одном условии: масса частиц — квантов этого поля — должна быть очень маленькой. Но по сравнению с чем маленькой?

Отступление.

О разумных значениях физических величин и основных параметрах

Каждая теория обычно начинается с постулатов, которые не доказываются по определению. Как правило, прежде всего выбираются динамические переменные — поля, вид их кинетической и потенциальной энергии

и форма взаимодействия с другими полями. Все это содержит неизвестные параметры, численные значения которых определяются экспериментально. Например, заряд электрона выступает как мера взаимодействия электронов и фотонов. Если какой-то параметр ока-

зывается очень маленьким, то это считается странным и требующим объяснения. Чтобы почувствовать проблему, приведу пример. Представьте себе, что вы дали задание группе детей сделать из пластилина чашку. Когда вы возвращаетесь через 20 минут, то на столе видите чашки самых разных размеров, отражающих индивидуальность их создателей. Приглядевшись, вы замечаете аккуратно сделанную чашечку размером 1 миллиметр. Согласитесь — это привлечет ваше внимание, и вы начнете думать о способе и причинах ее изготовления. То же самое происходит и в науке: когда некий экспериментально определенный параметр оказывается аномально малым или большим по сравнению с остальными параметрами, это привлекает внимание ученых и заставляет задуматься о причинах.

Выберем в качестве основных параметров, определяющих ход физических процессов, следующие:

- массы электрона, протона и нейтрона m_e , m_p и m_n соответственно;
- заряд электрона e , или, в безразмерном виде, $\frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$;
- константу сильного взаимодействия $\alpha_s \sim 1$;
- константу гравитационного взаимодействия G , или, в безразмерном виде, $G \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \sim 10^{-38}$.

Возможен, конечно, и другой выбор основных величин, в зависимости от предпочтений, но для наших целей это не так уж и важно.

Оказывается, что масса инфлатонного поля должна быть примерно в миллион раз меньше планковской массы! Откуда берется такая малая величина, не совсем понятно, и космологи этим сильно заинтригованы.

Но вернемся к созданию вселенной. Нам понадобятся частицы — основной строительный материал нашего конструктора. Это прежде всего протоны и электроны, которые уже позволяют создать простейший из атомов — водород. При условии, конечно, что между протоном и электроном есть сильное притяжение. За него отвечает электромагнитное взаимодействие, которое надо задать изначально, определив также и его величину. Первый шаг сделан, атомы водорода стабильны, но вселенная, заполненная атомами одного сорта, — скучное зрелище. Нужны более массивные ядра, например углерода, из которого могут быть сделаны живые существа. Но вот беда: введя притяжение между разноименно зарядами, практически невозможно избежать отталкивания между одноименны-

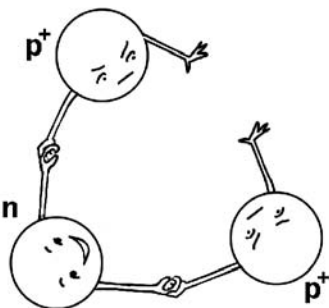
ми. Поэтому ядра, сделанные из одних протонов, мгновенно распадаются из-за сильного электрического отталкивания протонов как частиц с одинаковым зарядом.

Возможности электромагнитного взаимодействия исчерпаны, и нам приходится вводить новое, сильное взаимодействие. Но делать это надо аккуратно. Ведь если притяжение протонов, благодаря сильному взаимодействию, преодолевает их электрическое отталкивание (для чего, собственно, сильное взаимодействие мы и ввели), то будут образовываться гигантские ядра. Слишком большие ядра — тоже плохо: слишком высока плотность вещества, сделанного из них.

Похоже, мы опять вернулись на круги своя, только вместо отдельных частиц имеем отдельные очень плотные комплексы частиц, ядра. Такие объекты действительно существуют, это нейтронные звезды — но их плотность равна примерно 10^{14} г/см³. Жизнь на них была бы тяжела во всех смыслах. Например, обручальное кольцо, сделанное из такого вещества, весило бы 10^7 тонн. Нам же хочется иметь разнообразные структуры, состоящие из молекул, т. е. большого числа комплексов.

Природа нашла выход из создавшегося положения, и мы последуем ее рецепту: сильное взаимодействие должно быть короткодействующим! Тогда с увеличением расстояния электрическое отталкивание начинает доминировать, и массивные ядра оказываются неустойчивыми. Ситуация существенно улучшилась, но ядра хоть и медленно, но все-таки распадаются. Как только один из протонов ядра за счет квантовых

флуктуаций удаляется от остальных, сильное взаимодействие уже не в состоянии противодействовать электрическому отталкиванию, и протон улетает, ядро распадается. Видно, что цель близка: надо совсем немного, чтобы ядра были и стабильными, и достаточно тяжелыми, но не слишком.



Последний штрих — вводим нейтроны, заряда не имеющие, но участвующие в сильном взаимодействии. Благодаря этому удастся несколько увеличить силу притяжения, не увеличивая кулоновских сил отталкивания. Теперь ядра состоят из протонов и нейтронов и стабильны вплоть до ядер железа. Начиная с железа, увеличение числа нуклонов в ядре приводит к уменьшению энергии связи и затем к появлению нестабильных ядер типа урана.

Ну что же, успех налицо. Различные положительно заряженные ядра — в наличии. Отрицательно заряженные электроны создают облака вокруг ядер, образуются различные атомы. Но это только начало пути. Ведь раньше, в эпоху, когда преобладало излучение, протоны, электроны и нейтроны жили самостоятельной жизнью.

Увы, нейтрон тяжелее протона и электрона вместе взятых, что позволяет ему распадаться на протон, электрон и антинейтрино (которое здесь можно считать безмассовым). Получается, все нейтроны, рожденные, когда Вселенная была горячей, должны распасться в дальнейшем. Но нейтроны нужны для образования ядер гелия еще до появления первых звезд! Нам надо иметь в виду, что ядерные реакции в будущих звездах чувствительны к начальному составу вещества, и если гелий отсутствует с самого начала, то темп процессов в звездах меняется, в результате чего углерода, кислорода и других тяжелых элементов окажется слишком мало. Кроме того, ядра гелия состоят из четырех нуклонов (2 протона + 2 нейтрона), а вероятность столкновения одновременно четырех частиц очень мала. Как же создать достаточное количество гелия?

Природа нашла остроумный выход из этого тупика. При столкновении протон и нейтрон объединяются в одно целое — ядро дейтерия согласно реакции



Внутри дейтерия нейтрон может существовать сколь угодно долго. Остроумное решение, но, к сожалению, как раз когда Вселенная была горячей, фотонов было много и они были

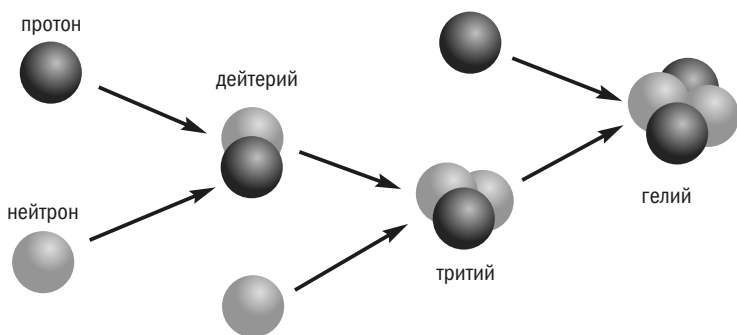


Рис. 5.1. Образование гелия в ходе первичного нуклеосинтеза.

достаточно энергичны, чтобы эффективно разрушать ядра дейтерия, освобождая при этом нейтроны:



Мы вернулись к тому, с чего начали.

Но хорошие идеи не пропадают втуне. Уже видно, что мы с самого начала взяли за слишком сложную, почти непосильную задачу. К счастью, Природа уже проделала этот труд, и мы можем руководствоваться ее идеями. Следуя рецепту, предложенному Природой, сделаем нейтрон долгоживущим: нескольких минут будет достаточно. Параметры слабого взаимодействия, приводящего к распаду нейтрона, подобраны так, что время его жизни составляет 15 минут. Это очень много для распадающихся частиц. Например, время жизни мюона — всего $2 \cdot 10^{-6}$ секунды, остальные нестабильные частицы распадаются еще быстрее. За 15 минут температура Вселенной успевает сильно уменьшиться, и средняя энергия фотонов становится недостаточной для разрушения ядер дейтерия.

Кто-то может предложить совсем убрать слабое взаимодействие, сделав нейтрон стабильным, но не будем торопиться — оно нам понадобится в дальнейшем, и мы, вслед за Природой, предусмотрительно учтем это.

Как мы уже знаем, в результате первичного нуклеосинтеза появляется стабильный гелий. Ядерные реакции могли бы

и дальше постепенно увеличивать массы ядер, но их «утяжеление» со временем прекращается по нескольким причинам. Во-первых, в результате расширения пространства расстояние между частицами возрастает, и вероятность их столкновения уменьшается. Во-вторых, в результате все того же расширения энергия частиц уменьшается, и ее уже не хватает, чтобы преодолеть потенциальный барьер ядер, даже если они столкнутся. В-третьих, ядра с числом нуклонов, равным пяти, оказываются совершенно нестабильными, что является серьезным, почти непреодолимым препятствием для ядерных реакций в ранней Вселенной. Этот недостаток придется компенсировать в дальнейшем, в наших с вами интересах. Впрочем, недостаток ли это? Ведь в противном случае первичный нуклеосинтез не остановился бы на гелии. Конечным продуктом последующих ядерных реакций были бы ядра самого устойчивого элемента — железа. Хорошо это или плохо, но железные живые существа бывают только в стране Оз в форме Дровосеков.

Видно, что эффект быстрого расширения пространства совершенно необходим по многим причинам. Но слишком увеличивать скорость расширения нельзя. Точнее, нам надо обеспечить не очень быстрое расширение Вселенной, чтобы успели образоваться галактики, но и не очень медленно, чтобы не допустить слишком высокой средней плотности — тогда останутся одни черные дыры. Последние, как известно, мало приспособлены для жизни. Темп расширения вещества зависит от величины гравитационной постоянной G , плотности материи, излучения и плотности темной энергии. Все это должно быть очень деликатно подогнано. Например, только сейчас плотность темной энергии стала превышать плотность материи, и не случайно — если бы это произошло намного раньше, галактики просто не образовались бы.

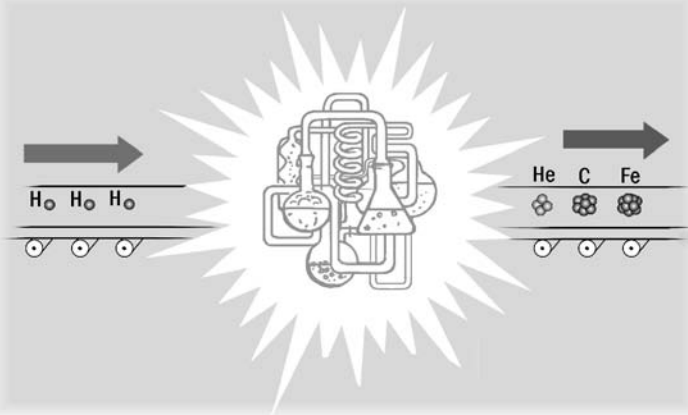
Для производства живых существ необходимо, как минимум, сырье. Основным нашим строительным материалом является углерод, но, как мы помним из главы 2, в результате первичного нуклеосинтеза образуются ядра не тяжелее гелия. Все возможности исчерпаны, а мы опять стоим перед, ка-

залось бы, неразрешимой проблемой: с одной стороны, Вселенная должна охлаждаться, чтобы появились планеты с живыми организмами, а с другой стороны, понижение температуры «замораживает» ядерные реакции, и тяжелые элементы не образуются. Да и какая разумная жизнь может быть при температуре, близкой к нулю?

Посмотрим, как с этой проблемой справилась Природа. А она нашла элегантный выход из положения. Оставив пространству возможность расширяться и охлаждаться, Природа предусмотрела локальные нагреватели — звезды! Они нагревают небольшую область пространства и выполняют сразу две важнейшие функции: все ядра, более сложные, чем гелий, образуются в результате реакций внутри звезд, и эти же ядерные реакции служат «печкой» для будущих живых существ на планетах.

Вообще-то организовать равномерное горение ядерного топлива в течение десятка миллиардов лет — непростая задача, но мы обсудим ее позже, поскольку есть проблема и поважнее. Кстати, медленное горение звезд — одна из важнейших причин, по которой необходимо слабое взаимодействие. Именно благодаря слабому взаимодействию звезда экономно расходует запас топлива в течение миллиардов лет, а не взрывается, как атомная бомба.

Казалось бы, можно и отдохнуть от трудов праведных, но новая неприятность не предоставляет нам такой возможности. Если тяжелые ядра рождаются только внутри звезд, то там они и останутся после того, как горючее в ядерной печи звезды будет исчерпано! Внутри звезд, пусть и остывающих, трудно создать условия для появления разумных существ. Природа решила и эту проблему, и мы последуем ее рецепту. Для этого придется вернуться к самому началу и подбирать параметры частиц и взаимодействий так, чтобы звезды в конце своего существования не просто остывали, а взрывались. Вот здесь-то и пригодится слабое взаимодействие! Нейтрино сталкивается с другими частицами только благодаря слабому взаимодействию, и поэтому столкновения происходят крайне редко. Поэтому нейтрино способны унести основную



энергию от центральной части звезды, позволяя ее внутренним слоям резко сжиматься, коллапсировать. В то же время величина слабого взаимодействия не должна быть слишком маленькой. В противном случае число нейтрино, рождающихся в звезде, во-первых, было бы слишком малым, и, во-вторых, внешние слои взрывающейся звезды не получили бы от нейтрино достаточной энергии, чтобы разлететься в космическом пространстве.

Итак, подобрав параметры слабого взаимодействия, удастся обеспечить вылет в окружающий космос образовавшихся в звездах углероду и другим тяжелым элементам. Но если звезды исчезнут, то кто будет обогревать разумных существ? Поэтому надо создать условия для образования новых звезд в дальнейшем. Природа пошла именно по этому пути: первые звезды состояли из протонов и альфа-частиц (ядер атомов водорода и гелия), а звезды следующих поколений были уже обогащены тяжелыми элементами.

Эффективное образование звезд происходит при столкновении галактик. Галактики же и звезды появляются там, где на раннем этапе эволюции Вселенной возникли флуктуации плотности энергии. Оказывается, что они также не могут быть произвольно маленькими или большими. Действительно, флуктуации плотности в ранней Вселенной обусловлены

квантовыми флуктуациями в инфляционный период, поэтому их первоначальный размер чрезвычайно мал, порядка 10^{-27} см. Но те же процессы, что заставляют расширяться всю Вселенную, способствуют расширению и флуктуаций. Ведь и сама Вселенная образовалась из пространственной области такого же размера, просто она начала расширяться раньше, а поэтому и преуспела в этом больше.

Наблюдения говорят, что амплитуда флуктуаций очень мала — контраст плотности $Q = \delta\rho/\rho$ составляет примерно 10^{-5} . Это накладывает сильные ограничения на параметры инфляционной теории. В частности, форма потенциалов, ответственных за этот период, должна быть чрезвычайно полой, настолько, что это считается серьезным недостатком теории. Если бы форма потенциала была более «естественной», флуктуации были бы больше и нас с вами не существовало бы. Почему Природа выбрала совершенно неестественный потенциал — ее загадка. Ради нас?

А зачем, собственно, нам нужна такая малая величина параметра Q ? И могла ли она быть еще меньше? Этим вопросом занялся астрофизик Мартин Рис (Martin J. Rees), и вот что он выяснил. Оказывается, при контрасте плотности $Q \sim 10^{-6}$, т. е. всего на порядок меньше, кластеры галактик не образовались бы к настоящему времени, а сами галактики были бы маленькими и анемичными, да и сформировались бы они гораздо позже (в статье М. Риса [31] детально рассмотрены эти и другие вопросы). Будучи слабо связанными, такие галактики не смогут удержать разлетающийся газ после взрывов сверхновых, и следующих поколений звезд просто не будет. Например, нашего Солнца в подобном случае не существовало бы. И, конечно, никаких планет!

А как выглядела бы Вселенная при больших значениях флуктуаций? При $Q = 10^{-4}$ плотность оказалась бы на порядок выше, и в результате мы бы имели более массивные галактики и скопления галактик. Более массивными были бы и звезды, а значит, среднее время их жизни было бы значительно меньше, а сами они — горячее. Еще большая плотность, $Q = 10^{-3}$, привела бы к неприятностям: слишком плот-

ные галактики коллапсировали бы в гигантские черные дыры.

Теперь понятно, что плотность некоторых областей с частицами должна и может быть лишь немного увеличена, после чего они сами начнут сжиматься под действием гравитационных сил.

И здесь мы в очередной раз неожиданно сталкиваемся с проблемой. Чтобы конденсация вещества произошла быстро (ведь нам надо успеть образовать звезды, дать им возможность наработать тяжелые элементы, на что надо несколько миллиардов лет, и создать хотя бы еще одно поколение звезд и планет вокруг них, насыщенных углеродом, кислородом и т. д.), необходимо увеличить плотность частиц. Но! Оказалось, что требуемая плотность частиц приведет к слишком массивным звездам, что плохо — см. выше. Разрешая этот конфликт, природа пошла по пути наименьшего сопротивления. Обычные частицы — протоны и электроны — могут эффективно уменьшать свою кинетическую энергию, излучая фотоны. Именно поэтому они собираются во все более плотный объект, пока не зажигаются ядерные реакции. Не мудрствуя лукаво, Природа ввела новый вид материи, который с фотонами не взаимодействует, а значит, не уменьшает свою кинетическую энергию и не концентрируется в малых областях. Это темная материя (скрытая масса). Флуктуации ее плотности могут быть большими, и именно области повышенной концентрации скрытой массы своей гравитацией притягивают барионы, оставаясь разреженными.

Похоже, Природа не создавала ничего лишнего. В нашей Вселенной любое свойство, любое явление строго необходимо и достаточно для зарождения разума. Объяснение этого факта является важнейшей задачей. Но вернемся к звездам.

Звезды являются ключевым звеном при построении Вселенной. Это сложнейшие объекты, в которых учтено множество нюансов. Например, то, что разумным существам, которые появятся через миллиарды лет после рождения первых звезд, кроме углерода, понадобится кислород для дыхания. Он также образуется в звездах в результате ядерных реакций.

Ясно, что скорость реакций, а значит, и обилие углерода и кислорода зависят от величины не только слабого, но и сильного взаимодействия, обеспечивающих эти реакции. Когда мы в самом начале «заказывали» свойства сильного взаимодействия, то были зажаты в очень узкие рамки: изменение его величины более чем на полпроцента приведет к серьезному недостатку углерода либо кислорода в первых звездах.

Оказывается, что процессы и ядерные реакции в звездах чрезвычайно чувствительны ко всем параметрам, а не только к величине сильного взаимодействия. Так, например, Брэндон Картер (Brandon Carter) обнаружил, что существование звезд возможно только при выполнении условия:

$$G \leq C \frac{12}{4},$$

причем константа C не должна сильно отличаться от единицы. Здесь $\frac{12}{4} = 1/137$ — величина, однозначно связанная с зарядом электрона и называемая постоянной тонкой структуры (см. в начале главы Отступление «О значениях физических величин и основных параметрах»), — отношение масс электрона и протона. Природа, создавая Вселенную, предвидела эту возможность и позаботилась о нас. На практике $C = 2,944$, и это значение ограничивает нас в выборе масс протона, электрона и постоянной тонкой структуры.

Итак, звезды должны производить из водорода и гелия все химические элементы — 92 вида ядер! — после чего взрываться, доставляя их в окружающее пространство. Затем должно успеть появиться новое поколение звезд, чтобы согреть своим теплом зарождающуюся жизнь.

Надеюсь, читатель уже получил представление о том, насколько сложно подобрать основные физические параметры так, чтобы в результате эволюции возникла вселенная с разумной жизнью внутри, и насколько грандиозная по сложности задача стояла перед Природой. На самом деле были рассмотрены лишь некоторые трудности конструирования Вселенной, и в действительности ситуация гораздо более сложная.

Для иллюстрации стоит привести один пример. В звездах углерод образуется в две ступени. Сначала сливаются две альфа-частицы, образуя нестабильный изотоп бериллий-8. Затем к бериллию добавляется еще одна, третья альфа-частица, и появляется ядро углерода. Но увы — бериллий-8 быстро распадается и может не дожидаться третьей альфа-частицы. Приходится потребовать, чтобы альфа-частица реагировала с бериллием быстрее, чем тот успеет распасться. Для этого в ядре углерода надо создать строго определенный энергетический уровень с энергией, примерно равной сумме масс альфа-частицы и ядра бериллия-8, что ускоряет реакцию и позволяет в конечном итоге углероду эффективно образовываться. Этот знаменитый энергетический уровень, равный 7,65 МэВ, лежащий всего на 0,3 МэВ выше суммарной массы альфа-частицы и ядра бериллия, увеличивающий эффективность реакции, был теоретически предсказан Фредом Хойлом в 1953 г. именно из этих соображений. Эксперимент подтвердил правильность предсказания. Здесь трудно удержаться от цитаты: «Когда смотришь на диаграмму энергетических уровней ядра ^{12}C и видишь первые три уровня — 4,43 МэВ, 7,65 МэВ и 9,64 МэВ, то душу охватывает чувство глубокой благодарности к уровню 7,65 МэВ за то, что он не спустился на 0,5 МэВ ниже. Какой малый запас прочности у всего, что нам так дорого!»¹

Итак, без уровня 7,65 МэВ не обойтись. Значит, необходимо опять вернуться к началу времен и заново подбирать параметры сильного и электромагнитного взаимодействий. Так что когда наша Вселенная только зарождалась, Природа уже должна была «знать» о будущей необходимости этого уровня.

Все те остроумные трюки, которые использовала Природа, чтобы организовать условия для возникновения разумной жизни, впечатляют и, тем не менее, меркнут перед обнаруженным несколько лет назад феноменом. Действительно, с тех пор, как было установлено, что энергия вакуума, т. е. состояния, в котором отсутствуют частицы, не равна нулю,

¹ Окунь Л. Б. Фундаментальные константы физики // УФН. № 9. 1991. С. 185.

возникла любопытная проблема. Дело в том, что плотность энергии вакуума ненамного больше плотности энергии скрытой массы и частиц. (Кстати, тоже не очень понятное совпадение.) Но это сейчас, а что было раньше? Ведь плотность скрытой массы и частиц уменьшилась примерно в 10^{123} раз с момента окончания инфляции и Большого взрыва. Как изменилась плотность энергии вакуума за это время — зависит от происхождения этой энергии. В самом простом и естественном случае плотность энергии не меняется со временем. Это значит, что в момент Большого взрыва плотность энергии вакуума была на 123 порядка меньше, чем плотность вещества!

Как уже говорилось выше, естественным энергетическим масштабом является планковский масштаб, 10^{19} ГэВ, или $\sim 10^{-5}$ г. Массу инфлатона, поля, ответственного за сверхбыстрое расширение в самом начале, приходится делать в миллион раз меньше. Иначе флуктуации плотности вещества во Вселенной окажутся слишком большими. Масса частиц — еще меньше. Например, масса протона — примерно 1 ГэВ, а это на 19 порядков меньше планковской. Природе пришлось очень постараться, чтобы произвести столь мелкие кирпичики мироздания. Но это еще ничто по сравнению с теми усилиями, которые ей пришлось приложить, чтобы сделать современную плотность темной энергии такой, какая она есть, — на 123 порядка меньше планковской плотности! До сих пор не ясно, какой механизм использован для достижения этой цели. Да и существует ли такой механизм?

Поскольку мы создаем свою Вселенную, то надо озаботиться вопросом: если уж без энергии вакуума не обойтись, то можно ли ее не делать такой маленькой? Оказывается, нельзя! Точнее, увеличить эту энергию можно всего в несколько раз — иначе ни галактики, ни звезды не появятся.

То, что плотность темной энергии по порядку величины совпадает с плотностью обычного вещества (включая и скрытую массу), приводит к любопытному наблюдению. Расчеты показывают, что если плотность темной энергии постоянна, то размер видимой части Вселенной достиг своего макси-

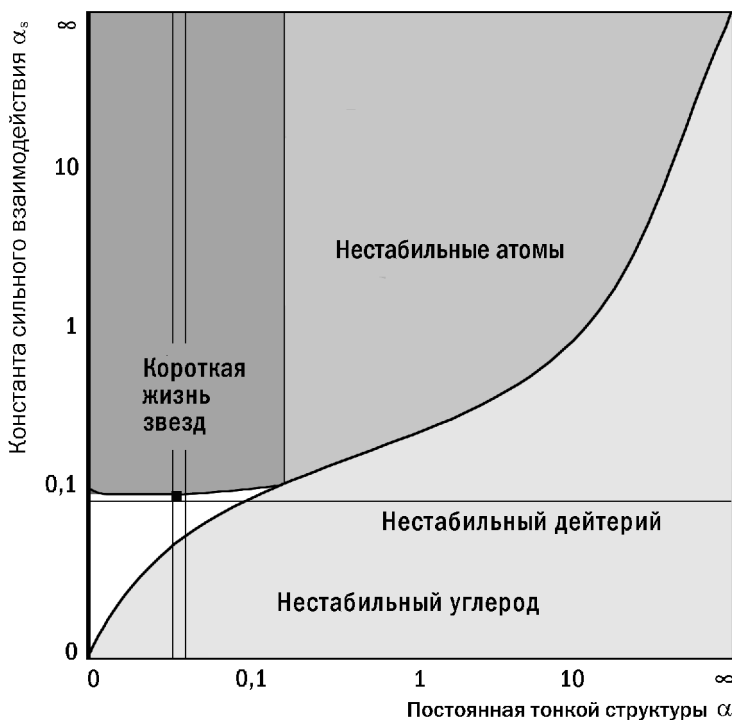


Рис. 5.2. Ограничения на константу сильного взаимодействия и постоянную тонкой структуры.

мального значения. Просто потому, что плотность энергии обычной материи уменьшается с расширением пространства, в отличие от плотности темной энергии. Пространство становится все больше похожим на пространство де Ситтера, свойства которого обсуждались в главе 2. Один из выводов, сделанных там, состоит в том, что свет, испущенный сейчас с Земли, никогда не достигнет горизонта, находящегося сейчас на расстоянии 10^{28} см. Но галактики, находящиеся от нас на солидном расстоянии, смогут пересечь эту невидимую границу, и мы навсегда потеряем их из виду. Сейчас мы живем в эпоху наибольшего количества видимых звезд. В будущем число звезд будет только уменьшаться, и через 10–20 млрд.

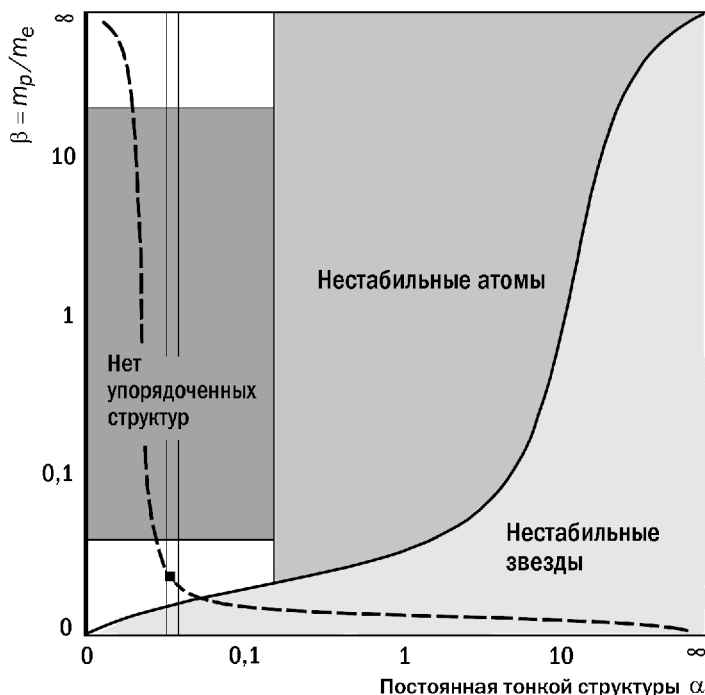


Рис. 5.3. Ограничения на соотношение масс электрона и протона и постоянную тонкой структуры.

лет в нашем распоряжении останутся лишь несколько галактик с сотней-другой миллиардов звезд.

Надеюсь, все уже получили представление о том, насколько точно внутренние свойства нашей Вселенной «подогнаны» для того, чтобы в ней было возможно существование разума. Этой удивительной проблемой уже довольно давно занимаются профессиональные ученые. В частности, изучается вопрос, насколько сильно можно менять различные параметры Вселенной, не нарушая условий, при которых возникает разумная жизнь. Уже в середине XX в. стало понятно, что фундаментальные константы — c , G , $\hbar$ — можно варьировать лишь незначительно. Дальнейшие исследования ученых показали, что, по-видимому, *все* свойства могут меняться лишь в узком ин-

тервале. Впечатляющие графики, суммирующие работу многих ученых, приведены М. Тегмарком [35]. На рис. 5.2 показана область изменения двух параметров — констант сильного и электромагнитного взаимодействий. Маленький черный квадратик — область разрешенных параметров. Как кстати, что эти значения, равные в нашей Вселенной 0,1 и $1/137$ соответственно, находятся именно внутри этого черного квадрата!

На рис. 5.3 изображена аналогичная ситуация, но вместо константы сильного взаимодействия по оси ординат — отношение массы электрона к массе протона. Связи, обнаруженные Картером, отмечены пунктирной линией. И опять область, отмеченная черным квадратиком (где возможна жизнь), мала, но, тем не менее, природа позаботилась о том, чтобы наблюдаемые параметры попали в этот квадрат.

Звезды созданы — что дальше?

Но вот, наконец, мы, после многочисленных попыток, создали подходящую вселенную, звезды и планеты. Может ли теперь в такой Вселенной зародиться жизнь? Увы, если мы все-таки хотим создать условия, благоприятные для живых существ, то до завершения еще далеко.

Начнем с того, что надо создать среду, удобную для развития и усложнения молекул. То есть первые объекты (протосущества) должны иметь возможность перемещаться в этой субстанции и быстро находить объекты для слияния/поглощения. Этим условиям удовлетворяют жидкости. Значит, на планете должно быть много жидкости, и вода — хороший кандидат. Правда, интервал температур, при которых она находится в жидкой фазе, невелик — от 273 до 373 К. Придется разместить планету так, чтобы средняя температура на ее поверхности попадала в этот интервал, и, кстати, сделать ее орбиту почти круговой, иначе зимы будут долгими и холодными и все живое померзнет¹. Причем те, кто выживет зимой, вряд ли перенесут слишком горячее лето.

¹ Земля как раз имеет почти круговую орбиту; смена времен года происходит благодаря наклону земной оси.

Насколько критично расстояние от Земли до Солнца? Существуют модельные расчеты, и они показывают следующее (хотя экспериментально проверить их правильность, естественно, невозможно): если бы радиус орбиты Земли был на несколько процентов меньше, это неизбежно вызвало бы парниковый эффект и перегрев планеты. Увеличение радиуса орбиты Земли на те же несколько процентов привело бы к тому, что Земля полностью и навсегда покрылась льдом. Итак, планета, на которой возможно существование разумной жизни, должна удовлетворять множеству условий. Проблема, тем не менее, вполне решаемая. В нашей Вселенной уже имеется около 10^{22} звезд, а значит, и число планет — того же порядка. Планеты находятся на самых разных расстояниях от своих звезд, в зависимости от случайностей в момент их образования. Часть из них имеет подходящие орбиты.

Мы уже решили, что протосущества будут зарождаться в воде. Но вот проблема: зимой часть воды переходит в твердую фазу — лед, а твердая фаза обычно имеет бóльшую плотность. В этом случае твердая фаза опускалась бы на дно водоемов и к концу зимы все водоемы находились бы в твердой фазе. Известны формы жизни, способные перезимовать, будучи полностью замороженными. К таковым относятся, например, лягушки. Но это не очень привлекательный вариант.

Чтобы найти выход из положения, посмотрим, как с этим справилась природа, — а она сделала лед легче воды! Это было непросто, и вода — одно из очень немногих веществ, твердая фаза которого легче жидкой. Далеко не при всяких соотношениях зарядов и масс частиц, входящих в состав вещества, это возможно, и подобное развитие событий должно было быть нами предусмотрено с самого начала, когда мы подбирали свойства частиц. Заодно надо обеспечить прозрачность воды, т. е. возможность проникновения света вглубь метров на пятьдесят, без чего фотосинтез невозможен. Кстати, нужно, чтобы вода не только была прозрачна для света, т. е. для электромагнитных волн оптического диапазона, но и не пропускала жесткое ультрафиолетовое излучение, смертельно опасное для живых организмов.

Вернемся ненадолго к проблеме промерзания водоемов. Так ли уж все плохо? Ведь есть экваториальная зона, где круглый год тепло. Но где гарантия, что промерзание водоемов, начавшееся с севера, не дойдет до экватора? Компьютерное моделирование процесса такого глобального оледенения чрезвычайно сложно. Мы же, на основе антропоного принципа, попробуем предсказать результат. Как мы теперь понимаем, создать вещество с более легкой твердой фазой очень непросто, иначе таких веществ было бы много. Значит, это нужно для существования разумной жизни (вот он, антропный принцип). Но при глобальном оледенении разумная жизнь вряд ли возможна. Значит, свойства воды таковы, чтобы не было всеобщего промерзания Земли. Следовательно, если бы лед опускался на дно, глобальное оледенение обязательно произошло бы. Это типичное рассуждение с использованием антропоного принципа, и можно понять многих ученых, которые отказываются считать такие рассуждения наукой. Пусть так, но фактом является то, что антропный принцип часто дает удивительно правильные предсказания. Вспомните ненулевую энергию вакуума и энергетический уровень ядра углерода, предсказанные именно из этих соображений. Наука должна объяснить этот феномен.

Теперь, когда понятно, насколько грандиозна задача создания вселенной, похожей на нашу, стоит вернуться к вопросу, поставленному в начале этой главы. Действительно, трудности были связаны с тем, что параметры, определяющие эволюцию Вселенной, можно варьировать в крайне ограниченных пределах. При этом, изначально задавая параметры, такие, например, как массы частиц и константы взаимодействия, надо учитывать множество деликатных проблем в будущем. Мы уже видели, что синтез барионов и ядер очень чувствителен к величинам параметров; то же самое относится и к процессам, протекающим внутри звезд. Существуют и постоянно пополняются новые свидетельства о тонкой настройке параметров нашей Вселенной. Каким же образом была проведена столь точная ее «юстировка»? Как можно было так точно предусмотреть заранее сотни причинных связей, выбрать час-

тицы и задать их свойства? Теперь, получив информацию, каждый может выбрать из предложенных в начале главы вариантов тот, который ему больше нравится, или предложить свой собственный.

С точки зрения автора, наиболее простым способом создания Вселенной с комфортными для разума условиями представляется следующий метод: не заботиться о конкретных деталях, а «просто» создать множество вселенных со всевозможными видами частиц, значениями их масс, с темной энергией и остальными физическими параметрами — какая-нибудь вселенная да подойдет.

Рассмотрим аналогию. Предположим, вам как командиру полка требуется во что бы то ни стало поразить очень маленькую мишень. Она слишком мала даже для снайпера, да и ночь на дворе. Выход из положения есть — надо приказать, чтобы весь полк начал стрелять в цель, каждый из своего оружия. Кто-нибудь когда-нибудь да попадет! Конечно, множество пуль пропадет напрасно, но цель будет достигнута. Кому-то такое решение проблемы может показаться малоэстетичным и скучным. Ну что ж, о вкусах не спорят. Единственным аргументом в пользу его служит только то, что оно работает! А возможно, и только оно.

Может быть, и природе проще создавать вселенные с *самыми разными* свойствами, не заботясь о деталях. Тогда среди них обязательно найдутся подходящие для возникновения живых существ. Конечно, множество вселенных при этом будут «нежизнеспособными», ну и пусть их. Природа не заботится о проигравших и не сожалеет о напрасных трудах своих. Из тысяч икринок лишь несколько превращаются в полноценных рыб, судьба остальных волнует только охотников за икрой.

О красоте теорий

Ученые полагают, и не без оснований, что лишь красивая теория может быть правильной. Но что такое красивая теория? Конечно, каждый считает свою теорию красивой, но на этом согласие и заканчивается. Известен поучительный пример из

XVII в. Кеплеру и Галилею очень не нравились эллиптические орбиты планет. То ли дело такая идеальная фигура, как круг! Но когда Ньютон открыл свой закон тяготения, ситуация резко изменилась. Одна формула описывает все многообразие орбит, да еще и движение тел в поле тяжести Земли! Это ли не красиво? «Неэлегантные» эллиптические орбиты оказались частью замечательно красивой теории.

Очевидно, понятие красоты научной теории несколько расплывчато, но любопытным фактом является то, что верные теории оказываются красивыми. Это несколько странно, потому что законы природы возникли задолго до появления человека и тем более до формирования самого понятия красоты. Можно было бы предположить, что, работая долгое время с правильной теорией, люди к ней привыкают, и она кажется им красивой. Но многие теории с самого начала представлялись красивыми — общая теория относительности, модель Вайнберга—Салама, идея суперсимметрии (последняя до сих пор не подтверждена). Значит, есть что-то неувловимое, что отличает теории друг от друга вне зависимости от того, верны они или нет.

По-видимому, критерием красоты служит степень экономности средств, которыми достигается цель — объяснение некоторого круга явлений и предсказание новых. И круг этот не должен быть маленьким. Можно даже попробовать выразить это в виде простой формулы:

$$R = \frac{N}{P},$$

где R — коэффициент качества теории, чем он выше, тем красивее теория кажется нам; N — число объясненных природных явлений, P — количество информации (в битах), использованной для начальных постулатов теории.

Величину N трудно определить однозначно, но в данном случае это и не очень важно.

Теперь вопрос можно сформулировать по-другому: Почему теории с большим значением R оказываются верными? Правильно поставленный вопрос облегчает поиск ответа на

него. Если принять идею множественности вселенных, проблема красоты теорий может быть сведена к следующему вопросу: почему доля вселенных с большим коэффициентом R велика по сравнению с долей других вселенных? В этом случае было бы неудивительно, что наша цивилизация возникла именно в такой вселенной. Итак, надо обосновать, почему доля вселенных W_{Universe} с определенным значением R пропорциональна R , а точнее, $W_{\text{Universe}} \sim R^a$, $a > 0$.

Строгое доказательство этой формулы пока не представляется возможным, но выбрать подходящий вариант объяснения вполне можно. Будем исходить из предположения о существовании большого множества вселенных с самыми разными свойствами. Тогда разумно считать, что чем сложнее устроена конкретная вселенная, тем реже в природе встречаются вселенные такого типа. Конечно, разумная жизнь не возникает в совсем простых вселенных, каких большинство. Есть некий порог сложности, ниже которого не стоит опускаться. Разум появляется в тех вселенных, где этот порог превышен. Их число много меньше, чем простых вселенных, но только они и интересны. Другими словами, если все множество вселенных разбить по степени их сложности, то получим набор:

$$K_1, K_2, K_3, \dots K_U, K_{U+1}.$$

Индекс означает степень сложности вселенной, K_1 — число самых простых вселенных, K_2 — число вселенных, устроенных чуть более сложно, и т. д. Число самых простых вселенных, где возможно появление разума, обозначено как K_U . K_{U+1} — число более сложных вселенных, населенных разумом. Выше было предположено, что чем сложнее вселенные, тем их доля меньше. Это означает, что

$$K_1 > K_2 > K_3 > \dots > K_U > K_{U+1}.$$

Но раз число простых вселенных, населенных разумом, больше (а скорее, много больше) числа более сложных вселенных, населенных разумом, то вероятность разумной цивилизации обнаружить себя в простой вселенной выше (а скорее, много выше), чем в более сложной. Термин «простая» в

данном случае означает, что свойства этой вселенной определяются наименьшим числом постулатов. А это как раз и означает, что наша Вселенная, населенная разумной жизнью должна описываться красивой теорией.

Итак, в начале этой главы были перечислены три основных пути развития науки. Вариант В — идея о множественности вселенных — представляется вполне работоспособным. Он предлагает не заботиться о конкретном способе создания вселенной со свойствами, подходящими для зарождения разума, а «просто» создать множество вселенных со всевозможными значениями темной энергии и остальными физическими параметрами в расчете на то, что какая-нибудь из них подойдет.

Вопрос, который волнует всех без исключения, — *где же все эти вселенные находятся и почему их свойства различны?* Ответу на вторую часть вопроса посвящен раздел «Случайный потенциал». Конкретная реализация механизма возникновения различных по свойствам вселенных сейчас разрабатывается заинтересованными учеными, например в теории струн. Ответ на первую часть вопроса дать проще. В главе 2 был рассмотрен механизм инфляции. Один из результатов состоит в том, что наша Вселенная — это всего лишь небольшая, видимая, часть всей, Большой, Вселенной, размер которой $\sim 10^{10^{12}}$ см (размер видимой части Вселенной $\sim 10^{28}$ см). Другие вселенные, с другими свойствами, находятся на границе нашей Большой Вселенной и дальше.

Внимательное чтение этой книги должно привести к пониманию исключительной важности понятия потенциала. Именно он определяет свойства частиц и в конечном счете всей Вселенной. Основное влияние оказывает форма минимума потенциала, просто потому, что именно в области минимумов развиваются основные события — определяются массы частиц и устанавливаются параметры взаимодействия. Но если потенциал имеет один минимум, то и свойства вселенных будут одинаковыми. Наличие нескольких минимумов тоже не спасает. Посмотрим, содержит ли современная теория намеки на потенциалы с большим, а лучше — с бесконечным числом минимумов.

Случайный потенциал

Настоящие приключения начинаются с поиска не новых пейзажей, а свежих глаз.

Марсель Пруст

На протяжении всей этой главы упоминались вселенные с различными свойствами. Вопросы о местонахождении этих вселенных и о причинах, приводящих к различию их свойств, обходились стороной. Сейчас подходящий момент для обсуждения этой проблемы. В главе 1 уже вводилось понятие поля, основное для современной физики, и здесь оно будет использовано. Поскольку, как мы видели, для инфляционной стадии необходимо существование скалярного поля, за основу возьмем именно его.

Само поле физического смысла обычно не несет, в отличие от кинетической и потенциальной энергии, связанной с этим полем. Точнее, потенциал V зависит от значения поля и имеет физический смысл плотности энергии этого поля. Вид функции $V(\phi)$ показывает, какую плотность энергии имеет пространство в зависимости от значения поля ϕ в этой области пространства. Этот вид изначально не определен и в теоретических моделях выбирается в зависимости от целей исследования. Например, простейшие инфляционные модели основаны на потенциалах вида $V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$ либо $V(\phi) = \frac{1}{4} \lambda \phi^4$ (последняя, похоже, противоречит наблюдениям). Кинетическая энергия может зависеть от самого поля и его производных. Именно эти две величины обычно постулируются, и только они имеют физический смысл.

Часто используются и другие формы потенциалов, но все они имеют некоторые странности, которые обычно не обсуждаются. Например, принято выбирать минимум потенциала около значения $\phi = 0$. Но если все значения поля ϕ непосредственного физического смысла не имеют (а только энергия), то почему отдается предпочтение именно величине $\phi = 0$? Кроме того, при планковских плотностях энергии квантовые флуктуации заведомо велики, и, значит, при значениях поля $\phi > \phi_P$, при которых потенциалы становятся больше планков-

ской плотности, они теряют всякий смысл. Это означает, что, фиксируя вид потенциала, мы сразу создаем себе проблемы при высоких плотностях энергии.

Еще один важный вопрос к будущей сверхтеории, одно-значно вытекающий из всего сказанного в этой главе. Законы Природы, которые еще предстоит открыть, должны объяснять значения масс всех частиц, константы взаимодействия, спины и т. д. Эти законы объективно существуют и, конечно, никакой связи с разумной жизнью не поддерживают. Однако они, законы, как будто специально приводят к таким параметрам (массам и т. д.) Вселенной, чтобы разумная жизнь могла возникнуть. Будущая сверхтеория должна, кроме всего прочего, разрешить эту загадку.

Такой теории у нас пока нет. Тем не менее мы можем проанализировать различные варианты решения проблемы, не вдаваясь в детали их осуществления. Упростим себе задачу и будем следить лишь за положением минимумов потенциала. Выделенная роль минимумов состоит в том, что поле, предоставленное само себе, стремится именно к такому состоянию, при котором потенциал минимален. Так же и шарик скатывается с горки вниз и после недолгих телодвижений располагается в долине. Итак, мы живем в одном из минимумов. Каковы же варианты их расположения, т. е. при каких значениях поля функция $V(\phi)$ минимальна?

Вариант 1. Значение поля $\phi = 0$ действительно выделено. Минимум (или конечное число минимумов) потенциала расположен(ы) около нулевого значения поля, и других минимумов не существует (рис. 5.4). Это действительно может иметь место, например в многомерных теориях, где поле связано с размером дополнительного пространства. Такой вариант возможен, но ответ на «антропную

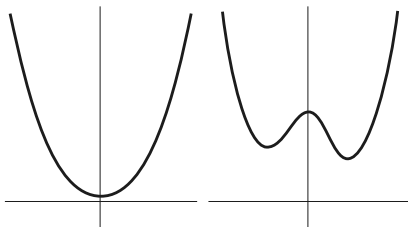


Рис. 5.4. Потенциал с конечным числом минимумов, расположенных около нулевого значения поля.

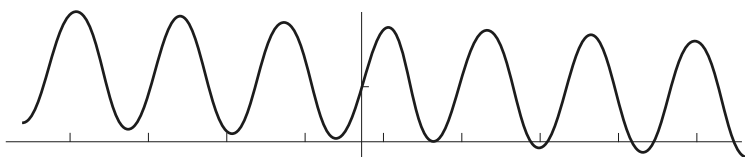


Рис. 5.5. Потенциал с бесконечным числом минимумов, расположенных согласно некоему закону.

проблему» (почему параметры теории приводят к появлению жизни) вряд ли будет получен.

Вариант 2. Число минимумов потенциала бесконечно велико. Они расположены по некоторому, неизвестному нам пока закону. Возможный вариант представлен на рис. 5.5. Будущая теория, конечно, объяснит, по какому именно закону, но «антропная проблема» и здесь остается актуальной, хотя и в ослабленном виде. Действительно, почему в счетном наборе минимумов, подчиняющихся определенному закону, должен существовать некий уникальный минимум, с точнейшей подстройкой параметров, приводящих к появлению жизни? Это маловероятная ситуация.

Вариант 3. Число минимумов потенциала бесконечно велико, но расположены они случайным образом. На рис. 5.6 изображена часть такого «случайного» потенциала. Вот этот вариант вполне самосогласованно отвечает на антропный вопрос: «случайность» означает, что вероятность каждого следующего минимума быть подходящим для возникновения ра-

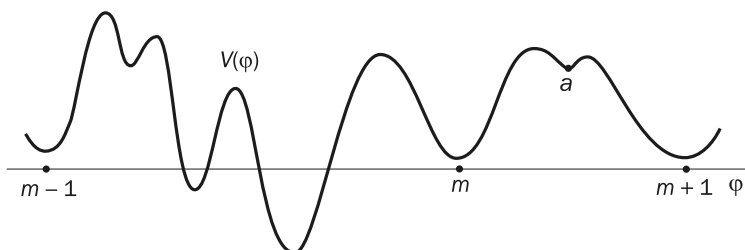


Рис. 5.6. Потенциал с бесконечным числом минимумов, расположенных хаотично.

зума не равна нулю, хотя и очень мала. А поскольку минимумов бесконечно много, подходящий обязательно найдется.

Другие варианты придумать непросто. Итак, похоже, что любая однозначно заданная форма потенциала противоречит факту существования разума во Вселенной, и не важно, выдуман потенциал из головы или получен как следствие будущей свёрхтеории. Слишком мала вероятность того, что изначально закладываемые свойства мира будут пригодны для разумной жизни. Скорее всего, реализуется третий вариант, и будущая теория должна указать путь к его реализации.

Какую же информацию можно извлечь, следуя варианту № 3, т. е. предполагая, что потенциал — случайная функция? Несколько лет назад автору удалось показать, что подобный подход имеет ряд преимуществ и является самосогласованным. Далее это демонстрируется на одном примере.

Отступление.

Количество минимумов случайного потенциала

Прежде всего сформулируем более точно понятие случайного потенциала. Пусть имеется плотность вероятности $P(V)$, определяющая вероятность $dP = P(V) dV$ найти

значение потенциала V в интервале dV , если значение поля равно ϕ . Именно функцию $P(V, \phi)$ должна будет определить будущая теория, сейчас же мы можем только констатировать факт ее существования. Теперь единственное, что нам нужно, — это сформулировать утверждение-постулат:

Пусть при некотором значении поля ϕ_0 известно значение потенциала V_0 . Тогда существует такое $(0 < \epsilon < 1)$, что для любых V и ϕ , таких, что $|V - V_0| > \epsilon$, выполняется условие $P(V, \phi) > 0$, не зависящее от ϕ_0 .

Строгим следствием этого постулата является наличие бесконечного числа минимумов. Для доказательства предположим обратное: начиная с некоторого значения поля ϕ_1 минимумы отсутствуют, и, следовательно, функция $V(\phi)$ строго положительна (или строго отрицательна). Тогда плотность вероятности $P(V < 0, \phi) = 0$ (или $P(V > 0, \phi) = 0$ соответственно) для любых $\phi > \phi_1$. Но это противоречит постулату. Значит, число минимумов БЕСКОНЕЧНО и потенциал выглядит примерно так, как показано на рис. 5.6. Как уже упоминалось, наша Вселенная расположена в одном из минимумов потенциала.

Из всей логики предыдущего обсуждения вытекает, что вероятность найти значение потенциала в минимуме, т. е. в

точках $m-1$, m , $m+1$, точно равным нулю, бесконечно мала. Это значит, что в нашей Вселенной, находящейся, скажем, в минимуме m , плотность энергии вакуума обязательно отлична от нуля. Как мы знаем, наблюдательные данные как раз и подтверждают это. Кстати, если в будущем окажется, что плотность энергии вакуума все-таки равна нулю, это опровергнет всю конструкцию, описанную выше. То, что имеется принципиальная возможность опровергнуть какую-либо теорию, является положительным моментом для нее. Странно выглядела бы теория, легко приспособливающаяся к новым экспериментальным данным. Это означало бы нулевую предсказательную силу такой теории.

И еще один момент. Как известно, наблюдаемое значение плотности энергии вакуума крайне мало. Ее естественное значение должно было бы составлять ~ 1 (в планковских единицах), но она равна по порядку величины 10^{-123} ! Современные теории не в состоянии объяснить этот факт. С позиций же случайного потенциала ситуация выглядит следующим образом. Имеется бесконечное число минимумов, в каждом из которых, согласно постулату, вероятность обнаружить плотность энергии в любом малом интервале не равна нулю. Значит, всегда найдутся минимумы, расположенные сколь угодно близко к нулю. Доля их, конечно, крайне мала, но, поскольку всех минимумов бесконечно много, *число* таких минимумов также бесконечно. Итак, с точки зрения случайного потенциала малое значение плотности энергии означает лишь то, что доля вселенных с таким свойством мала. Мы живем в одной из них, и нам нет дела до остальных вселенных, поскольку взаимодействие между вселенными отсутствует.

Замечание напоследок

А так ли уж хорошо позаботилась Природа о детях своих? Избавила ли она нас от опасности глобальных катастроф, ведущих к гибели всего живого?

Природные катастрофы прошлого вполне могли стать причиной гибели жизни на Земле. Первая катастрофа, согласно одной из гипотез, произошла 2,3 млрд. лет назад, в первый

ледниковый период, когда лед покрыл Землю, возможно, даже целиком. Причины столь глубокого и длительного похолодания на планете не вполне ясны. Выжили только те одноклеточные, которые случайно оказались в местах, нагреваемых теплом, идущим от ядра Земли.

Еще одна катастрофа произошла 250 млн. лет назад, на границе палеозоя и мезозоя, когда погибло около 90% морских организмов. Тепло земного ядра, спасшее зарождавшуюся жизнь 2,5 млрд. лет назад, чуть не вызвало ее гибель: колоссальный выброс продуктов вулканизма в районе нынешней Сибири 650 млн. лет назад привел к катастрофическому парниковому эффекту. Температура поверхности Земли увеличилась на 10–20 °С, реки испарились.

Второй ледниковый период на границе мезозоя и кайнозоя, по мнению многих биологов, привел к известному вымиранию динозавров. (Часть авторов связывает это вымирание с падением астероида, но оно если и сыграло роль, то лишь дополнительную: «добило» виды, которые и без этого шли к своему концу.)

Впрочем, биосфера представляет собой весьма устойчивую систему, разрушить которую полностью не так-то просто.

ЖИЗНЬ ЦИВИЛИЗАЦИЙ

Они будут прилежно слушать, но не услышат;
они будут внимательно смотреть, но не увидят.

Евангелие от Матфея, 13:14

Внеземной разум, его существование, проблема обнаружения и встречи с ним — тема захватывающая. Наверное, поэтому так велико число публикаций на эту тему, от научно-фантастических романов до научных статей. Нам тоже стоит обсудить нынешнюю ситуацию в данном вопросе.

С научной точки зрения, мы вступаем в наиболее спекулятивную область с бедным экспериментальным и наблюдательным материалом. По большому счету, имеется всего два наблюдательных факта, они же и тривиальны: а) во Вселенной существует по крайней мере одна цивилизация (наша) и б) хотя свойства Вселенной одинаковы во всех ее закоулках, следов других цивилизаций до сих пор не обнаружено. Тем не менее любознательная часть человечества крайне заинтересована проблемой соседей по космосу и развила интенсивную деятельность по их поиску.

Понимая всю неполноту наших знаний о зарождении цивилизаций, попробуем оценить вероятность встречи с внеземным разумом. Для анализа возьмем только нашу Галактику с ее сотней миллиардов звезд и посмотрим, насколько быстро может расширяться сфера влияния одной цивилизации. Для начала оценим ее возраст. Наше Солнце зажглось 5 млрд. лет назад, и этого времени хватило на образование Земли и на то, чтобы разумная жизнь эволюционировала до нашего уровня. Будем считать, что эта цифра (5 млрд. лет) характерна и для других цивилизаций. Но в нашей галактике Млечный Путь звезды рождались и десять миллиардов лет назад.

Тогда получается, что может существовать некая цивилизация, которая старше нас на 5 млрд. лет. Не рискуя ее обидеть, будем считать, что изначально она была похожа на нашу. Значит, им, как и нам, потребовалось 10 тыс. лет, чтобы пройти путь от дикого состояния до космических полетов. Даже если добавить еще тысячу лет на освоение межзвездных перелетов, это небольшой срок по сравнению с временем жизни древней цивилизации и Галактики в целом.

Итак, несколько миллиардов лет назад появилась цивилизация, стремящаяся осваивать новые планеты (такая у них цель). Обычно оценивается количество таких независимых цивилизаций. Эти оценки содержат много неопределенностей, но забудем о них на время и предположим, что появилась всего одна цивилизация. Далее делаем разумные предположения, которые каждый читатель сможет затем изменять по собственному усмотрению. Будем считать, что экспансия осуществляется следующим образом.

От планеты, заселенной пра-цивилизацией, снаряжается три корабля, летящих в разные стороны, с 1 тысячей поселенцев и необходимой техникой. Корабли долетают до ближайших подходящих звезд, и пра-люди поселяются там. Расстояние между звездами $L \sim 1$ парсек, скорость корабля $v = 0,2 c$ ($1/5$ скорости света), так что лететь они будут 20 лет. Выбранная скорость корабля кажется сейчас недостижимой, но не будем забывать о возрасте цивилизации, а значит, и о ее возможностях. Да и сейчас уже разрабатываются паруса, использующие солнечный ветер — поток элементарных частиц от Солнца, который придаст начальную скорость межзвездному кораблю. Очень важно, чтобы парус был как можно более легким; достигнутый сейчас результат — в 50 раз тоньше листа бумаги при размере в 20 м.

Но вот переселенцы лет через 20 достигли подходящей планеты. Дадим им еще лет 300 спокойно пожить и размножиться, чтобы они были в состоянии повторить операцию — отправить еще 3 таких же корабля к следующим звездам. При таких предположениях поселенцы будут распространяться по галактике со скоростью 1 парсек в 320 лет. Размер

нашей Галактики — 60 килопарсек, и, чтобы заселить ее всю, потребуется повторить операцию 60 тысяч раз. Нетрудно подсчитать, что через 20 млн лет одна-единственная цивилизация заполнит всю Галактику. Конечно, мы получили лишь грубую оценку. Неучтенные факторы могут изменить результат в ту или другую сторону. Например, солидное число звезд сосредоточено близко к центру Галактики, и расстояние между ними гораздо меньше 1 парсека. Кроме того, далеко не все звезды имеют подходящие планеты, и на их заселение не будет потрачено время. Тем не менее эта цифра — 20 млн лет — слишком мала по сравнению со временем жизни древней цивилизации в несколько миллиардов лет, чтобы поправки к ней изменили дальнейшие выводы.

Сколько звезд можно заселить подобным образом? Это также нетрудно оценить: на каждый цикл заселения потребуется 3 корабля, каждый корабль освоит одну планету, всего 10^4 циклов. Итого $3^{10\,000} = 10^{4\,771}$ планет, что много даже для всей Вселенной, а не только для нашей Галактики. Как видно, не обязательно посылать по 3 корабля, одного-двух окажется достаточно.

Итак, за 20 млн. лет Галактика может быть полностью заселена колониями только одной цивилизации. Это очень малый срок по сравнению со временем существования Галактики, так что мы должны были бы появиться, когда все места заняты и банкет в разгаре. И где же они, колонисты, цивилизация которых насчитывает миллиарды лет? Почему не вступают с нами в контакт? Почему поиски следов их жизнедеятельности пока безуспешны? Попробуем перечислить хотя бы основные варианты.

1. Возникновение жизни, а тем более разумной, — редкое явление, даже при наличии подходящих планет. Мы — первые в Галактике, а скорее всего, и в нашей Вселенной.

2. Срок существования цивилизации не очень велик.

3. Перемещение в космосе опасно, и разумные существа избегают этого. Действительно, если в галактике имеется множество небольших черных дыр или кротовых нор, то столкновение с одной из них чревато неприятными последствиями.

4. Возможно, что мы им просто неинтересны.
5. Им неинтересна экспансия собственной цивилизации.
6. Мы еще не в состоянии воспринимать их сигналы.

Разберемся с каждой возможностью.

1. *Возникновение жизни — редкое явление.* Возможно, что это действительно так, но мы еще недостаточно продвинулись, чтобы даже оценить вероятность этого. Такие оценки, конечно, делаются, но выводы сильно зависят от того, что конкретный автор хочет доказать, а также от исходных предположений. Например, долго считалось, что жизнь зарождалась в теплом бульоне из растворенных в воде химических компонентов. Но, по-видимому, жизнь на Земле возникла миллиарда 4 лет назад. В то время условия на Земле были далеки от идиллического теплого бульона — шел процесс формирования планетной системы вокруг Солнца, сопровождавшийся многочисленными столкновениями твердых тел самой разной массы. На Землю падали метеориты, большие и маленькие, что приводило к спонтанному и резкому нагреву поверхности, вода испарялась.

Согласно одной из теорий, жизнь могла зародиться глубоко под Землей, в нескольких километрах от поверхности. Интересно, что пробы вещества, поднятого с большой глубины, дали положительный результат — следы жизни действительно были найдены! Видимо, такая форма жизни не может быть основана на потреблении кислорода, поскольку глубоко под землей его мало. Известно, что подобные организмы — экстремофилы — существуют и сейчас, они были найдены в горячих серных источниках. Таким образом, чтобы оценить вероятность возникновения жизни, надо учесть все возможности, что не представляется реальным. Однако надо признать, что жизнь может существовать при гораздо более суровых условиях, чем казалось до сих пор. Так, мох, выставленный на две недели в открытый космос, перенес это испытание без вреда для себя.

2. *Срок существования цивилизации не очень велик.* Малопривлекательная перспектива, и, чтобы оценить варианты развития событий, оглянемся на себя.

Во-первых, на протяжении всей своей истории человечество занималось самоуничтожением. В конце концов оно может преуспеть в этом. К катастрофе способны привести глобализация терроризма, случайные утечки вредоносных бактерий, возникновение новых эпидемий наподобие СПИДа. Каждая из возможностей представляется маловероятной, но она существует, и за длительный промежуток времени вероятность вполне может приблизиться к единице.

Во-вторых, человечество стало глобальным фактором, уничтожающим естественные связи, которые устанавливались миллионы лет. Можно долго перечислять примеры вымирания видов, загрязнения атмосферы и т. д. Тем не менее думаю, что цивилизация способна справиться с этими проблемами. Не наша цивилизация, так другая. Это значит, что вышеназванные причины вряд ли служат причиной гибели *всех* цивилизаций в Галактике.

Но есть не очень заметный фактор, который может привести к серьезным последствиям. Что самое печальное, сейчас не ясно, как его исключить. Этот фактор — отсутствие естественного отбора. Человечество либо исключило естественный отбор, либо изменило его направление, и неизвестно, что хуже. Печально то, что насущно необходимый для человеческого сообщества естественный отбор (слабые погибают, не дав потомства) противоречит самим принципам гуманного общества, без которых существование цивилизации также проблематично.

3. *Перемещение в космосе опасно.* Вообще говоря, этот аргумент не представляется очень серьезным. В конце концов, наша планета тоже «перемещается в космосе» со скоростью 29 км/с вокруг Солнца, да и само Солнце является одной из типичных звезд, скорость движения которых вокруг центра галактики составляет примерно 200 км/с. И ничего страшного с Землей до сих пор не произошло.

Чтобы понять, насколько аргумент об опасностях космоса существенен, рассмотрим возможность и последствия столкновения с черной дырой. По-видимому, это наиболее неприятный вариант из известных — ведь увидеть черную дыру и

предотвратить столкновение с ней не так просто. Прежде всего оценим их количество в галактике. Будем считать, что вся скрытая масса галактики заключена в черных дырах. Скорее всего, это не так, но лучше переоценить опасность, чем недооценить. Итак, пусть суммарная масса всех черных дыр $M_{\text{чд}} = 10^{12} M_{\odot} = 10^{45}$ г. Черных дыр с массой, меньшей, чем $M_{\text{мин}} = 10^{15}$ г (миллиард тонн!), быть не должно: все они испарились за время существования Вселенной благодаря эффекту, открытому Стивеном Хокингом. Значит, таких черных дыр не больше, чем $N_{\text{чд}} = M_{\text{чд}}/M_{\text{мин}} = 10^{30}$.

Космический корабль, совершив перелет длиной l , «заметет» объем $V = Sl$, где S — площадь поперечного сечения корабля. Не будем скупиться и построим корабль с площадью $S = 1 \text{ км}^2$. До соседних звезд в среднем 5 парсек. Значит, объем, в котором побывает корабль за время полета,

$$V = Sl \sim 10^{-26} (\text{пк}^3).$$

Количество черных дыр в этом объеме (именно столько столкнется с кораблем) легко вычисляется:

$$n = \frac{V}{V_{\text{Gal}}} N_{\text{чд}}.$$

Объем нашей Галактики $V_{\text{Gal}} = 10^{11} \text{ пк}^3$, что дает одно столкновение на 10^7 перелетов. Это не так уж и мало — ведь мы могли не учесть, например, корреляции плотности черных дыр и звезд (разумно предположить, что чем больше плотность звезд, тем больше плотность черных дыр). Поэтому стоит посвятить некоторое время последствиям встречи черной дыры с кораблем.

Итак, корабль, летящий с субсветовой скоростью, сталкивается с черной дырой массой в миллиард тонн. В воображении рисуются картины гибели Титаника и прочие неприятности. Но черная дыра — необычный объект. Вся его масса заключена под его сферой Шварцшильда, радиус которой для данной массы равен примерно 10^{-13} см. Это в сто тысяч раз меньше размера атома. Вряд ли повреждения, нанесенные таким снарядом, будут непоправимыми. Конечно, пролетая

мимо частиц в атомах, черная дыра изменит траектории этих частиц своим гравитационным полем. В условиях поставленной задачи нетрудно оценить дополнительную скорость, приобретаемую частицей, – примерно 10 м/с. Это совсем мало по сравнению со скоростью теплового, хаотического движения частиц в сотни метров в секунду и тем более мало по сравнению со скоростью электронов в атомах. Чтобы возникли проблемы, размер повреждений должен быть как минимум с атом. Значит, черная дыра должна быть в сто тысяч раз массивнее минимального значения, поскольку – еще одна странность черных дыр – их масса пропорциональна радиусу, а не объему, как у всех нормальных тел. Но тогда их должно быть в те же сто тысяч раз меньше в галактике, поскольку их суммарная масса остается прежней – $10^{12} M_{\odot}$. В этом случае вероятность столкновения действительно мала.

Последние три возможности (4–6) несколько более оптимистичны. Предположим, что цивилизации в Галактике возникают и некоторые из них преодолевают те трудности и опасности, о которых говорилось выше. Тогда, как мы видели, они в состоянии заселить всю Галактику за 20 млн. лет. Это не такой уж и большой срок. После рождения нашего Солнца из межзвездного газа прошло 5 млрд. лет, а мы уже можем читать, писать и летать. Галактика же существует около 10 млрд. лет. Поэтому наличие старых цивилизаций, которые старше нас на несколько миллиардов лет, кажется вполне возможным. Если подобная цивилизация в свое время посвятила несколько миллионов лет облету всех звезд Галактики, то такая любознательность кажется естественной. Значит, инопланетяне знают о Земле и обо всех других обитаемых планетах, и знают их так же хорошо, как мы свою планету. Или лучше. Почему же они не вступают с нами в контакт?

Итак,

4. *Возможно, что мы им просто неинтересны.* Если они старше нас на миллиарды лет, то это означает такую же разницу во времени эволюции. Теперь вспомним, что было 2–3 млрд. лет назад на Земле. Жизнь только зарождалась. Да-

же трилобиты, предшественники раков, крабов и прочих современных членистоногих, появились всего полмиллиарда лет назад. Прогресс налицо. Их родственники живут до сих пор, а есть ли у читателя желание вступать с ними в контакт (интеллектуальный)? Какие такие проблемы можно обсуждать с креветкой? Ответ очевиден. Итак, древним цивилизациям просто скучно общаться с такими примитивными созданиями, как мы.

Но если они настолько совершеннее нас, то им ничего не стоило заселить нашу планету давным-давно, до динозавров, или еще раньше, в эпоху тех же трилобитов. Тогда человечество просто не возникло бы. Но мы существуем! (?) И это может означать, что

5. *Инопланетянам неинтересна экспансия собственной цивилизации.* Собственно, почему цивилизация должна стремиться к увеличению своего контингента? По-видимому, такое стремление выработалось за миллионы лет эволюции и заложено в нас на уровне безусловных рефлексов. Все виды, не обладавшие этим свойством, были вытеснены из областей, приспособленных для размножения, и поэтому вымерли. Но цивилизация, которая пару миллиардов лет назад была в состоянии облететь галактику, не нуждается в таком рефлексе. Человека, много путешествовавшего в течение жизни, трудно соблазнить дальними странами в пожилом возрасте. Он скорее займется какой-либо творческой деятельностью. Возможно, то же самое происходит и с пожилыми цивилизациями. Впрочем, если они и продолжают путешествовать, то, скорее всего, уже в другие галактики. Это означает, что надеяться на их стремление связаться с нами не следует.

6. *Как уже говорилось, не стоит рассчитывать на их попытки установить контакт.* Вряд ли есть надежда и на обнаружение случайных сигналов. Просто потому, что мы еще не в состоянии воспринимать их сигналы. За время развития они могли перейти к другим способам связи, нежели электромагнитные волны. Мы же научимся этому еще не скоро, хотя изменения в способах передачи информации происходят на наших глазах. Фрэнк Дрейк (Frank Drake), президент института

SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence — Поиск внеземного разума), обратил внимание на то, что поток радиоволн от нашей планеты в окружающее пространство не увеличивается со временем, как этого следовало ожидать, а уменьшается. Причина кроется в новых технологиях, таких, например, как кабельное и спутниковое телевидение. В связи с этим интересно, что разговоры по сотовым телефонам пассажиров самолетов могут мешать поиску внеземных цивилизаций в рамках проекта SETI. Радиоволны от сотовых телефонов с легкостью улавливаются чувствительными антеннами, направленными в космос, и могут интерпретироваться как внеземной сигнал от разумных существ.

До сих пор мы обсуждали взаимоотношения человечества с цивилизацией, намного превышающей нашу по интеллектуальному уровню. Но стоит ожидать контактов и с более близкими по развитию партнерами, которые появились примерно тогда же, когда и мы. Именно эта захватывающая и многосторонняя проблема давно и подробно обсуждается в литературе.

В 1961 г. Ф. Дрейк предложил формулу для определения вероятности появления цивилизации в нашей Галактике:

$$N = R \cdot F_p \cdot N_e \cdot F_l \cdot F_i \cdot F_c \cdot L,$$

где N — число развитых цивилизаций; R — число звезд, образующихся в год; F_p — доля звезд с планетами; N_e — доля планет с подходящими для возникновения жизни условиями; F_l — вероятность зарождения жизни в благоприятных условиях; F_i — вероятность возникновения разума при наличии жизни; F_c — вероятность развития цивилизации, способной к межзвездным контактам; L — время жизни цивилизации;

Формула хороша тем, что ее анализ помогает понять, насколько неопределенны наши знания, а значит, и предсказания в этой области. Кое-что мы знаем достоверно, другие аспекты — хуже, а некоторые и совсем плохо. Так, скорость звездообразования в нашей галактике R известна очень даже неплохо: несколько новых звезд в год. Доля звезд, обладающих планетной системой, $F_p \sim 1$, тоже неплохо предсказывается

модельными расчетами. Величина N_e уже не очень определена. При ее обсуждении сразу начинаются дебаты о том, что считать «жизнью» и какие условия достаточны для ее возникновения. Основные споры вызывает величина F_i , вероятность возникновения жизни, даже если условия для этого созданы. Мнение одних ученых о том, что $F_i \sim 1$, совершенно не разделяется теми, кто считает такую вероятность близкой к нулю. Проблема усугубляется тем, что вообще не ясно, какой объект считать живым и тем более разумным. Множество научно-фантастических романов как раз и основано на недоразумениях подобного рода. Оценка величин F_i и F_c также сильно зависит от менталитета оценщика. Ну и, наконец, время жизни развитой цивилизации, L , колеблется от 1 тысячи лет до бесконечности.

Отметим важное обстоятельство: в формуле Дрейка не заложено влияние самой старой цивилизации на оставших в своем развитии соседей. Этот фактор с трудом поддается оценке, поскольку нам неизвестна мораль цивилизации, развивавшейся несколько миллиардов лет, а также их отношение как к своему будущему, так и к нам, братьям своим меньшим. Вполне возможно, что древняя цивилизация подавляет развитие более молодых. Ведь и мы по-разному относимся к бабочкам и комарам. Способы подавления могут быть разными, но не будем о грустном. Да и есть у сверхцивилизации проблема, достойная их интеллекта и возможностей, — это проблема собственного выживания в охлаждающейся Вселенной.

Современные модели эволюции Вселенной предоставляют на выбор несколько сценариев будущего, и все они не дают оснований для благодушия. Кратко перечислю главные.

Основной сценарий состоит в том, что Вселенная будет вечно расширяться и охлаждаться, что возможно, если космологическая постоянная действительно не меняется со временем. В итоге останутся только частицы — нейтрино, фотоны и, возможно электроны с протонами. Никаких звезд и черных дыр. Только равномерно распределенные частицы, разделенные большими расстояниями. Частиц и сейчас-то мало —

меньше одного протона на кубометр, в дальнейшем же их плотность будет только убывать, просто из-за расширения Вселенной. Темп расширения зависит от соотношения между плотностью энергии и давлением, а оно как раз и является поводом для дискуссий. Ведь сейчас около 70% плотности энергии доставляется темной энергией, свойства которой еще до конца не ясны. Выберем наиболее простой вариант: плотность темной энергии постоянна. Тогда в уравнениях, описывающих расширение пространства, добавляется слагаемое, аналогичное космологической постоянной, сначала введенной, а затем отброшенной Эйнштейном (подробности обсуждались в главе 2).

Для оценки характерного времени расширения достаточно учесть только вклад от темной энергии — он и сейчас велик, а в дальнейшем будет только увеличиваться. В этом случае размеры растут со временем согласно закону

$$R(t) = R_0 e^{H_0 t}.$$

Мы знаем, что современное значение параметра Хаббла $H_0 = 71$ км/(с · Мпк). Сейчас, если рассредоточить все атомы по Вселенной равномерно, то в кубе со стороной 1 м окажется 1 протон. Нетрудно сообразить, что через время

$$t = H_0^{-1} \ln \frac{10^{28}}{1} = 65 H_0^{-1} = 910 \text{ (млрд. лет)}$$

этот куб расширится до размеров видимой части Вселенной, которая сейчас составляет 10^{28} см. Значит, в объеме, равному размеру современной Вселенной, останется 1 протон, из которого вряд ли удастся сформировать разумное существо. Задача сверхцивилизации — не дать разлететься энергии в любом виде: в виде частиц, электромагнитного или любого другого излучения, включая гравитационное. Это не так просто сделать, как будет видно из дальнейшего.

Вторая опасность — Вселенная сожмется в состояние, предшествующее Большому взрыву. Вероятность такого развития событий уменьшилась после открытия темной энергии, но тем не менее существует.

Третья опасность — так называемый «Большой разрыв». Эта идея была выдвинута в 2003 г. в статье Р. Р. Колдвелла, М. Камионковского и Н. Н. Вайнберга «Фантомная энергия и космический конец света» и с тех пор интенсивно обсуждается. Есть определенные основания предполагать, что величина взаимодействия между частицами, благодаря которому существуют все структуры начиная с атомов, понижается со временем. Тогда в какой-то момент, когда взаимодействие значительно уменьшится, произойдет распад всех жизненно важных объектов, и разума в том числе.

Четвертая опасность. Вполне возможно, что наше пространство состоит не из трех пространственных измерений, а из (гораздо) большего числа. Мы не замечаем остальных измерений ввиду их малого размера. Но если размер дополнительных измерений растет со временем, то они уже будут серьезно влиять на динамику нашего мира, и, как всегда, не в лучшую сторону.

Пятая опасность. Современные модели часто используют понятие «брана». Это поверхность в многомерном пространстве, на которой мы, как предполагается, живем. Если это так, то частицы могут вылетать с браны в многомерное пространство. Для нас это будет выглядеть как внезапное исчезновение частицы. Поскольку наша Вселенная существует уже довольно долго, вероятность таких событий мала, даже если эти модели верны. Но за большой промежуток времени, в будущем, может испариться все вещество нашей Вселенной.

Вряд ли древнюю цивилизацию волнуют только вышеперечисленные напасти, но повод для озабоченности явно имеется.

Таким образом, если древней цивилизации не безразлична собственная судьба (что, впрочем, вполне возможно), то она должна посвятить себя решению проблемы выживания.

Оказывается, эти вопросы волнуют и отдельных, наиболее предусмотрительных, представителей человечества. Рассмотрим некоторые варианты выхода из положения. Предположим сначала, что развитие идет по наиболее вероятному первому сценарию. Тогда главная проблема — откуда в будущем

черпать энергию? Никаких привычных объектов не осталось, температура — практически абсолютный нуль. Но жизнь, что бы под этим ни подразумевалось, сопряжена с энергетическими потерями, и восполнение их — важнейшая задача. Например, по предложению Дайсона (Dyson), можно понижать температуру тел, что, оказывается, дает значительную экономию энергозатрат. При обычной температуре тела 309,6 К человек потребляет 100 Вт, а при 155 К — в 4 раза меньше. Правда, и соображать он будет вдвое медленнее. Но последнее не так уж и важно, поскольку будет справедливо для всех и при условии бесконечного времени жизни. Конечно, приспосабливаясь к низким температурам, придется пойти на некоторые жертвы. Например, надо будет полностью перестроить тело, которое всего лишь защитная оболочка для разума. (Интересно посмотреть конкурс красоты далекого будущего.)

Однако до полной победы еще далеко. Например, если охладиться придется быстрее, чем охлаждается Вселенная при расширении, то у цивилизации возникнут проблемы с отводом тепла. В запасе имеется еще один трюк, давно освоенный животными на Земле, — «зимняя спячка», во время которой энергия практически не расходуется. Впадая в анабиоз на все более длительный срок, можно продлить свое существование. К сожалению, этот план нельзя претворять в жизнь бесконечно долго.

Еще одно неприятное ограничение накладывает квантовая механика. Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, неопределенность в положении системы обратно пропорциональна импульсу. Уменьшая энергию системы, а значит, и ее импульс, мы все сильнее «размываем» систему, она становится все менее детерминированной и предсказуемой.

Но современная теория поля совместно с теорией гравитации предоставляют любопытную возможность спасения. Оказывается, могут существовать такие необычные объекты, как, например, кротовые норы и черные дыры со скалярным полем внутри них. В создании таких объектов гравитация играет первостепенную роль. Можно воспользоваться тем, что время внутри таких объектов течет совсем не так, как вдали от

них. Поэтому стоит только оказаться внутри них, и можно продлить свое существование как угодно долго. Можно возразить, что черные дыры также не вечны, что, казалось бы, опровергает эту идею. Действительно, для наблюдателя, смотрящего на черную дыру «со стороны», время жизни черной дыры ограничено. Но у тех, кто внутри, время течет совсем по-другому, и для них черная дыра будет существовать вечно.

Читатель, добравшийся до конца этой книги, понимает теперь, насколько сложны взаимосвязи в нашей Вселенной, как точно подогнаны все ее части. Более или менее ясны прошлое нашей Вселенной и возможные варианты будущего. Теперь, впервые в истории человечества, ученые представляют себе Вселенную как единый эволюционирующий объект, а не как эклектичный набор явлений и феноменов. Тем не менее ряд проблем остался нерешенным, и их решение — дело будущего.

Основные проблемы физики

1. Объединение гравитации и квантовой теории.
2. Стрела времени.
3. Дополнительные измерения, их стабильность, компактность, топология.
4. Тонкая настройка параметров нашей Вселенной на возникновение разумной жизни.
5. Происхождение различных сортов частиц.
6. Объяснение наблюдаемых величин c , G , $\hbar$.
7. Нарушение симметрии частиц и античастиц.
8. Развитие модели Вайнберга–Салама.
9. Теория раннего формирования галактик и квазаров.

Несколько замечаний. Конечно, этот список отражает мнение автора. Другие списки включают другие пункты, либо те же, но с другими приоритетами. Проблемы перечислены в порядке убывания их важности и сложности, хотя такое деление несколько условно. Вполне возможно, что решения проблем взаимосвязаны. Проблемы № 8–9 кажутся решаемыми. Проблема № 7 имеет слишком много решений, так что основная задача на будущее — выбрать правильное. Проблема № 6, возможно, будет снята автоматически после решения про-

блем № 1, 3 и 4. Решение проблем № 3–5 кажется сильно взаимосвязанным. Особняком стоит проблема 2, которую пытаются решить уже десятки лет. Проблема № 1 — наиболее важная и наиболее сложная. Она, несмотря на успехи теории суперструн и теории петлевой гравитации, еще далека от решения. Более того, если подходы к решению проблем № 3–9 более или менее понятны, то решение проблем № 1 и 2, скорее всего, будет очень неожиданным.

1. Соотношение неопределенностей и размер атома

Оценим размер r атома водорода, используя минимум школьных знаний и принцип неопределенности Гейзенберга. Энергия электрона в атоме водорода есть сумма кинетической и потенциальной энергий:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{r}.$$

Из принципа неопределенности следует, что импульс электрона p должен быть примерно равен $p \sim \hbar/r$. Чем меньше область локализации электрона r , тем больше его импульс, а значит, и скорость. Уже ясно, что локализовать такой объект непросто. Далее, учитывая, что импульс электрона $p = mv$, трудно выразить энергию электрона через его радиус:

$$E = \frac{\hbar^2}{2mr^2} - \frac{e^2}{r}.$$

Энергия системы обычно стремится к минимуму, который в данном случае можно найти из условия $\frac{dE}{dr} = 0$. В результате получаем

$$r = \frac{\hbar^2}{me^2}.$$

Это как раз то, что получил Нильс Бор, используя свои знаменитые постулаты.

2. Пространство де Ситтера

Поскольку гравитация играет определяющую роль в динамике развития Вселенной, введем величины, ее определяющие. В специальной теории относительности важную роль играет интервал между событиями:

$$ds = dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

В общей теории относительности выражение для интервала имеет более сложный вид:

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu.$$

Здесь вектор x^μ обозначает пространственные координаты и время. Величины $g_{\mu\nu}$ называются метрическим тензором, и именно они являются динамическими переменными гравитационного поля. Уравнения, предложенные Эйнштейном для вычисления метрического тензора, сложны и красивы. Они устанавливают взаимозависимость метрического тензора со свойствами материи и справедливы всюду, где не надо учитывать квантовую природу полей. Наш объект — однородная Вселенная, что сильно упрощает все уравнения, делая их обозримыми, поскольку все компоненты метрического тензора выражаются всего лишь через одну функцию — масштабный фактор $a(t)$. В этом случае интервал имеет вид

$$ds = dt^2 - a(t)^2 dr^2 - a(t)^2 r^2 d\Omega^2. \quad (\text{П } 2.1)$$

Это хотя и правильное, но все-таки не самое общее выражение. Тем не менее оно достаточно в подавляющем большинстве случаев. Функция $a(t)$ как раз и есть тот самый масштабный фактор, который появился впервые в выражении (2.1). Как явствует из (П 2.1), выражение

$$dR = a(t) dr \quad (\text{П } 2.2)$$

обозначает малый пространственный интервал, т. е. расстояние между двумя точками, расположенными вдоль радиуса, так что телесный угол $d\Omega = 0$. Именно отсюда вытекает связь (2.1). Поскольку гравитация описывается метрическим тензором, а он в данном случае сводится к одной-единственной функции $a(t)$, уравнения Эйнштейна упрощаются и имеют вид:

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8}{3} \frac{G}{c^2} \rho. \quad (\text{П } 2.3)$$

Это одно из уравнений. В правой части оно содержит плотность энергии вещества ρ , пропорциональную гравитационной постоянной G , и величину ρ_{vac} , пропорциональную плотности энергии вакуума. Как принято в физике, точка над буквой означает производную по времени: $\dot{a} = \frac{da}{dt}$.

Прежде всего рассмотрим весьма поучительный случай $\rho_{\text{vac}} = 0$, что соответствует отсутствию частиц. Поскольку мы уже знаем про существование темной энергии и, более того, про ее преобладание в современную эпоху, наши предстоящие труды полезны и поучительны. Уравнение (П 2.3) сводится к еще более простому:

$$\frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{3}{2}}. \quad (\text{П } 2.4)$$

Решение этого уравнения — тривиально:

$$a(t) = a(0)e^{t\sqrt{3/2}}$$

(оставлено слагаемое, не стремящееся к нулю со временем). Начальное значение масштабного фактора $a(0)$ зависит от выбора единицы измерения длины, как это объяснено ранее, в параграфе про странных наблюдателей.

Одной из важнейших величин в космологии является величина, называемая параметром Хаббла, которая по определению равна

$$H = \frac{\dot{a}}{a}.$$

В нашем, простейшем, случае она равна константе

$$H = H_0 \sqrt{\frac{3}{2}}, \quad (\text{П } 2.5)$$

и поэтому ситуация сильно упрощается, оставаясь тем не менее поучительной. Такое пространство называется пространством де Ситтера, в честь ученого, изучавшего его в начале прошлого века. Чтобы понять удивительные свойства этого пространства, посмотрим, какое расстояние пролетает свет за определенное время. Из специальной теории относительности

мы знаем, что свет движется так, чтобы интервал ds был равен нулю. Будем также считать, что свет движется вдоль радиуса, так что полярный и азимутальный углы не меняются и $d\theta = 0$. Тогда из уравнения (П 2.1) и условия $ds = 0$ следует выражение для перемещения dr за время dt :

$$dr = \frac{dt}{a(t)}.$$

Полный путь, который пролетает свет, начавший свое движение в момент времени t_0 и окончивший в момент t_1 , равен сумме перемещений:

$$r(t_1, t_0) = \int_{t_0}^{t_1} \frac{dt}{a(t)}. \quad (\text{П } 2.6)$$

Кстати, это уравнение справедливо не только для пространства де Ситтера, но и для большинства случаев, когда вещество распределено однородно, что приблизительно выполняется на всех этапах эволюции Вселенной. Ну а для нашего пространства де Ситтера поведение масштабного фактора хорошо известно — см. (П 2.4, П 2.5) — и мы можем вычислить путь, пройденный светом:

$$r(t_1, t_0) = e^{H t_0} - e^{H t_1}. \quad (\text{П } 2.7)$$

Здесь использован часто встречающийся выбор начального значения масштабного фактора, $a(0) = H^{-1}$.

Полученный результат — знаменательный и очень странный. Действительно, посмотрим, например, какое расстояние пролетит свет, если будет двигаться бесконечно долго. Для этого полагаем в формуле (П 2.7) $t_1 = \infty$ и получаем *конечный* ответ:

$$r(\infty, t_0) = e^{H t_0}.$$

За бесконечное время свет проделал конечный путь! Значит, все, что находится дальше, совершенно недоступно для наблюдателя, расположившегося в центре, т. е. в точке $r = 0$. И это еще не все. Если этот наблюдатель пустил другой луч света позже, то второй луч пролетит меньшее расстояние, поскольку время t_0 увеличилось.

Здесь следует перевести дух и вспомнить, что пока мы находимся в сопутствующей (координатной) системе отсчета. Ну а что же происходит с точки зрения наблюдателя, использующего физические координаты? Подставляя (П 2.4) и (П 2.7) в (2.1), получаем, что свет за большой промежуток времени проходит расстояние

$$R(t) = H^{-1} e^{H t}.$$

И, наконец, посмотрим, как изменяется физическое расстояние R_{12} между двумя наблюдателями, находящимися на координатном расстоянии r_{12} друг от друга. При наличии формул (2.1), (П 2.4) и (П 2.7) это совсем просто:

$$R_{12} = r_{12} e^{H t}.$$

Физическое расстояние между любыми двумя наблюдателями растет экспоненциально быстро. Это совсем не похоже на то, к чему мы привыкли, обитая в пространстве Минковского, когда расстояние, пройденное светом, пропорционально времени. Как мы видим, пространство де Ситтера, при всей своей простоте, обладает весьма странными свойствами. Кстати, нашим потомкам, скорее всего, придется жить именно в таком мире. Уже сейчас вклад темной энергии в общую плотность составляет 70%, а со временем эта доля только возрастает, поскольку плотность частиц уменьшается. Значит, испускаемый нами свет будет проходить все меньшее расстояние и долетать до все меньшего числа галактик. Правда, произойдет это через много миллиардов лет.

3. Масса Джинса

Определим размер и массу флуктуации, начиная с которых гравитационное сжатие преодолевает силы внутреннего давления. Пусть область слегка повышенной плотности имеет размер d . Конечно, масса этой области слегка превышает массу таких же соседних областей, поэтому гравитационные силы стремятся ее сжать. Нетрудно оценить время сжатия такой области из размерных соображений: в нашем распоряжении есть плотность среды ρ , характерный размер области L и гра-

витационная постоянная G . Из этих величин можно единственным образом записать выражение с размерностью времени — это $(G)^{-1/2}$. Значит, характерное время $t_{\text{грав}}$ гравитационного сжатия по порядку величины должно равняться

$$t_{\text{грав}} \propto (G)^{-1/2}.$$

Можно, конечно, написать сложное уравнение и честно его решить. Это приведет лишь к уточнению численного множителя. Само же выражение для времени сжатия под действием гравитационных сил останется таким же — у нас просто нет в распоряжении других размерных величин, относящихся к данной проблеме, из которых можно было бы составить нечто с размерностью времени.

Противостоять сжатию может только давление, создаваемое средой внутри этой области. Но как внутренняя область «узнает», что периферийные участки начали движение внутрь под действием гравитационных сил? Есть две возможности: с периферии прибывают атомы, плотность в центре возрастает, а с ней и давление. Вторая возможность — приход волны сжатия (звуковой волны) с периферии. К счастью, обе эти величины — скорость атомов и скорость звуковых волн $u_{\text{звук}}$ — примерно равны друг другу. Поэтому время, необходимое сжимаемой области для перегруппировки сил и организации сопротивления $t_{\text{давл}} \propto L/u_{\text{звук}}$. Если это время меньше времени сжатия гравитационными силами, то давление будет успевать нейтрализовать гравитационное сжатие. В противном случае область будет продолжать сжиматься. Итак, условие начала сжатия есть равенство времен:

$$t_{\text{давл}} = t_{\text{грав}}.$$

Простые вычисления на основе вышеприведенных формул дают размер области, при котором начинается сжатие:

$$L_j \propto u_{\text{звук}}(G)^{-1/2},$$

а масса такой области, следовательно:

$$M_j \propto L_j^3$$

Индекс «J» напоминает нам о физике Джинсе, впервые исследовавшем эту проблему.

Оценим размер области и ее массу, начинающую сжиматься в период рекомбинации, когда образовались нейтральные атомы. Скорость звука в этот период $u_{\text{звук}} \sim 5$ км/с, плотность $\rho \sim 10^{-22}$ г/см³ (подробнее эти вопросы рассмотрены в лекциях К. Постнова [21]). Теперь по формулам, приведенным выше, получаем размер области $L_J \sim 10^{20}$ см и массу внутри нее $M_J \sim 10^6 M_\odot$.

4. Взаимосвязь свойств пространства-времени и материи

Здесь на более строгом уровне рассматриваются свойства пространства, заполненного однородно распределенной материей. Из Приложения 2 мы поняли, насколько необычными свойствами обладает пространство де Ситтера, простейшее нетривиальное пространство, если корректно учесть гравитацию. Свойства этого пространства обусловлены ненулевым значением энергии вакуума. Если не быть очень требовательными, то *приближенно* такие же свойства пространства можно получить и другим способом, на чем и основана сама идея инфляции. Ключевую роль в подобных случаях играет масштабный фактор. Именно в нем заложена вся информация о метрическом тензоре и, следовательно, о конфигурации гравитационного поля, если энергия в пространстве распределена однородно. В наше время, как было обнаружено совсем недавно, энергия вакуума доминирует, но так было далеко не всегда. Раньше плотность вещества и излучения была гораздо выше плотности энергии вакуума (темной энергии), просто потому, что последняя не меняется при расширении Вселенной, а плотность энергии обычного вещества — уменьшается. Значит, были эпохи в истории Вселенной, когда плотностью энергии вакуума можно было пренебречь. Как раз это мы сейчас и сделаем, чтобы посмотреть, как расширялась Вселенная в те времена. Мы увидим, что не только плотность энергии зависит от масштабного фактора, но и сам масштабный фактор определяется как плотностью энергии среды, так и ее свойствами.

Как говорилось выше, уравнения Эйнштейна включают в себя динамические переменные гравитационного поля и материи. К пространству де Ситтера мы еще вернемся, а пока рассмотрим важный случай преобладания энергии обычного вещества. В однородном случае гравитационное поле представлено масштабным фактором $a(t)$, а вещество — плотностью энергии и давлением p . Во многих важных случаях единственная характеристика вещества, которая потребуется для анализа, — это связь давления и плотности энергии, записываемая обычно в виде

$$p = w . \quad (\text{П } 4.1)$$

Эта формула охватывает такие распространенные случаи, как пыль, когда давление равно нулю, а значит, и $w = 0$, а также излучение, при котором $w = 1/3$. Под термином «излучение» в этом контексте обычно понимается пространство, заполненное фотонами либо релятивистскими частицами, масса которых мала по сравнению с их кинетической энергией. Теперь можно выписать уравнения, являющиеся «выжимкой» из уравнений Эйнштейна. Первое из них — уже знакомое уравнение (П 2.3):

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8}{3} G \rho . \quad (\text{П } 4.2)$$

Здесь мы уже пренебрегаем вкладом энергии вакуума по сравнению с вкладом вещества и излучения. Второе уравнение в окончательном виде таково:

$$\frac{d}{da} \left(3(1 + w) \frac{\dot{a}}{a} \right) = - \frac{3}{2} (1 + w) \frac{\dot{a}}{a} . \quad (\text{П } 4.3)$$

Оно дает связь между масштабным фактором, т. е. скоростью расширения Вселенной, и плотностью вещества. Свойства самого вещества учитываются параметром w . Уравнение (П 4.3) легко решается, приводя к связи между плотностью вещества и масштабным фактором:

$$\rho = \frac{C}{a^{3(1 + w)}} . \quad (\text{П } 4.4)$$

Обычно несущественная константа C может быть определена из начальных условий. Теперь уже и решение уравнения (П 4.2) не представляет трудностей. Оно имеет вид

$$a(t) = C t^{\frac{2}{3(1-w)}} \quad (\text{П 4.5})$$

при больших временах t .

После окончания инфляционного периода Вселенная была сильно разгорячена, частицы имели сверхвысокие энергии, много большие, чем их массы. Да и плотность фотонов была высока. В этих условиях параметр $w = 1/3$, а значит, согласно формуле (П 4.5), все расстояния во Вселенной увеличиваются со временем как

$$R \sim a(t) \sim \sqrt{t}.$$

Плотность энергии как функция времени может быть определена из формулы (П 4.4):

$$(t) \quad \frac{1}{a(t)^4} \sim \frac{1}{t^2}. \quad (\text{П 4.6})$$

Плотность энергии быстро убывает со временем.

Совсем другая картина возникает, когда Вселенная как следует остыла, частицы стали медленными и основной вклад в плотность энергии вносит уже масса частиц, большая по сравнению с их кинетической энергией. Малоподвижные частицы уже не создают давления, а такое состояние, с параметром $w = 0$, как мы уже знаем, называется «пылью». Вселенная с пылью в качестве содержимого расширяется по закону

$$R(t) \sim a(t) \sim t^{2/3},$$

см. (П 4.5), а плотность уменьшается с той же скоростью, что и при доминировании излучения:

$$(t) \sim \frac{1}{a(t)^3} \sim \frac{1}{t^2}, \quad (\text{П 4.7})$$

как это следует из формулы (П 4.4).

Итак, важнейший вывод, состоит в том, что темп расширения пространства зависит от содержимого, в данном случае от величины параметра w .

5. Расширение пространства и динамика частиц

В Приложении 4 было показано, что свойства материи влияют на глобальные свойства самого пространства, и в частности на динамику его расширения. Но обратное тоже верно: оказывается, расширение пространства приводит к уменьшению скорости частиц. Докажем это для массивной нерелятивистской частицы.

Пусть имеется два наблюдателя, находящиеся на координатном расстоянии dr друг от друга. Считаем их неподвижными, т. е. $dr = \text{const}$. Однако в физических координатах, согласно выведенному нами закону Хаббла, второй наблюдатель движется относительно первого со скоростью

$$dv_{\text{obs}} = H(t)dr,$$

где dR — расстояние между ними в физических координатах. Частица, имеющая скорость $V(t)$ относительно первого наблюдателя и пролетающая мимо него в момент времени t , долетит от него до второго наблюдателя за время

$$dt = \frac{dR}{V(t)}.$$

Если бы пространство не расширялось, то скорость частицы $V(t)$ была бы постоянной. В расширяющейся вселенной это не так. Через время dt скорость частицы измеряет второй наблюдатель, который движется относительно первого со скоростью dv_{obs} . Он определит, что скорость пролетающей мимо него частицы равна

$$V(t + dt) = V(t) - dv_{\text{obs}} = V(t) - H(t)dr.$$

Из этого равенства очевидно, что

$$\frac{dV}{dt} = -H(t)V = -V \frac{da/dt}{a}.$$

Последнее равенство — это просто определение параметра Хаббла. Окончательно имеем следующее тривиальное уравнение:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{da}{a},$$

решение которого имеет вид:

$$V = \frac{\text{const}}{a}.$$

Константа определяется начальными условиями, как обычно. Самое интересное — обратная пропорциональность масштабному фактору. Если Вселенная расширилась в 2 раза, то скорость *свободно* летящей частицы уменьшилась в два раза. Закон Ньютона справедлив только в пространстве Минковского, в котором $a(t) = 1$.

6. Инфляция — первые мгновения жизни Вселенной

Мы изучали расширение пространства, когда давление и плотность энергии были связаны простой формулой $p = w$. Но на инфляционной стадии доминирует энергия не частиц, а поля, для которого эта связь не совсем понятна. Посмотрим, что здесь можно сделать и чем же так интересна эта эпоха.

Как уже говорилось выше, инфляционную стадию, т. е. стадию сверхбыстрого расширения Вселенной, можно объяснить, введя новое поле, которое так и называется — «инфлатон», или «инфлатонное поле». Кроме того, предполагается, что другие поля и частицы не вносят заметного вклада в динамику всей системы. В этом случае удастся, исходя из проверенных уравнений Эйнштейна, найти зависимость масштабного фактора от времени.

Формула (П 4.2), полученная на основе одного из уравнений Эйнштейна, пригодна и в данном случае. Более того, если раньше плотность энергии надо было связывать с давлением, что легко сделать лишь в простых случаях, то теперь она однозначно выражается через единственную динамическую переменную — инфлатонное поле. Точнее, плотность энергии есть просто сумма плотности кинетической и потенциальной энергии:

$$\frac{1}{2} \cdot \dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (\text{П 6.1})$$

Различные модели инфляции отличаются друг от друга формой потенциала, т. е. видом функции $V(\phi)$. Сейчас, правда, появились модели, в которых модернизируется кинетическое

слагаемое, первое в формуле (П 6.1), вместо скучного множителя $^{1/2}$ подставляется произвольная функция K). На первых порах вид функции постулировался без каких-либо обоснований. С развитием этого научного направления росло понимание преимуществ и недостатков инфляционного сценария, потенциал выбирался все более сложного вида. Кроме того, сейчас уже нельзя довольствоваться его простым постулированием, необходимо искать обоснование выбора его формы в современных многомерных моделях типа многомерной гравитации и теории суперструн. Для нас же важно понять суть проблемы, и мы в дальнейшем воспользуемся простейшей формой потенциала.

Ключевым моментом подавляющего большинства моделей инфляции является медленное изменение поля со временем. В конце вычислений надо будет проверить, действительно ли это так, чтобы модель была самосогласованной, и в каких ситуациях это условие может выполняться.

Второе уравнение Эйнштейна запишем, уже используя медленность движения поля:

$$3H \frac{d}{dt} \quad \frac{dV(}{d}. \quad (\text{П } 6.2)$$

К этому уравнению добавим уравнение

$$\frac{\dot{a}}{a} = H = \sqrt{\frac{8}{3} G} V(), \quad (\text{П } 6.3)$$

вытекающее из выражений (П 4.2) и (П 6.1). Здесь уже учтено, что в плотность энергии вносит вклад только потенциальная энергия, поскольку движение предполагается медленным, и, следовательно, кинетическая энергия мала по сравнению с потенциальной:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d}{dt} \right)^2 \quad \frac{1}{2} \cdot^2 \ll V(). \quad (\text{П } 6.4)$$

Выбрав форму потенциала $V()$ и используя систему уравнений (П 6.2, П 6.3), можно найти поведение поля (t) и масштабного фактора $a(t)$, сведя эти уравнения к одному:

$$\frac{d}{dt} \frac{1}{\sqrt{24} GV(\phi)} \frac{dV(\phi)}{d\phi}.$$

При виде этой формулы становится ясно, что область применимости уравнения (малые производные по времени) нужно искать там, где потенциал имеет большие значения и знаменатель формулы велик. Подбором параметров этого вполне можно добиться.

В качестве примера рассмотрим простейшую модель инфляции, с потенциалом вида

$$V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2. \quad (\text{П 6.5})$$

Прежде всего проверим, при каких значениях поля ϕ , которое называется «инфлатон», выполняется условие медленного скатывания (П 6.4). Используя уравнение (П 6.2) для поля ϕ , получим

$$\frac{1}{6H} \frac{dV(\phi)}{d\phi} \ll V(\phi).$$

Подставляя в это неравенство конкретный вид потенциала (П 6.5), получим значения поля ϕ (инфлатона), при которых справедливы все расчеты

$$\gg \frac{M_p}{\sqrt{12}}.$$

Чем больше величина поля, тем точнее наши расчеты, но тем больше и значение потенциала. То, что само поле больше планковского значения, еще не страшно, главное, чтобы потенциал был меньше планковской плотности M_p^4 . В противном случае мы попадаем в область квантовых эффектов в гравитации, и все уравнения становятся более чем сомнительными. В нашем случае квадратичного потенциала условие $V(\phi) \ll M_p^4$ сводится к ограничению на массу инфлатона

$$m \ll \sqrt{6} M_p.$$

Итак, если в некоторой области пространства, за счет квантовых флуктуаций, возникло поле $\phi_{in} > M_p$ (индекс «in»

обозначает начальную величину), то само поле будет смещаться к минимуму потенциала, как на рис. 2.4. Изменение размера пространственной области, в которой это все происходит, диктуется масштабным фактором. Манипулирование уравнениями (П 6.2) и (П 6.3) приводит к следующему результату для масштабного фактора

$$a(t) = a_{\text{in}} \exp \frac{2}{M_{\text{p}}^2} \int_{\text{in}}^2 t^2 .$$

Как мы уже выяснили, $a_{\text{in}} > M_{\text{p}}$, а конечное значение поля — в минимуме потенциала, т. е. при $\phi = 0$. Очевидно, что фактор

$$a(t) = a_{\text{in}} \exp \frac{2}{M_{\text{p}}^2} \int_{\text{in}}^2 M_{\text{p}}^4 \quad (\text{П 6.6})$$

показывает, во сколько раз увеличился размер пространства (основное свойство масштабного фактора). Критичным является выбор начального значения поля a_{in} . Его можно получить, считая, что в начальный момент потенциал имел планковскую величину:

$$V(a_{\text{in}}) = \frac{1}{2} m^2 a_{\text{in}}^2 = M_{\text{p}}^4 .$$

Значит, начальное значение поля равно приблизительно $a_{\text{in}} = \sqrt{2} \frac{M_{\text{p}}^2}{m}$. Подставляя это в выражение (П 6.6), получаем

$$P \sim \exp -4 \frac{M_{\text{p}}^2}{m^2} . \quad (\text{П 6.7})$$

Предполагается, что масса инфлатона примерно в миллион раз меньше планковской массы, так что пространственная область, изначально образовавшаяся с планковской плотностью, увеличится согласно (П 6.7) в $P \sim e^{10^{13}}$ раз. Даже если ее размер был равен тому же планковскому, т. е. наименьшему, при котором справедливы все уравнения, то только за инфляционный период, длившийся примерно 10^{-37} с, размер пространства стал большим: $l \sim e^{10^{13}} \cdot 10^{-37} \sim 10^{10^{12}}$ см. Это несравнимо больше видимой части Вселенной (10^{28} см). Просто свет еще не успел долететь до нас с расстояний, больших, чем 10^{28} см.

Далее будет рассмотрен конкретный пример, а пока — *самое главное и красивое*. Посмотрите на формулу (П 6.3). Если поле меняется медленно, то правая часть — почти постоянная величина. Слева же стоит параметр Хаббла, равный по определению $H = \dot{a}(t)/a(t)$. Поэтому уравнение (П 6.3), справедливое на инфляционной стадии, *приближенно* эквивалентно уравнению (П 2.4) для пространства де Ситтера. Значит, на инфляционной стадии можно пользоваться формулами, полученными нами для этого хорошо изученного пространства. Просто теперь параметр выражается через потенциал поля :

$$8 \text{ GV}(\varphi).$$

Итак, масштабный фактор, указывающий, как меняется расстояние между двумя любыми наблюдателями, в инфляционный период растет по экспоненциальному закону

$$a(t) = a(0) \cdot \exp(tH_A), \quad (\text{П } 6.8)$$

где параметр Хаббла почти постоянен и равен

$$H_A = \sqrt{\frac{8 \text{ GV}(\varphi)}{3}}.$$

Как мы видим, при большом значении потенциала изменение поля с течением времени вполне может быть медленным. Но поле, хоть и медленно, будет двигаться к минимуму потенциала (см. рис. 2.7). В конце концов оно начнет скатываться быстро, а достигнув минимума, будет совершать там колебания. Именно эта фаза означает окончание инфляционного периода.

Колебания поля совершаются необычайно быстро, с частотой порядка 10^{36} Гц (сравните с частотой переменного тока — 50 Гц). Очевидно, что такие интенсивные колебания одного поля — инфлатонного — порождают колебания всех остальных полей. Но частицы — это и есть колебания соответствующих полей! Значит, в конце инфляционной стадии рождается множество всевозможных частиц высоких энергий. Размер видимой части нашей Вселенной в этот момент составлял 0,1 см по порядку величины.

Таким образом, сразу после окончания инфляции имеется короткий период быстрых осцилляций поля, порождающих релятивистские частицы и тем самым нагревающих пространство до температур порядка 10^9 ГэВ (в других моделях — меньше). Именно этот период мы воспринимаем как Большой взрыв.

Почитательно проследить за эволюцией причинных связей в нашей Вселенной. Сначала в нашем распоряжении лишь инфлатонное поле, его флуктуации возникают непрерывно благодаря квантовым эффектам. Пусть в некоторый момент времени $t = 0$ случайным образом возникла флуктуация, состоящая из небольшой области, заполненной пространственно однородным инфлатонным полем. Как мы уже знаем, поскольку пространство во время инфляционной стадии очень похоже на пространство де Ситтера, формулы, полученные для него, верны и в нашем случае. Проще всего работать в координатной системе отсчета, в которой расстояние между покоящимися наблюдателями не меняется со временем. Это расстояние обозначим r_0 . Свет, испущенный в момент времени t_0 , к моменту t проходит расстояние (см. П 2.7)

$$r(t, t_0) = e^{H_0 t - H_0 t_0}.$$

Максимальное расстояние будет пройдено светом за время t и совпадет с размером горизонта:

$$r(t, t_0) = l_{\text{horizon}} = e^{H_0 t}.$$

Важно, что размер горизонта уменьшается со временем. Точнее, свет, испущенный позже (t_0 больше), покрывает меньшее расстояние. В какой-то момент времени, когда $l_{\text{horizon}} < r_0$, два наблюдателя не смогут общаться и влиять друг на друга.

Итак, на инфляционной стадии причинно связанные области с течением времени перестают быть таковыми.

А что же происходит после окончания инфляции? Оказывается, что ситуация меняется кардинальным образом — через некоторое время наблюдатели опять окажутся в причинно связанной области и смогут посылать друг другу поздравления с праздниками. И это несмотря на то, что в *физических*

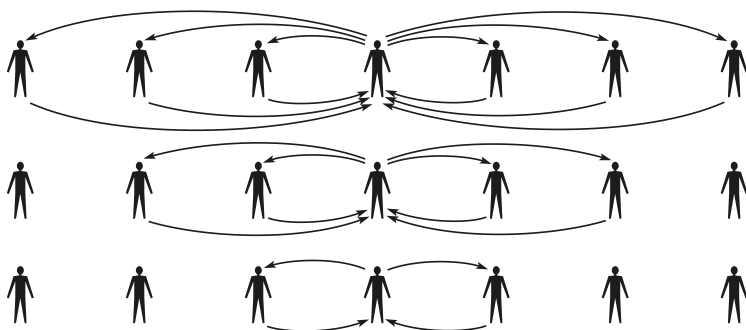


Рис. П 6.1. Уменьшение зоны влияния центрального наблюдателя со временем.

координатах пространство продолжает расширяться, расстояние между двумя наблюдателями растет пропорционально масштабному фактору, который в послеинфляционный период изменяется как $a(t) = t^q R_0$, $q < 1$. Все-таки продолжаем рассуждения в координатной (сопутствующей) системе отсчета.

Расстояние между наблюдателями продолжает оставаться равным r_0 и после окончания инфляции (нумерация точек не меняется). Свет в этой системе за время t пройдет путь

$$r_{\text{light}}(t) = \int_{t_1}^t \frac{dt}{a(t)} = \frac{t^1}{1} \frac{q}{q}.$$

Здесь момент t_1 , когда инфляция закончилась, дает малый вклад, который поэтому и опущен. Мы видим, что теперь свет проходит все большие расстояния со временем и в некоторый момент он достигнет второго наблюдателя! В физической системе отсчета принципиально ничего не меняется. Те, кто предпочитает работать в ней, должны все расстояния и размеры умножить на масштабный фактор, свой для инфляционной и постинфляционной стадии.

Вырисовывается следующая картина. На инфляционной стадии две причинно связанные точки «разбегаются» с такой скоростью, что со временем уже не могут влиять друг на друга даже с помощью света. После окончания инфляции расширение пространства идет медленнее, и свет от одного наблю-

дателя в какой-то момент догонит второго, они окажутся в причинно связанной области. Если инфляционный период — время разбрасывать камни, то постинфляционный — время собирать их.

7. Масса белого карлика и принцип Паули

Как было пояснено выше, свойства белого карлика зависят от свойств электронов. Если последние собраны в одну систему, то должны находиться в разных состояниях, т. е. с разными импульсами. Точный расчет приводит к следующему выражению для зависимости максимального импульса электрона p_F (импульс Ферми, в честь итальянского ученого) от их числа N :

$$p_F = \sqrt[3]{(3\pi^2)^2} \sqrt[3]{\frac{N}{V}} \hbar, \quad (\text{П } 7.1)$$

где V — объем системы. Формула получена для идеализированной системы слабовзаимодействующих фермионов. Свойства белых карликов еще не использованы. Очевидно, что в белом карлике электроны взаимодействуют с барионами, поэтому формула (П 7.1) может служить лишь для оценок. Кроме того, считаем, что наибольшие скорости электронов приближаются к скорости света ($v \sim c = 1$). Это означает, что энергия электронов примерно равна их импульсу, p_F . Объем белого карлика, как и объем любого шара, есть $V = 4\pi R^3/3$. Собирая все вместе, получаем оценку для наибольшей энергии электронов в зависимости от радиуса белого карлика и числа электронов в нем:

$$E_F = p_F \sqrt[3]{\frac{9}{4}} \sqrt[3]{\frac{N}{R}} \hbar. \quad (\text{П } 7.2)$$

Эта оценка верна, если можно пренебречь гравитационными эффектами. Если же в систему добавлять нуклоны и электроны в одинаковом количестве (чтобы сохранить нулевой заряд белого карлика), то увеличиваться будет не только энергия электронов — см. (П 7.2). Будет увеличиваться и гравитационная энергия нуклонов, равная $E_G = G \frac{N_B m_B^2}{R}$. Когда

последняя станет большой, вся система выходит из равновесного состояния и сжимается (коллапсирует). Происходит это когда ϵ_F примерно сравнивается с энергией Ферми ϵ_F . В этом случае электронам хватает энергии, чтобы в столкновениях порождать нуклоны. При этом сам электрон уничтожается. Масса барионов (нуклонов) m_B примерно равна массе протона, а число барионов (протоны + нейтроны) N_B примерно вдвое больше числа электронов.

Итак, коллапс белого карлика начинается, когда

$$\epsilon_F \approx \epsilon_B.$$

Подставляя все написанное выше в эту формулу, получаем максимальное число барионов в белом карлике:

$$N_{\max} \approx \sqrt[2]{\frac{\hbar^3}{G m_B^2}} \approx 10^{57}. \quad (\text{П } 7.3)$$

Поскольку уже видно, что это только оценка по порядку величины, все численные множители отброшены. Значит, в белом карлике примерно 10^{57} барионов, и не больше! Следовательно, и его масса (в граммах) ограничена величиной

$$M_{\max} \approx m_B N_{\max} \approx 10^{33},$$

а это примерно масса Солнца. Неудивительно, что в результате точного расчета получена цифра $1,4 M_\odot$.

Теперь мы можем оценить максимальный радиус белого карлика. Действительно, если продолжать увеличивать число электронов, то их кинетическая энергия станет так велика, что сравняется с массой электрона. При этом важную роль начинают играть взаимодействия электронов с фотонами и барионами. Мы уже не можем применять уравнение (П 7.1), пригодное для невзаимодействующих частиц; белый карлик выходит из равновесия и коллапсирует. Таким образом, предельная энергия одного электрона, находящегося в белом карлике, примерно равна его массе,

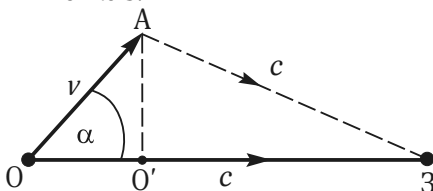
$$\epsilon_F \approx m_e c^2. \quad (\text{П } 7.4)$$

Используя здесь формулы (П 7.2) и (П 7.3), находим радиус белого карлика в километрах:

$$R_{\text{crit}} \approx \hbar \frac{\sqrt{N_{\text{crit}}}}{m_e^2} \approx 5 \cdot 10^3. \quad (\text{П 7.5})$$

8. Сверхсветовые скорости джетов?

На рисунке, приведенном ниже, условно изображен джет, летящий со скоростью v под углом α . Скорость его, конечно, меньше скорости света. Источник находится в точке O , а Земля с приемником – в точке $З$.



Пусть фронт джета был испущен в момент времени $t = 0$. Поскольку фронт представляет собой раскаленную плазму, то он, естественно, испускает электромагнитные волны во всех направлениях, и в частности в направлении Земли. Рассмотрим два момента времени: $t = 0$ и $t = t'$. За время t' фронт переместился в точку A и также испустил световой сигнал в направлении Земли (в частности). Наблюдателю с Земли будет казаться, что источник излучения переместился из точки O' в точку A . Между точками O и A расстояние $r = vt'$. Время прихода сигналов в точку $З$ из точек O и A различается на величину Δt , которую еще предстоит вычислить. Тогда кажущаяся поперечная скорость есть просто $v_{\text{obs}} = R_{O'A} / \Delta t$ (поперечная составляющая скорости, вдоль оси $OЗ$, не детектируется и поэтому не определяется). Величина Δt определяется как разность:

$$\Delta t = t - t' = \frac{R_{A3}}{c} - \frac{R_{O3}}{c}.$$

Теперь осталось все выразить через угол α и скорость v . Итак, $R_{O'A} = vt' \sin \alpha$, поскольку расстояние от источника до Земли велико, можно считать с хорошей точностью, что $R_{A3} - R_{O3} = R_{O3} - R_{OO'}$, и тогда

$$t - t \frac{R_{03}}{c} - \frac{R_{00}}{c} - \frac{R_{03}}{c} - t \frac{R_{00}}{c} - t - vt \frac{\cos}{c}.$$

И окончательно:

$$v_{\text{obs}} = \frac{R_{0A}}{t} - v \frac{\sin}{1 - v/c \cos}.$$

Таким образом, мы получили, что кажущаяся скорость джета v_{obs} может быть больше скорости света при некоторых углах и скоростях v .

9. Разрушительное влияние приливных сил

Найдем условия, при которых разрушается планета (или звезда) с массой M и радиусом R при подлете к черной дыре с массой M_{BH} . Объект, а точнее, его центр масс, движется к черной дыре с ускорением:

$$w_{\text{planet}} = \frac{GM_{\text{BH}}}{r^2}.$$

Любые тела (камни, молекулы...) на поверхности планеты испытывают результирующее ускорение под действием гравитации самой планеты,

$$g = \frac{GM}{R^2},$$

и гравитации черной дыры

$$w = \frac{GM_{\text{BH}}}{(r - R)^2} - \frac{GM_{\text{BH}}}{r^2} \sim 2GM_{\text{BH}} \frac{R}{r^3}.$$

Здесь учтено то, что вся планета как целое также движется с ускорением, а тело находится в точке поверхности планеты, ближайшей к черной дыре. Поэтому и возникает разность между ускорением центра масс планеты и ускорением на ее поверхности. Второе, приближенное равенство получено разложением в ряд Тейлора по степеням $R/r \ll 1$. Основные события развиваются на расстоянии от черной дыры, равном ее гравитационному радиусу,

$$r = r_g = \frac{2GM_{\text{BH}}}{c^2}.$$

Рис. П 9.1. Влияние приливных сил на протяженный объект типа планеты



Ускорения g и w направлены в разные стороны, и как только w превысит g , все камни и молекулы с поверхности планеты полетят в сторону черной дыры, т. е. вверх. Поэтому условие $w = g$ считается условием разрушения планеты или звезды при подлете к черной дыре. После несложных вычислений получаем связь между параметрами подлетающего объекта и массой черной дыры, при которых начинается его разрушение:

$$\frac{M}{R^3} = \frac{2}{27} M_{\text{BH}}^2.$$

Здесь массы измеряются в солнечных массах, а радиус объекта — в километрах. Интересно, что отношение слева пропорционально средней плотности планеты или звезды.

ЛЖЕНАУКА И ЧТО С ЭТИМ МОЖНО ПОДЕЛАТЬ

Приезжайте ко мне, дорогой соседушко, ей-богу.
Откроем что-нибудь вместе... и Вы меня... вы-
числениям различным поучите.

А. П. Чехов.

Письмо к ученому соседу

Предположим, читатель, что вам надо объяснить марсианину, что означает понятие «красивый человек» и по каким признакам его можно отличить от некрасивого. Подумайте немного, и, надеюсь, вы со мной согласитесь, что задача не так проста. Трудно объяснять очевидное.

Схожая ситуация и с лженаучными теориями. Для профессионального ученого обычно не представляет труда определить, что́ перед ним, но внятное обоснование требует усилий.

Что же делать читателю, искренне желающему разобраться в проблеме? Как известно, полезно бывает встать на сторону оппонента и повторить его путь, то есть в данном случае создать свою собственную лженаучную теорию. Конечно, разработать добротную, хорошо разветвленную лженаучную теорию довольно сложно. Претенденты должны осознавать всю грандиозность предприятия.

Чтобы помочь читателю, автор предлагает первый в мире Краткий самоучитель по созданию лженаучных теорий. Ценность его состоит в том, что все советы взяты автором из реальной жизни и, следовательно, хорошо опробованы.

Краткий самоучитель по созданию лженаучных теорий

Ваше действие	Примеры	Комментарий
1. Выбрать какое-либо поле	Возможны 4 варианта: а) биополе; б) информационное поле; в) энергетическое поле; г) произвольная смесь трех предыдущих или любое новое, неизвестное науке поле, например торонное поле.	Лучше не отклоняться от предложенных вариантов. Обычно люди не задают вопросов типа «что значит „биополе“ и каким законам оно подчиняется», а про непривычное для них торонное могут и спросить.
2. Ссылки на статьи великих ученых	Примеры: Эйлер, Лейбниц, Пуанкаре. Эйнштейн — обязательно. На Ньютона не ссылаться — надоел в школе.	Хорошо также иметь в запасе труды другого опровергателя законов. Тогда в диспутах можно спросить с удивлением: «Как, вы не знакомы с трудами X?». И не важно, что эти труды опубликованы на конференции по спелеологии 20 лет назад. Эффект обеспечен.
3. Определить, какая именно польза от этого всему человечеству.	Обещать видимый эффект через 2–5 лет. Меньше двух — не успеют забыть и потребуют предъявить; больше пяти — не будут ждать и потеряют интерес.	Тем не менее ваша опытная установка, конечно, уже работает, но именно в данный момент ее осмотреть нельзя (варианты объяснения: находится в другом городе, дорабатывается, видна только тем, кто во все это верит).
4. Найти обоснование, почему до сих пор никто «этого» не обнаружил.	Это — самое сложное, если учитывать п. 3. Именно здесь надо включить воображение. Например, ваше поле может улавливаться только каким-либо органом человека (лучше — мозгом, хотя возможны варианты).	Желательно иметь устройство, «улавливающее» ваше поле. Если захотят детально ознакомиться, скажите, что сможете это сделать после получения патента, и понимающе улыбнитесь.

Ваше действие	Примеры	Комментарий
5. Ввести что-нибудь японское или китайское.	Примеры из «обычной» науки: производная Ли, матрица Кобаяши–Маскава.	Придает загадочность и глубину вашей теории. Потенциал Лифшица не использовать — он не японец.

Опасности и как их избежать

Профессиональные ученые омрачают существование лжеученых и представляют собой основную опасность. К сожалению, для развития вашего детища контактов с ними не избежать. Поэтому нужна серьезная подготовка. Надо знать много разделов физики. Читайте научно-популярные журналы. На первых порах публичный спор с учеными нежелателен. Можно начать с заочных споров или дискуссий с людьми, знающими физику еще хуже вас.

Публикации. В журналах, посвященных обычной науке, рецензенты «зарубят». Объяснять это можно, например сговором «релятивистов» (из реального разговора с участием автора этой книги: имелись в виду сторонники специальной теории относительности).

Публикуйтесь в трудах любых институтов — за деньги сейчас иногда получается, участвуйте в любых конференциях, куда удастся попасть.

Немного освоившись, можно вступать в диспуты с ученым. В спорах часто вводите новые термины, ссылайтесь на ученых начала прошлого века, твердо стойте на том, что у вас — «другая наука», а ваши оппоненты — зашоренные ретрограды без капли воображения. Чтобы вас понять, надо подняться на новый уровень сознания, что недоступно профессиональным ученым, копающихся в мелочах. И самое главное — работа над ошибками! После каждого спора с любым ученым анализируйте его возражения и продумывайте ответные ходы. Таким образом, со временем ваша позиция будет только укрепляться.

О лжеученых

Надеюсь, что, прочитав Самоучитель, читатели уже смогут разобраться в ситуации, даже не особенно вдаваясь в детали конкретной теории. Чем больше элементов из Самоучителя вы обнаружите, тем вернее можете утверждать, что перед вами — лженаучная теория. Автор сам неоднократно убеждался в удивительной эффективности Самоучителя, написанного десятилетиями назад.

Сами лжеученые не представляют собой какой-либо характерный тип, хотя их сортамент ограничен. Общее между ними одно — они не разбираются в той области физики, терминами которой оперируют. Присмотримся к ним повнимательнее.

Первый тип — искренние благодетели человечества. Это хорошие, но несчастные люди, искренне не понимающие, почему от них все отмахиваются. Ведь их идея так проста и сулит такие выгоды! Ну и что, что она противоречит, скажем, уравнениям Максвелла. Значит, эти уравнения надо немного подправить! Участь таких людей печальна.

Второй тип — опровергатели основ физики. Это тоже более или менее безобидные люди, издающие за свой счет целые учебники с Новой Физикой (кстати, они легко опознаются по большому числу восклицательных знаков в тексте и большому числу слов, начинающихся с заглавной буквы).

Здесь уместно отступление. Ведь и обычные ученые тоже предлагают новые законы, вводят новые поля. Так почему же один — просто ученый, а другой — с обидной приставкой «лже-»? На самом деле человек, который отваживается на любые нововведения в науке, взваливает на себя тяжелое бремя: он должен доказать, что его идея не противоречит всем экспериментальным данным. Именно это отличает ученого от других людей, также пытающихся объяснить природные явления. Итак, еще раз: ученый, разрабатывая новую теорию, постоянно проверяет, не противоречит ли она экспериментальным данным. При этом не надо заново проводить все эксперименты. Уже существующие законы как раз на них и построены. Значит, надо, чтобы новая теория «всего лишь» не

противоречила уже проверенным законам в области применимости последних. Лжеученый, наоборот, создав свою теорию, наивно считает, что его дело сделано и остается только слегка подправить известные законы. Этим могут заняться менее талантливые, чем он, люди. Читатель, который прочел эту книгу, понимает, насколько наивна такая точка зрения.

Третий тип — мошенники, умные и беспринципные. Откуда у них первоначальный капитал — трудно сказать. Возможно, они находят простодушных чиновников, и, обещая золотые горы через несколько лет, получают денежные субсидии. Часть этих денег тратится на статьи о себе в обычных газетах и журналах, которым нужны любые сенсации (автор неоднократно поражался, какая ахинея публикуется даже в хорошо известных изданиях, при отсутствии популярных обзоров современных открытий, публикуемых в научных журналах), после чего можно опять идти к чиновникам. Этот тип лжеученых приносит наибольший вред. Они отвлекают и без того скудные денежные средства, направляемые в науку, и одновременно дискредитируют ее. Если первые два типа относительно безвредны, то третий является серьезной проблемой. В нормально развивающемся обществе это явление можно свести к минимуму. Газеты, печатающие все это, будут терять доверие читателей, что, впрочем, уже и происходит в нашей стране.

А теперь, как ни странно,

О пользе лженауки

Если рассматривать науку со всеми ее разделами и направлениями как некую спонтанно развивающуюся систему, то очевидно, что ее развитие не может проходить идеально гладко. Наоборот, только за счет большого числа теорий-попыток, основная масса которых — тупиковые, постепенно выбирается верный путь. Кто может сказать заранее, какое направление окажется верным? Бывали ошибки и у серьезных ученых. Остроградский с пренебрежением относился к деятельности Лобачевского, Французская академия отказывалась признавать существование не только вечных двигате-

лей, но и метеоритов — по той простой причине, что камни с неба падать не могут.

Конечно, в рядовых случаях, описанных выше, диагноз очевиден, но ведь существуют и промежуточные варианты. На любой конференции по космологии что-нибудь такое нет-нет да и проскочит.

Что же делать? По мере возможности бороться с мошенниками и, ради будущих Лобачевских, терпеть простаков.

АБСОЛЮТНЫЙ НУЛЬ температуры — самое низкое из всех возможных значений температуры тела, состоящего из атомов.

АННИГИЛЯЦИЯ — процесс, при котором частица и ее античастица, сталкиваясь, превращаются в другие частицы, преимущественно в фотоны и/или кварки.

АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП: Вселенная такова, потому что, будь она другой, нас бы в ней не было и мы бы не могли ее наблюдать (216, 217, 218).

АККРЕЦИЯ — падение вещества на объект под действием гравитационного притяжения.

АТОМ — наименьшая частица вещества. Состоит из положительно заряженного тяжелого ядра и движущихся вокруг него электронов.

БЕЛЫЙ КАРЛИК — остывающая звезда небольших размеров, находящаяся в равновесии благодаря тому, что в соответствии с принципом исключения Паули между электронами действуют силы отталкивания (136–139).

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ — элемент космологической теории расширяющейся Вселенной. Считается, что порядка 14 миллиардов лет назад произошел Большой взрыв, во время которого родились частицы высоких энергий, а все, что мы сейчас наблюдаем, есть результат этого взрыва. В пользу этой теории говорит существование реликтового излучения и наблюдаемое разбегание галактик (39, 67–69, 73–74, 280).

БРАНА — в многомерных моделях — пространство меньшей размерности по сравнению с основным пространством (117).

ВЕЩЕСТВО — вид материи, состоящей из частиц, которые обладают массой покоя.

ВИРТУАЛЬНАЯ ЧАСТИЦА — частица любого вида, рождающаяся на короткое время и уничтожающаяся в том же самом процес-

¹ Цифры в скобках указывают страницы, содержащие более подробную информацию о рассматриваемом понятии.

се. Ее невозможно непосредственно зарегистрировать при помощи прибора, но существование таких частиц подтверждается косвенными наблюдаемыми эффектами.

ВСЕЛЕННАЯ — весь наблюдаемый мир; в более узком смысле — часть материального мира, доступная изучению астрономическими средствами. Наша (видимая) Вселенная состоит из примерно 10^{11} галактик и имеет размер около 10^{28} см.

ВЫРОЖДЕННЫЙ ГАЗ — набор одинаковых частиц, свойства которого обусловлены принципом Паули (неразличимостью одинаковых частиц в квантовой механике).

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ — электромагнитное излучение с очень малой длиной волны, испускаемое, например, при соударениях элементарных частиц.

ГАЛАКТИКА — гигантская звездная система, до сотен миллиардов звезд, обращающихся вокруг общего центра.

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ — самый короткий путь между двумя точками. В отсутствие гравитации — прямая.

ГРАВИТАЦИОННЫЙ РАДИУС — радиус воображаемой сферы (так называемой сферы Шварцшильда), отделяющей область, недоступную для внешнего наблюдателя. Гравитационный радиус Земли равен приблизительно 9 мм, Солнца — 3 км.

ДЕТЕКТОР элементарных частиц — прибор для регистрации входящих в него частиц, их энергий, направления движения и зарядов.

ДЖЕТЫ — струи релятивистских частиц, образующиеся при падении вещества на нейтронную звезду или черную дыру (143, 154).

ДЛИНА ВОЛНЫ — расстояние между двумя соседними ее гребнями.

ДОПЛЕРА ЭФФЕКТ — изменение частоты волн при движении источника и наблюдателя относительно друг друга (36, 84, 169).

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ — закон, согласно которому энергия замкнутой системы не меняется со временем.

ИНФЛЯЦИЯ — сверхбыстрое расширение Вселенной на раннем этапе ее эволюции (70, 75–78, 97).

КВАНТ — минимальная порция энергии. Часто — синоним фотона.

КВАЗАРЫ — мощные внегалактические источники электромагнитного излучения; по современным представлениям, являются активными ядрами галактик (48).

КВАРК — элементарная заряженная частица, участвующая в сильном взаимодействии. Из кварков состоят протоны и нейтроны.

КОЛЛАПС — быстрое необратимое сжатие.

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ: в различных обстоятельствах микрообъекты проявляют свойства либо частиц (корпускул), либо волн.

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ — вспомогательная величина, введенная Эйнштейном в уравнения общей теории относительности для того, чтобы пространство-время, описываемое этими уравнениями могло быть стационарным.

КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ — нестационарность Вселенной, проявляющаяся в том, что расстояние между любыми двумя ее «точками» (скоплениями галактик) увеличивается по единому закону. Приводит к эффекту «разбегания галактик».

КОСМОЛОГИЯ — наука, занимающаяся изучением Вселенной в целом.

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ — увеличение длин волн, испускаемых удаляющимся от наблюдателя источником излучения.

ЛИНЗИРОВАНИЕ — изменение наблюдаемой формы объекта из-за отклонения лучей света гравитационным полем.

МАССА — одна из основных характеристик объекта. Пропорциональна энергии покоящегося объекта.

МЕТАВСЕЛЕННАЯ — гипотетическая совокупность большого числа вселенных.

НЕЙТРИНО — легчайшая из известных на данный момент элементарных частиц вещества, участвующая только в слабых и гравитационных взаимодействиях.

НЕЙТРОН — незаряженная частица, участвующая в сильных взаимодействиях. Входит в состав атомного ядра.

НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА — одна из конечных стадий эволюции звезд. Состоит из плотно «упакованных» ядер тяжелых элементов и нейтронов (44, 45, 139–145).

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ — теория гравитации, в основе которой лежит предположение о том, что законы одинаковы для всех наблюдателей. Гравитационное взаимодействие объясняется искривлением четырехмерного пространства-времени.

ПЕРВИЧНАЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА — черная дыра, возникшая на ранней стадии развития Вселенной, до появления звезд.

- ПОЗИТРОН** — положительно заряженная античастица электрона.
- ПОЛЕ** — объект, распределенный по всем точкам пространства (14, 27).
- ПРЕДЕЛ ЧАНДРАСЕКАРА** — максимально возможная масса белого карлика, в случае превышения которой он должен коллапсировать в нейтронную звезду или черную дыру.
- ПРИНЦИП ПАУЛИ** — фундаментальный закон природы, заключающийся в том, что две тождественные частицы с полуцелым спином (фермионы) не могут одновременно находиться в одном состоянии. Сформулирован в 1925 г. швейцарским физиком В. Паули для электронов в атоме и назван им принципом запрета.
- ПРОСТРАНСТВО ДЕ СИТТЕРА** — модель мира (1917 г.), в котором нет вещества, а присутствует только вакуум, обусловленный эйнштейновской космологической постоянной.
- ПРОСТРАНСТВО МИНКОВСКОГО** — четырехмерное пространство, объединяющее физическое трехмерное пространство и время; введено немецким ученым Г. Минковским в 1907 г.
- РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** — микроволновое фоновое космическое излучение, спектр которого близок к спектру абсолютно черного тела с температурой около 3 К. Его происхождение связывают с эволюцией Вселенной, имевшей в прошлом очень высокую температуру и плотность излучения (68–73, 87, 98, 104).
- СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — самое сильное из фундаментальных взаимодействий элементарных частиц. Удерживает кварки внутри протонов и нейтронов и связывает последние в ядре атома.
- СИНГУЛЯРНОСТЬ** — точка, в которой кривизна пространства-времени бесконечна.
- СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — обуславливает большинство превращений частиц, связанных с нейтрино. Наиболее распространенный процесс, связанный со слабым взаимодействием, — распад радиоактивных ядер.
- СПЕКТР** — в широком смысле — совокупность гармонических колебаний, на которые может быть разложено сложное колебание, характеризующее систему или процесс; *спектр излучения* — зависимость интенсивности излучения от длины волны, как правило, имеющая то или иное графическое представление (кривая, набор линий).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ — теория, согласно которой все физические законы должны быть одинаковы для всех наблюдателей, находящихся в инерциальных системах отсчета.

СПИН — свойство частицы, связанное с ее внутренним моментом импульса.

СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ — состояние, динамические переменные которого не меняются со временем.

СТРУНА — объект, один из размеров которого много больше остальных. Применительно к космологии, рассматриваются струны, состоящие из полей.

ТЕОРИЯ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ — теория, объединяющая электромагнитные, сильные и слабые взаимодействия.

ФОТОН — квант электромагнитного излучения.

ХАББЛА ЗАКОН: скорость удаления астрономического объекта пропорциональна расстоянию до него. Открытие этой закономерности означало открытие расширения Вселенной.

ЧЕРНАЯ ДЫРА — область пространства-времени, ограниченная сферой Шварцшильда; см. *Гравитационный радиус*.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ — в точном значении термина — первичные, далее неразложимые частицы, из которых состоит вся материя. В современной физике термин «элементарные частицы» обычно употребляется менее строго — для наименования мельчайших частиц материи, не являющихся атомами или атомными ядрами (14–22).

ЭНЕРГИЯ ТЕОРИИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ — энергия, выше которой электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия предположительно должны стать неразличимыми (около 10^{16} ГэВ).

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСЛАБОЙ ТЕОРИИ — энергия (около 100 ГэВ), выше которой электромагнитные и слабые взаимодействия неразличимы.

ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ — процесс слияния ядер.

ЯДРО — центральная, положительно заряженная часть атома, которая состоит только из протонов и нейтронов, удерживаемых в ядре сильным взаимодействием.

Научно-популярная

1. Вайнберг С. Первые три минуты: Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.; Ижевск, 2000.
2. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы: Пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС, 2004.
3. Гиндилис Л. М. Пути поиска внеземных цивилизаций // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 116–122.
4. Голдсмит Д., Оуэн Т. Поиски жизни во Вселенной. М.: Мир, 1983.
5. Дайсон Ф. Будущее воли и будущее судьбы // Природа. 1982. № 8. С. 60–70.
6. Менский М. Человек и квантовый мир. Фрязино, Век 2, 2005.
7. Панасюк М. И. Странники Вселенной, или Эхо Большого взрыва. Фрязино: Век 2, 2005.
8. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики: Пер. с англ. (Сер. «Синергетика: от прошлого к будущему»). Изд. 2. М.: УРСС, 2005.
9. Проблема СЕТИ (связь с внеземными цивилизациями). М.: Мир, 1975.
10. Розенталь И. Л. Вселенная и частицы. М., 1990.
11. Розенталь И. Л., Архангельская И. В. Геометрия, динамика, Вселенная. Изд. 2. М.: УРСС, 2004.
12. Сажин М. В. Современная космология в популярном изложении. М.: УРСС, 2002.
13. Троицкий В. С. К вопросу о населенности Галактики // Астрон. журн. 1981. Т. 58. С. 1121–1130.
14. Хокинг С. Краткая история времени: От Большого взрыва до черных дыр. СПб.: Амфора, 2005.
15. Черепашук А. М., Чернин А. Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. М.: Век 2, 2004.

¹ Приведен список книг и статей, использованных автором при подготовке книги, а также рекомендуемых читателю для более глубокого знакомства с предметом.

16. Crick F. and Orgel L. Directed Panspermia // *Icarus*. 1973. Vol. 19. № 3. P. 341–346; см. также: Крик Ф., Оргел Л. Направленная панспермия // *Химия и жизнь*. 1974. № 9. С. 75–79.

Научная

17. Долгов А. Д., Зельдович Я. Б., Сажин М. В. *Космология ранней Вселенной*. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1988.
18. Захаров А. Ф., Сажин М. В. Гравитационное микролинзирование // *УФН*. 1998. № 10. С. 1041.
19. Линде А. Д. *Физика элементарных частиц и инфляционная космология*. М.: Наука, 1990.
20. Куликовский П. Г. *Справочник любителя астрономии*. М.: УРСС, 2002.
21. Постнов К. А. Лекции по общей астрофизике для физиков. <http://www.astronet.ru/db/msg/1170612/index.html>.
22. M. Yu. Khlopov, S. G. Rubin. *Cosmological Pattern of Microphysics in the Inflationary Universe*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004. 295 p.; Рубин С., Сахаров А., Хлопов М. Образование первичных ядер галактик при фазовых переходах в ранней вселенной // *Журн. эксперим. и теорет. физики*. 2001. № 91. С. 921.
23. Соболев В. В. *Курс теоретической астрофизики*. М.: Наука, 1985.
24. *Физика космоса. Космическая физика: Маленькая энциклопедия* / Сюняев Р. А. (ред.). М.: Сов. энцикл., 1986.
25. Хлопов М. Ю. *Основы космоастрофизики*. М.: УРСС, 2004.
26. Шкловский И. С., Каплан С. А., Пикельнер С. Б. *Современные проблемы астрофизики*. М., 2001.
27. Carroll B. W., Ostlie D. A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Addison-Wesley Publishing Company, 1996.
28. Dolgov A., Freese K., Rangarajan R., and Srednicki M. Baryogenesis during reheating in natural inflation and comments on spontaneous baryogenesis // *Phys. Rev.* 1997. Vol. D56. P. 6155–6165. <http://au.arxiv.org/abs/hep-ph/9610405>
29. Padmanabhan T. *Theoretical Astrophysics*. Vol. 1–3. Cambridge, 2000–2002.
30. Piner B. G., Bhattarai D., Edwards P. G., Jones D. L. The Fastest Relativistic Jets: VLBA Observations of Blazars with Apparent Speeds Exceeding 25c (2005). <http://ru.arxiv.org/abs/astro-ph/0511664>.
31. Rees Martin J. Numerical coincidences and ‘tuning’ in cosmology. <http://ru.arxiv.org/abs/astro-ph/0401424>

32. Rubin S. G. Fine tuning of parameters of the universe // Chaos Solitons Fractals. 2002. № 14. P. 891.
<http://ru.arxiv.org/abs/astro-ph/0207013>
33. Rubin S. G. Origin of universes with different properties // Gravitation and Cosmology. 2003. № 4 (36). P. 243–248.
<http://lanl.arxiv.org/abs/astro-ph/hep-ph/0309184>.
34. Sazhin M., Capaccioli M., Longo G., Paolillo M., Khovanskaya O. Further spectroscopic observations of the CSL-1 object.
<http://ru.arxiv.org/abs/astro-ph/0506400>
35. Tegmark M. Parallel Universes // Scientific American. 2003. № 5.
<http://ru.arxiv.org/abs/astro-ph/0302131>
(См. также: Термарк Макс. Параллельные вселенные // В мире науки. 2003. № 8).



**Несколько интернет-страничек,
содержание которых
соответствует тематике книги**

<http://www.astronet.ru>

<http://www.moscowaleks.narod.ru>

<http://www.sai.msu.su/apod>

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
Глава 1. ИНГРЕДИЕНТЫ ВСЕЛЕННОЙ	11
О здравом смысле и научном подходе	12
Элементарные частицы	14
Античастицы	15
Виды взаимодействий	16
<i>Электромагнитное взаимодействие</i>	<i>17</i>
<i>Гравитационное взаимодействие</i>	<i>19</i>
<i>Слабое взаимодействие</i>	<i>19</i>
<i>Сильное взаимодействие</i>	<i>20</i>
<i>Модель Вайнберга—Салама. Успехи и проблемы.</i>	<i>21</i>
Квантовая теория	22
Поля	27
Макрообъекты	34
<i>Эффект Доплера</i>	<i>36</i>
Закон Хаббла	38
Компактные объекты	42
<i>Звезды</i>	<i>42</i>
<i>Белые карлики</i>	<i>43</i>
<i>Нейтронные звезды</i>	<i>44</i>
<i>Черные дыры</i>	<i>45</i>
<i>Квазары</i>	<i>48</i>
Скрытая масса (темная материя)	48
<i>Поиски скрытой массы</i>	<i>50</i>
<i>Эффект линзирования</i>	<i>51</i>
<i>Эффект Доплера</i>	<i>53</i>
<i>Горячие газовые облака</i>	<i>53</i>
<i>Носители скрытой массы</i>	<i>54</i>
<i>Разнообразие MACHOs</i>	<i>54</i>

Как обнаружить MACHOs?	55
Неуловимые WIMPs	56
Скрытая масса — холодная или горячая?	58
Темная энергия — энергия вакуума?	61
Топологические дефекты	62
Про кротовые норы	64

Глава 2. ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ВСЕЛЕННОЙ. 67

Как из искры возгорелось пламя.	67
Основные проблемы Большого взрыва	67
Период сверхбыстрого расширения Вселенной	75
Основные вопросы к инфляции	78
Странные наблюдатели	79
Красное смещение	83
Молодые годы.	86
Рождение барионов.	86
Эти опасные античастицы	87
Появление гелия.	90
Космологический нуклеосинтез.	90
Первичные флуктуации — причина зарождения галактик . .	97
Состав Вселенной до первых звезд	99
Закон Хаббла	102
Реликтовое излучение	104
Прогнозы на будущее.	108
Многомерное пространство	115

Глава 3. ЖИЗНЬ ГАЛАКТИК. 120

Звезды — основной объект.	120
Солнце.	124
Эволюция звезд.	127
Сверхновые	132
Белые карлики	136
Нейтронные звезды	139
Массивные черные дыры	146
Механизм рождения массивных первичных черных дыр . .	151
Джеты	154
Квазары.	157
«Ненужное» открытие	157
Квазар — яркая черная дыра?	160

Нежелательные соседи.	165
Переменная яркость	165
Поставщики информации.	166
Родственники	167
Планеты.	168
Межзвездная среда.	171
Области антиматерии.	172
Космические лучи.	174
Гамма-вспышки.	178
Галактики	180
Млечный Путь.	184
Эволюция галактик.	187
Глава 4. ИНСТРУМЕНТАРИЙ.	193
Детекторы электромагнитного излучения	196
Радиотелескопы	196
Инфракрасные телескопы.	197
Оптические телескопы	197
Детекторы рентгеновского и гамма-излучения	199
Кванты-гиганты	207
Нейтринные детекторы	208
Лайман-альфа лес.	210
Глава 5. КОНСТРУКТОР ВСЕЛЕННЫХ	213
Антропный принцип.	216
Создаем Вселенную	221
Звезды созданы — что дальше?	237
О красоте теорий	240
Случайный потенциал	244
Замечание напоследок	248
Глава 6. ЖИЗНЬ ЦИВИЛИЗАЦИЙ	250
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	264
ПРИЛОЖЕНИЯ	266
1. Соотношение неопределенностей и размер атома	266
2. Пространство де Ситтера	266

3. Масса Джинса	270
4. Взаимосвязь свойств пространства-времени и материи.	272
5. Расширение пространства и динамика частиц	275
6. Инфляция — первые мгновения жизни Вселенной	276
7. Масса белого карлика и принцип Паули	283
8. Сверхсветовые скорости джетов?	285
9. Разрушительное влияние приливных сил	286
ЛЖЕНАУКА И ЧТО С ЭТИМ МОЖНО ПОДЕЛАТЬ	288
Краткий самоучитель по созданию лженаучных теорий	289
<i>Опасности и как их избежать</i>	<i>290</i>
<i>О лжеученых.</i>	<i>291</i>
<i>О пользе лженауки</i>	<i>292</i>
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	294
ЛИТЕРАТУРА	299

Научно-популярное издание

Рубин Сергей Георгиевич

УСТРОЙСТВО НАШЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Оформление и компьютерная верстка
Н. Л. Васильевой

Подп. в печ. 01.04.2006. Формат 84 108/32. Усл. печ. л. 16,38.
Тираж 2 500 экз. Заказ №

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино-5, Моск. обл., а/я 107

Тел. (495) 785-56-39, доб. *15-14
e-mail: vek-2@mail.ru; www.vek2.nm.ru

Фрязино, пл. Введенского, 1, к. 102

Изд. лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97

Отпечатано в ОАО «Можайский полиграфкомбинат»,
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93.