

*Наука
для всех*

А. М. Черепашук, А. Д. Чернин

Вселенная, жизнь, черные дыры



«Наука для всех»

А. М. Черпащук, А. Д. Чернин

Вселенная, жизнь, черные дыры



ВЕГ 2

Фрязино

2004

УДК 524
ББК 22.66
Ч-46

Анатолий Михайлович Черепашук, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Государственного Астрономического института им. П. К. Штернберга (ГАИШ) МГУ, заведующий кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ. Область научных интересов – астрофизика, физика тесных двойных звезд, обратные задачи астрофизики. Гл. 2–3.

Артур Давидович Чернин, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ГАИШ МГУ. Область научных интересов – астрофизика, физика галактик, внегалактическая астрономия, космология. Гл. 1, 4.

Черепашук А. М., Чернин А. Д.

Ч-46 Вселенная, жизнь, черные дыры. — Фрязино: «Век 2», 2004. — 320 с. — (Наука для всех).

ISBN 5-85099-142-5

Человека всегда интересовало где он живет, откуда это появилось, «есть ли жизнь на Марсе» и что со всем этим будет дальше.

В предлагаемой книге изложена современная представления о возникновении и развитии Вселенной; о том, как ведутся поиски жизни вне Земли и о результатах этих поисков; о загадочных и фантастических свойствах черных дыр и о том, как их находят и «взвешивают»; о самых последних открытиях в астрофизике – агитгравитации, «темной материи» и «темной энергии».

Для чтения книги не требуется никаких специальных знаний, выходящих за рамки школьной физики.

УДК 524
ББК 22.66

ISBN 5-85099-142-5

© «Век 2», 2003

*Рассуждай о химерах
на конкретных примерах.*

Борис Заходер «Заходерзости»

ПРЕДИСЛОВИЕ

Астрономия вступила сегодня в новую эпоху крупнейших открытий. В последние годы найдены планеты вне Солнечной системы, собраны почти неопровержимые доказательства существования черных дыр, обнаружено всемирное антитяготение. Столь щедрых на революционные открытия лет в истории астрономии никогда еще не бывало. На наших глазах древняя наука переживает необычайный взлет, и это стало возможным благодаря мощным наземным и орбитальным телескопам нового поколения, которые необычайно расширили возможности астрономических наблюдений.

На очереди грандиозные задачи завтрашнего дня, уже обеспеченные совершенной наблюдательной техникой, и самая увлекательная среди этих задач — поиск жизни на других планетах.

В этой книге читатель найдет краткий рассказ о новейших событиях в астрономии наших дней, о долгожданных и неожиданных наблюдательных открытиях, о дерзких идеях и гипотезах астрономов.

Материал книги охватывает широкий круг тем. Мы говорим об эволюции Вселенной, о галактиках, звездах, черных дырах, скрытой материи, о поисках внеземной жизни, опираясь на твердо установленные наблюдательные факты.

Затем мы переходим к космологии, предметом которой служит самый большой объект науки — вся видимая Вселенная. В современной Вселенной почти безраздельно господствует всемирное антитяготение, только что открытое по наблюдениям вспышек сверхновых звезд в удаленных галактиках.

Антитяготение создается космическим вакуумом, и этот вакуум — не пустота: его энергия больше суммарной энергии всех других форм материи на современной стадии эволюции мира.

Однако читатель вправе спросить: как можно изучать физические характеристики астрономических объектов, удаленных от нас на такие громадные расстояния. Ведь даже свет идет к нам от ближайшей звезды около четырех лет. А от далеких галактик свет идет к нам миллиарды лет.

Астрономия отличается от лабораторной физики: если физик при исследовании объекта может приблизиться к нему, нагреть, сжать его и даже расчленить на части, то астроном не может непосредственно воздействовать на объект и все, что остается делать — это регистрировать различные виды излучения от него. Поэтому астроном при анализе результатов наблюдений чаще всего решает так называемую обратную задачу, когда по наблюдаемым следствиям некоторого процесса необходимо судить о физических причинах, его породивших.

Хотя астрономы при исследовании объектов Вселенной находятся в роли пассивных наблюдателей, надежность выводов о физической природе астрономических объектов гарантируется применением современных высокоэффективных методов и средств наблюдений в очень широком диапазоне спектра электромагнитных излучений: от гамма-квантов до радиоволн, включая оптический, инфракрасный, ультрафиолетовый и рентгеновский диапазоны.

Если до середины прошлого века астрономы наблюдали небо лишь в оптическом диапазоне (длина волны λ меняется от 3500 до 7000 ангстрем, то есть всего в два раза), то в настоящее время, благодаря выносу астрономических телескопов за пределы земной атмосферы на космических аппаратах, удается исследовать астрономические объекты в неизмеримо большем диапазоне, когда длина волны регистрируемого излучения меняется не в два раза, а в 10^{14} раз: от гамма квантов ($\lambda \approx 10^{-9}$ см) до радиоволн ($\lambda \approx 10^5$ см).

Например, изучая черные дыры в двойных звездных системах, астрономы используют рентгеновский диапазон ($\lambda \approx 1$ ангстрем или 10^{-8} см) совместно с оптическим ($\lambda \approx 5 \times 10^{-5}$ см) и радиодиапазоном.

Следует особо подчеркнуть, что к настоящему времени в разных странах введена в строй дюжина 8–10 метровых оптических телескопов нового поколения, а эффективность фотоприемников многократно возросла благодаря использованию ПЗС–матриц, которые регистрируют до 90 фотонов из каждых 100, упавших на приемник излучения.

Огромный прогресс достигнут в последние годы и в радиоастрономии: например, используя метод интерферометрии со сверхдлинной базой, удается достичь углового разрешения в 1000 раз выше разрешающей способности знаменитого космического телескопа Хаббл с зеркалом диаметром в 2,4 метра.

Для чтения этой книги не требуется каких-либо специальных знаний, выходящих за рамки обычной школьной физики и астрономии. Мы старались говорить лишь о самой сути дела, не входя в технические подробности и не перегружая текст математическими формулами; те немногие формулы, которые у нас все же приводятся, по существу просты и наглядны.

В конце книги помещен составленный издательством словарь, поясняющий главные из используемых астрономических понятий и терминов.

Авторы благодарны коллегам в Московском Университете Л. И. Корочкину, Д. В. Гальцову, Ю. Н. Ефремову, Ф. А. Цицину, которые прочитали отдельные части рукописи и сделали множество ценных замечаний.

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Июнь 2003 г.

Глава 1

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Истоки астрономии

Наскальные астрономические рисунки, встречающиеся в разных частях света, были первой попыткой человека запечатлеть и осознать картину мира, в котором мы живем. Древние майя чертили такие рисунки более шести тысячелетий назад. Пять тысяч лет назад появились первые астрономические записи в Египте, Вавилоне, Китае.

В древнеиндийской «Ригведе», что значит «Книга гимнов», можно найти описание — одно из самых первых в истории человечества (X век до н. э.) — всей Вселенной как единого целого. Согласно этому описанию, Вселенная устроена не слишком сложно. Прежде всего, в ней имеется Земля. Она представляется «обширным пространством» и имеет вид безграничной плоской поверхности. Эта поверхность покрыта сверху небом. А небо — это «голубой свод», усеянный звездами. Между небом и Землей — «светящийся воздух».

Очень похожи на эту картину и ранние представления о мире у древних греков и римлян — тоже плоская поверхность под куполом неба.

От настоящей науки это еще очень далеко. Но замечательна и грандиозна сама цель — объять мыслью всю Вселенную. Отсюда берет истоки уверенность в том, что человеческий разум способен осмыслить, понять и воссоздать в своем воображении полную картину мира. Наука о мире в целом складывалась по мере того, как шло накопление конкретных знаний о Земле,

Солнце, Луне, планетах, звездах, а затем уже и о галактиках и их системах.

Мир Аристотеля

В VI веке до н.э. Пифагор учил, что Земля шарообразна. Доказательством этому служила, например, круглая тень нашей планеты, падающая на Луну во время лунных затмений. Парменид, а за ним и Аристотель, всю Вселенную считали шарообразной, сферической. На эту мысль наводит не только округлый вид небосвода, но и круговые суточные движения небесных светил.

В центре мира Аристотель помещает Землю. Вокруг нее располагаются Солнце, Луна и известные тогда пять планет — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Каждому из этих тел соответствует своя сфера, обращающаяся вокруг нашей планеты. Тело прикреплено к своей сфере и потому оно тоже движется вокруг Земли. Самой удаленной сферой, охватывающей все остальные, считалась восьмая, на которой располагались звезды. Эта сфера тоже обращается вокруг Земли в соответствии с наблюдаемым суточным движением неба.

Аристотель учил, что небесные сферы, как сами небесные тела, сделаны из особого небесного материала — эфира. Эфир — это пятая стихия, т. е. квинтэссенция, после земли, воды, огня и воздуха. Он не имеет свойств тяжести или легкости и существует в вечном кругообразном движении.

Система Птолемея

Такая геоцентрическая картина мира царила в умах людей на протяжении двух тысячелетий — вплоть до эпохи Коперника. Замечательное ее усовершенствование осуществил во II веке нашей эры Птолемей, астроном и географ, живший в Александрии. Он создал строгую математическую теорию движения планет и на ее основе мог весьма точно вычислять видимые положения светил на небе — где они находятся сейчас, где были раньше и где окажутся потом. Для воспроизведения всех тонких деталей движения планет по небу к прежним пяти концентрическим небесным сферам пришлось добавить новые, центры которых уже не совпадали с центром Земли.



Рис. 1.1. Клавдий Птолемей
(2-й век новой эры).

Таким изобразил его безымянный европейский иллюстратор, живший много веков спустя. Птолемей был астрономом, астрологом, географом и философом. Точные даты его рождения и смерти не известны. Полагают, что он прожил 78 лет и умер в 141, а может быть, в 151 году. Родом он с берегов Нила, и в дельте Нила, в Александрии, устроил обсерваторию на крыше одного из крупных храмов. Собрание его астрономических трудов называется «Альмагест», в арабской традиции. Сам автор называл его «Синтаксис».

Астрономы Востока сохранили этот труд после падения античной цивилизации, и, благодаря им, он стал доступен всему миру. Более тысячелетия «Альмагест» служил источником ценнейших астрономических данных. Освященный авторитетом католической церкви, он был сводом общепринятых сведений о космосе и месте в нем человека. Уже в новейшие времена Птолемея обвиняли (как считают специалисты, без достаточных оснований) в научном плагиате: якобы он заимствовал — без ссылок на первоисточник — звездный каталог, составленный ранее Гипархом, другим знаменитым астрономом древности.

Споры вокруг Птолемея продолжаются и до сих пор; дело доходит порой и до совсем вздорных идей. Некогда прекрасный математик, а ныне небезызвестный писатель квазиисторических небылиц (из стен Московского Университета, увы) утверждает, что никакого Птолемея никогда не было, а его труд — средневековая подделка. Но нет худа без добра: кто и не видел «Альмагест» своими глазами, тот сейчас снимет его с полки и с почтением и восхищением прочтет или, по крайней мере, пролистает.

У Птолемея каждая планета участвует в нескольких круговых движениях, а их сложение и дает видимые пути небесных тел. Птолемей писал, что «наблюдаемые небесные явления воспроизводятся неизменными круговыми движениями».

Основные вращения назывались циклами, а добавочные эпициклами; их число доходило до 55 в некоторых вариантах.

В середине XIV века (а это был век увлечения техническими изобретениями в Европе) часовых дел мастер из Падуи изготовил не простые часы, а то, что называли астрариумом. Конечно, эти часы показывали время и притом с довольно высокой точностью. Но это не все: астрариум воспроизводил видимые перемещения Солнца, Луны и планет по небесной сфере. И все это в полном соответствии с астрономическими знаниями той эпохи. Это была в действительности вполне удавшаяся попытка построить действующую модель Вселенной, то есть это было воспроизведение Вселенной в действии посредством часового механизма.

Многочисленные цепляющиеся друг за друга колеса астрариума воспроизводили своим вращением циклы и эпициклы Птолемея, так что вся эта часовая машина представляла собою систему Птолемея «в металле», как сказали бы инженеры.

Модели Вселенной, подобные астрариуму, наглядным и очевидным образом демонстрировали любому человеку небесную механику, устройство и движение мира.

Система Аристотеля–Птолемея — это тоже модель Вселенной, но в отличие от астрариума, она воспроизводит мир в теоретическом виде — в виде чисел, таблиц, графиков. Она позволяет вычислить наперед пути небесных тел, и такие теоретические предсказания проверяются потом прямыми астрономическими наблюдениями. Эти предсказания неизменно и с хорошей точностью подтверждались, и модель с немалой пользой служила людям на протяжении четырнадцати веков (если считать от Птолемея).

В современной науке тоже строят теоретические модели Вселенной, или космологические модели. Они описывают уже не Солнечную систему с ее планетами, а весь мир звезд и галактик, ставший доступным астрономическим наблюдениям; о них речь пойдет далее в главе 4.

Коперниковская революция: гелиоцентрическая Вселенная

Небесная механика Птолемея была сложной, но не громоздкой. В ее сложности есть своя логика, своя гармония и даже красота. Но, судя по всему, природа предпочитает простоту.

Эту простоту мира разгадал Коперник. Сначала в 1515 г. в «Малом комментарии», а затем и в своей главной книге, вышедшей в год его смерти (1543), Коперник предложил гелиоцентрическую систему мира. Его книга носила скромное название «О вращениях небесных тел». Но это было дерзкое и решительное ниспровержение аристотелевского взгляда на мир.

Рис. 1.2. Система мира Коперника, как она наглядно изображена в его книге. Солнце здесь в центре орбит Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера и Сатурна. Внешний круг — сфера неподвижных звезд.



Благодаря Копернику мы узнали, что не Земля, а Солнце занимает центральное положение в планетной системе. При этом основные черты движения планет получили самое естественное объяснение. Земля же никакой не центр мира, а одна из рядовых планет, обращающихся вокруг Солнца. Так все стало на свои места, и простое устройство Солнечной системы оказалось распознанным.



Рис. 1.3. Николай Коперник (1473—1543).

Таким он был, вероятно, во времена написания «Малого комментария».

В 1973 г. астрономы всего мира праздновали 500-летие великого ученого. Большие торжества были в Варшаве, по «нашу» сторону железного занавеса, и для советских астрономов это была редчайшая по тем временам возможность лично встретиться с западными коллегами, которых давно и хорошо знали по их книгам и статьям.

Славно, что Коперник был поляк, не правда ли! — говорили нам новые друзья.

С этого времени сложная картина небесных сфер и циклов отошла в прошлое. Началась новая эпоха в изучении и понимании Вселенной. Продолжалась она почти пять столетий, вплоть до второй революции в астрономии, которая пришлась на 20-е годы XX века. После Коперника мы уже не можем рассматривать нашу Землю как какое-то особое место в пространстве. Наше положение в мире ничем особым не выделено — это общее утверждение называют принципом Коперника.



Рис. 1.4. Иоганн Кеплер
(1571–1630).

Математический талант и проницательность астронома вместе с необычайным трудолюбием и усердием позволили ему извлечь из огромной груды сырого материала наблюдений простые и стройные законы движения планет. Главный из них гласит: каждая планета обращается по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

В Праге показывают округлую стену старого собора, вблизи которого жил тогда (в 1609 г.) Кеплер. В поперечном сечении она представляет собой эллипс; эта ее форма, которую астроном внимательно изучил, и натолкнула его, как говорят, на мысль о космических эллипсах, которые заменили, с тех пор и навсегда, циклы и эпициклы Птолемея.

В Прагу он приехал выпускником Тюбингенского университета, чтобы занять место ассистента при Тихо Браге, знаменитом астрономе (и большом вельможе) тех лет, и после безвременной кончины патрона в 1601 г. унаследовал от него почетный титул Императорского математика.

Император Священной Римской Империи Рудольф Второй не слишком исправно платил жалование научным работникам и в результате сильно задолжал Кеплеру. Поговаривали, что Императорскому математику приходилось подрабатывать на жизнь составлением заказных гороскопов.

Он был лютеранин, и религиозные гонения, обострившиеся время от времени, заставляли его переезжать с места на место; он и умер в дороге, перебираясь из Линца в Баварию.

Замечательно, что задолго до Коперника, в середине III века до н. э., идею движения Земли вокруг Солнца обсуждал Аристарх Самосский. Эта идея вновь возникла в XI в. н. э. на Востоке в трудах энциклопедиста Бируни. Но она завоевала умы лишь благодаря Копернику и его книге. И это несмотря на церковный запрет, который был наложен на учение Коперника в 1616 г. и действовал (формально) до 1828 года.

Победе нового взгляда на мир в очень значительной степени способствовали усилия Галилея. В 1632 г. вышло его изложение системы Коперника, книга «Диалог о двух главнейших системах мира», написанная ясно и просто. Одно из преступлений, в которых инквизиция обвиняла Галилея, касалось формы и стиля его сочинений. Возмущало, что он пишет так, что это понятно обыкновенным людям.

Рис. 1.5. Галилео Галилей
(1564–1642).

Математик, физик, астроном, мыслитель. Галилей открыл закон падения тел в поле тяжести: все тела падают с одинаковым ускорением независимо от их собственной массы и размера, если исключить сопротивление воздуха.

Он учился медицине в Университете Пизы, но, как считают современные историки науки, вряд ли бросал предметы с верхнего яруса Пизанской башни. Он наблюдал в университетском соборе качания люстры и заметил, что период колебаний не зависит от их размаха. Потом он надежно проверил этот факт в лабораторных экспериментах с маятником.

Он вряд ли воскликнул: «А все-таки она вертится!» после объявления ему обвинительного вердикта. Но «упрямый Галилей», как назвал его Пушкин, наверняка так думал в тот момент.



Исаак Ньютон, родившийся в год смерти Галилея (1642), превратил учение Коперника в точную науку. Он открыл закон всемирного тяготения и на этой основе создал теорию движения небесных тел. Применительно к Солнечной системе небесная механика Ньютона открыла причину, по которой Земля и



Рис. 1.6. Исаак Ньютон
(1642—1727).

Его главный труд «Математические начала натуральной философии», опубликованный в 1687 году, содержал открытые им, и всем теперь известные, три закона классической механики и закон всемирного тяготения. Идея всемирного тяготения посетила его, когда он увидел падение созревшего яблока. Так гласит легенда, рассказанная Вольтеру племянницей Ньютона, а может быть, и сочиненная великим вольнодумцем, от которого ее узнал весь свет.

Изящный и просвещенный век видел в этой истории прозрачную аллегорию: сама Природа дарит своему избраннику зрелый плод от древа познания.

«Начала» существуют в превосходном русском переводе академика и адмирала А. Н. Крылова, который перепроверил все математические выкладки Ньютона, перечертил все его чертежи и по ходу дела устранил немало мелких огрехов, а главное — дал ясный комментарий к ключевым местам этого фундаментального труда. В основе основ механики Ньютона лежит представление об абсолютном времени и абсолютном пространстве, которые существуют сами по себе и остаются всегда и везде неизменными по своим свойствам. Так все и думали после Ньютона, пока не пришел Эйнштейн.

Был этот мир кромешной мглой окутан.

Да будет свет! — и вот явился Ньютон.

Но сатана не долго ждал реванша:

Пришел Эйнштейн, и стало все как раньше.

(Фольклор физиков)

планеты движутся по своим орбитам — их удерживает на замкнутых орбитах сила тяготения Солнца. Замкнутые орбиты могут быть идеально круговыми, как у Аристотеля и Птолемея.

В общем случае орбиты являются не окружностями, а эллипсами. Эллипсами, но не очень сильно отличающимися от окружностей, и являются в действительности орбиты Земли и планет. Эллиптичность планетных орбит открыл еще в 1609–1619 гг. Кеплер. Эмпирические законы планетных движений

Кеплера — крупнейшее наблюдательное открытие Коперниковской эпохи в астрономии.

Ньютоновское тяготение — это поистине сила, что движет мирами. Огромное разнообразие явлений природы — от движения планет Солнечной системы до разбегания галактик во Вселенной прекрасно описывается ньютоновской механикой и теорией тяготения.

Мир звезд

Солнечная система — это еще не вся Вселенная. Есть ведь еще и далекие звезды. О них Коперник не высказывает в своей книге никакого определенного мнения. Он просто оставляет их на прежнем месте, на дальней сфере, где они были у Аристотеля. Он лишь счел нужным добавить (и совершенно правильно), что расстояния до звезд во много раз больше размеров планетных орбит.

Как и в классической древности, Вселенная в целом мыслилась у Коперника замкнутым шарообразным пространством, ограниченным этой сферой.

В хорошую ясную ночь, вне сумерек и без лунного света, в каждое мгновение на видимой половине неба можно увидеть невооруженным глазом от двух до трех тысяч звезд. В списке, составленном во II веке до н. э. знаменитым астрономом древности Гиппархом и дополненным позднее Птолемеем, значится 1022 звезды. Гевелий, последний астроном, производивший (в XVII веке) такие подсчеты без помощи телескопа, довел их число до 1533. Звездочеты, конечно, не только считали звезды, но и оценивали величину их блеска, измеряли координаты на небесной сфере. Это нелегкая работа, так что неудивительно, что за многие века трудов до изобретения телескопа астрономы смогли занести в каталоги немногим больше половины звезд, видимых невооруженным глазом на северной небесной полусфере.

Уже в древности подозревали и о существовании большого числа звезд, не видимых глазом. Демокрит говорил, что белесоватая полоса, протянувшаяся через все небо, которую мы называем Млечным Путем, есть на самом деле соединение света множества невидимых по отдельности звезд. Споры о природе

Млечного Пути продолжались веками. Решение — в пользу догадки Демокрита — пришло в 1610 г., когда Галилей сообщил о первых открытиях, сделанных с помощью телескопа. С понятным волнением и гордостью он писал, что теперь удалось «сделать доступными глазу звезды, которые раньше никогда не были видимыми и число которых, по меньшей мере, в десять раз больше числа звезд, известных издревле».

После этого открытия важнейшей задачей астрономии стало изучение Млечного Пути, этого гигантского собрания звезд, которые Галилей увидел в свой телескоп. Усилия поколений наблюдателей были нацелены на то, чтобы узнать, каково полное число звезд Млечного Пути, определить его действительную форму и границы, оценить размеры.

Лишь в XIX веке удалось понять, что это единая система, заключающая в себе и все видимые глазом звезды, и огромное число других звезд. На равных правах со всеми входит в эту систему и наше Солнце, а с ним Земля и планеты. Причем располагаются они далеко не в центре этого мира звезд, а на его окраине.

Гипотеза Бруно

Идея о том, что наше Солнце — рядовая звезда, но только самая близкая к нам, была высказана Джордано Бруно в 1584 г., еще до открытий Галилея. Его сочинение называлось «О бесконечности, вселенной и мирах» и содержало соображения о бесконечности пространства Вселенной, о множественности обитаемых планет. Если Коперник указал место Земле отнюдь не в центре мира, то Бруно и Солнце лишил этой привилегии. Он сказал, что Солнце лишь одна из великого множества звезд Вселенной.

Конечно, это были только догадки, гипотезы, не имевшие под собой никакой наблюдательной основы. Они, во всяком случае, не противоречили никаким фактам науки. Это лишь необходимое, но не достаточное, условие правильности идеи. На тогдашнем уровне науки гипотезы Бруно нельзя было проверить — подтвердить или опровергнуть путем прямых астрономических наблюдений. В этом была их слабая сторона. Главное, однако, было вовсе не в этом.

Оказывается даже непроверенные на опыте идеи и предположения могут быть исключительно важны.

Яркие гипотезы, идеи необычайной смелости способны резко раздвинуть умственный кругозор людей. Так и произошло с гипотезой Бруно.

Горизонты мира стали иными после Бруно. Такого простить не могли. Он был сожжен в 1600 году на Площади Цветов в Риме.

Несколько лет назад Папа Римский Иоанн Павел II принимал в Ватикане участников проходившего в Риме научного конгресса. Математик В. И. Арнольд спросил у него: Галилей недавно оправдан церковью; не пора ли оправдать и Джордано Бруно? Понтифик ответил: Почему бы и нет, но докажите сначала существование жизни на других планетах.

Раз Солнце — одна из звезд Вселенной, то тогда и другие звезды тоже вполне могут быть подобны Солнцу и иметь свои планетные системы. А на других планетах тоже возможна жизнь... Только в самые последние годы существование планет вне Солнечной системы было надежно доказано прямыми астрономическими наблюдениями. Астрономия вплотную подошла к научному поиску внеземной жизни. Это одна из главных тем нашей книги (глава 2).

Смелая гипотеза Бруно породила целый каскад поразительных следствий. Среди них и вполне конкретные и в высшей степени полезные для астрономии задачи и перспективы. Из этой гипотезы вытекала, в частности, возможность оценки расстояний до звезд.

Действительно, Солнце такое большое и яркое только потому, что оно близко к нам. А на какое расстояние нужно отодвинуть наше дневное светило, чтобы оно выглядело бы так, как, например, звезда Сириус?

Ответ на этот вопрос дал Гюйгенс в середине XVII века. Он сравнил блеск этих двух небесных тел, и оказалось, что Сириус находится от нас в сотни тысяч раз дальше, чем Солнце. Позднее эту оценку удалось улучшить, когда выяснилось, что Сириус не очень похож на Солнце, он много ярче сам по себе. По современным расчетам расстояние до Сириуса 2,6 парсек, что составляет приблизительно 8 световых лет, тогда как расстояние до Солнца — 8 световых минут.

Млечный Путь — наша Галактика

По мере изучения Млечного Пути стали постепенно вырисовываться основные черты его строения, как гигантской звездной системы. Эту звездную систему называют еще нашей Галактикой. Оказалось, что Галактика имеет весьма правильную форму, несмотря на видимую клочковатость Млечного Пути, на беспорядочность, с которой, как кажется, рассеяны звезды по небу.

Три главных структурных элемента выделяют в Галактике. Это диск, сферическая подсистема и гало — см. рис. 1.7. Диск похож на две сложенные краями тарелки. Он образован звездами, которые внутри этого объема движутся по почти круговым орбитам вокруг центра Галактики. Диаметр диска составляет приблизительно сто тысяч световых лет. Число звезд в диске — около ста миллиардов.

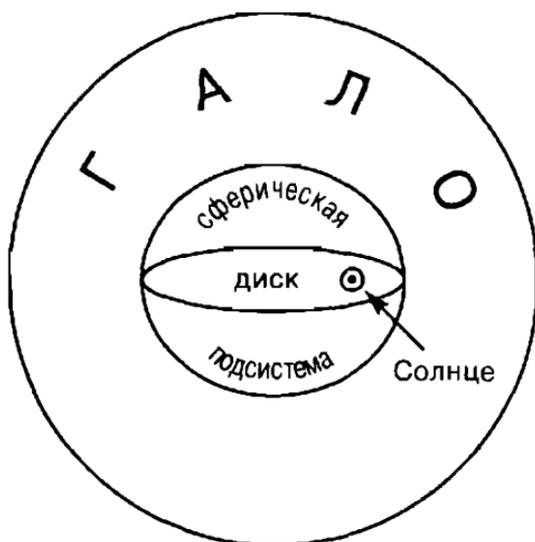


Рис. 1.7. Схема строения нашей Галактики.

На 90% по массе она состоит из темного вещества, которое заполняет огромный объем с поперечником приблизительно в десять диаметров звездного диска Галактики. В диске различают центральное уплотнение, которое называется балджем, а в самом центре всей системы находится черная дыра — ни то, ни тем более другое не изображено на этой простейшей схеме.

В сферической (в действительности, слегка сплюснутой с полюсов) подсистеме Галактики тоже около ста миллиардов звезд. Они движутся не по круговым, а по сильно вытянутым орбитам. Плоскости этих орбит проходят через центр Галактики. По разным направлениям плоскости орбит распределены более или менее равномерно. Диаметр сферической подсистемы близок к диаметру диска.

Сферическая подсистема и вложенный в нее диск погружены в почти сферическое гало, размер которого раз в 10 больше размеров диска. В гало нет звезд. Оно состоит из скрытых масс, или, как чаще сейчас говорят, темного вещества. Из гало не исходит никакого света. Темное вещество нельзя увидеть, оно проявляет себя только своим тяготением — по этому эффекту о его существовании и узнали.

Открытие гало Галактики и обнаружение темного вещества — событие 70–80-х годов богатого астрономическими (и не только) открытиями XX века. Значение этого открытия станет особенно ясным, если сказать, что масса темного вещества в гало Галактики в десять раз больше суммарной массы всех звезд диска и сферической подсистемы. Физическая природа темного вещества — острая и еще очень далекая от решения проблема современной астрономии и космологии (глава 4).

Хаббл и вторая революция в астрономии: Вселенная — мир галактик

К началу XX века границы наблюдаемой Вселенной раздвинулись настолько, что включали в себя всю звездную (без гало) Галактику. Многие считали тогда, что эта огромная звездная система и есть весь мир. Это была распространенная точка зрения; к ней склонялся, например, Эйнштейн, в своих размышлениях (1916–17 гг.) о новой космологии, которая бы строилась на основе только что созданной им общей теории относительности. Но новые телескопы, построенные в 1920-е годы, открыли перед астрономами совершенно новые горизонты. Оказалось, что за пределами Галактики мир не кончается.

В 1924 г. Эдвин Хаббл доказал, что знаменитая Туманность Андромеды находится вне Галактики и представляет собой гигантскую систему звезд, сравнимую с Галактикой по размерам.

Ему удалось сделать то, что за триста лет до него сделал Галилей — различить отдельные звезды там, где до этого видели лишь белесоватые облака. Как Галилей открыл звезды Млечного Пути, так Хаббл открыл звезды Туманности Андромеды. Если Галилею было достаточно телескопа диаметром в 3 см, то Хабблу потребовался телескоп с зеркалом, диаметр которого был чуть ли не в сто раз больше и составлял 2,5 м.



Рис. 1.8. Телескоп обсерватории Маунт Вилсон в Калифорнии. Диаметр его зеркала — 100 дюймов, т. е. 2,5 метра. Он был построен в 1917 г.

В 1924—29 гг. с его помощью Эдвин Хаббл сделал свои знаменитые открытия, положившие начало новой эпохи в астрономии.

За несколько лет работы Хаббл смог установить истинную физическую природу двух дюжин ближайших к нам внегалактических туманностей, которые оказались такими же звездными системами, хотя и не столь крупными, как наша Галактика и Туманность Андромеды. Эти туманности стали называть галактиками. Становилось ясно, что Вселенная — это не мир звезд, а мир галактик, и наша собственная Галактика отнюдь не центр этого мира.

Дальнейшие наблюдения галактик показали, что большинство их, а может быть и практически все, собраны в различные коллективы, насчитывающие от нескольких единиц до сотен и тысяч галактик различной массы и размеров. Эти агрегаты называют группами и скоплениями галактик.

Наша Галактика вместе с Галактикой Андромеды и тремя десятками менее крупных галактик образуют Местную группу. Местная группа входит в скопление галактик в Деве, а это скопление составляет вместе с несколькими другими примерно такими же скоплениями систему, которая называется Местным сверхскоплением. Местное сверхскопление не имеет четкой очерченной формы и в целом представляется несколько упло-

шенным. Его наибольший размер достигает нескольких миллионов световых лет. Приблизительно так же устроены и другие скопления и сверхскопления галактик.

Сверхскопления — самые крупные образования, которые наблюдаются во Вселенной. Какие-либо системы большего масштаба просто отсутствуют. Так что иерархия астрономических систем не продолжается к сколь угодно большим масштабам, она ограничена масштабом сверхскоплений.

Исключительной важности факт состоит в том, что скопления и сверхскопления распределены в пространстве равномерно. Это означает что мир галактик однороден в среднем по большим масштабам.

Если мысленно выделить в объеме Вселенной области с размером в 300 миллионов световых лет (или более) и подсчитать в каждой из них число галактик, то это число окажется практически одинаковым для всех таких областей. То же самое будет и при подсчете скоплений и сверхскоплений.

Объем поперечником в 300 миллионов световых лет, начиная с которого распределение галактик представляется в среднем равномерным в пространстве мира, называют ячейкой однородности во Вселенной.

Такого рода подсчеты позволяют определить среднюю плотность вещества во Вселенной. Для этого нужно знать массу вещества в ячейке однородности. Эта масса есть сумма масс всех галактик в этом объеме.

Конечно, измерить массу каждой отдельной галактики в данном объеме невозможно. Но, зная число звезд и массу звезд в типичной галактике, такую оценку все же можно сделать.

В результате получается, что в среднем на каждые десять кубических метров пространства мира приходится один (!) атом водорода.

Если выразить эту величину в единицах плотности массы, то окажется, что она составляет приблизительно 10^{-31} г/см³. Эта неммыслимо малая плотность гораздо меньше, чем остаточная плотность газа в лучших лабораторных вакуумных установках.

Такова средняя плотность светящегося вещества звезд, если мысленно «размазать» его равномерно по объему ячейки однородности.

Так как масса темных гало галактик раз в десять больше массы их звезд, то тем же путем получим среднюю плотность темного вещества в мире на уровне 10^{-30} г/см³.

Однородность распределения галактик означает, что ни одна из них не является центром мира. Или, что то же самое, каждая из них могла бы считаться центром мира. А это значит, что никакого центра в мире нет.

Современным наблюдениям доступен объем мира с радиусом в десять миллиардов световых лет. И мы находимся именно в центре этого сферического объема только потому, что дальность действия телескопов не зависит от направления в пространстве. Но наше собственное положение во Вселенной никак не выделено. Вселенная выглядит одинаково из любой точки пространства, и любой наблюдатель видит ее такой же, какой видим ее мы.

Если в Солнечной системе не Земля занимает центральное место, а в Галактике не Солнце находится в ее центре, то в мире Хаббла центра нет вообще. Так принцип Коперника оказался распространенным на весь наблюдаемый ныне огромный мир.

Удивительно, но об однородности мира в целом рассуждали задолго до того, как для этого появились наблюдательные основания. Наглядный образ однородности мира можно найти у Паскаля. Он говорил, что мир это шар, поверхность которого нигде, а центр везде.

Еще и за тысячу лет до Паскаля рассуждали о сфере без границ и с центром в любой точке. Эту метафору толковали и как модель умопостигаемого мира и как образ Бога Вседержителя мира.

Применительно к Вселенной эти рассуждения питались явными или неявными предположениями о максимальной простоте природы.

Этой давней традиции следовали уже в XX веке Эйнштейн, а за ним и Александр Александрович Фридман, создатель теории космологического расширения. Они строили модели Вселенной, в которых трехмерное пространство является однородным. При этом первая космологическая работа Эйнштейна (1917 г.) и работы Фридмана (1922–24 гг.) были сделаны еще до открытий Хаббла.

Итак, если отвлечься от таких деталей и подробностей, как галактики, их скопления и сверхскопления, и взглянуть на Вселенную шире, охватив мысленным взглядом сразу все множество космических структур, то она предстанет перед нами всюду одинаковой — «сплошной» и однородной. Осознание Вселенной как однородного мира галактик — решительный шаг в науке, по значению вполне сопоставимый с Коперниковской революцией.

Мир в динамике

Хаббл у принадлежит и другое, не менее значительное открытие. Наблюдая галактики вокруг нас, он обнаружил в 1927–29 гг., что звездные системы не стоят на месте, а движутся и притом все (кроме самых близких, таких как Туманность Андромеды) удаляются от нас и друг от друга.

Разбегание галактик было найдено по спектрам принимаемого от галактик света. Оказалось, что спектральные линии сдвинуты в сторону больших длин волн, то есть в сторону красного участка спектра. Это ныне знаменитое космологическое «красное смещение».

Такой сдвиг спектральных линий возникает всегда, когда расстояние между источником и приемником света возрастает, — это эффект Доплера, хорошо изученный в физике и использовавшийся в астрономии еще и до Хаббла для измерения скоростей небесных тел.

Это открытие означало, что мир галактик находится в состоянии общего расширения. Расширение прослеживается сейчас до расстояний около десяти миллиардов световых лет. Это самое грандиозное по пространственному масштабу явление природы. О нем говорят, как о расширении Вселенной.

Этот космический феномен был предсказан в теории Фридмана, созданной за несколько лет до открытия Хаббла, в 1922–24 гг. Из теории Фридмана следовало, что мир галактик существует не вечно, он возник приблизительно десять миллиардов лет назад. Последняя величина — это возраст мира. Мир в целом старше каждой из звезд или галактик, это самый длительный промежуток времени, реально измеренный в современной науке.

Конечно, не случайно пространственный размер наблюдаемого мира галактик представляет собой возраст мира, умноженный на скорость света. Раз мир существует десять миллиардов лет, лучи света, которые мы принимаем, не могли быть испущены раньше, чем десять миллиардов лет назад. Они могли пройти за это время путь не больше десяти миллиардов световых лет. Глядя на самые далекие из доступных наблюдением источники света — гигантские галактики и квазары, мы видим, таким образом, Вселенную, какой она была около десяти миллиардов лет назад.

Можно сказать, что мир галактик, наблюдаемый с помощью современных телескопов, предстает перед нами не только в пространстве, но и во времени. Мы реально видим «четырёхмерный куб» мира, три измерения которого составляют максимальные пространственные расстояния, а четвертым измерением служит возраст мира.

Канун третьей революции в астрономии?

Но какой будет следующая, третья революция в астрономии? И когда она произойдет? По-настоящему крупные перемены в науке невозможно предвидеть заранее.

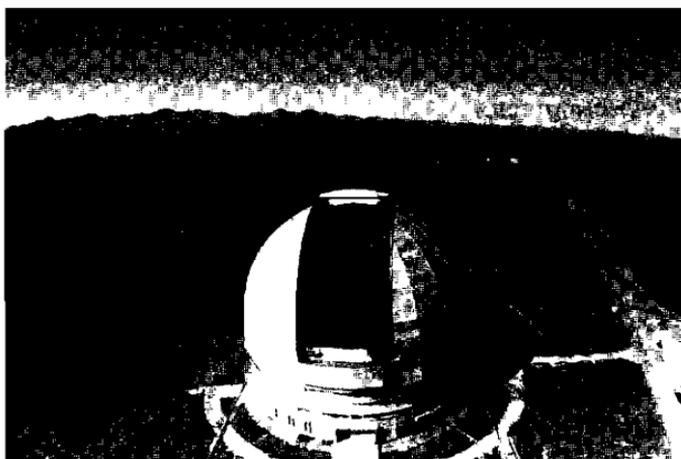


Рис. 1.9. Специальная астрофизическая обсерватория РАН на Северном Кавказе. Находящийся здесь телескоп с диаметром зеркала в 6 метров был построен в 1973 году и до недавнего времени оставался самым крупным в мире.



Рис. 1.10. Радиотелескоп РАТАН-600 с диаметром кольца в 600 метров. Здесь были начаты и успешно ведутся до сих пор систематические наблюдения реликтового излучения.

Однако в последние годы все более и более зреет ощущение, что мы стоим на пороге новых очень значительных, поистине революционных перемен.

Поразителен, прежде всего, быстро растущий арсенал астрономической техники. Если в распоряжении Хаббла был телескоп диаметром два с половиной метра, то уже почти три десятка лет действует шестиметровый телескоп (на Северном Кавказе), а недавно введены в строй два телескопа диаметром десять метров (на Гавайях) и несколько телескопов диаметром восемь метров.

На стадии конструирования находятся еще гораздо более крупные инструменты. Это телескопы с системой зеркал, а не со сплошным зеркалом. По своей эффективности такие инструменты эквивалентны телескопам с диаметром сплошного зеркала в тридцать и даже сто метров.

Только один процент света, падающего на зеркало телескопа, шел в дело во времена Хаббла. Эффективность современных приемников света на основе приборов с зарядовой связью достигает почти 100%.

Астрономические наблюдения ведутся из космоса. На орбите находится Хаббловский космический телескоп.

Специализированные космические обсерватории наблюдают Вселенную в рентгеновских и гамма-лучах.

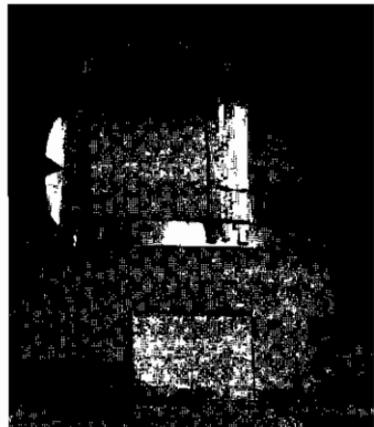


Рис. 1.11. Башня одного из двух 10-метровых телескопов-близнецов на Гавайях.

Астрономия поистине стала всеволновой, как говорил об этом И. С. Шкловский. Наблюдениям доступен не только видимый свет, но также ультрафиолетовое и инфракрасное излучение небесных тел. Весь огромный диапазон принимаемых сейчас электромагнитных волн простирается от радиоволн до гамма-лучей. Рекордно жесткие гамма-лучи имеют энергию до нескольких эрг (~ 1 ТэВ). В наблюдениях космических лучей, то есть потоков не волн, а частиц из космоса, регистрируются энергии, которые еще в миллиард раз выше. Важнейшие сведения о мире несут нейтрино, испускаемые Солнцем и при вспышках сверхновых звезд. Недавно (2002 г.) достижения наблюдателей в астрофизике высоких энергий и в нейтринной астрофизике отмечены Нобелевской премией.



Рис. 1.12. Космический телескоп имени Хаббла с диаметром зеркала 2,4 метра. Крайняя левая деталь — открытая крышка телескопа.

В астрономии стремительно накапливается «критическая масса» новых инструментов немыслимой ранее мощности и новых теоретических идей. В невиданном ранее темпе возникают все новые проблемы, одна острее и грандиознее другой. Об этом и пойдет речь далее в нашей книге.

Глава 2

ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ

От романтической — к реалистической постановке задачи

Сегодня мы знаем лишь одно место во Вселенной, где есть жизнь и цивилизация — это наша родная планета Земля. Внеземные формы жизни и, тем более, внеземные цивилизации пока не открыты. Между тем, человека всегда остро интересовал вопрос — одинок ли он во Вселенной, есть ли жизнь вне Земли, кто является творцом жизни — объективно развивающийся материальный мир или всемогущий Бог, создавший человека по своему образу и подобию?

Жизнь и разум являются высшей формой организации материи. Физические и химические процессы, происходящие в живых организмах, в высшей степени сложны, упорядочены и гармоничны. Несмотря на выдающиеся достижения современной биологии, практическое завершение программы расшифровки генома человека и ряда других организмов, тайна происхождения жизни и, тем более, разумной жизни пока не разгадана. Разгадке этой тайны природы будет способствовать открытие хотя бы одного примера внеземной жизни. Кроме того, трудно переоценить огромные социальные последствия открытия внеземной жизни и колоссальное значение этого открытия для развития науки и техники.

Поэтому ученые, опираясь на новейшие достижения науки, техники и технологии, интенсивно занимаются поисками жизни

за пределами Земли. В конце 50-х годов прошлого века было осознано, что развитие технологической деятельности человека идет столь стремительно, что если во Вселенной есть цивилизации, которые хотя бы на тысячи лет старше нашей, то мы можем наблюдать с Земли результаты их деятельности как «космическое чудо», необъяснимое с точки зрения естественных причин, вызванных известными физическими законами.

Действительно, за последние 100 лет (отрезок времени, очень малый по сравнению со временем существования человека как биологического вида $\sim 10^6$ лет) человечество прошло путь от паровой машины до полетов в Космос и клонирования животных.

Результаты технологической деятельности человечества в течение последующего столетия невозможно предугадать, но совершенно очевидно, что уже в конце 21-го века деятельность человечества будет заметной для наблюдателей, расположенных вблизи ближайших звезд.

К идее «космического чуда» примыкает так называемый парадокс Ферми, сформулированный в 1950 году выдающимся итальянским физиком Э. Ферми. Если цивилизации на других планетах Вселенной развиваются такими же стремительными темпами, как земная цивилизация, то за время существования ($\sim 4,5$ миллиарда лет) Земля должна была неоднократно посещаться инопланетянами. Между тем на вопрос «Где они?» нам приходится разводиться руками.

Никаких достоверно установленных следов посещения Земли внеземными аппаратами и существами не обнаружено. Известные мифы о летающих тарелках, гуманоидах и захватах людей Земли инопланетными кораблями относятся либо к технологической деятельности человечества, чаще всего, к запускам земных космических аппаратов, либо к области психиатрии, поскольку этой навязчивой идеей часто страдают не вполне здоровые люди.

Оптимистические надежды

Идея множественности обитаемых миров во Вселенной была весьма популярной на протяжении практически всей истории человечества. Особенно широкое распространение эта

идея получила после коперниковской революции в астрономии (середина 16-го века), которая лишила Землю привилегированного положения, как центра Вселенной. Если Земля — рядовая планета, то почему бы не существовать другим планетам в необъятных просторах Вселенной, на которых есть жизнь, в том числе разумная? Эта мысль казалась вполне естественной. Поэтому многие ученые и философы активно пропагандировали идею существования внеземных форм жизни и внеземных цивилизаций.

Энтузиазм в отношении существования внеземной жизни особенно сильно возрос, когда в 1877 году итальянский астроном Скиапарелли, а затем американский исследователь Лоуэлл высказали сенсационную гипотезу о существовании «каналов» на Марсе.

Наблюдая эту красную планету в телескоп, они подметили наличие длинных, тонких и почти прямолинейных образований на ее поверхности, которые были названы каналами.

Идея об искусственном происхождении каналов на Марсе и существовании там разумной жизни быстро овладела умами людей. Эта идея получила дальнейшее развитие после открытия сезонных изменений на поверхности Марса, которые ученые середины прошлого века связывали с наличием переменного растительного покрова. Появилась даже специальная наука — астроботаника, энтузиастом которой был известный советский астроном Тихов.

Разочарования

Увы, все эти смелые и романтические гипотезы не подтвердились прямыми космическими исследованиями Марса. Оказалось, что «каналы» — это цепочки пятен, которые из-за субъективного восприятия человеческим глазом при наблюдении в телескоп с Земли представлялись как прямые линии, а сезонные изменения на поверхности Марса связаны с атмосферной циркуляцией пыли и, возможно, вулканического пепла. Никаких следов жизни на поверхности Марса пока не обнаружено.

Ученые испытали жесточайшее разочарование в середине 70-х годов прошлого века, когда первые панорамы поверхности

Марса, переданные на Землю телевизионными датчиками американских космических станций Викинг-1 и Викинг-2, высаженных на Марсе, не показали ни живых, ни окаменелых растений и животных. Поверхность Марса, снятая вблизи, оказалась безжизненной пустыней (рис. 2.1)...

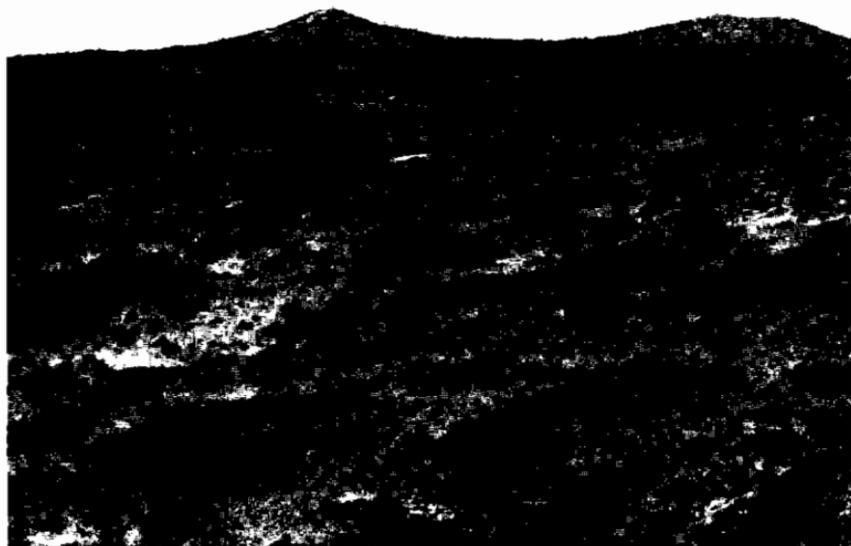


Рис. 2.1. Марсианский пейзаж (снимок с борта американского посадочного космического аппарата «Викинг»).

Не менее жестокое разочарование в отношении существования внеземной жизни ученые испытали в конце 60-х годов прошлого века в связи с открытием пульсаров. В 1967 году аспирантка профессора Хьюиша Джоселин Белл в знаменитой Кавендишской лаборатории Кембриджского университета (Англия), проводя радиоастрономические наблюдения, зарегистрировала строго периодические (период около 1 сек) короткие (длительность $\sim 0,05$ сек) радиоимпульсы, идущие из Космоса. Стабильность периода следования этих импульсов была необычайно высока. Это вызвало серьезные подозрения в искусственном происхождении радиоимпульсов.

Полгода английские астрономы держали в секрете сделанное ими открытие — беспрецедентный случай в астрономической практике.

Лишь когда они убедились в том, что импульсы идут от объекта, расположенного далеко за пределами Солнечной системы, и не связаны с сигналами внеземной цивилизации, результаты наблюдений этого объекта, который был назван пульсаром, были опубликованы. Оказалось, что строго периодические импульсы радиоизлучения испускаются быстро вращающейся, сильно намагниченной нейтронной звездой радиусом около 10 км и плотностью в сотни миллионов тонн в кубическом сантиметре.

Открытие нейтронных звезд стало революционным прорывом в физике и релятивистской астрофизике. За это открытие и за разработку новых методов наблюдений в радиоастрономии профессор Хьюиш был удостоен Нобелевской премии. Однако в данном случае астрономы еще раз вынуждены были смириться с фактом отсутствия «космического чуда», связанного с деятельностью внеземных цивилизаций.

В очередной раз астрономы вынуждены были отказаться от идеи «космического чуда», когда в 1979 году американским астрономом Маргоном с сотрудниками были открыты строго периодические перемещения линий излучения водорода и гелия в оптическом спектре уникального объекта SS433.

В спектре этого звездообразного объекта присутствуют три системы линий излучения: одна из них неподвижна и примерно соответствует лабораторному положению, а две другие перемещаются в синюю и красную часть спектра с периодом 162,5 суток на огромную, никогда ранее не наблюдававшуюся величину около тысячи ангстрем (1 ангстрем равен 10^{-8} см).

Строгая периодичность и огромная амплитуда перемещений «подвижных» линий дали основания для гипотезы об искусственном происхождении этого явления. Было высказано предположение, что в данном случае некая очень развитая цивилизация сигналиит нам лучом очень мощного перестраиваемого лазера.

Однако дальнейшие наблюдения показали отсутствие значительной поляризации в «подвижных» линиях излучения (лазер же дает поляризованное монохроматическое излучение), а период 162,5 суток и большая амплитуда перемещений линий по спектру были объяснены вполне «прозаической» причиной

— прецессией узконаправленных выбросов вещества, вырывающихся со скоростями 80000 км/с из центральных частей газового диска (аккреционного диска) вокруг черной дыры в двойной звездной системе.

Открытие оптических затмений в объекте SS433 с периодом 13,1 суток, сделанное в 1980 году, позволило окончательно доказать, что SS433 является двойной системой, и объяснить все спектральные особенности этого объекта естественными причинами, без привлечения гипотезы о внеземной цивилизации.

Объект SS433 оказался первым примером так называемого микроквара — тесной двойной звездной системы, содержащей нормальную звезду и черную дыру, окруженную диском из вещества, поставляемого спутником — оптической звездой, причем из центральных частей диска вырываются узконаправленные выбросы высокоскоростного газа (джеты). Таких микрокваров к настоящему времени насчитывается в Галактике уже около десятка.

Таким образом, и в этом случае надежды на обнаружение «космического чуда» не оправдались.

Одна из последних сенсаций прозвучала совсем недавно, в 1996 году, когда американский ученый Д. Мак-Кей с сотрудниками сообщил об открытии в метеорите ALH84001, прилетевшем на Землю с Марса, окаменелых остатков древних микроорганизмов внеземного происхождения. Однако размеры этих бактерий оказались в 100—1000 раз меньше земных.

Функционирование бактерий столь малого размера трудно объяснить в рамках современной молекулярной биологии. Ряд ученых возражает против гипотезы об органическом происхождении структур в марсианском метеорите, которые были отождествлены с окаменелыми бактериями.

Поэтому, хотя сообщение Мак-Кея стимулировало финансирование американской программы космических исследований Марса, вопрос о наличии окаменелых остатков внеземной жизни в марсианском метеорите пока остается открытым.

Энтузиазм неиссякаем

Существует поговорка: «пессимист — это хорошо информированный оптимист». Следуя ей, можно сказать, что к настоящему времени ученые столь хорошо информированы о трудностях, связанных с обнаружением проявлений внеземных цивилизаций, что многие из них уже очень осторожно высказываются о возможности существования внеземных форм жизни.

В этом отношении весьма показателен пример выдающегося советского астрофизика, члена-корреспондента АН СССР И. С. Шкловского. В 1962 году, в первом издании своей замечательной книги «Вселенная, жизнь, разум», он весьма оптимистично оценивал перспективы межзвездной радиосвязи с внеземными цивилизациями и возможности астрономических поисков следов внеземной жизни. Однако через четверть века в шестом издании этой книги он подчеркивает, что, несмотря на неизмеримо возросшую мощь наших телескопов и приемников излучения практически во всем диапазоне электромагнитных волн, никаких «космических чудес» обнаружить не удалось.

Между тем, поскольку образование звезд и планетных систем вокруг них идет во Вселенной непрерывно, можно ожидать, что разные очаги жизни во Вселенной могут иметь возраст от 15 миллиардов до нескольких сотен миллионов лет. Поскольку возраст Земли составляет 4,5 миллиардов лет, а возраст земной жизни около 3,8 миллиарда лет (возраст человека около 1 миллиона лет) можно ожидать наличия во Вселенной цивилизаций гораздо большего возраста и несравненно более продвинутых в технологическом отношении, чем земная цивилизация.

Именно деятельность таких цивилизаций и должна приводить к явлению «космического чуда». Поскольку никаких «космических чудес» не обнаружено, Шкловский подчеркивает, что молчание Космоса — это фундаментальный наблюдательный факт, требующий объяснения; возможно, что жизнь на Земле — очень редкое, уникальное, а может быть и единственное явление в нашей Галактике.

Другую мысль в этом направлении высказывает профессор Тутуков: время жизни высокоразвитых цивилизаций по каким-то причинам очень короткое (~1000 лет), поэтому цивилизации погибают раньше, чем они успевают вступить в контакт друг с

другом. Не все ученые разделяют эти пессимистические взгляды. Например, академик Кардашев считает, что неудачи поиска внеземных цивилизаций вызваны рядом причин.

Первая причина связана с тем, что большинство экспериментов предполагает поиски внеземных цивилизаций, подобных нашей. Но найти цивилизацию, подобную нашей, крайне маловероятно.

Вторая причина связана с невозможностью описания возникновения и эволюции цивилизаций на космологически значимых интервалах времени: например, мы не можем предсказать развитие земной цивилизации на миллиард лет вперед, а без этого трудно представить реальные наблюдательные проявления большинства внеземных цивилизаций. В связи с этим Кардашев предлагает принять как аксиому: существует отличная от нуля вероятность возникновения жизни во Вселенной, и нет принципиальных причин, ограничивающих уровень ее развития.

Третья причина состоит в том, что, по-видимому, мы слишком переоцениваем наши знания о физике и структуре Вселенной, которая на самом деле может быть устроена намного сложнее, чем мы о ней думаем. Уже тот факт, что современная астрономия может изучать лишь около 3% окружающей нас материи, а 97% материи во Вселенной представляет собой скрытую материю, которая проявляет себя лишь гравитационным взаимодействием, позволяет ожидать самых экзотических и неожиданных проявлений внеземных цивилизаций.

Например, можно ожидать наличия внеземных цивилизаций в мире зеркального вещества или цивилизаций, осуществляющих связь с нашей Вселенной через пространственно-временные туннели и т. п.

Несмотря на весь драматизм положения с проблемой поиска внеземной жизни, в самые последние годы у ученых вновь появились надежды на успех в решении этой, как выяснилось, очень непростой и чрезвычайно животрепещущей проблемы. Эти надежды связаны с недавним открытием планетных систем у многих ближайших звезд.

О новейших подходах к проблеме поиска внеземной жизни мы и хотим рассказать в данной главе.

Три типа цивилизаций

Согласно Кардашеву, во Вселенной могут существовать цивилизации трех типов, различающихся по уровню технологического развития:

I. Цивилизации, уровень развития которых близок к земному: ежесекундное потребление энергии порядка 10^{20} эрг.

II. Цивилизации, которые овладели энергией, излучаемой своей звездой: ежесекундное потребление энергии равно светимости Солнца ($\sim 4 \times 10^{33}$ эрг/с).

III. Цивилизации, овладевшие энергией в масштабе своей галактики: ежесекундное потребление $\sim 10^{44}$ эрг.

При современном развитии техники наблюдатели с Земли могут обнаружить сигналы от внеземных цивилизаций II типа даже тогда, когда они удалены от нас на расстояния порядка 10 миллионов световых лет (размеры местной группы галактик, включающей нашу Галактику, галактики Андромеды и Треугольника, Большое и Малое Магеллановы облака и еще около десятка карликовых галактик).

Сигналы же от внеземных цивилизаций III типа могут быть зарегистрированы современными земными техническими средствами вплоть до расстояний в 10 миллиардов световых лет; то есть, включая самые удаленные из известных объектов метагалактики.

По оценкам Шкловского, цивилизации I типа могут быть обнаружены с расстояний до 100 световых лет (полное число звезд в объеме такого радиуса составляет порядка 10000). А по оценкам американского астронома Дрейка, если использовать гигантский 300-метровый радиотелескоп в Аресибо (Пуэрто-Рико) и максимально возможные современные энергетические затраты (мощность радиопередатчика ~ 1000 киловатт), можно посылать обнаружимые сигналы к внеземным цивилизациям I типа, расположенным на расстояниях до 6000 световых лет.

Где и как искать?

Возникает, однако, вопрос — в каком направлении, и на какой частоте искать радиосигналы от внеземных цивилизаций. Эта проблема детально обсуждается Шкловским.

В частности, отмечается, что искать сигналы цивилизаций нужно от звезд поздних спектральных классов солнечного типа, которые медленно вращаются по сравнению с горячими звездами. По мнению Шкловского, это свидетельствует о существовании планетной системы, которая при своем формировании взяла на себя основную часть вращательного момента звезды.

Как отмечает Шкловский, малые скорости вращения звезд позднего спектрального класса могут быть также вызваны потерей этими звездами момента вращения при истечении замагниченного звездного ветра. Эта гипотеза была высказана французским ученым Шацманом.

Вопрос о выборе подходящей длины волны радиоизлучения при поиске сигналов внеземных цивилизаций впервые обсуждался в работе Коккони и Моррисона в 1959 году. Авторы предложили проводить поиск сигналов на длине волны 21 см, соответствующей знаменитой линии излучения нейтрального водорода.

Эта линия принципиально важна для изучения распределения водорода в галактиках и она должна быть хорошо известна внеземным цивилизациям I—III типов.

Кардашев предложил также использовать для межзвездной радиосвязи длину волны 1,5 мм, соответствующую максимуму в распределении энергии реликтового трехградусного радиоизлучения — остатка от первичного Большого взрыва, сопровождавшего образование наблюдаемой Вселенной. Если внеземная цивилизация значительно продвинута в своем развитии, то она должна знать о существовании реликтового излучения.

Поиски братьев по разуму

Первые наблюдения с целью поиска искусственных радиосигналов от звезд солнечного типа τ Кита и ϵ Эридана были выполнены в 1960 году Дрейком на специально разработанной для этой цели аппаратуре, работающей на длине волны 21 см (проект «ОЗМА»). От этих звезд, расположенных от нас на расстоянии около 11 световых лет, искусственных сигналов не было обнаружено.

В Советском Союзе подобные наблюдения были выполнены членом-корреспондентом АН СССР Троицким с сотрудни-

ками, которые исследовали 12 звезд солнечного типа, удаленных от Земли на расстояния 10–60 световых лет.

Результаты этих наблюдений также оказались отрицательными. В дальнейшем, посылали специальные радиосигналы к звездам и звездным скоплениям, а также письменные послания на борту межпланетных станций, например, американских станций «Пионер» и «Вояджер».

Была сформирована специальная международная программа поиска внеземных цивилизаций (SETI), а в Международном Астрономическом Союзе образована специальная Комиссия по программе поиска внеземных цивилизаций.

В 1974 году американские астрономы отправили радиопослание в сторону созвездия Геркулес к шаровому скоплению М13, содержащему около ста тысяч звезд. Эксперимент проводился с использованием гигантского 300-метрового радиотелескопа в Аресибо.

Послание было составлено Дрейком и Оливером. Оно содержит в закодированном виде цифры от 1 до 10, атомные числа нескольких химических элементов, схему молекулы ДНК и число атомов в ней, фигуру человека, численность людей на Земле, вид Солнечной системы, схему радиотелескопа в Аресибо. Изображения передавались по принципу телевизионной развертки. Они состояли из 73 строк, в каждой из которых было по 23 точки. Эти изображения передавались в виде последовательности радиоимпульсов, число которых равно произведению двух простых чисел: $23 \times 73 = 1679$. Когда последовательность радиоимпульсов будет принята внеземной цивилизацией, ее можно будет разложить на строки единственным способом и построить телевизионное изображение.

Это послание отправлялось многократно. Дойдет оно к звездам в скоплении М13 лишь через 25 тысяч лет. Так велики расстояния между Солнцем и другими звездами Галактики, что даже радиосигналам,двигающимся со скоростью света, требуются десятки тысяч лет, чтобы их преодолеть.

Еще одно специальное радиопослание к четырем ближайшим звездам солнечного типа, удаленным от Солнца на 55–70 световых лет, было осуществлено в рамках международного проекта «Космический звонок» в 1999 году с радиолокатора

Центра дальней космической связи в Евпатории (Крым, Украина). В этом послании, наряду с основным научным текстом, содержалось около 50 тысяч личных посланий граждан на английском языке, принятых к отправке за некоторую плату, что стало финансовым базисом реализации проекта.

Следует упомянуть также и о первом детском Послании к внеземным цивилизациям (проект «Здравствуй, Галактика», шесть звезд солнечного типа на расстояниях 40–70 световых лет), которое было реализовано в 2001 году в России с использованием украинского 70-метрового радиотелескопа Центра дальней космической связи.

В течение последних сорока лет поиск радиосигналов искусственного происхождения из Космоса проводился многими радиоастрономическими обсерваториями ряда стран: Австралия, Нидерланды, Канада, СССР, США, Франция, ФРГ, Япония и др. Результаты этих поисков пока отрицательны. В настоящее время на радиотелескопе в Аресибо, наряду с работами по основным научным программам, ведутся непрерывные наблюдения неба в радиодиапазоне с целью поиска внеземных цивилизаций.

В рамках специальной программы SETI@HOME данные таких наблюдений могут быть получены для обработки любым желающим по сети Интернет. Следует подчеркнуть, что это задача со многими неизвестными и потому очень сложна и неопределенна: необходимо знать направление, радиочастоту, ширину полосы, состояние поляризации радиоизлучения, характер возможной модуляции сигнала и т. п. В данном случае вполне уместна поговорка «пойди туда, не знаю куда, найди то, не знаю что». Тем не менее, романтический порыв смелых исследователей, вдохновленных идеей поиска братьев по разуму во Вселенной, достоин уважения и всяческого поощрения — слишком велика цена возможного положительного результата таких поисков.

Впрочем, в этой связи уже раздаются голоса осторожных людей: а не привлечем ли мы, посылая сигналы к другим звездам, внимание агрессивных высокоразвитых цивилизаций, которые начнут жестокую колонизацию нашей родной и уютной планеты?

Дискуссии на эту тему идут в научной литературе, в публичной прессе и, конечно же, в научно—фантастических романах и кинофильмах.

В последние годы, в связи с открытием планетных систем у многих звезд, появилась уникальная возможность более реалистично решать проблему поиска внеземной жизни. Ученые надеются, что в течение ближайших 10 лет с помощью космических интерферометров удастся снять спектры планет вокруг других звезд. Это позволит осуществить поиск кислорода и озона в их атмосферах — верных признаков органических форм жизни.

Прежде чем перейти к изложению новейших результатов в этом направлении, рассмотрим современные представления о жизни, разуме, цивилизации.

Поговорим о жизни

Мы многократно упоминали вполне очевидные для каждого человека понятия «жизнь», «разум», «цивилизация». Однако, что такое жизнь? Каковы основные свойства живого вещества? Каковы признаки разумной жизни? Что такое цивилизация? Все эти понятия столь сложны, что строгого определения их дать невозможно.

На примере земной жизни мы опишем важнейшие признаки живой материи с точки зрения современной молекулярной биологии. Сразу оговоримся, что поскольку мы намерены в нашей книге описать современный реалистичный подход к проблеме поиска внеземной жизни, мы не будем фантазировать о различных небелковых формах жизни, космическом разуме и т. п. — оставим эти красивые фантазии для Станислава Лема. Действительно, что конструктивного мы можем сказать о космическом разуме, если даже не знаем, существуют ли хотя бы примитивные формы жизни вне Земли?

В старых школьных учебниках по биологии жизнь определялась, как способ существования белковых тел, основанный на обмене веществ. Это явно неполное определение, поскольку обмен веществом и энергией может происходить при химических реакциях и в неживых системах, состоящих из сложных органических молекул.

С точки зрения современной биологии главные качества жизни — это самовоспроизводимость и гомеостаз. Самовоспроизводимость — это способность живого организма к размножению, рождению и выращиванию себе подобных.

Гомеостаз — это стремление живых организмов к состоянию устойчивого равновесия и обособлению от внешней среды при наличии обмена энергией и веществом с ней. Именно благодаря гомеостазу живой организм существует во внешней среде, свойства которой могут значительно изменяться.

Реакция организма на стрессы — сильные внешние воздействия, может быть двоякой — резистентной (сопротивляющейся) и толерантной (подчиняющейся). Если внешние воздействия относительно невелики, резистентная реакция организма стремится поддержать гомеостаз путем выработки реакций сопротивления изменениям окружающей среды. Например, в жаркую погоду человек потеет, что позволяет ему поддерживать постоянную температуру тела.

Если внешние воздействия очень сильны, организм жертвует гомеостазом ради сохранения главного — жизненных процессов, и переходит в состояние анабиоза, когда все процессы в организме сильно замедляются. Например, медведь зимой впадает в спячку. Очевидно, что если внешние воздействия предельно сильны, то ни резистентная, ни толерантная реакции организма не помогут, и организм погибнет.

Молекулярные механизмы

Рассмотрим кратко основные молекулярные механизмы функционирования живой материи. Прежде всего, подчеркнем, что попытки обнаружить в живых организмах, например в клетках, особое биологическое вещество и поле оказались безуспешными: все живые организмы состоят из атомов, молекул и связанных с ними полей ядерных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Никакой особой «биологической субстанции», никакого специального «биополя» не существует. Жизненный процесс функционирует благодаря огромному количеству обычных химических реакций.

Среди огромного разнообразия химических веществ, входящих в состав живых существ, особое значение имеют два типа биологических полимеров — белки и нуклеиновые кислоты. Структура белков очень сложна. Важнейшим химическим элементом, обеспечивающим функционирование белков, является углерод.

Поэтому, как говорят, земная жизнь является органической, то есть, построена на углеродной основе. Обсуждаются другие, не углеродные формы жизни, например, на основе кремния (напомним, что современные достижения в области компьютерных и информационных технологий основаны на использовании сверхчистого кремния). Однако научного обоснования возможности существования кремниевых форм жизни пока не существует.

Главные составляющие белков — это более простые органические молекулы, называемые аминокислотами. Из курса химии мы знаем, что кислоты — это вещества, способные в химических реакциях отдавать протон (H^+), а основания — вещества, присоединяющие протон.

Всего известно около 100 типов аминокислот, однако в живых организмах синтезируются белки, основанные лишь на 20. Возможности синтеза белков на основе такого количества аминокислот практически безграничны: комбинируя аминокислоты разных типов, можно получать различные белки, число которых превосходит полное число атомов во Вселенной ($\sim 10^{80}$). В организме взрослого человека содержится около одного миллиона типов белков.

Белки являются теми рабочими телами, которые обеспечивают структуру и функционирование живого организма. Однако для обеспечения роста организма, поддержания гомеостаза и, главное, для реализации самовоспроизводимости организма, необходимо непрерывное воспроизводство, синтез белков на основе некоторых строгих и упорядоченных правил. Эти правила синтеза белков записаны в химической структуре одного из типов нуклеиновых кислот — дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК).

Другой тип нуклеиновых кислот — рибонуклеиновая кислота (РНК) служит для переноса информации и синтеза белков. Синтез белков является центральным событием в жизни клетки любого организма.

Как иногда говорят биологи, в сущности, жизнь есть способ существования аппарата белкового синтеза.

Как известно, генетическая (наследственная) информация записана в цепи молекулы ДНК в виде последовательности

более простых молекул — нуклеотидных остатков, содержащих одно из четырех оснований: аденин (А), гуанин (G) — пуриновые основания, цитозин (С) и тимин (Т) — пиримидиновые основания.

Как уже отмечалось, основания отличаются от кислот тем, что при химических реакциях они присоединяют протон (H^+).

Открытие Уотсона и Крика

В 1953 году Дж. Уотсон и Ф. Крик, впоследствии нобелевские лауреаты, предложили модель строения молекулы ДНК в форме двойной спирали (рис. 2.2).

В молекуле ДНК две спиральные полинуклеотидные цепи закручены вправо вокруг общей оси. Полимерный остов спиральной цепи ДНК состоит из чередующихся остатков фосфата и сахара дезоксирибозы.

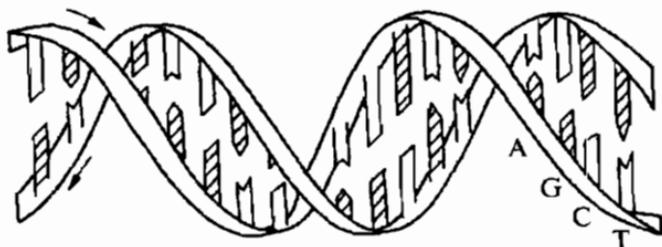


Рис. 2.2. Модель структуры молекулы ДНК по Уотсону и Крику.

Молекула ДНК — это двойная спираль, состоящая из двух полинуклеотидных цепей, закрученных вправо. К бокам спиралей прикреплены молекулы оснований: двух пуриновых (аденин и гуанин) и двух пиримидиновых (тимин и цитозин).

Информация о наследственных свойствах организма записана в виде различных комбинаций этих оснований.

Пуриновые основания (А и G) и пиримидиновые основания (Т и С) прикреплены с боков спиралей к полимерному остову на одинаковом расстоянии друг от друга.

При этом против каждого остатка пуринового основания одной спиральной полинуклеотидной цепи находится остаток пиримидинового основания другой спиральной цепи. Информационное содержание обеих спиральных цепей ДНК идентично, так как каждая из них содержит последовательность

нуклеотидов, строго соответствующую последовательности нуклеотидов другой цепи, благодаря образованию так называемых уотсон — криковских пар G—C и A—T.

Все реакции обмена веществ в клетках организма осуществляются под контролем особых белков — биокатализаторов (ферментов), структура которых записана в ДНК в виде генов (ген — это единица наследственной информации, определяющая данный признак живого организма, иными словами, ген — это участок цепи ДНК, используемый для кодирования белков определенного типа). Эта запись передается по схеме: ДНК → РНК → Белок.

Сначала информация, записанная в виде чередования нуклеотидов на одной из двух спиральных цепей ДНК, переписывается на молекулу так называемой информационной РНК (иРНК) — происходит процесс транскрипции (переписывания информации). На следующем этапе в рибосоме иРНК взаимодействует с так называемой транспортной РНК (тРНК) и происходит трансляция — синтезируется белок.

Большой вклад в исследование структуры и функционирования рибосомы как молекулярной машины, осуществляющей упорядоченный синтез белка, был сделан российским ученым академиком А. С. Спириным.

Генетический код

Информация, записанная на спиральных цепях ДНК, должна быть определенным образом закодирована. Мы знаем, что математический код может быть двоичным (чередование нулей и единиц, используемое в процессорах современных компьютеров), троичным и т. п.

Впервые расшифровка генетического кода была выполнена выдающимся физиком Г. А. Гамовым (российским ученым, эмигрировавшим в США) в 1954 году.

В общей форме вопрос о генетическом коде был решен Криком с коллегами в 1961 году.

Оказалось, что генетический код триплетен, то есть каждая кодирующая единица — кодон, состоит из трех нуклеотидов. Последовательность кодонов определяет последовательность аминокислотных остатков в белках.

Как уже отмечалось, оснований, по которым различаются нуклеотиды, всего четыре. Число же аминокислот, входящих в белки, равно 20. Таким образом, необходимо четырьмя основаниями записать двадцать аминокислот. Отсюда следует, что генетический код должен быть триплетным, поскольку по одному основанию и даже по двум ($4 \times 4 = 16$) вариантов записи недостаточно, а по трем ($4 \times 4 \times 4 = 64$) — достаточно, с большим запасом.

К 1965 году генетический код был полностью расшифрован. Стало ясно, что каждой аминокислоте соответствует от одного до шести кодонов, то есть генетический код обладает свойством избыточности. Следует подчеркнуть, что в то время как одной аминокислоте может соответствовать от одного до шести кодонов, каждому кодону соответствует единственная аминокислота. Поразительно, что за небольшими исключениями, все живые организмы на Земле, от простейших и древнейших синезеленых водорослей до человека имеют одинаковый генетический код.

Репликация ДНК

Способность клеток живого организма поддерживать высокую упорядоченность своей организации определяется генетической информацией, записанной в ДНК, и непрерывным синтезом соответствующих белков. Но этого еще не достаточно для полноценного функционирования живого организма. Помимо целенаправленного синтеза белков необходимо, чтобы сама ДНК была способна к самовоспроизводству. На языке молекулярной биологии процесс самовоспроизводства ДНК называется репликацией.

Именно благодаря репликации ДНК возможно размножение живых организмов, передача наследственных свойств от поколения к поколению и развитие многоклеточного организма из оплодотворенной яйцеклетки. Для репликации ДНК требуется участие многих видов белков. Эти белки, как и все другие, закодированы в нуклеотидной последовательности ДНК. Таким образом, в живом организме реализуется важнейшая для жизни обратная связь: ДНК организует биосинтез белков, которые в свою очередь синтезируют ДНК.

Модель строения ДНК в форме двойной спирали, предложенная Уотсоном и Криком, позволила понять принцип удвоения ДНК. Удвоение происходит потому, что две спиральные цепи расходятся, а потом каждая цепь служит матрицей, на которой с помощью особых ферментов собирается подобная ей новая спиральная цепь ДНК. В результате вместо одной ДНК образуются две, неотличимые по строению от родительской молекулы ДНК.

Точность синтеза (репликации) новой ДНК на базе родительской ДНК—матрицы очень велика, что обеспечивается наличием специальных механизмов, осуществляющих коррекцию, то есть устраняющих ошибки репликации.

Суть механизма коррекции заключается в том, что при синтезе дважды проверяется соответствие каждого присоединяемого нуклеотида: один раз перед включением его в состав растущей цепи, а второй раз перед тем, как включить следующий нуклеотид. В итоге достигается поистине фантастическая точность: в процессе воспроизведения генома млекопитающего, состоящего из ДНК длиной в 3 миллиарда пар нуклеотидов, возникает в среднем не более трех ошибок(!).

Открытие рибозимов

В 1977 году была открыта прерывистость генов у сложных одноклеточных и многоклеточных организмов, в клетках которых имеются ядра (эукариот). Выяснилось, что последовательность генов, кодирующая данную последовательность аминокислот в белке или нуклеотидов в РНК, не всегда является непрерывной. Она может содержать вставки, которые были названы интронами и которые не кодируют белок.

Оказалось, что РНК, содержащая интроны, может сама осуществлять селективную реакцию по удалению интронов и сшивке соответствующих концов.

Таким образом, биологическими катализаторами могут быть не только белки, но и рибонуклеиновые кислоты. Такие катализаторы получили название рибозимов.

Открытие рибозимов позволило по-новому рассмотреть эволюцию жизни на Земле и ответить на вопрос: с чего началась жизнь на Земле — с белков или с нуклеиновых кислот.

Как известно, белки, в отличие от нуклеиновых кислот, не могут самовоспроизводиться, а нуклеиновые кислоты до открытия рибозимов считались неспособными катализировать химические реакции, необходимые для самовоспроизводства.

После открытия рибозимов была высказана гипотеза, что первоначально на Земле все же появились нуклеиновые кислоты, которые одновременно могли служить и ферментами (правда, не очень эффективными). По мере эволюции с помощью рибозимов был выработан новый класс биополимеров — белков, что и привело к развитию современных форм жизни.

Вот что пишет академик Спиринов о роли РНК: «Современная жизнь — это РНК, передавшая часть своих генетических функций рожденному ею же родственному полимеру — ДНК, и синтезирующая белки для всеобъемлющего эффективного функционирования содержащих ее компонентов — клеток и многоклеточных организмов».

Восстановление генетических повреждений

Эволюция жизни на Земле шла под действием двух факторов: мутаций (изменения структуры) генов и дарвиновского естественного отбора. В данном случае мы имеем яркий пример того, как огромная совокупность случайных процессов привела к формированию в высшей степени регулярных и совершенных существ (стохастический детерминизм, как говорят биологи).

Причиной мутаций могут служить как ошибки при репликации, так и воздействия внешних факторов — разные виды облучения, химические воздействия и т. п.

Важнейшим фактором, обеспечивающим изменчивость ДНК, является также так называемая генетическая рекомбинация, то есть перераспределение генетического материала, приводящее к возникновению новых комбинаций генов.

Живые организмы обладают свойством восстанавливать повреждения, возникшие в ДНК в результате воздействия различных мутагенных факторов. Они, как говорят биологи, осуществляют репарацию генетических повреждений.

Большой вклад в решение проблемы репарации внес проф. В. Н. Соيفер. Реакции репарации весьма разнообразны — от быстрого устранения результатов мутагенного воздействия (до

того, как клетки организма вступят в новую фазу деления) до растянутого во времени процесса, который создает новые специальные ферменты, помогающие устранить возникшие повреждения ДНК.

В последнем случае реакция репарации может реализовываться уже после того, как клетки закончили деление.

Вполне вероятно, что процессы репарации генетических повреждений играли решающую роль в эволюции жизни на Земле. Как показали лабораторные эксперименты по искусственному синтезу ДНК, выполненные американским ученым Кронбергом в середине 70-х годов, только после введения в реакционную смесь ферментов репарации удалось получить нормальные двунитевые молекулы ДНК, без ветвящихся сахарофосфатных нитей.

Это и позволило предположить, что на ранних стадиях эволюции жизни на Земле роль ферментов репарации была очень велика.

О механизмах зарождения жизни

Мы очень кратко описали основы функционирования живых организмов на Земле. Вопрос об эволюции и в особенности, зарождении жизни на Земле — это отдельная большая проблема, все еще далекая от окончательного решения.

По-видимому, на самых ранних стадиях эволюции Земли, когда ее возраст составлял всего несколько сотен миллионов лет, вначале в водных бассейнах при оптимальной температуре формировались сложные молекулярные соединения.

Серьезным основанием для такой гипотезы является то, что к настоящему времени радиоастрономическими методами в космической межзвездной среде, состоящей из пыли и газа, открыто множество типов сложных 9–13 атомных органических молекул, включая молекулы этилового спирта и даже молекулы аминокислоты (глицин), которые являются компонентами белков.

Таким образом, даже в жесточайших экстремальных условиях межзвездной среды при средней концентрации вещества порядка 1 атома водорода в кубическом сантиметре (концентрация вещества в атмосфере у поверхности земли $\sim 10^{19}$ атомов в

кубическом сантиметре) и температуре, близкой к абсолютно нулю, при облучении жесткой космической радиацией, по-видимому, на поверхностях пылинок осуществляется синтез сложных органических молекул.

Это, а также результаты прямых лабораторных экспериментов по моделированию физико-химических условий на поверхности ранней Земли, дает основания предположить, что на ранних стадиях эволюции Земли на ее поверхности вполне могли идти химические реакции синтеза сложных органических молекул.

Однако понять, как совершился скачок от неживой органической материи к живой форме, обладающей свойствами самовоспроизводства и гомеостаза, пока не удастся. Выше уже отмечалось, что новейшие данные молекулярной биологии позволяют предполагать, что вначале на Земле сформировались не белки, а молекулы РНК, которые, обладая свойствами ферментов, привели к синтезу молекул белков, ДНК и далее — современных форм жизни.

Химическая структура молекулы РНК гораздо проще, чем белков и ДНК. Однако даже переход от неживой материи к простейшим молекулам РНК — это гигантский качественный скачок в эволюции материи, и как он произошел пока неясно. Решение этой фундаментальной проблемы — дело будущих лабораторных химико-биологических экспериментов.

Гипотеза панспермии

Как отмечает академик Пармон, принципиальный вопрос в проблеме зарождения жизни — это поиск химических систем, более простых, чем РНК и ДНК, но которые могли бы хранить свою химическую предысторию и обеспечивать поступательную эволюцию своих свойств за счет химических изменений в носителях информации.

В последние годы было выяснено, что способностью к однонаправленной химической эволюции должны обладать не только биологические организмы, но и достаточно простые химические системы, не имеющие специальных носителей биологической информации. Иными словами, естественный отбор может происходить не только в случае эволюции живых

организмов, но и в неживых, но специфических химических системах.

Пармоном было показано, что в системе, содержащей химически не взаимодействующие автокатализаторы, которые конкурируют за один и тот же вид «пищи», при уменьшении объема пищи возникает феномен «естественного отбора», приводящий к «прогрессивной эволюции» автокатализаторов.

Таким образом, первичный естественный отбор на ранней стадии эволюции Земли мог происходить без РНК и ДНК. Поэтому можно предполагать, что пребиотическая фаза естественного отбора до появления первых молекул РНК занимала не миллиарды, а лишь десятки миллионов лет после охлаждения поверхности ранней Земли и появления в ней природных вод, в которых шли химические реакции и появлялись и исчезали прототипы живых организмов.

Крик и Оргелл в 1973 году, вслед за Аррениусом и Циолковским, для объяснения зарождения жизни на Земле предложили гипотезу направленной панспермии (занесении спор жизни на Землю из космического пространства).

Предполагается, что где-то в глубинах Вселенной в результате одного или нескольких чрезвычайно маловероятных процессов зародились примитивные формы жизни, которые в дальнейшем были занесены на Землю каким-либо способом (падающими кометами, метеоритами и т. п.).

Поскольку в данном случае в процессе естественного отбора участвует не одна Земля, а вся Вселенная, шансы зарождения живой материи значительно выше. Легко видеть, однако, что в гипотезе направленной панспермии проблема зарождения жизни не решается, она лишь переносится с Земли в другую точку Вселенной.

В последние годы гипотезе о происхождении зародышей жизни в Космическом пространстве уделяется серьезное внимание. Например, академик Заварзин утверждает: «происхождение жизни окончательно вытеснено в Космос». А академик Соколов подчеркивает, что предбактериальные организмы нам вовсе неизвестны.

Некоторые философы даже предполагают, что зародыши жизни существуют вечно в эволюционирующей вселенной.

С этим нельзя согласиться. Действительно, современная космология учит, что Вселенная нестационарна и 15 миллиардов лет тому назад она находилась в сверхплотном и сверхгорячем состоянии, при котором не могли существовать даже элементарные частицы.

Более того, даже после Большого взрыва и начала расширения Вселенной был период (порядка нескольких сотен миллионов лет), когда Вселенная состояла в основном лишь из водорода и гелия с небольшой примесью дейтерия и лития. На этой стадии развития Вселенной жизнь также не могла зародиться, поскольку во Вселенной не было тяжелых элементов и, главное, углерода — основного компонента органической жизни. Тяжелые элементы появились во Вселенной, когда ее возраст был близок к 1 миллиарду лет. В этот период из первичной водородно—гелиевой плазмы формировались звезды первого поколения. Термоядерный синтез химических элементов в недрах этих звезд и последующие взрывы сверхновых привели к обогащению Вселенной тяжелыми элементами, что создало условия для зарождения жизни.

Таким образом, гипотеза о существовании вечных зародышей жизни во Вселенной является неприемлемой с точки зрения современной космологии.

О происхождении генетического кода

Выше уже упоминалось, что генетический код земных живых организмов почти универсален в том смысле, что его основная часть одинакова для всех форм жизни на Земле. Лишь для некоторых экзотических систем трансляции (синтеза белка) найдены слабые отклонения в генетическом коде.

По мнению большинства биологов, генетический код явился продуктом добиологической молекулярной эволюции и продолжал частично эволюционировать в дальнейшем.

Гипотезы возникновения генетического кода как стохастического процесса молекулярной эволюции, учитывают следующие возможности:

а) свойства генетического кода могли быть предзаданы физико—химическими параметрами взаимодействующих компонент и условий их взаимодействия;

б) они могли быть отобраны, как адаптивные, среди многих альтернативных вариантов;

в) свойства генетического кода были фиксированы случайно. Например, в 1968 году Крик предложил гипотезу «замороженного случая». Он предположил, что в процессе эволюции была зафиксирована первая случайная, но достаточно удовлетворительная система кодирования. Эта система в дальнейшем была размножена и подверглась эволюционному усложнению и оптимизации.

Как путем случайных блужданий в пространстве и времени сформировался генетический код в современном виде, пока остается загадкой. Ясно лишь то, что генетический код представляет собой не случайный набор, а высокоорганизованную систему соответствий, поддерживаемую сложными молекулярными механизмами.

Как отметил Крик, «генетический код — это ключ к молекулярной биологии, поскольку он показывает, как два великих языка полимеров — язык полинуклеотидов и язык полипептидов (белков) связаны между собой».

Естественный отбор

После возникновения первых простейших живых организмов, типа сине-зеленых водорослей, которые функционировали, когда атмосфера Земли была насыщена углекислым газом, и в ней практически отсутствовал молекулярный кислород (так называемая, анаэробная жизнь — жизнь в отсутствие кислорода), начал работать дарвиновский механизм естественного отбора.

Этот механизм в простейшем случае включает три этапа: случайное появление мутаций в гене; изменение той биологической функции, которая определяется этим геном; закрепление изменения, если оно дает преимущества в борьбе за существование (выживают наиболее приспособленные).

Однако, как подчеркивает академик Скулачев, такая простейшая схема пригодна лишь в том случае, когда мутация приносит немедленную выгоду эволюционирующей особи. Она не работает, если появление полезных свойств происходит лишь после последующих мутаций в данном или других генах.

В ряде случаев естественный отбор в его простейшем варианте может не способствовать, а препятствовать прогрессу эволюции. Все это замедляет биологическую эволюцию.

В последние годы биологами были предложены механизмы переключения режимов существования биологической популяции, которые позволяют ускорить ее эволюцию. Речь идет о так называемых г- и к-стратегиях в жизни биологической популяции. Стратегия типа г предполагает бурное размножение и короткую продолжительность жизни особей, а стратегия типа к соответствует низкому темпу размножения и продолжительной жизни.

В случае г-стратегии смена поколений происходит чаще, поэтому вероятность формирования новых свойств у особей выше, чем в случае к-стратегии. Переключение г- и к-стратегий может происходить случайно, при этом выживают те особи, которые выбрали стратегию, более соответствующую условиям конкретной среды обитания. Такое переключение стратегий может осуществляться специальным геном или группой генов.

По мнению Скулачева, центральную роль в реализации переключения стратегий играют активные формы кислорода в организмах. Механизм переключения г- и к-стратегий позволяет ускорить биологическую эволюцию. Вполне возможно, что в природе существуют и другие механизмы, приводящие к ускорению эволюции.

Как подчеркивает академик Алтухов, классическая дарвинская схема эволюции, трактующая образование биологических видов как вероятностный процесс, в последние годы пересматривается. С развитием генетики накапливается все больше фактов в пользу того, что образование биологических видов должно быть скачкообразным, связанным с коренной перестройкой генома организма, а не происходить в виде длительного адаптивного процесса постепенных замещений отдельных генов.

Родословные деревья живых организмов

В 1977–79 годах благодаря успехам экспериментальной и теоретической молекулярной биологии началась массовая расшифровка последовательностей аминокислот в белках и последовательностей нуклеотидов в ДНК и РНК.

К настоящему времени накоплены огромные международные банки данных о миллионах генов и сотнях тысяч белков.

Расшифровка нуклеотидных последовательностей генов позволяет изучить процесс эволюции жизни на Земле с точки зрения молекулярного уровня организации живого вещества.

Известно, что многие мутации генов состоят в замене лишь одного или нескольких нуклеотидов, при этом большая часть гена остается неизменной. Чем раньше появились мутационные различия двух генов, тем больше различий они накопят. Поэтому анализ сходства последовательностей макромолекул (ДНК, РНК и белков) позволяет построить их филогенетическое (т. е. родословное) дерево или, как говорят биологи, осуществить филогенетический анализ.

Результаты такого анализа позволили американскому ученому Гудмену построить филогенетические деревья для некоторых генов и белков от высших приматов и человека.

Из этих данных следует, что наиболее близким к человеку в эволюционном смысле является шимпанзе. Оценки показывают, что свыше 99% нуклеотидов у геномов человека и шимпанзе одинаковы. Геномы шимпанзе и человека существенно «разошлись» примерно 5–10 миллионов лет тому назад.

Программа «Геном человека»

В течение последнего десятилетия достигнуты огромные успехи в международной программе «Геном человека», посвященной решению проблемы картирования генов человека. Как уже отмечалось, ген — это участок молекулы ДНК, кодирующий определенный белок. Число генов в составе ДНК человека около 50–60 тысяч, что составляет только 3% общей длины ДНК; роль остальных 97% пока неясна.

В каждой клетке человека содержится 46 молекул ДНК, которые распределены в 23 парах хромосом. Хромосомы — это структуры, по которым распределена полная молекула ДНК. Число хромосом зависит от природы живого организма. В пределах каждой хромосомы ДНК представлена одной линейной двойной спиралью гигантского размера — каждая из нитей спирали содержит сотни миллионов нуклеотидов.

Суммарная длина всех 46 молекул ДНК в одной клетке

человека равна около 2 метров. Полная же длина всех молекул ДНК в теле взрослого человека, состоящего из 5×10^{13} клеток, составляет 10^{11} км, что в тысячу раз превышает расстояние от Солнца до Земли.

В геноме человека с помощью четырех оснований записана кодировка состава синтезируемых белков, а также инструкции о том, как клеткам выживать, как реагировать на внешние воздействия, как будет происходить развитие тела человека и много других сведений о функционировании организма.

Поломка генных инструкций ведет к мутациям. Если мутации происходят в генеративных клетках — сперматозоидах или яйцеклетках человека, то мутации передаются следующим поколениям.

Цель проекта «Геном человека» состоит в выяснении последовательности оснований во всех молекулах ДНК в клетках человека. Кроме того, должна быть установлена локализация всех генов, что должно помочь выяснить причины наследственных заболеваний и открыть пути к их лечению.

В выполнении проекта «Геном человека» задействовано несколько тысяч ученых: биологов, химиков, математиков и физиков, а также ученых в области технических наук. Это один из самых дорогостоящих научных проектов — его суммарная стоимость составляет многие миллиарды долларов. К настоящему времени практически полностью расшифрована полная последовательность ДНК человека.

Главная задача исследований — изучить вариации ДНК в разных органах и клетках отдельных индивидуумов и выявить генетические различия между ними. Анализ таких различий позволит построить индивидуальные генные портреты людей, что даст возможность лучше лечить болезни. Кроме того, такой анализ позволит выявить различия между популяциями и выявить географические районы повышенного риска поражения генома людей.

Исследования генома человека и геномов других организмов, например, мышей и т. п. позволят лучше понять эволюцию органического мира.

В частности, исследования генома археобактерий (древних бактерий, принадлежащих к типу так называемых прокариот, в

клетках которых нет ядер, но есть одиночные двунитевые молекулы ДНК) показали, что эти бактерии представляют собой отдельную ветвь на эволюционном (филогенетическом) древе живых существ на Земле.

Таким образом, благодаря геномным исследованиям стало ясно, что в ходе эволюции жизни на Земле сначала выделились представители архей, имеющих клетки без ядер, а позже — эукариот (состоящих из клеток с ядрами), включая человека.

Геномными исследованиями было выявлено также совпадение нуклеотидных последовательностей у неродственных видов. Это дает основания предположить, что в процессе эволюции происходил перенос генов от одного вида к другому. Например, оказалось, что геномы человека и мыши весьма близки — их нуклеотидные последовательности совпадают более чем на 90%.

Система органического мира на Земле

Рассмотрим теперь общую систему органического мира на Земле, которая образовалась в результате длительной (~3,8 миллиарда лет) эволюции.

Принципиальное сходство генетического кода, организации макромолекул, а также биохимического аппарата синтеза белка свидетельствует о единстве происхождения всех живых организмов на Земле. Биологи предполагают, что у живых организмов был один общий предок — «прогенот». Что он собой представлял, пока окончательно неизвестно.

Как считает А. С. Спирин, универсальным предшественником живых организмов («прогенотом») могло быть своеобразное «коммунальное» сообщество колоний — ансамблей РНК, существующих и размножающихся на твердых и гелеобразных поверхностях первобытной Земли.

Во второй половине XX века удалось установить, что все живые организмы, имеющие клеточное строение, могут быть отнесены к одной из двух групп: прокариотам и эукариотам. Как уже отмечалось, у прокариот клетки устроены проще, чем в случае эукариот: они не имеют ядра. Клетки эукариот не только имеют ядро, но и обладают элементами, которые они не могли получить от предков современных прокариот.

Биологи считают, что современная эукариотная клетка возникла в результате длительных и многократных слияний более простых организмов. Процесс возникновения более сложных организмов за счет слияния нескольких простых называется симбиогенезом.

На рис. 2.3 приведена схема эволюции органического мира Земли согласно теории симбиогенеза.

Предполагается, что общий предок земных живых организмов «прогенот» дал начало трем самостоятельным ветвям эволюционного дерева, называемым доменами. Выделяют три домена: бактерии, археи и эукариоты.

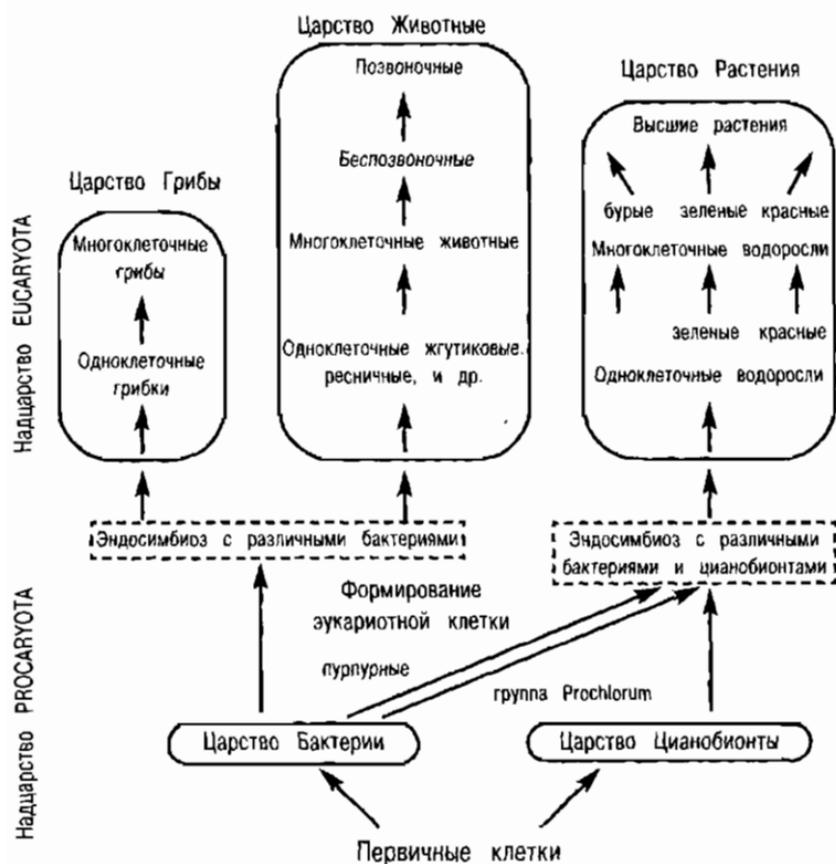


Рис. 2.3. Схема эволюции органического мира Земли на основе теории симбиогенеза.

К настоящему времени в системе органического мира Земли, с учетом современного и ископаемого материала, выделяют от 4 до 26 так называемых царств (например, царство бактерии, царство животные и т. п.), от 33 до 132 типов, от 100 до 200 классов, а общее число видов оценивается в несколько миллионов. Теория и практика классификации органических объектов получила название таксономии.

На рис. 2.4 приведена система классификации живых организмов на Земле, включающая Империю (Жизнь), два надцарства (доядерные организмы — прокариоты и ядерные организмы — эукариоты) и пять царств (царства бактерий, цианобионт, растений, грибов и животных). Надцарство прокариот (доядерных организмов) появилось на Земле 3,8–3,1 млрд. лет тому назад. Это одноклеточные и многоклеточные (колониальные формы) организмы, не имеющие обособленного ядра.

Клетки прокариот имеют стенку, а генетическая информация сосредоточена в единственной хромосоме. Размеры прокариот составляют от 0,015 мкм до 20 см (колониальные формы). Бактерии появились на Земле 3,5–3,8 миллиарда лет тому назад, а цианобионты — 3,5 миллиарда лет тому назад.

Благодаря наличию хлорофилла, цианобионты являлись первыми фотосинтезирующими организмами, производящими биогенный молекулярный кислород в атмосфере Земли (которая вначале состояла в основном из углекислого газа).

Надцарство эукариот появилось на Земле 1,5–1,7 миллиардов лет тому назад, то есть значительно позднее надцарства прокариот. Надцарство эукариот — это одноклеточные и многоклеточные организмы, разделяющиеся на три царства: царство растений, царство грибов и царство животных. Размеры эукариот составляют от 10 мкм (одноклеточные) до 33 м (китообразные) и даже 100 м (высота некоторых деревьев).

Растения — это разнообразные, главным образом, неподвижные организмы, имеющие верхушечный рост. Для растений характерен фотосинтез — поглощение энергии света и выделение молекулярного кислорода. Кроме того, растения из неорганических соединений создают органические.

Грибы сочетают свойства как растений, так и животных. Их сходство с растениями: неподвижность, верхушечный рост и



Рис. 2.4. Система классификации живых организмов на Земле.

размножение с помощью спор. В то же время, у грибов, как и у животных, отсутствует фотосинтез.

Животные — это одноклеточные и многоклеточные организмы, обладающие следующими признаками:

- 1) питание осуществляется готовыми органическими продуктами путем их заглатывания;
- 2) клетки животных не имеют целлюлозной оболочки и различных пигментов, свойственных растениям;
- 3) животные подвижны либо на протяжении всей жизни, либо на отдельных возрастных стадиях.

Размножение животных происходит двумя способами: половым и бесполом (путем деления или почкования).

Разум и человек

На высшей ступени развития животных находится человек, который обладает разумом. Разум и интеллект являются самыми совершенными из известных форм существования материи. Разумная деятельность выражается в том, что человек с помощью системы высшей нервной деятельности может строить модели окружающего мира, накапливать и запоминать информацию о внешнем мире.

Сравнение модели внешнего мира с накопленной информацией позволяет человеку вырабатывать стратегию поведения, самообучаться и, в конечном счете, осуществлять систему поведенческих актов, направленных на удовлетворение своих потребностей.

В книге Шкловского «Вселенная, жизнь, разум» проанализированы также функциональные определения жизни и разума,

не зависящие от конкретного носителя жизненных процессов и основанные на идеях кибернетики и теории управления сложных систем. С функциональной точки зрения, главные особенности жизни и разумной деятельности — это накопление, переработка информации и управление при наличии обратной связи.

Как у человека появился разум, то есть способность к пониманию и осмыслению, пока не совсем ясно. Несомненно, что появление разума означало качественно новый этап в развитии материи во Вселенной по схеме «неживая материя — жизнь — разумная жизнь». Выше уже отмечалось, что, согласно данным филогенетического анализа, эволюционные пути человека и наиболее близкого к нему высшего примата — шимпанзе, разошлись 5–10 миллионов лет тому назад. Что послужило толчком к появлению разума у древнего человека?

Эволюционный характер разума

Современная биология, изучая нейробиологические основы высшей нервной деятельности человека, подчеркивает, что существует много сведений, свидетельствующих о наличии у животных свойств высшей нервной деятельности, которые ранее считались присущими лишь человеку.

Оказалось, что многое из того, что ранее считалось специфичным для человека и связывалось с его особым социальным развитием, в той или иной степени присуще и животным, то есть имеет общие нейробиологические основы. Это, разумеется, не отрицает наличия у человека качественно новых свойств по сравнению с другими высшими животными, но ставит вопрос о правомерности существующих ныне критериев специфичности для человека. Кроме того, это подчеркивает эволюционный характер формирования разума человека.

До последнего времени бесспорным проявлением специфичности мозга человека считалась структурная и функциональная асимметрия коры больших полушарий. Правое полушарие связывается с пространственно-синтетической деятельностью, левое — с речевой и аналитической. Однако в последнее время накоплены убедительные доказательства функциональной асимметрии мозга и у животных. Более того,

как и у людей, у животных степень асимметрии мозга разная для мужских и женских особей.

Пожалуй, наиболее специфической особенностью человека является его речевая способность. Биологи считают, что сегодня нет оснований для безоговорочного признания существования языка у животных. Как правило, акустические сигналы животных отражают не события внешнего мира, а являются проявлениями их внутреннего состояния. Лишь в редких случаях акустические сигналы животных означают те или иные события внешнего мира. К их числу можно отнести сигналы опасности обезьян, специфичные по звучанию при появлении трех хищников: змеи, леопарда и орла. Считается, что знаковые системы, которыми в состоянии пользоваться обезьяны (несколько сот знаков), можно сопоставить с уровнем развития 2–3 летнего ребенка.

Описанные сходства в проявлениях высшей нервной деятельности человека и животных свидетельствуют о том, что разум человека есть результат длительной эволюции под жестоким прессом естественного отбора. По-видимому, решающую роль в формировании разума сыграл труд, однако не исключено и влияние других факторов (изменение внешних условий, накопившиеся внутренние причины и т. п.).

Цивилизация

Определенный уровень, ступень общественного развития материальной и духовной культуры сообщества людей называется цивилизацией. Астрономы часто под цивилизацией понимают не эти качества развитого сообщества людей, а само развитое сообщество, обладающее этими качествами. К настоящему времени человеческая цивилизация достигла весьма высокого уровня развития, и деятельность человека уже стала космическим фактором (см. выше). Темпы развития человеческой цивилизации столь велики, что мы не можем предсказать ее состояние даже на 100 лет вперед.

Мы кратко описали современное состояние проблемы земной жизни. Мы убедились в том, что земная жизнь насквозь пронизана эволюцией. Подавляющее большинство биологов, опираясь на новейшие достижения молекулярной биологии и

генетики, считают, что жизнь на Земле возникла около 3,8 миллиардов лет тому назад естественным путем, в результате развития и самоорганизации материи с одной стороны и, с другой стороны, сложного, возможно нелинейного статистического механизма естественного отбора — современной модифицированной версии дарвиновского естественного отбора. По мере развития науки все меньше остается места идее креационизма в биологии, то есть идеи разового, божественного творения жизни на Земле.

Приведем, в заключение этого параграфа, высказывание академика Галимова об эволюции жизни на Земле: «В истории развития жизни на Земле время от времени наступали периоды стремительных качественных изменений, связанных с проявлением принципиально новых эволюционных возможностей. Самый первоначальный период — переход от молекулярной формы ее организации к клеточной. За этим последовали возникновение клеточного ядра, первое обобществление разных геномов и превращение первично независимых «особей» в оргanelлы одной клетки (пластиды и митохондрии), объединение клеток в многоклеточный организм, возникновение биомеханизмов (глаза, крылья, конечности), появление организмов с осмысленным поведением, наконец, появление человеческого разума.

Между отдельными эволюционными «открытиями» проходили иногда сотни миллионов лет. Эти гигантские промежутки времени были заполнены относительно медленным видоизменением биологических систем, видообразованием».

Но если жизнь на Земле возникла естественным путем, при наличии подходящих условий для ее зарождения, то можно ожидать существования жизни и на других планетах.

Рассмотрим современное состояние этой проблемы.

Планеты во Вселенной

Необходимым условием существования жизни вне Земли является наличие планетных систем вокруг многих звезд Галактики. До последнего времени даже в этом вопросе не было ясности. У некоторых ближайших к нам звезд астрометристами были заподозрены периодические отклонения от собственных движений, которые могут быть вызваны наличием маломассивных темных спутников. Однако последующие тщательные наблюдения не подтвердили эти результаты.

Так обстояли дела с одной из ближайших к нам звезд, удаленной от Земли на расстояние 1,8 парсек — знаменитой летящей звездой Бернарда. У этой звезды американский астроном Ван де Камп заподозрил наличие темного спутника массой равной 1,5 массы Юпитера, обращающегося вокруг видимой звезды с периодом 24 года. К сожалению, последующие наблюдения не подтвердили этих подозрений.

Ситуация с планетами вне Солнечной системы стала проясняться лишь в последние годы, а первые обнадеживающие результаты пришли в 1991 году из совершенно неожиданной области науки — релятивистской астрофизики, занимающейся изучением нейтронных звезд и черных дыр. Планеты были обнаружены около пульсаров — быстро вращающихся сильно намагниченных нейтронных звезд.

Мы опишем новейшие результаты поиска планет вне Солнечной системы (их еще называют экзопланетами). Однако вначале рассмотрим вопрос о том, что мы понимаем под планетами и каковы современные методы их поиска.

Что такое планеты

Под планетами обычно понимаются темные стационарные тела достаточно малой массы (менее $0,01M_{\odot}$, здесь и далее M_{\odot} — масса Солнца), при которой в недрах тела из-за низкой температуры не могут зажечься термоядерные источники энергии.

Интервал масс от $0,01$ до $0,08M_{\odot}$ соответствует так называемым коричневым карликам — объектам, у которых температура недр недостаточна для зажигания термоядерных реакций, но которые светятся за счет выделения энергии при гравитационном сжатии. Коричневый карлик — это еще не звезда, но уже не планета, поскольку, обладая значительным запасом гравитационной энергии, он может светиться за счет гравитационного сжатия очень длительное время. Для коричневого карлика с массой менее $0,08M_{\odot}$ — больше 10^{10} лет, что близко ко времени существования Вселенной.

Прежде чем переходить к описанию методов поиска планет вокруг звезд, рассмотрим кратко свойства планет Солнечной системы. Известно, что Солнечная система содержит 9 планет, основные характеристики которых приведены в таблице 2.1.

Из таблицы видно, что планеты так называемой земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс), ближайшие к Солнцу, отличаются сравнительно малой массой и высокой средней плотностью $\sim 4\text{--}5$ г/см³. За исключением Меркурия, планеты земной группы имеют атмосферы, состоящие из углекислого газа, азота, кислорода и других сравнительно тяжелых газов.

Атмосферы этих планет не содержат водорода, легкого газа, который в силу сравнительно слабого гравитационного поля планет земной группы и относительно высокой температуры их поверхностей, успел улечься в космическое пространство за $\sim 4,5$ млрд. лет — время существования Солнечной системы.

В отличие от планет земной группы, планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун), наиболее удаленные от Солнца, имеют большую массу (в десятки и сотни раз превышающую массу Земли), сравнительно низкую плотность ($1\text{--}2$ г/см³) и обладают мощными атмосферами, состоящими преимущественно из водорода (90% по числу атомов), гелия ($\sim 10\%$) и других газов.

Таблица 2.1

Основные характеристики планет Солнечной системы.

	Большая полуось орбиты, а. е.	Орбит. период, годы	Радиус (в рад. Земли)	Масса (в массах Земли)	Средняя плотность, г/см ³	Колич. спутников
Меркурий	0,387	0,241	0,380	0,055	5,4	0
Венера	0,723	0,615	0,950	0,815	5,2	0
Земля	1,000	1,000	1,000	1,000	5,5	1
Марс	1,523	1,881	0,532	0,108	3,95	2
Юпитер	5,202	11,862	11,18	318	1,34	28
Сатурн	9,539	29,458	9,42	95,1	0,70	30
Уран	19,182	84,014	3,84	14,5	1,58	20
Нептун	30,058	164,793	3,93	17,2	2,30	8
Плутон	39,44	247,7	~ 0,50	~0,017	0,7(?)	1

Примечания: 1 астрономическая единица (а. е.) — среднее расстояние от Земли до Солнца, равна 150 млн. км или $1,5 \times 10^{13}$ см; радиус Земли равен 6370 км; масса Земли равна 6×10^{27} г = $3 \times 10^{-6} M_{\odot}$.

Особняком стоит Плутон, который, являясь самой удаленной от Солнца планетой, имеет сравнительно малую массу и большой эксцентриситет орбиты.

Все планеты, кроме Меркурия и Венеры, имеют спутники, число которых колеблется от одного (системы Земля — Луна, Плутон — Харон) до 30 (Сатурн).

Кроме того, все планеты-гиганты окружены тонкими кольцами из мелких частиц вещества размером от метров до долей

миллиметра. Особенно впечатляюще в телескоп видно знаменитое кольцо Сатурна. Существование колец вокруг Юпитера, Урана и Нептуна было обнаружено наблюдениями с бортов космических аппаратов.

Эксцентриситеты орбит большинства планет Солнечной системы близки к нулю, и лишь у Меркурия и Плутона эксцентриситеты орбит значительны: $e \approx 0,21-0,25$. Все орбиты планет лежат в одной плоскости — плоскости эклиптики. Земной экватор наклонен к плоскости эклиптики на угол $23^\circ 27'$. Орбитальные периоды планет Солнечной системы находятся в пределах от 0,24 до 248 земных лет, а размеры больших полуосей орбит планет меняются от 0,39 до 39 астрономических единиц (а. е.). Все планеты обращаются вокруг Солнца в одном направлении.

Как искать планеты вокруг звезд

Рассмотрим теперь, как будет выглядеть Солнечная система, если ее наблюдать с ближайших звезд. В сфере радиусом 5 парсек (16,3 светового года) находятся 53 звезды, из которых 40 — красные карлики низкой светимости.

Если мы отнесем Солнечную систему на расстояние 5 парсек, то Солнце (карлик спектрального класса G2) будет выглядеть, как звезда 4-й звездной величины, легко видимая невооруженным глазом, а наиболее крупная планета Юпитер будет расположена на расстоянии 1 угловой секунды от Солнца и будет в миллиард раз слабее Солнца, так как она светит лишь отраженным солнечным светом. Остальные планеты будут видны еще слабее.

Разрешающая способность современных крупных наземных телескопов, в которых применяются адаптивные системы, компенсирующие атмосферные искажения, достигает 0,1 угловой секунды. Разрешающая способность космического телескопа Хаббл с зеркалом диаметром 2,4 м лучше 0,1 секунды. Поэтому принципиальных ограничений для прямого наблюдения наиболее крупных и удаленных от центральной звезды планет не существует. Нужно только сильно (в миллион раз) уменьшить рассеянный свет, порождаемый светом яркой центральной звезды в телескопе. Для этого нужно использовать телескоп в

режиме коронографа — прибора, с помощью которого проводятся внезапные наблюдения солнечной короны (корона в миллион раз слабее Солнца).

Такие коронографические наблюдения звезд проводятся в последние годы. С их помощью уже удалось решить задачи, более легкие, чем обнаружение планет, например, получены оптические изображения протопланетных дисков вокруг ряда ближайших звезд, которые были открыты по свечению в инфракрасных лучах в середине 80 годов с борта специализированного спутника ИРАС.

Однако задача прямого наблюдения планет вокруг звезд, хотя в принципе и разрешима, но значительно более трудна для реализации, чем задача обнаружения коричневых карликов и протопланетных дисков. Связано это с тем, что блеск планет, светящихся отраженным светом центральной звезды, в сотни и тысячи раз меньше, чем блеск протопланетных дисков или коричневых карликов. Поэтому для прямого наблюдения планет должны применяться особые методы, включая космические эксперименты. Ввиду исключительно большой трудности прямых наблюдений планет астрономы до последнего времени использовали косвенные методы.

Первый и наиболее ранний метод обнаружения планет — астрометрический, о котором мы уже упоминали выше. Планета и звезда обращаются вокруг общего центра масс. При массе планеты порядка массы Юпитера и орбитальном периоде около 12 лет амплитуда периодических отклонений близкой звезды от прямолинейной траектории, обусловленной собственным движением звезды в Галактике, должна составлять $\sim 10^{-3}$ угловой секунды.

Эта величина слишком мала для того, чтобы быть уверенно зарегистрированной с поверхности Земли. Такие смещения трудно зарегистрировать и с помощью нового космического каталога Гиппаркос, точность которого $\sim 2 \times 10^{-3}$ секунды.

Однако будущие космические астрометрические эксперименты, например, проект ГАЙЯ, предложенный Европейским космическим агентством, позволят надежно регистрировать такие малые угловые смещения звезд, вызванные присутствием планет вокруг них.

Второй способ — затменный. Ослабление света звезды при прохождении крупной планеты по ее диску может достигать около 1%. Нужно только наблюдать много звезд, чтобы выделить те планетные системы, у которых плоскости орбит достаточно близки к лучу зрения. В случае затмения Солнца Юпитером продолжительность затмения составит около 27 часов, а период следования затмений — порядка 12 лет, при глубине затмений $\sim 0,01$ звездной величины.

Таким образом, для решения такой задачи нужно наблюдать с весьма высокой точностью сотни ближайших звезд на протяжении десятков лет. Такая задача весьма трудна, но вполне реализуема с помощью современных автоматизированных наземных и космических телескопов. Недавно таким затменным методом уже открыты планеты около звезд HD209458 и OGLE-TR-56.

Третий способ, предложенный совсем недавно, состоит в наблюдении эффектов гравитационного микролинзирования звезд темными телами гало Галактики. Если темное тело гало Галактики имеет планеты-спутники, то кривая блеска, обусловленная гравитационным микролинзированием, то есть искривлением лучей света от далекой звезды фона, будет иметь несколько узких максимумов, наложенных на основную кривую блеска. Это позволяет определять параметры планет.

Четвертый способ, который в последние годы уже привел к успеху — спектральный или, точнее говоря, доплеровский. Он основан на точном измерении смещений линий в спектре обычной звезды или измерении времени прихода импульсов радиоизлучения у пульсара — нейтронной звезды.

Точность обычных измерений лучевых скоростей звезд порядка 1 км/с. Скорость орбитального движения Солнца вокруг общего с планетами центра масс ~ 13 м/с. В эту величину 12,5 м/с вносят гравитационные возмущения от Юпитера. Поэтому для поиска планет вокруг звезд доплеровским методом требуется увеличение точности измерений скоростей звезд до нескольких метров в секунду.

В последние годы, благодаря применению современных высокоэффективных твердотельных панорамных фотоприемников (ПЗС-матриц) и специальных методов измерения лучевых

скоростей с использованием большого числа (нескольких сотен) линий поглощения в спектре звезды удалось довести точность измерения лучевых скоростей звезд спектральных классов G-K до нескольких м/сек.

Точность определения доплеровских сдвигов импульсов радиоизлучения пульсаров достигает порядка сантиметра в секунду ввиду исключительно высокой стабильности периода осевого вращения пульсара и большой длительности времени наблюдений — порядка десятков лет. Все это и позволило обнаружить присутствие темных спутников — планет вокруг нейтронных и обычных звезд.

Планеты вокруг нейтронных звезд

Нейтронные звезды образуются на поздних стадиях эволюции звезд, массы железных ядер которых не превышают $3M_{\odot}$. Быстрое сжатие (коллапс) железного ядра звезды, сопровождаемое вспышкой сверхновой, приводит к образованию нейтронной звезды радиусом около 10 км и плотностью вещества, достигающей сотен миллионов тонн в см^3 . При сжатии сильно возрастают угловая скорость вращения и напряженность магнитного поля (до 10^{12} гаусс). Многие нейтронные звезды являются радиопульсарами. Строго периодические импульсы радиоизлучения пульсара связаны с преобразованием его энергии вращения в направленное радиоизлучение.

Пульсар представляет собой своеобразные, очень стабильные часы: периодичность следования радиоимпульсов одиночного пульсара (периоды пульсаров лежат в пределах от нескольких миллисекунд до нескольких секунд) на больших интервалах времени стабильна с точностью лучше 10^{-14} сек за секунду, то есть выше, чем стабильность современных атомных стандартов частоты! Поэтому если пульсар и его спутник (звезда или планета) вращаются около общего центра масс, то, измеряя доплеровские сдвиги в частоте следования импульсов пульсара, можно обнаружить присутствие вокруг него спутника и определить некоторые его параметры.

Первый радиопульсар в двойной системе был открыт в 1975 году американскими учеными Халсом и Тейлором, удостоенными впоследствии Нобелевской премии.

Используя беспрецедентно высокую стабильность частоты следования радиоимпульсов одиночного пульсара, эти исследователи детально изучили релятивистские эффекты в орбитальном движении пульсара PSR1913+16, точно измерили массы обеих нейтронных звезд, из которых состоит двойная система, и доказали, что уменьшение орбитального периода этой системы вызвано излучением ею потока гравитационных волн.

Наблюдаемая величина этого потока с точностью лучше 1% согласуется с теоретической, которая определяется по формуле Эйнштейна для излучения гравитационных волн в рамках общей теории относительности.

В дальнейшем было открыто много радиопульсаров в двойных системах, содержащих в качестве спутников неактивные нейтронные звезды, белые карлики и массивные звезды ранних спектральных классов В. Сейчас из ~1500 известных радиопульсаров примерно 100 входят в состав двойных систем.

Большим сюрпризом для астрономов стало открытие в 1991 году у пульсара PSR1829-10 темного спутника, нижняя граница массы которого равна 10,2 массы Земли, и который обращается с периодом 184,4 земных суток. Это открытие сделано группой английских астрономов и было настолько неожиданным, что большинство ученых сначала не поверило в корректность интерпретации изменений периода пульсара, как наличие спутника. Однако дальнейшие наблюдения подтвердили вывод о наличии планеты возле пульсара.

Открытие в 1992 году планетной системы из двух планет у пульсара PSR1257+12, а в 1993 году планеты у пульсара PSR

Таблица 2.2. Характеристики системы из двух планет вокруг пульсара PSR1257+12.

Параметр	Первая планета	Вторая планета
Орбит. период, сутки	66,54	98,21
Эксцентриситет орбиты, e	0,020	0,024
Нижний предел массы	$7,25 \cdot 10^{-6} M_{\odot}$	$5,97 \cdot 10^{-6} M_{\odot}$

J2322+2057 окончательно убедило астрономов в существовании планет, обращающихся вокруг нейтронных звезд. В таблице 2.2 приведены характеристики системы из двух планет, обращающихся вокруг пульсара PSR1257+12 (период осевого вращения 6,2 миллисекунды).

Видно, что нижние пределы для массы обеих планет примерно вдвое больше массы Земли ($3 \times 10^{-6} M_{\odot}$), а орбитальные периоды близки к периоду Меркурия (88 суток).

О происхождении планет вокруг нейтронных звезд

Происхождение планет вокруг нейтронных звезд трудно понять. Взрыв сверхновой звезды, сопровождавший образование нейтронной звезды, должен был разрушить планетную систему, обращающуюся вокруг предсверхновой. Поэтому планетные системы, наблюдаемые вокруг пульсаров, вряд ли представляют собой «огарки» от первичных планет, обращавшихся вокруг обычных звезд.

В настоящее время наиболее популярны две гипотезы образования планет вокруг нейтронных звезд. Обе они предполагают, что пульсар образовался в двойной звездной системе. В первой гипотезе предполагается, что в результате полного перетекания вещества спутника на нейтронную звезду вокруг последней образовался массивный диск, дальнейшая фрагментация которого привела к образованию зародышей планет и далее — к планетам. Во второй гипотезе предполагается, что спутник не полностью перетекает на нейтронную звезду, которая, тем не менее, сильно раскручивается, аккумулируя орбитальный угловой момент при перетекании вещества.

Сформированный быстро вращающийся радиопульсар испускает мощный поток релятивистских частиц (релятивистский ветер), под действием которого спутник — обычная звезда нагревается и испаряется, так что его масса уменьшается до величины планетной массы. В пользу этой гипотезы свидетельствуют наблюдения двойных радиопульсаров.

У многих из них периоды осевого вращения малы (порядка нескольких миллисекунд), а массы спутников — белых карликов также весьма малы, порядка нескольких сотых массы Солнца.

У отдельных двойных радиопульсаров наблюдаются затмения в радиодиапазоне, вызванные поглощением радиоизлучения пульсара протяженной расширяющейся атмосферой, сформированной из вещества испаряющегося спутника — белого карлика.

Постоянное облучение поверхности планеты потоком релятивистских частиц (с энергиями более 10^{12} эв) при полной мощности корпускулярного излучения пульсара $\sim 10^{38}$ эрг/с (что на 5 порядков больше светимости Солнца) исключает возможность существования на этих экзотических планетах каких-либо известных нам форм жизни.

Планеты вокруг звезд солнечного типа (экзопланеты)

В течение последних лет описанным выше доплеровским методом были открыты планеты у многих звезд солнечного типа. Первая звезда, у которой швейцарскими учеными Мэйором и Квелозем в 1995 году удалось открыть планету, была 51 Пегаса (рис. 2.5).

Существует принципиальный предел точности измерения лучевых скоростей звезд, связанный с нестабильностью их атмосфер. Например, в атмосфере Солнца существуют мелкомасштабные конвективные движения газа со скоростями (0,3–3) км/с, что приводит к известному явлению грануляции: поверхность Солнца при наблюдении в телескоп выглядит состоящей из огромного числа светлых и темных гранул размером $\sim 1,3$ угловых секунды (~ 1000 км), напоминающих рисовые зерна.

Число гранул на поверхности Солнца составляет несколько миллионов, поэтому при спектральных наблюдениях всего диска звезды хаотические конвективные движения в ее атмосфере усредняются.

Однако поскольку хаотические скорости порядка 1 км/с, достичь точности измерения лучевых скоростей лучшей, чем несколько м/с, вряд ли возможно. В атмосфере Солнца также наблюдаются регулярные мелкомасштабные колебательные движения газа со скоростями порядка 0,5 км/с и периодом 295 секунд. Хотя они также усредняются при наблюдении диска звезды, это ограничивает предельную точность измерений.

Детальное изучение стабильности лучевых скоростей звезд-карликов показало, что внутреннее хаотическое изменение лучевых скоростей этих звезд зависит от их скоростей вращения и составляет 15 м/с для наиболее быстро вращающихся звезд (период вращения 10 дней) и 3 м/с для медленно вращающихся звезд (период вращения 30 дней).

Известно, что периоды вращения звезд классов F-K тем больше, чем больше их возраст. Поэтому звезды-карлики, возраст которых более 3 миллиардов лет, наиболее подходят для поиска планет доплеровским методом, так как внутренняя стабильность их лучевых скоростей лучше 5 м/с.

На рис. 2.5–2.6 приведены кривые лучевых скоростей некоторых звезд, у которых обнаружены планеты. Точность определения лучевых скоростей составляет 4,70–7,44 м/с. Полуамплитуда изменения лучевых скоростей, обусловленная присутствием планеты вокруг звезды, около 50 м/с, что много больше ошибок наблюдений.

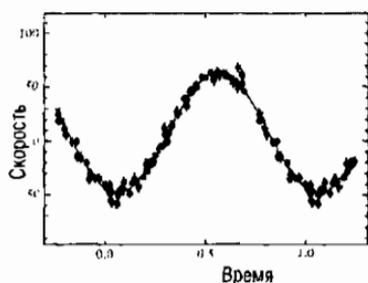


Рис. 2.5. Кривая лучевых скоростей звезды солнечного типа 51 Пегаса, демонстрирующая наличие вокруг этой звезды планеты с массой более 0,44 массы Юпитера и орбитальным периодом 4,23 суток.

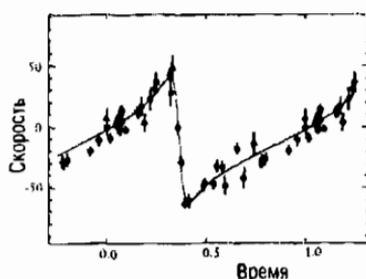


Рис. 2.6. Кривая лучевых скоростей звезды 16 Лебедя В. Орбита ее планеты имеет большой эксцентриситет ($e=0,69$), поэтому форма кривой сильно отличается от синусоидальной. Масса планеты более 1,61 массы Юпитера.

Таким образом, выявление планет в данном случае можно считать весьма надежным.

К настоящему времени описанным выше доплеровским методом планетные системы открыты примерно у ста ближайших звезд. У ряда звезд (например, ϵ Андромеды) открыты планетные

системы, состоящие из двух—трех планет разных масс. Мы выбрали 8 звезд солнечного типа с наиболее характерными параметрами планет. Данные о них приведены в таблице 2.3.

Орбитальные периоды планет лежат в пределах 3,3—1092 дней, соответствующие большие полуоси орбит составляют от 0,04 до 2,1 а. е. Эксцентриситеты некоторых орбит значительно больше, чем в случае Солнечной системы. Нижние пределы масс планет (по-видимому, это массы наиболее крупных планет и не исключено наличие большого числа менее массивных) составляют 0,44—6,73 масс Юпитера.

Таблица 2.3

Характеристики планет вокруг звезд солнечного типа.

Звезда	Орбит. период, сутки	Полуамплитуда лучевых скоростей, м/с	Эксцентриситет орбиты	$m \sin(i)$ (в массах Юпитера)
47 Uma	1092	47,3	0,09	2,38
16 Cyg B	802	50,3	0,68	1,67
70 Vir	116,5	316	0,40	6,73
ρ Cr B	39,6	67	0,03	1,1
55 ρ' Cnc	14,65	75,9	0,04	0,85
ϵ And	4,62	71,9	0,15	0,61
51 Peg	4,231	56,0	0,01	0,44
τ Boo	3,3125	468	0,00	3,66

На рис. 2.7 приведена гистограмма распределения масс спутников у звезд—карликов спектральных классов G—K. Видно, что хотя условия для обнаружения массивных спутников у звезд лучше (больше соответствующая амплитуда изменения лучевых скоростей звезды), наибольшее число обнаруженных спутников лежит в интервале сравнительно малых планетных масс (0—10 масс Юпитера). Это свидетельствует о том, что распространенность планетных систем среди звезд солнечного

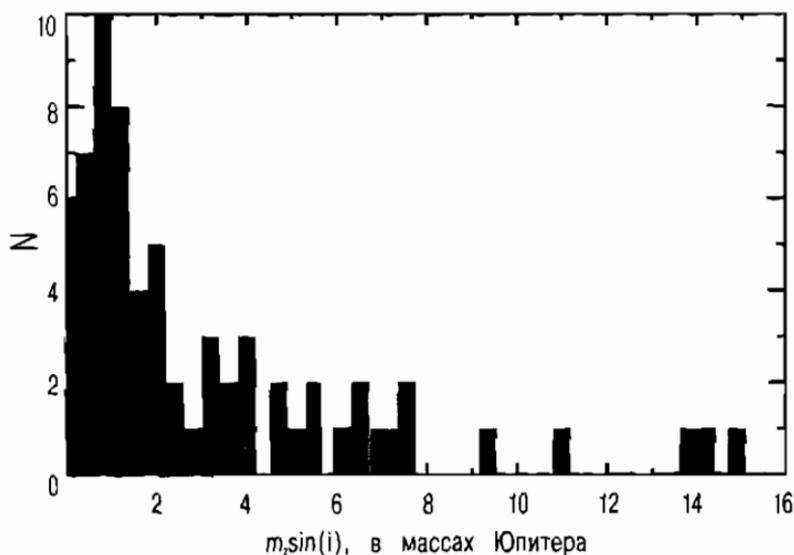


Рис. 2.7. Гистограмма распределения по массам спутников у звезд солнечного типа. Число обнаруженных маломассивных спутников с планетными массами (<10 масс Юпитера) наибольшее, хотя условия их обнаружения наихудшие. Это свидетельствует о большой распространенности планетных систем вокруг звезд.

типа весьма велика, не ниже, чем распространенность двойных и кратных звезд, которая составляет $\sim 50\%$.

Таким образом, новейшие наблюдательные данные свидетельствуют, что важнейшее необходимое условие существования жизни вне Земли выполняется: планетные системы существуют вокруг многих звезд и их число в Галактике составляет не менее 10% от общего числа звезд, то есть порядка 10 миллиардов. Естественно предполагать, что количество планет, у которых условия пригодны для зарождения жизни, должно быть много меньше.

Свойства экзопланет

Перейдем теперь к рассмотрению свойств отдельных планет вне Солнечной системы. Свойства планеты вокруг звезды 47UMa близки к свойствам Юпитера. Орбитальный период этой планеты 3 года, эксцентриситет орбиты $e = 0,09$, величина большой полуоси орбиты $a = 2,1$ а. е., нижний предел массы

составляет 2,4 массы Юпитера. На кривой лучевых скоростей 47 УМа нет признаков наличия других планет (которые должны приводить к отличию кривой лучевых скоростей от квазиси- нусоидальной формы).

Планеты—гиганты, как следует из теории их образования, должны формироваться за пределами расстояния от центральной звезды, соответствующего конденсации льда, и иметь почти круговые орбиты с размером большой полуоси, по крайней мере, в несколько астрономических единиц. Большая полуось орбиты для планеты у звезды 47 УМа несколько меньше, чем следует из теории. Возможно, что после образования из вещества протопланетного диска, планета у звезды подверглась орбитальной миграции внутри этого диска и приблизилась к центральной звезде.

Пять планет из таблицы 3 с массами порядка массы Юпитера имеют периоды менее 40 дней, откуда следует, что радиусы их орбит менее 0,23 а. е., т. е. почти вдвое меньше радиуса орбиты Меркурия. В трех случаях орбитальные периоды гигантских планет с массой порядка массы Юпитера составляют 3—4 дня, т. е. радиусы орбит порядка 0,04 а. е., что в десять раз меньше радиуса орбиты Меркурия! Таким образом, экстремальная близость гигантских планет к центральной звезде — весьма распространенное явление в мире планетных систем вокруг звезд Солнечного типа. Этот новый наблюдательный факт принципиально важен для понимания механизмов формирования планет из протопланетных облаков вокруг звезд.

Новым фактом, также имеющим большое значение для космогонических теорий, является обнаружение значительных эксцентриситетов орбит гигантских планет у звезд, например, 70Vir и 16CygB. Столь большие эксцентриситеты орбит гигантских планет могли появиться в результате действия двух механизмов. В первом случае, движение зародышей планет в протопланетном диске порождает в нем спиральные волны плотности, обратное гравитационное воздействие которых на планету увеличивает эксцентриситет ее орбиты. Во втором случае большой эксцентриситет орбиты планеты достигается в результате действия гравитационных возмущений со стороны других планет системы.

В этой связи важно отметить, что если бы Юпитер в Солнечной системе имел орбиту с большим эксцентриситетом, его переменное возмущающее гравитационное воздействие на планеты земной группы привело бы к их вылету из Солнечной системы, и жизнь в Солнечной системе была бы невозможной...

Таким образом, простой «взгляд со стороны» на планетные системы вокруг звезд солнечного типа позволяет нам глубже понять планетную космогонию и проблемы, связанные с существованием внеземной жизни.

Новейшие открытия

Исследование звезд, у которых открыты планетные системы, показывает, что эти звезды имеют увеличенное количество тяжелых элементов. По-видимому, обогащение тяжелыми элементами способствует образованию планетных систем из первичных газопылевых дисков вокруг звезд. Такие диски открыты у многих молодых звезд Галактики. Например, одна из самых ярких звезд северного полушария Вега (α Лиры) имеет протопланетный диск, который был открыт с борта инфракрасной космической обсерватории IRAS. Затем этот протопланетный диск вокруг Веги, а также диск вокруг другой яркой звезды — Фомальгаута был зарегистрирован и в оптическом диапазоне с помощью специальной аппаратуры, применяющейся при наблюдениях солнечной короны.

С борта космического телескопа Хаббл протопланетные диски были открыты вокруг молодых звезд, проецирующихся на яркие туманности. В этом случае протопланетные диски видны как темные кружки или эллипсы на ярком фоне туманности.

Отметим несколько открытий в области исследования внесолнечных планет, сделанных в самое последнее время.

С помощью космического телескопа Хаббл удалось обнаружить присутствие атмосферы, содержащей натрий, при изучении движения планеты на фоне звезды HD209458 (рис. 2.8).

При затмении звезды планетой излучение звезды просвечивает атмосферу планеты, что и дает возможность детектировать атмосферу и ее химический состав.

Звезда HD209458 близка по спектральному классу к Солнцу

и расположена от нас на расстоянии около 150 световых лет в созвездии Пегаса. В 1999 году у этой звезды доплеровским методом была открыта планета массой 0,7 массы Юпитера, период обращения которой очень короткий (3,5 дня), так что эта массивная планета расположена очень близко к центральной звезде. Впоследствии было обнаружено, что эта планета регулярно затмевает звезду, так как плоскость орбиты планеты близка к лучу зрения. Эти затмения наблюдались как наземными телескопами, так и космическим телескопом Хаббл.

Точность наблюдений была очень высокой. Это позволило определить радиус планеты ($R = 1,35 R$ Юпитера) и по форме кривой затмения сделать заключение, что у планеты нет кольца (типа кольца Сатурна) и нет спутников размерами больше, чем Земля.

В то же время, исключительно высокая точность кривой блеска при затмении позволяет заключить, что у планеты есть плотная атмосфера, состоящая из атомов водорода. Это связано

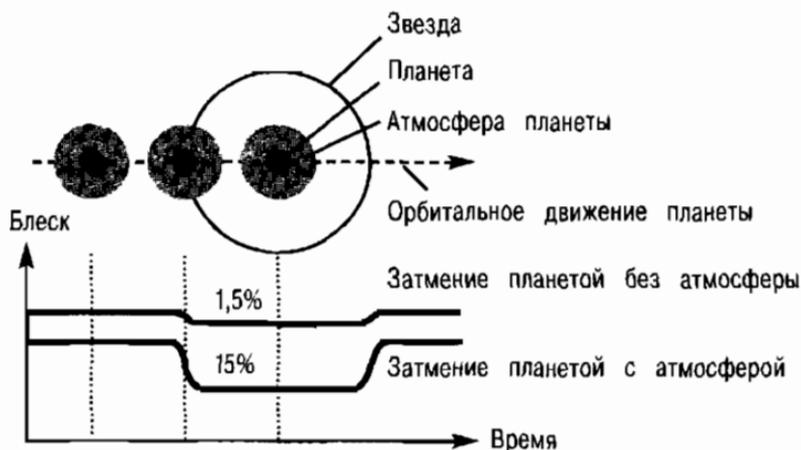


Рис. 2.8. Затмение звезды планетой. Внизу показана кривая изменения блеска звезды. Планета вокруг звезды HD209458 окружена протяженной водородной атмосферой. В непрерывном спектре, где видна лишь поверхность планеты, глубина затмения звезды планетой составляет 1,5%. Наблюдения в линии поглощения водорода показывают значительно большую глубину затмения (15%) ввиду больших размеров водородной атмосферы планеты.

с потерей вещества планетой ввиду высокой температуры ее поверхности, которая сильно нагревается излучением близкой звезды. Последующие наблюдения позволят определить полный химический состав атмосферы этой планеты.

Планируются специальные программы поиска затмений звезд планетами как наземными, так и космическими методами. Это позволит определить не только массы, но и радиусы планет, детектировать атмосферы вокруг них и определять их химический состав.

Исследованиями мазерного излучения паров воды 17 звезд с планетными системами у трех (ϵ Андромеды, ϵ Эридана и Лаланд 2185) зарегистрирована линия излучения, характерная для молекул воды. Самые заметные признаки воды были найдены в системе ϵ Андромеды (расстояние — 50 световых лет). У этой звезды была открыта планетная система, состоящая из трех планет с массами 0,7; 2,1 и 4,6 масс Юпитера.

Все эти планеты—гиганты состоят в основном из газа, подобно Юпитеру. Наличие признаков воды свидетельствует, что вокруг этой звезды обращаются, помимо гигантских планет, также планеты земного типа с твердой поверхностью, которые обнаружить доплеровским методом пока невозможно.

Наконец, следует отметить недавнее открытие планеты массой в 8,1 масс Юпитера, обращающейся не около звезды—карлика (как это имеет место в подавляющем большинстве случаев), а около звезды—гиганта (i Дракона).

Размеры этой звезды в 13 раз превышают размеры Солнца, ее масса несколько больше массы Солнца. Возраст этой звезды 7 миллиардов лет, то есть она значительно старше нашего Солнца и представляет собой наше Солнце 2,5 миллиарда лет спустя.

Таким образом, большинство планетных систем, открытых вокруг звезд, не похожи на солнечную систему: массивные планеты—гиганты часто расположены очень близко к центральной звезде (их называют горячими юпитерами), а многие массивные планеты имеют сильно эллиптические орбиты.

Вполне возможно, что эти особенности отражают эффекты наблюдательной селекции: массивные планеты на короткопериодических орбитах просто легче обнаружить доплеровским методом.

Для окончательного выяснения структуры и динамики внесолнечных планетных систем и поиска внесемной жизни необходимо осуществить поиск планет земной массы вокруг звезд. Эта сложная, но в высшей степени важная задача, будет решаться с помощью специальных космических телескопов и интерферометров, которые мы опишем ниже.

Как победить молчание Космоса

Итак, современные наблюдения показывают, что планетные системы существуют у многих звезд Галактики, число которых, по-видимому, достигает нескольких миллиардов. Число планетных систем, в которых хотя бы одна планета была пригодна для жизни (как в случае солнечной системы), может быть существенно меньше этой величины. Но, даже с учетом этого факта, полное число планет в Галактике, на которых могут существовать условия, благоприятные для зарождения жизни земного типа, должно составлять десятки миллионов.

Почему же мы до сих пор, несмотря на неизмеримо возросшую мощь наших наблюдательных средств во всех электромагнитных диапазонах, несмотря на специальные тщательные поиски, не уловили сигналов внесемных цивилизаций? Почему до сих пор мы не имеем убедительных свидетельств посещения Земли внесемными существами?

Как уже отмечалось, этот отнюдь не риторический вопрос был поставлен Шкловским в 1985 году. На вопрос «почему Космос молчит?» Шкловский ответил так: скорее всего, земная цивилизация является уникальной и практически единственной во Вселенной. Шкловский рассматривал две основные причины молчания Космоса: либо условия для зарождения жизни и, тем более, разумной жизни, чрезвычайно специфичны и крайне редко реализуются на планетах Вселенной, либо при достаточной распространенности жизни во Вселенной время существования разумных форм жизни (внесемных цивилизаций) относительно коротко — не превышает сотни тысяч лет.

Перечислим будущие космические эксперименты по обнаружению новых планетных систем вокруг звезд и поиску проявлений жизни на них, которые помогут человечеству лучше осознать свое место во Вселенной.

В течение ближайших пяти лет будут реализованы наземные интерферометрические системы на базе крупнейших телескопов нового поколения (10–метровые телескопы Кека в США, телескоп VLT Южно-Европейской обсерватории и другие). Эти системы обеспечат астрометрический поиск планет вокруг ближайших звезд путем измерения их положений с точностью лучше одной угловой миллисекунды.

В начале 21-го века Французское Космическое Агентство планирует запуск космического аппарата (Corot) с целью высокоточных фотометрических наблюдений затмений звезд окружающими их планетами. В 2007 году предполагается запуск такого же космического аппарата (Эддингтон) Европейским Космическим Агентством.

В течение ближайших 15 лет рядом стран планируется запуск космических инфракрасных интерферометров (проекты Darwin, Terrestrial Planet Finder и др.). Эти интерферометры позволят непосредственно увидеть планеты вокруг звезд, в том числе и планеты земного типа, и есть надежда даже снять спектры этих планет, что много труднее, чем просто получить их изображения.

Главная задача спектральных наблюдений планет — поиск линий и полос кислорода и озона. Почему именно кислорода и озона? Дело в том, что кислород в атмосфере — верный признак наличия жизни на планете. Кислород — химически очень активный элемент и легко вступает в соединения с различными веществами поверхности планеты. Поэтому для поддержания высокой концентрации кислорода в атмосфере требуется непрерывно действующий источник его поступления. Таким источником в атмосфере Земли является жизнедеятельность растений, основанная на фотосинтезе.

В течение длительной истории Земли жизнедеятельность растений очистила земную атмосферу от углекислого газа и насытила ее кислородом. Как отметил Шкловский, если бы жизнедеятельность растений (которая поставляет в атмосферу Земли ежегодно $\sim 10^{11}$ тонн чистого кислорода) прекратилась, то за очень короткое время ($\sim 10^4$ лет) химически активные молекулы кислорода вступили бы в соединения с веществами поверхности Земли и кислород исчез бы из земной атмосферы.

Получение прямых изображений планет будет возможно также в космическом эксперименте «Фомальгаут», предложенном астрономами ГАИШ МГУ. Основная идея эксперимента — использование супергладких, то есть обладающих очень высоким качеством полировки, зеркал, изготовленных по специальной технологии и позволяющих снизить уровень рассеянного света в телескопе на 4 порядка по сравнению с обычной оптикой. Наконец, в ближайшем десятилетии рядом групп планируется продолжение спектральных доплеровских наблюдений многих сотен звезд Солнечного типа с целью поиска планет, а также поиск планет вокруг звезд по наблюдениям эффектов гравитационного микролинзирования.

Будем надеяться, что после проведения описанных экспериментов, человечество сможет посмотреть на проблему жизни вне Земли не так пессимистично, как сейчас.

Проект «Дарвин»

Открытие доплеровским методом планетных систем у большого числа звезд позволяет реально поставить задачу прямого наблюдения планет и поиска проявлений жизни на них. Как уже отмечалось, поскольку планеты светят отраженным светом центральной звезды, их светимость в оптическом диапазоне спектра должна составлять порядка 10^{-9} , то есть одну миллиардную долю от светимости звезды.

Ясно, что в этом случае наблюдать планеты очень трудно — они буквально тонут в рассеянном свете, создаваемом в реальном телескопе излучением центральной звезды.

Чтобы наблюдать планеты вокруг звезд, нужно преодолеть ряд чрезвычайно трудных препятствий. Среди них главные — это очень малый контраст планет на фоне излучения звезды и рассеянного света в телескопе, а также малые угловые расстояния планет от центральных звезд.

Типичное расстояние для близких звезд — порядка сотой и тысячной доли угловой секунды (чтобы на планете была жидкая вода, необходимая для возникновения жизни, необходимо, чтобы планета была не сильно удалена от центральной звезды — не далее 1–2 астрономических единиц).

Таким образом, задача состоит в том, чтобы сильно (в сотни

тысяч раз) уменьшить влияние света центральной звезды и рассеянного света в телескопе, а также в сотни раз увеличить разрешающую способность инструмента.

Концепция проекта

Первая задача — увеличение контраста планет — решается переходом из видимого в инфракрасный диапазон спектра (где контраст планет в тысячу раз выше) и применением специальных мер по уменьшению рассеянного света (использование телескопа в режиме коронографа, который применяется при наблюдениях чрезвычайно слабоконтрастной солнечной короны). Кроме того, применяется режим наблюдений, при котором яркость центральной звезды гасится не с помощью ее геометрического экранирования, а оптическим способом, основанным на явлении интерференции света (режим так называемого интерферометра с занулением).

Вторая задача — увеличение разрешающей способности — решается с использованием не одного, а нескольких телескопов, разнесенных на расстояния в десятки и сотни метров и работающих, как единый инструмент в режиме интерферометра. Разрешающая способность телескопа определяется волновой природой света. Мы знаем, что свет — это поперечные колебания электрических и магнитных полей, которые распространяются в пустоте с предельно возможной скоростью 300 000 км/с. Длина волны этих колебаний для излучения в видимом диапазоне (от синего до красного концов спектра) составляет в среднем около 5500 ангстрем (1 ангстрем, как уже упоминалось, равен 10^{-8} см). Благодаря явлению дифракции электромагнитных волн на краю объектива изображение звезды — точки получается в виде кружка ненулевого диаметра (главный дифракционный максимум) и системы чередующихся светлых и темных колец. Размер центрального кружка определяет разрешающую способность телескопа.

Разрешающая способность телескопа определяется отношением длины волны светового излучения λ к диаметру телескопа D , и для телескопа с объективом диаметром 14 см равна одной угловой секунде (напомним, что разрешающая способность невооруженного человеческого глаза в 60 раз хуже и составляет

около 1 минуты). Если мы возьмем телескоп с диаметром объектива в 14 метров, то его теоретическая разрешающая способность будет в 100 раз лучше, то есть составит 0,01 угловой секунды.

Оказывается, чтобы получить такое высокое угловое разрешение, вовсе не обязательно изготавливать столь большой и дорогостоящий объектив. Можно использовать несколько малых (например, $D=14$ см), но разнесенных на расстояние около 14 метров.

Тогда, собирая свет от этих объективов в одном месте и используя явление интерференции света, путем специальной математической обработки принимаемого сигнала можно также достичь высокого углового разрешения в 0,01 угловой секунды.

Именно такой интерферометр и предполагается использовать для наблюдения планет вокруг звезд. Но нужно при этом иметь в виду, что искажения изображений звезды и планет, вызванные нестабильностью земной атмосферы, сильно затрудняют получение высокого углового разрешения при наблюдениях с поверхности Земли. Поэтому интерферометр для наблюдений планет вокруг звезд должен работать за пределами земной атмосферы, в космическом пространстве.

Поскольку в инфракрасном диапазоне спектра, на длинах волн в десятки микрон, планета не только светит отраженным светом звезды, но и сама излучает (при температуре планеты в десятки градусов Цельсия максимум теплового излучения планеты лежит в инфракрасном диапазоне), а светимость центральной звезды падает, контраст планеты в инфракрасном диапазоне в 1000 раз выше, чем в оптическом диапазоне спектра (составляет не 10^{-9} , а 10^{-6}). Поэтому переход в инфракрасный диапазон существенно облегчает наблюдения планет вокруг звезд.

Однако в этом случае появляются другие трудности. Прежде всего, в далеком инфракрасном диапазоне спектра сам телескоп и вся приемная аппаратура излучают энергию, которая создает дополнительный фон и затрудняет наблюдения планет. Поэтому телескоп и приемное оборудование при наблюдениях в инфракрасном диапазоне должны быть охлаждены до возможно более низких температур, порядка -240°C .

Осуществить столь глубокое и, главное, стабильное охлаждение очень непросто.

Вторая трудность связана с тем, что в инфракрасном диапазоне интенсивно излучает межпланетная пыль — мелкие твердые частицы — остатки разрушившихся комет и астероидов, которые летают по своим орбитам в межпланетном пространстве, преимущественно между орбитами Марса и Юпитера. В видимом диапазоне эта межпланетная пыль проявляет себя в виде хорошо известного явления зодиакального света. Чтобы уменьшить влияние фона инфракрасного излучения, вызванного межпланетной пылью, космический интерферометр должен быть запущен не на орбиту вокруг Земли, а на околосолнечную орбиту, приблизительно вблизи орбиты Юпитера.

Самая тонкая и деликатная проблема — это экстремально сильное уменьшение интенсивности излучения центральной звезды и рассеянного света. Наиболее эффективное решение этой проблемы состоит в следующем.

С помощью специального оптического устройства (так называемой полуволновой пластинки) электромагнитные колебания, падающие на одно плечо—телескоп интерферометра сдвигаются на половину периода по сравнению с электромагнитными колебаниями, поступающими на второе плечо. При сложении эти колебания гасятся, что приводит к занулению интенсивности главного центрального изображения дифракционной картины звезды. В то же время, поскольку планеты расположены на некотором угловом расстоянии от звезды, их изображения не гасятся, что и позволяет регистрировать изображения планет вблизи звезды.

Борьба с рассеянным светом в телескопе идет по ряду направлений. Во-первых, используется специальная, супергладкая оптика с очень высоким качеством полировки, когда остаточная шероховатость зеркал и линз в десятки раз меньше, чем в обычной оптике. Во-вторых, в телескопе применяется специальная схема коронографа Лию, в которой сначала с помощью отдельной линзы (линзы Фабри) строится изображение объектива. Свет, рассеянный на краю объектива, отсекается специальной диафрагмой (диафрагма Лию) и затем, после такого устранения основной части рассеянного света в телескопе,

строится изображение звезды. Все эти меры, вместе взятые, позволяют уменьшить интенсивность рассеянного света в десятки и сотни тысяч раз, что и делает реальным получать изображения планет вокруг звезд и даже снимать спектры этих планет.

Спектры атмосфер планет

Для поиска следов жизни на планетах вокруг звезд необходимо снять спектры этих планет с достаточно высоким спектральным разрешением ($\lambda/\Delta\lambda > 20$), чтобы зарегистрировать линии поглощения воды, кислорода, озона и углекислого газа в их атмосферах. В инфракрасном диапазоне спектра, в области 7–20 мкм (микрометр), наиболее сильно в тепловых спектрах атмосфер планет земного типа представлены линии поглощения воды H_2O (полоса поглощения вблизи $\lambda = 8$ мкм), озона O_3 (линия поглощения на $\lambda = 9,6$ мкм) и углекислого газа CO_2 на $\lambda = 15$ мкм.

На рис. 2.9 представлены спектры теплового излучения атмосфер Венеры, Земли и Марса в инфракрасном диапазоне. Видно, что в спектрах атмосфер Венеры и Марса, которые практически лишены кислорода и состоят в основном из углекислого газа, наблюдается лишь сильная линия поглощения углекислого газа. В то же время, в спектре атмосферы Земли, помимо линии углекислого газа, наблюдается заметная линия поглощения озона O_3 , что отражает присутствие в атмосфере Земли значительного количества кислорода (линии молекулярного кислорода O_2 расположены в оптическом диапазоне спектра).

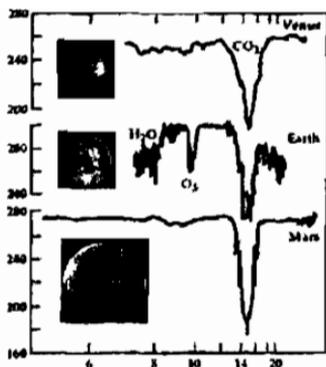
Кроме того, в инфракрасном спектре атмосферы Земли наблюдается сильная полоса поглощения паров воды H_2O , что отражает наличие на поверхности Земли жидкой воды. Таким образом, инфракрасный спектр Земли прямо указывает на наличие принципиально важных для функционирования органической жизни компонент: жидкой воды, кислорода и углекислого газа.

В то же время в спектрах Венеры и Марса, где практически отсутствуют жидкая вода и кислород, нет линий поглощения паров воды и кислорода.

Рис. 2.9. Спектры атмосфер Земли, Марса и Венеры в инфракрасном диапазоне (по горизонтальной оси — длина волны, мкм).

В спектре атмосферы Земли видна сильная линия поглощения озона O_3 , свидетельствующая о наличии большого количества кислорода.

Таким образом, наблюдая инфракрасные спектры планет вокруг звезд, можно проводить диагностику химического состава их атмосфер и делать выводы о наличии или отсутствии органических форм жизни на них.

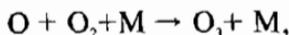


Фотосинтез

Современная атмосфера Земли состоит на 21% из молекулярного кислорода, на 78% из молекулярного азота, небольшой примеси углекислого газа (0,03%) и других элементов (аргон 0,9%, водород 0,1%, неон 0,0015%, гелий 0,0001%). Слой озона находится на высоте 35–60 км, его объемное содержание составляет всего 0,00006%. Озон появляется в результате разложения молекулярного кислорода при фотохимических реакциях:



($h\nu$ — энергия квантов солнечного света), и последующих тройных взаимодействиях:



где M — некоторая третья молекула. В результате реакции:



озон поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца в диапазоне 2000–3000 ангстрем; в итоге, это излучение разогревает верхний слой атмосферы Земли.

Как уже отмечалось, современный химический состав атмосферы Земли образовался благодаря активной деятельности живых организмов и, прежде всего, благодаря фотосинтезу. Фотосинтез заключается в преобразовании и запасании солнечной энергии. В результате из простых веществ — углекислого газа и воды — синтезируются углеводы и выделяется молекулярный кислород.

Именно явление фотосинтеза привело к радикальному преобразованию нашей планеты в процессе ее эволюции.

Атмосфера Земли на ранних стадиях ее эволюции, до появления фотосинтезирующих организмов была разреженной и состояла главным образом из углекислого газа и аммиака.

Приобретенная в процессе эволюции, более 2 миллиардов лет тому назад, способность растений к выделению молекулярного кислорода увеличила содержание кислорода практически от нуля в древней атмосфере Земли до 21% в настоящее время.

В период значительного повышения O_2 в атмосфере Земли произошло окисление соединений железа, серы, марганца на ее поверхности, при этом на такие процессы окисления ушло более 95% кислорода, выделенного фотосинтезирующими организмами за всю историю земной биосферы.

По мере возрастания содержания O_2 в атмосфере Земли значительно увеличилось содержание молекулярного азота благодаря окислению аммиака. Кроме того, процесс фотосинтеза привел к значительному, более чем в 100 раз уменьшению содержания углекислого газа в атмосфере. В итоге первоначально разреженная атмосфера Земли превратилась в плотную вторичную атмосферу, состоящую из азота и кислорода с небольшой примесью углекислого газа.

Чрезвычайно важно, что фотосинтетическое образование O_2 , сопровождающееся поглощением CO_2 , в сочетании с появившейся возможностью аэробного дыхания у животных, когда осуществляется обратный процесс — потребление O_2 , сопровождающееся выделением CO_2 , привело к образованию замкнутых циклов формирования O_2 и CO_2 . Сочетание этих циклов дает возможность восполнять содержание как CO_2 , так и O_2 . Участие этих циклов в едином цикле «фотосинтез — дыхание» обеспечивает постоянное поступление энергии в биосферу Земли.

Реалистическая постановка задачи поиска внеземной жизни

Мы убедились, что линии озона, паров воды и углекислого газа в инфракрасном спектре планеты являются признаками проявления жизнедеятельности организмов и, прежде всего,

растений на поверхности планеты. Перейдем теперь к описанию проекта космического инфракрасного интерферометра «Дарвин». Проект назван именем выдающегося английского ученого Чарльза Дарвина, поскольку главная цель этого проекта — поиск следов органической жизни на планетах вокруг ближайших звезд.

Проект «Дарвин» был одобрен для научной и технологической проработки в феврале 1997 года Европейским космическим агентством. Предполагается запуск на орбиту вблизи орбиты Юпитера пяти или шести инфракрасных телескопов с зеркалом диаметром 1,5 метра.

Каждый телескоп выводится на орбиту своим носителем и расположен на отдельной управляемой стабилизированной платформе. Телескопы располагаются по окружности диаметром 50–100 метров, причем твердой связи между телескопами нет — все они находятся в свободном движении на своих платформах.

Стабилизация относительного положения телескопов осуществляется с помощью специальных электрических устройств, а контроль относительного положения телескопов происходит с помощью лазерных систем с обратной связью с огромной точностью 0,1 микрометра (10^{-1} сантиметра).

Для дополнительного контроля стабильности относительного положения телескопов к системе основных телескопов запускается отдельный небольшой специальный спутник, который позволит держать оптические оси всех телескопов в строго одинаковом направлении.

Излучение от исследуемой звезды, собранное всеми телескопами, направляется в центральный космический аппарат — оптический блок, который также летает свободно на своей платформе под контролем следящих систем и в котором потоки от всех рабочих телескопов складываются. Анализ интерференционной картины, полученной в результате такого сложения, позволяет достичь углового разрешения в несколько тысячных угловой секунды.

Поскольку система телескопов в данном случае работает в режиме интерферометра с занулением центрального максимума дифракционного изображения звезды (см. выше), свет от

центральной звезды гасится, что позволяет непосредственно регистрировать изображения планет.

Весь космический интерферометр работает в инфракрасном диапазоне спектра ($\lambda = 7 \div 20$ мкм), поэтому и телескопы, и приемники излучения охлаждаются до температуры 30 К (-240°C). Охлаждение пассивное, с помощью дискообразных радиаторов, охватывающих телескопы (рис. 2.10).

Реализация этого проекта планируется в 2010–2015 годах. В течение четырех лет работы космического интерферометра предполагается получить изображения планетных систем у 120 звезд, удаленных от Земли в пределах 20 парсек и открыть планеты, подобные Земле по массе и размерам.

Предполагается также получить инфракрасные спектры всех планет, открытых около 50 звезд и сделать более глубокий, с лучшим разрешением, спектроскопический анализ планетных систем у 20 звезд, где планеты, подобные Земле будут открыты. Будет осуществлен поиск линий озона, паров воды и углекислого газа в тепловых спектрах этих планет с целью обнаружения проявлений органической жизни.

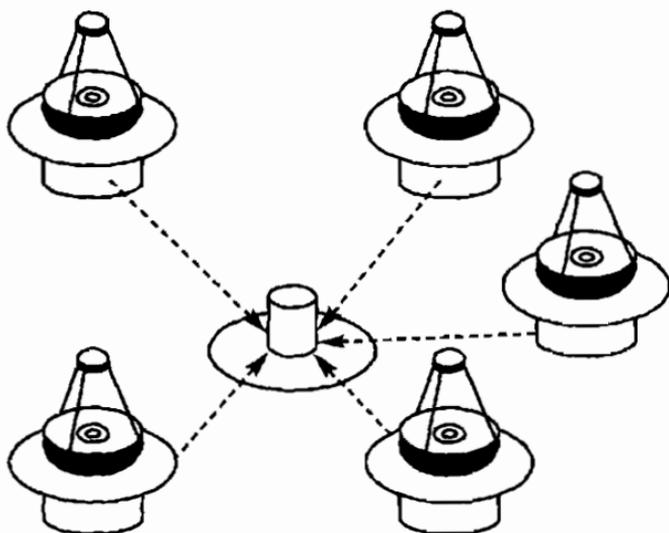


Рис. 2.10. Схема космического эксперимента «Дарвин», предназначенного для поиска проявлений органической жизни на планетах вокруг многих звезд; 5 телескопов диаметром по 1,5 м объединены в единую систему.

Проект «Дарвин» рассматривается как первый шаг на пути к разработке и запуску космического инфракрасного интерферометра следующего поколения, с существенно большей базой (расстоянием между телескопами) — порядка нескольких тысяч километров. При этом планируется увеличить диаметр рабочих телескопов и их число настолько, что полная собирающая площадь телескопов будет составлять около одного квадратного километра. В этом случае можно будет не только детально изучить спектры планет, но и получить изображения их поверхностей с разрешением около 100 км.

Для ускорения реализации проекта «Дарвин» предполагается объединить его с космическим проектом TPF (Terrestrial Planet Finder — искатель планет земного типа), разрабатываемым американским космическим агентством (NASA). Главная задача TPF — поиск планет земного типа вокруг звезд с достаточно теплым климатом, жидкой водой и атмосферой, содержащей молекулярный кислород. Это будет, как и в случае проекта «Дарвин», космический инфракрасный интерферометр, работающий в режиме зануления главного максимума дифракционной картины и состоящий из четырех телескопов с зеркалом диаметром 3,5 метра.

Есть ли жизнь на Марсе, нет ли жизни на Марсе...

Поговорим теперь о поисках жизни вне Земли в Солнечной системе. К сожалению, приходится признать, что пока в этой области успехи практически нулевые. Так что до сих пор остается актуальной известная сентенция артиста Филиппова в знаменитой кинокомедии Эльдара Рязанова: науке не известно, есть ли жизнь на Марсе. То же самое можно сказать пока и про другие планеты солнечной системы.

Марс

Наиболее обещающей в смысле перспектив поиска внеземной жизни традиционно считается планета Марс — одна из планет Солнечной системы. Марс — четвертая по удаленности от Солнца планета, принадлежащая к группе планет земного типа, то есть обладающих высокой средней плотностью ($3,92 \text{ г/см}^3$) и сравнительно небольшой массой.

Масса Марса в девять раз меньше земной, его экваториальный радиус равен 3397 км, что вдвое меньше радиуса Земли (6370 км). Ускорение свободного падения на поверхности Марса 376 см/с^2 , то есть сила тяжести на Марсе втрое меньше земной, а вторая космическая скорость составляет 5 км/с.

Марсианские сутки почти равны земным, а экватор Марса наклонен почти на такой же угол к плоскости орбиты ($24^{\circ}56'$), как и у Земли ($23^{\circ}27'$). Поэтому на Марсе наблюдается смена времен года, похожая на земную (рис. 2.11).

Орбита Марса имеет заметный эксцентриситет ($e = 0,093$, у орбиты Земли $e = 0,016$), ее большая полуось равна 1,52 астрономической единицы, т. е. Марс расположен в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля. Поэтому Марсианский год длится 687 земных суток, а поверхность Марса в среднем значительно холоднее земной: если средняя температура поверхности Земли составляет около 289 К ($+16^{\circ}\text{C}$), то средняя температура поверхности Марса заметно ниже: 214 К (-59°C).

Атмосфера вблизи поверхности Марса имеет плотность в 160 раз меньше земной и состоит на 95% из углекислого газа, на 2,5% из азота, с примесью других газов (аргон, кислород, вода и др.).

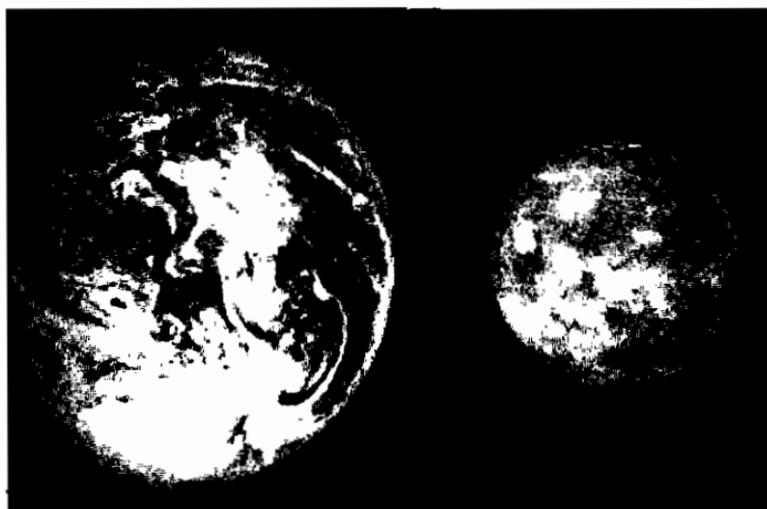


Рис. 2.11. Марс и Земля — вид с борта космического корабля с одного и того же расстояния. Диаметр Марса вдвое меньше земного.

В связи с разреженностью атмосферы Марса и низкой теплопроводностью грунта перепады дневной и ночной температуры на поверхности Марса очень велики. Так, на экваторе максимальная температура днем достигает $+5^{\circ}\text{C}$, а ночью падает до -100°C . Самая низкая температура наблюдалась над зимней полярной шапкой Марса: -138°C .

Таким образом, температурный режим на Марсе, за исключением самых холодных мест, соответствует в среднем зимней Антарктиде, а атмосферное давление такое же, какое наблюдается в земной атмосфере на высоте примерно 15–30 км над уровнем моря.

Знаменитые полярные шапки на Марсе состоят из замерзшего углекислого газа (хорошо известный нам сухой лед) и водяного льда. Марсианский грунт — в основном мелко раздробленный материал — реголит, в сочетании с камнями разных размеров. В составе марсианских пород больше окислов железа по сравнению с земными породами; этим объясняется красный цвет Марса.

На поверхности Марса имеется много гор вулканического происхождения высотой до 28 км. Столь высокие горы могут существовать благодаря меньшей силе тяжести на Марсе по сравнению с Землей. На ранней стадии образования Марс подвергся интенсивной бомбардировке астероидами и кометами. Поэтому поверхность покрыта множеством кратеров.

Кроме того, на Марсе наблюдаются разнообразны следы эрозии: дюны, холмы и провалы, долины, которые могли быть прорыты потоками лавы, ледниками, селевыми потоками и даже жидкой водой. Часть долин на Марсе может представлять собой высохшие русла рек.

Все эти данные были получены исследованиями Марса с помощью космических аппаратов (рис. 2.12).

Рассмотрим теперь новейшие данные, которые имеют отношение к поискам жизни на Марсе. Для формирования органической жизни необходимы три главных условия на планете: подходящий температурный режим, наличие кислорода в достаточно плотной атмосфере и жидкой воды. Ученые уже давно подозревали наличие огромного количества водяного льда в подпочвенных слоях поверхности Марса.

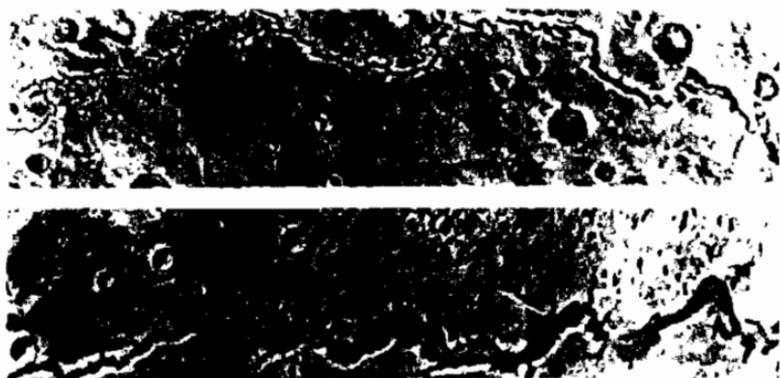


Рис. 2.12. Извилистые протяженные образования на поверхности Марса, чрезвычайно похожие на высохшие русла рек.

Совсем недавно с помощью детектора высокоэнергичных нейтронов, установленного российскими учеными (группа проф. Митрофанова) на борту американской космической станции Марс—Одиссей, удалось доказать присутствие на Марсе толстого слоя подпочвенного льда. Таким образом, вода на Марсе есть, и притом в больших количествах, которых вполне достаточно для объяснения происхождения высохших русел рек. В настоящее время существование жидкой воды на поверхности Марса невозможно, т. к. она быстро выкипает при таком экстремально низком атмосферном давлении. Однако наличие высохших русел рек позволяет предположить, что миллиарды лет назад Марс имел более плотную атмосферу и жидкую воду.

Плотная атмосфера молодой планеты Марс сглаживала разницу ночной и дневной температуры на его поверхности, а парниковый эффект, обусловленный высоким содержанием CO_2 в атмосфере, увеличивал среднюю температуру поверхности Марса до $+30 \div +50^\circ\text{C}$. Поэтому вполне возможно, что в экваториальных районах Марса были условия, благоприятные для зарождения жизни. На первых порах эта жизнь зарождалась в отсутствие кислорода в атмосфере и так же, как в случае Земли, носила анаэробный характер.

Возможно также, что в дальнейшем деятельность живых организмов обогатила атмосферу Марса молекулярным кислородом, что могло привести к развитию не только растительных, но и животных форм жизни на Марсе.

По какой-то, пока окончательно не выясненной причине (главным образом, из-за относительно малой массы планеты и потери ею значительной части атмосферы и паров воды) климатические условия на Марсе претерпели кардинальные изменения, и в настоящее время условия на этой планете стали такими суровыми, как мы их наблюдаем.

Отсутствие заметного количества молекулярного кислорода в сильно разреженной атмосфере Марса, а также отсутствие жидкой воды не позволяют предполагать наличия сложных форм органической жизни на Марсе в настоящее время. Можно лишь пытаться искать живые микроорганизмы в почвенном слое Марса.

Именно такая задача решалась в 1976 году с помощью космических аппаратов серии «Викинг», высаженных на поверхности Марса. Портативные автоматизированные химические лаборатории аппаратов Викинг-1 и Викинг-2 осуществили анализ забранных на борт этих аппаратов проб грунта Марса.

Главная цель исследований — поиск микроорганизмов в марсианском грунте. В первом эксперименте марсианский грунт помещался в герметически закрытую камеру с атмосферой, подобной марсианской, но часть атомов углерода C^{12} была заменена радиоактивным изотопом углерода C^{14} , при этом грунт освещался светом, подобным солнечному.

Затем грунт нагревался, предполагаемые микроорганизмы разлагались и если в нем были микроорганизмы, усвоившие в результате фотосинтеза углекислый газ с радиоактивными изотопами C^{14} , то приборы должны были бы зарегистрировать усвоенный радиоактивный углерод. Это доказывало бы использование микроорганизмами фотосинтеза.

Этот эксперимент в земных условиях проводился многократно и всегда давал положительные результаты. Эксперименты с марсианским грунтом были неопределенными: радиоактивный углерод иногда регистрировался, а иногда — нет. Поэтому окончательный вывод в данном случае сделать не удалось. Результаты двух других экспериментов с контрольной камерой также оказались неопределенными и, скорее, отрицательными. Решающий удар по надеждам обнаружить микроорганизмы в грунте Марса нанес четвертый эксперимент, в

котором использовался газовый хроматограф, соединенный с масс-спектрометром. Образец марсианского грунта нагревался и образующиеся при этом газовые продукты разложения возможных микроорганизмов анализировались.

В тестовых экспериментах с образцами грунта из Антарктиды этим методом всегда обнаруживалось до двадцати органических соединений — продуктов разложения живых организмов. В то же время при анализе грунта Марса было зарегистрировано выделение кислорода, водяного пара и углекислого газа, но никаких органических соединений обнаружено не было.

Поскольку любые известные нам формы жизни при разложении выделяют органические газовые вещества, можно заключить, что либо количество микроорганизмов в местах посадки Викинга-1 и Викинга-2 было ничтожно мало, либо живых микроорганизмов на Марсе вообще нет.

О возможности существования на Марсе окаменелых ископаемых микроорганизмов мы уже писали в начале этой главы, когда упоминали о марсианском метеорите, прилетевшем на Землю. К настоящему времени в этом вопросе также нет ясности. Будем надеяться, что будущие эксперименты на поверхности Марса с помощью спускаемых аппаратов, а также с помощью космонавтов внесут большую ясность в вопрос о существовании жизни на Марсе.

Венера

Другая планета, которую можно рассматривать в связи с поисками внеземной жизни — это Венера. Венера — вторая от Солнца планета солнечной системы, она расположена на расстоянии 0,72 астрономической единицы от Солнца, то есть на 30% ближе к Солнцу, чем Земля. Венерианский год составляет 0,62 от земного или 225 земных суток, период осевого вращения очень велик — 243 земных суток, причем Венера вращается вокруг своей оси в направлении, противоположном орбитальному вращению.

Масса Венеры близка к массе Земли (0,82 массы Земли), радиус также близок к земному (0,95 земного радиуса). Эксцентриситет орбиты Венеры очень мал ($e=0,007$). Ускорение силы тяжести на поверхности Венеры составляет 887 см/сек².

Наклонение экватора Венеры к эклиптике весьма мало (близко к $3,5^\circ$), поэтому там почти не происходит смен времен года.

Хотя по своим размерам и массе Венера близка к Земле, она резко отличается от Земли по физическим условиям на поверхности. Прежде всего, атмосфера Венеры состоит на 96% из углекислого газа и на 4% из азота и имеет плотность вблизи поверхности примерно в 100 раз выше, чем у Земли (1/15 плотности воды!), а температура поверхности Венеры очень высока: около $+500^\circ\text{C}$. Такое высокое значение температуры поверхности не может быть объяснено только эффектом нагрева солнечным излучением, поскольку этот эффект относительно слабо зависит от расстояния планеты до Солнца: эффективная температура поверхности планеты обратно пропорциональна корню квадратному из расстояния.

Главная причина столь высокой температуры поверхности Венеры — уже упоминавшийся парниковый эффект: молекулы углекислого газа, из которого в основном состоит атмосфера Венеры, прозрачны для солнечных лучей в видимом диапазоне спектра и непрозрачны для инфракрасного излучения, которое испускается нагретой поверхностью планеты.

В 1975 году спускаемые аппараты советских автоматических межпланетных станций Венера-9 и Венера-10 совершили мягкую посадку на поверхность Венеры и передали на Землю телевизионные изображения ее поверхности. Это были первые в мире изображения, переданные с поверхности другой планеты. Поверхность Венеры оказалась состоящей из камней, плит и рыхлого грунта; имеются свидетельства тектонической активности коры.



Рис. 2.13. Общий вид Венеры с ее сплошным облачным покровом, состоящим в основном из капелек серной кислоты (снимок в ультрафиолетовых лучах с борта космического телескопа Хаббл).

Венера покрыта плотным облачным слоем и до наступления эры космических исследований была недоступной прямым наблюдениям.

Подробные карты поверхности Венеры были получены как с помощью прямых посадок автоматических космических аппаратов, так и с использованием радиолокационных методов.

Рельеф Венеры содержит равнинные области, горы, низменности и кратеры, как ударного, так и вулканического происхождения.



Рис. 2.14. Снимок поверхности Венеры, полученный Советской автоматической межпланетной станцией «Венера-14».

Шансов обнаружить какие-либо следы жизни на Венере невелики: на поверхности Венеры нет жидкой воды, а верхний облачный слой атмосферы состоит, в основном, из капелек серной кислоты. При температуре 500°C в таких условиях крайне маловероятно ожидать проявления каких-либо форм жизнедеятельности на поверхности этой жаркой планеты.

Другие планеты Солнечной системы

Условия для зарождения органических форм жизни на других планетах солнечной системы еще хуже: у Меркурия температура поверхности меняется от $+500^{\circ}\text{C}$ в полдень до -170°C в полночь, и он практически лишен атмосферы, у Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна температура верхнего облачного слоя атмосферы из-за удаленности этих планет от Солнца не поднимается выше -140°C , а температура поверхности Плутона составляет около -230°C .

Спутники планет

В последние годы обсуждается вопрос о возможности существования каких-либо форм жизни на спутниках планет. Благодаря космическим исследованиям планет солнечной системы у

многих из них открыто множество различных спутников. В канун 2002 года Международный Астрономический Союз утвердил известные спутники планет.

Сейчас известно, что Юпитер имеет 28 спутников, Сатурн — 30, Уран — 20, Нептун — 8, Марс — 2, Земля и Плутон по одному спутнику, а Меркурий и Венера спутников не имеют. При этом число открытых спутников планет-гигантов постоянно растет. Таким образом, всего в солнечной системе известно около 90 спутников планет. На ряде крупных спутников Юпитера и Сатурна имеется атмосфера, а температура их поверхности достаточно высока в силу мощной тектонической активности. Эта активность связана с движением спутников по эллиптическим орбитам на сравнительно небольшом расстоянии от центральной массивной планеты.

Возникающие при этом переменные деформации тела спутника, вызванные центральной планетой и соседними спутниками, приводят к взаимному трению его различных слоев, выделению тепла и к тектонической активности.

Таким образом, хотя в данном случае поток солнечной радиации весьма скуден, относительно высокая температура поверхности спутника поддерживается теплом, идущим из его недр.

Ио

Впервые тектоническая активность была открыта на Ио — спутнике Юпитера. При исследовании далеких планет-гигантов с помощью американских автоматических межпланетных станций «Пионер», «Вояджер» и «Галилей» с 1972 по 1989 годы были детально изучены не только поверхности этих планет, но и их спутники и кольца.

Оказалось, что не только у Сатурна имеется кольцо из сравнительно мелких твердых тел,двигающихся в экваториальной



Рис. 2.15. Ио — общий вид.

плоскости планеты. Кольца имеются и у других гигантских планет — Юпитера, Урана и Нептуна. Помимо колец, у планет-гигантов было открыто много новых спутников, а поверхности многих спутников были детально изучены.

Спутник Юпитера Ио имеет значительную массу (на 20% больше массы Луны), его диаметр 3630 км (диаметр Луны составляет 3476 км), средняя плотность $3,55 \text{ г/см}^3$ (рис. 2.15). Ускорение свободного падения достаточно велико — 181 см/сек^2 .

На Ио обнаружены действующие вулканы с выбросами из паров серы, сернистого газа, сульфидов, а также из силикатных магм. Ио имеет разреженную атмосферу, в состав которой входит двуокись серы.

Средняя температура поверхности составляет около -120°C , но в некоторых районах, особенно вблизи действующих вулканов, температура существенно выше, и достигает $+(80 \div 130)^\circ\text{C}$.

Обычная органическая жизнь в таких условиях вряд ли возможна.

Европа

Однако есть спутники, на которых имеются основания предполагать наличие жизни. К ним относится спутник Юпитера Европа. Главная особенность Европы состоит в том, что вся ее поверхность покрыта толстым слоем водяного льда.

Густая сеть линий на поверхности Европы напоминает мифические каналы Марса, но если в случае Марса гипотеза о каналах не подтвердилась, то в случае Европы сеть пересекающихся линий — трещин в ледяной оболочке — вполне реальна. Диаметр Европы 3138 км, а средняя плотность $3,01 \text{ г/см}^3$, масса вдвое меньше массы Ио.

В недрах Европы выделяется энергия приливных взаимодействий. Сочетание этого фактора с высоким давлением ледяной коры приводит к тому, что на Европе под толстым слоем льда (толщиной от 60 до 200 км) имеется океан из жидкой воды глубиной в несколько десятков километров.

Тектонические процессы вызывают образование трещин в ледяном панцире, по которым жидкая вода поднимается наверх и выбрасывается на поверхность спутника (рис. 2.16). Изливающаяся вода быстро закипает в почти безатмосферной среде и

замерзает. Испарившаяся часть воды в виде снега выпадает на поверхность.

Дно подледного океана сложено, по-видимому, из силикатных пород. Если в силикатной подводной коре Европы имеются действующие подводные вулканы, то здесь в результате термохимического синтеза могут возникать сложные химические молекулы.

В последнее время высказываются гипотезы о возможности существования жизни в подледном океане Европы. Объем океана Европы близок к объему земного океана.

При ускорении свободного падения на поверхности Европы 132 см/сек^2 давление на дне океана Европы такое же, как давление земного океана на глубине 4 километра.

В этих условиях, несмотря на практически полное отсутствие солнечной радиации и фотосинтеза, вблизи действующих подводных вулканов на Европе могли зародиться, по крайней мере, примитивные формы жизни. В этой связи предполагается отправить в будущих космических миссиях к Европе океанографическую аппаратуру для решения вопроса о наличии океана из жидкой воды под ледяным панцирем Европы и поиска следов жизни на этом экзотическом объекте.

Будем надеяться, что дальнейшие углубленные исследования Марса, Венеры и ряда спутников планет-гигантов с помощью космических аппаратов 21-го века (включая высадку космонавтов на Марсе) прояснят вопрос о существовании внеземной жизни в солнечной системе.

Рассмотрение планет солнечной системы показывает, что лишь малая часть от их полного числа (одна планета, Земля, из девяти) пригодна для возникновения и развития жизни.

Температурный режим остальных планет слишком суров для того, чтобы там могла функционировать жизнь.



Рис. 2.16. Участок поверхности Европы. Видна сложная структура ледяных трещин.

Этот вывод нужно принимать во внимание при поисках жизни на планетах, обращающихся вокруг других звезд.

Мы рассмотрели такое удивительное и пока окончательно не понятое явление Природы, как жизнь. Будучи оптимистами, мы уверены в том, что человечество со временем найдет внеземные формы жизни и сможет разгадать сущность и происхождение этой сложнейшей и в высшей степени совершенной формы самоорганизации материи в эволюционирующей Вселенной.

Перейдем теперь к рассмотрению черных дыр — не менее удивительной и уникальной формы существования материи.

Глава 3

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Надежды, разочарования, успехи

История предсказаний и поисков черных дыр полна драматизма и до сих пор окончательно не завершена. В этом отношении проблема черных дыр сходна с проблемой внеземных цивилизаций, с той лишь разницей, что в случае внеземных цивилизаций имеется полное единодушие среди физиков и астрономов в том, что эти цивилизации могут существовать, но пока еще не открыты. А в случае черных дыр сложилась парадоксальная ситуация: астрономы почти уверены, что черные дыры открыты, в то время как многие физики не верят в их существование. Слишком уж удивительны и экзотичны свойства этих поистине экстремальных объектов, чтобы можно было легко поверить в их существование.

Ранние представления

Под черной дырой понимается область пространства–времени, для которой вторая космическая скорость равна скорости света в вакууме $c = 300000$ км/с. Таким образом, гравитационное поле черной дыры столь сильно, что из нее даже свет, самый быстрый в природе переносчик энергии, не может вырваться.

Напомним, что вторая космическая скорость — это скорость, которую должно иметь некоторое тело (космический корабль, молекула атмосферы и т. п.), чтобы преодолеть силу притяжения массивного тела и улететь на бесконечность.

Иногда ее называют параболической скоростью, так как объект, имеющий эту скорость, движется по траектории, близкой к параболе. В астрономии часто используется неблагозвучный термин «скорость убегания». Мы, в основном, будем использовать термин «вторая космическая скорость». Для Земли вторая космическая скорость равна 11,2 км/сек.

Впервые термин «черная дыра» был введен в употребление в 1968 году известным американским физиком Дж. Уилером. Идея черной дыры, как объекта, невидимого для наблюдателя из-за того, что свет не может вырваться из него, возникла после открытия Ньютоном в 1687 году закона всемирного тяготения. Согласно этому закону, тела с массами M и m притягиваются друг к другу с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F = GMm/r^2,$$

где $G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{сек}^2)$ — постоянная гравитации.

В 1783 году английский астроном—любитель, священник и геолог, один из основателей сейсмологии, Джон Митчелл в переписке со своим другом, знаменитым физиком Г. Кавендишем предположил, что в природе должны существовать тела, для которых скорость, необходимая для преодоления гравитационного притяжения, превышает скорость света. Поэтому такие тела должны быть темными, невидимыми для наблюдателя, хотя они могут проявлять себя своим гравитационным воздействием на другие объекты.

Митчелл отметил в этой связи, что подобный темный объект можно было бы обнаружить по движению второй звезды в двойной системе. Забегая вперед, отметим, что именно таким способом в настоящее время и обнаруживаются реальные кандидаты в черные дыры(!).

Позднее, в 1798 году, французский ученый П. Лаплас в своей книге «Изложение системы мира» также высказал и обосновал, основываясь на использовании закона тяготения Ньютона, идею существования темных тел во Вселенной. Как это часто бывает в науке, работа Митчелла оказалась незамеченной, и длительное время основателем гипотезы существования темных звезд считался Лаплас.

Например, в 1973 году известные английские физики

С. Хоукинг и Г. Эллис в своей книге, посвященной математическому описанию структуры пространства–времени, цитировали Лапласа в связи с возможностью существования темных звезд. Однако 10 лет спустя, в 1984 году, на научной конференции в Тулузе известный английский астрофизик М. Рис восстановил справедливость и процитировал работу Митчелла. Сейчас общепризнанно, что предсказателями темных звезд были два ученых: англичанин Митчелл и француз Лаплас. Этот пример иллюстрирует, насколько сильно судьба ученого зависит от капризов фортуны...

Для вывода характеристик темных звезд Митчелл и Лаплас использовали понятие второй космической скорости. Эта скорость вычисляется из условия равенства нулю суммы кинетической E и потенциальной U энергии тела; в этом случае при уходе на бесконечность от тяготеющего тела пробное тело будет иметь нулевую скорость:

$$U + E = -GMm/r + mV^2/2 = 0.$$

Отсюда находится выражение для второй космической скорости V_2 :

$$V_2 = (2GM/r)^{1/2}.$$

Подставив формально в выражение для второй космической скорости вместо V_2 величину скорости света c , получим радиус темного тела r при заданной его массе M :

$$r = 2GM/c^2.$$

Для тела такого радиуса при заданной массе M вторая космическая скорость равна скорости света, поэтому такое тело будет невидимым.

Так поступали Митчелл и Лаплас при вычислении характеристик темного тела. Однако эта процедура неправомерна по двум причинам. Во-первых, при скорости, близкой к скорости света, кинетическая энергия описывается более сложной, так называемой релятивистской формулой. Во-вторых, выражение для потенциальной энергии на тех расстояниях, где достигаются скорости, близкие к скорости света, должно быть заменено более сложной формулой, основанной не на использовании закона Ньютона, а на применении общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна, которая обобщает ньютоновский закон тяготения на случай сильных гравитационных полей и трактует

гравитацию как эффект искривления пространства—времени. Если все сделать правильно и провести соответствующие вычисления, то мы получим выражение для радиуса темного тела, называемого гравитационным радиусом r_g , которое в точности совпадает с выражением, полученным Митчеллом и Лапласом.

Поразительно, что хотя Митчелл и Лаплас исходили из неверных физических предпосылок, они получили абсолютно правильный окончательный результат, поскольку ошибки в выражениях для кинетической и потенциальной энергий в точности скомпенсировали друг друга.

Современные представления

Митчелл и Лаплас, проводя вычисления для определения радиуса темного тела, еще не знали, что скорость света является предельной скоростью распространения взаимодействия в природе. Поэтому современная концепция черной дыры, основанная на решении уравнений ОТО Эйнштейна, гораздо глубже той, что была предложена этими гениальными мыслителями 18-го века: не только свет, но никакой другой сигнал, никакое физическое тело не могут вырваться наружу из черной дыры.

Более того, поскольку, согласно ОТО, ход времени зависит от силы тяжести, с точки зрения далекого наблюдателя течение времени вблизи черной дыры бесконечно замедляется и все процессы для внешнего наблюдателя застывают.

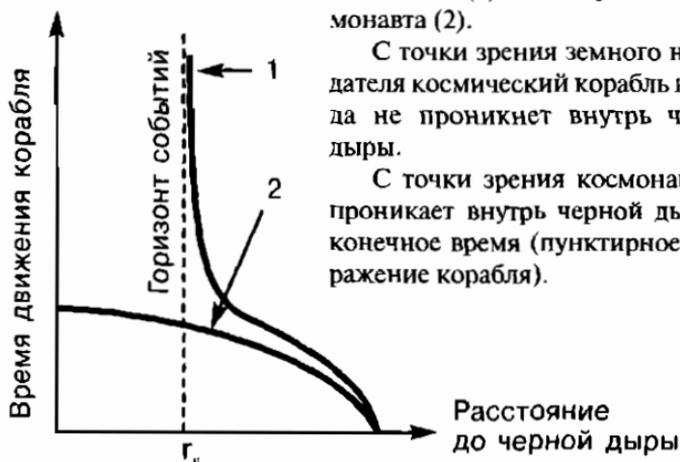
Это означает, что если мы пошлем к черной дыре космический корабль с космонавтами на борту, то по мере его приближения к черной дыре мы, находясь на Земле, увидим, что корабль будет замедлять свое движение.

С точки зрения далекого наблюдателя космический корабль остановится вблизи черной дыры и никогда не проникнет внутрь, поскольку время вблизи черной дыры остановило свой ход для внешнего наблюдателя (рис. 3.1). Любому сколь угодно малому промежутку времени вблизи черной дыры соответствует сколь угодно большой промежуток времени в системе отсчета, связанной с далеким наблюдателем.

Если теперь обратить ситуацию и посмотреть, что увидит космонавт из окна космического корабля, зависшего вблизи черной дыры, то оказывается, что для него события во внешней



Рис. 3.1. Зависимость времени движения космического корабля к черной дыре от расстояния до ее центра с точки зрения земного наблюдателя (1) и движущегося космонавта (2).



С точки зрения земного наблюдателя космический корабль никогда не проникнет внутрь черной дыры.

С точки зрения космонавта он проникает внутрь черной дыры за конечное время (пунктирное изображение корабля).

Вселенной пробегают в чрезвычайно ускоренном темпе: практически в один миг своего времени космонавт, зависший вблизи черной дыры, увидит все бесконечно продолжительное развитие внешней Вселенной. Правда, энергия фотонов, принимаемых космонавтом из внешней Вселенной, сместится в высокоэнергетичную область спектра, и космонавту потребуются специальные приборы, чтобы наблюдать Вселенную.

Космонавт увидит, как распухает наше Солнце, становясь красным гигантом, как Земля испаряется в горячих солнечных лучах, поскольку она скользит по верхним слоям атмосферы умирающего Солнца, как от Солнца отделяется внешняя водородная оболочка и оно превращается в белый карлик — словом, космонавт увидит будущее нашей Вселенной(!).

Таким образом, черная дыра «чувствует» не только прошлое, но и будущее. Поэтому неудивительно, что, в связи с открытием в последние годы большого числа кандидатов в черные дыры,

ученые серьезно рассматривают принципиальную возможность создания машины времени.

Но это еще не все из поистине фантастических свойств черных дыр. В то время как, с точки зрения далекого наблюдателя, космический корабль остановится и никогда не проникнет внутрь черной дыры, с точки зрения самого космонавта, сидящего в падающем на черную дыру корабле, космический корабль свободно проникает внутрь черной дыры, не испытывая каких-либо препятствий.

При этом космонавт увидит внутренность черной дыры и центральную сингулярность — область с формально бесконечной плотностью, куда сжалось исходное вещество, образующее черную дыру (и где царят законы квантовой гравитации). Однако передать какую-либо информацию обо всем увиденном наружу космонавт не сможет, поскольку чтобы сделать это, он должен был бы послать сигнал со скоростью большей скорости света, что запрещено законами физики.



Рис. 3.2. Схема невращающейся черной дыры.

Сингулярность, куда сжалась исходная материя, окружена сферическим горизонтом событий. Вблизи горизонта событий находится фотонная сфера — область пространства, где захваченные фотоны двигаются вокруг черной дыры по замкнутым траекториям.

По мере приближения космонавта к черной дыре на него все сильнее будут действовать приливные силы, обусловленные разностью сил притяжения, действующих на разные части его тела; эти силы стремятся разорвать космонавта.

Внутри черной дыры возможно только движение, причем движение к центру, развернуться назад и вырваться из внутренности черной дыры космический корабль никогда не сможет. Вот уж действительно стопроцентная относительность: с нашей

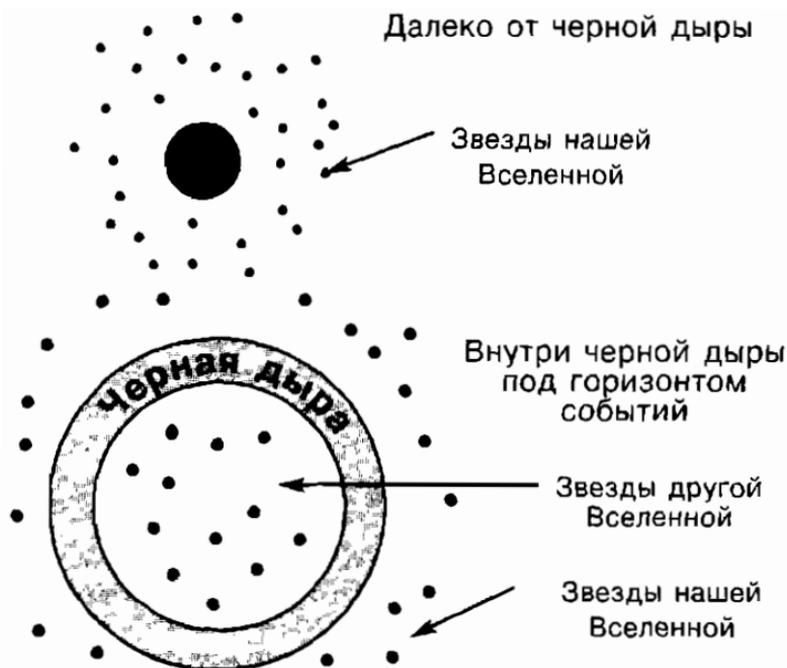


Рис.3.3. Двигаясь под горизонтом событий невращающейся черной дыры со скоростью, близкой к скорости света, космонавт увидит свое будущее и другую Вселенную, а черная дыра проявляет себя в виде темного кольца на небосклоне, разделяющего внешнюю и внутреннюю Вселенные.

точки зрения космический корабль встал вблизи черной дыры, а с точки зрения космонавта он уже давно проник внутрь. О внутренности черной дыры внешний наблюдатель никогда ничего не узнает. В связи с этим уникальным свойством черной дыры возникло понятие горизонта событий. Для невращающейся черной дыры радиус горизонта событий r_h равен гравитационному радиусу r_g , для вращающейся черной дыры $r_h < r_g$.

Все, что расположено и происходит под горизонтом событий, для $r < r_h$, недоступно далекому наблюдателю.

Из опыта нашей жизни мы знаем, что такое горизонт видимости: например, из-за кривизны поверхности земного шара наблюдатель видит лишь небольшую часть океана.

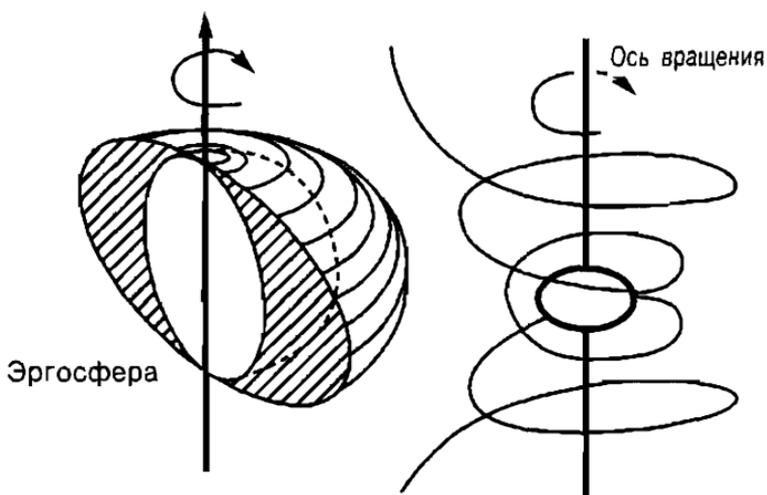


Рис. 3.4. Схематическое изображение вращающейся черной дыры в разрезе.

Слева: Горизонт событий окружен эргосферой, в которой тела, частицы и фотоны непрерывно двигаются, подхваченные вихревым гравитационным полем черной дыры.

Справа: Луч света, проходящий вблизи вращающейся черной дыры, завихряет свое движение.

Поэтому при появления корабля из-под горизонта он видит сначала его мачты, а затем остальные детали корпуса. Все, что расположено под горизонтом, наблюдателю не видно.

Горизонт событий — это такой же горизонт, но в пространстве событий: для далекого наблюдателя доступны лишь события вне горизонта, для $r > r_h$, а события, происходящие «под» горизонтом, для $r < r_h$, ему недоступны.

И уж совсем поразительным свойством черной дыры является то, что если систему координат пространства—времени вне черной дыры продолжить под горизонт событий, то с точки зрения далекого, неподвижного наблюдателя при переходе через горизонт событий пространственная и временная координаты меняются местами.

Если бы космическому кораблю, с точки зрения далекого наблюдателя, удалось проникнуть под горизонт событий (например, после того, как наблюдатель прождал бы бесконечно

большое время), то космонавт с точки зрения далекого наблюдателя двигался бы уже не в пространстве, а во времени(!). Двигаясь внутри невращающейся черной дыры, космонавт увидит другую Вселенную и даже свое будущее (рис. 3.3). Еще более необычны свойства вращающихся черных дыр: у них радиус горизонта событий меньше гравитационного радиуса, при этом горизонт событий помещен внутрь так называемой эргосферы, содержащей вихревое гравитационное поле (рис. 3.4).

Под действием этого вихревого поля все тела, помещенные в эргосферу, должны непрерывно двигаться. Из эргосферы вращающейся черной дыры можно извлекать энергию, причем с огромной эффективностью, в сотни раз превосходящей эффективность выделения энергии при термоядерных реакциях. Если черная дыра вращающаяся, то, двигаясь под горизонтом событий, космонавт может увидеть даже не одну, а много других Вселенных. Следует отметить, однако, что в случае вращающейся черной дыры внешние возмущения могут приводить к неустойчивости ее внутренней структуры пространства—времени. Поэтому возможность путешествия по разным Вселенным внутри вращающейся черной дыры кажется проблематичной.

Иногда высказываются опасения: а не могут ли черные дыры, эти монстры Вселенной, своим чудовищным гравитационным притяжением поглотить Землю и ее обитателей? Эти опасения абсолютно безосновательны. Эффекты, специфичные для черных дыр, начинают сказываться лишь на расстояниях всего в несколько гравитационных радиусов, то есть вблизи черной дыры. На больших расстояниях гравитационное поле черной дыры практически не отличается от ньютоновского, и воздействие черных дыр Галактики и Вселенной на Землю ничем не отличается от воздействия звезд, то есть исчезающе мало. Достаточно сказать, что расстояния от черных дыр до Земли составляют сотни миллиардов их гравитационных радиусов.

Решение Шварцшильда

Описанные свойства черных дыр столь фантастичны, что в возможность существования этих удивительных объектов действительно верится с трудом.

В течение многих десятилетий среди ученых идут ожесточенные споры о том, существуют ли черные дыры в природе.

В последние годы, по крайней мере астрономы, все больше склоняются к мысли, что да, действительно, черные дыры существуют. Однако путь к такому выводу оказался весьма тернистым.

Строгая научная теория черных дыр, основные выводы которой мы изложили выше, появилась лишь в начале XX века после появления ОТО Эйнштейна. В декабре 1915 года, вскоре после публикации Эйнштейном своей знаменитой общей теории относительности, немецкий астроном К. Шварцшильд получил точное решение уравнений ОТО для гравитационного поля сферически-симметричного невращающегося тела.

В общем случае гравитация в ОТО описывается не одним уравнением, как в законе Ньютона, а десятью дифференциальными нелинейными уравнениями в частных производных второго порядка, и получить точные решения этой системы уравнений очень трудно.

Однако, в частном случае строго сферически-симметричного гравитационного поля точное решение получить можно. В решение, полученное Шварцшильдом, входит как фундаментальный параметр гравитационный радиус $r_g = 2GM/c^2$, который также называют шварцшильдовским радиусом.

Поверхность с радиусом r_g , отделяющая доступную часть пространства-времени от недоступной для далекого наблюдателя, называют также сферой Шварцшильда.

То есть сфера Шварцшильда — это горизонт событий для невращающейся черной дыры.

Согласно решению Шварцшильда, сила притяжения F обращается в бесконечность в двух случаях: когда $r = 0$ и $r = r_g$.

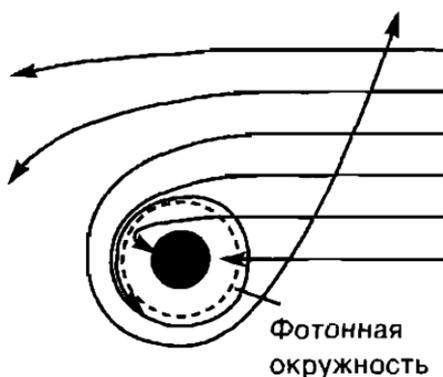


Рис. 3.5. Лучи света вблизи черной дыры загибаются, двигаются по круговым траекториям и даже засасываются в черную дыру.

Особенность (как чаще говорят — сингулярность) при $\Gamma = 0$ имеет место также и для классического закона тяготения Ньютона. В подавляющем большинстве случаев она несущественна, поскольку в случае реальных физических тел, имеющих ненулевые размеры, расстояние Γ никогда не достигает нуля, так как тела соприкасаются своими поверхностями.

Гораздо более существенной является сингулярность при $\Gamma = \Gamma_g$, и именно она определяет описанные выше экзотические свойства черных дыр. При $\Gamma = \Gamma_g$ сила притяжения также становится равной бесконечности. При этом расстояние Γ отлично от нуля. Например, для массы равной 10 солнечным массам, величина гравитационного радиуса равна 30 км. Значительный объем пространства (радиусом 30 км для $M = 10M_\odot$) оказывается отделенным от внешнего наблюдателя бесконечным потенциальным барьером, где сила притяжения $F = \infty$.

Именно этот факт ($F = \infty$) и приводит к тому, что даже свет не может вырваться со шварцшильдовской поверхности, а ход времени на этой поверхности (горизонте событий) останавливается для далекого наблюдателя (рис. 3.5).

Скептицизм усиливается

Внимательный читатель, однако, должен подметить необычность действия бесконечно большой силы при $\Gamma = \Gamma_g$: если для далекого наблюдателя $F = \infty$, то для тела, свободно падающего на черную дыру (вспомним пример с космическим кораблем, приведенный выше) сила притяжения F не достигает бесконечно большого значения. Поэтому падающее тело достигает центра черной дыры за конечное время по своим часам. Таким образом, сингулярность может быть устранена выбором системы отсчета. Поэтому сфера Шварцшильда — это не твердая поверхность, а лишь, как говорят, координатная особенность.

На это обратил внимание замечательный английский астрофизик Артур Эддингтон, который показал, что, используя координатное преобразование, можно устранить сингулярность на горизонте событий черной дыры. Этот известный астрофизик, создатель основ научной теории внутреннего строения и эволюции звезд, всегда откликался на решение самых актуальных проблем физики и астрономии.

Например, Эддингтону принадлежит честь первого надежного определения отклонения лучей света звезд в гравитационном поле Солнца по данным наблюдений полного солнечного затмения. Оказалось, что этот эффект вдвое больше, чем предсказывалось ньютоновской теорией гравитации и в точности согласуется с предсказанием ОТО, что было триумфом ОТО Эйнштейна.

Тем не менее, несмотря на свою тонкую физическую интуицию и врожденную способность чувствовать новое в науке, Эддингтон до конца своей жизни не верил в возможность существования черных дыр. В январе 1934 года на заседании Английского Королевского Астрономического общества после замечательного доклада молодого индийского ученого Чандрасекара о существовании предельной массы белого карлика, откуда следовала возможность существования нейтронной звезды и черной дыры, Эддингтон, признавая результаты работы Чандрасекара правильными, тем не менее, подчеркнул: «Я думаю, что должен существовать Закон Природы, который бы не допускал, чтобы эволюция звезды шла столь абсурдным способом».

Даже великий Эйнштейн, создатель ОТО, из которой следует решение Шварцшильда, признавая правильность и математическую красоту этого решения, с большим сомнением относился к возможности реального существования черных дыр в природе. В своей работе, опубликованной в 1939 году и посвященной выяснению вопроса о том, допускают ли реальные физические модели существование сингулярности Шварцшильда, он пришел к следующему выводу: «основным результатом проведенного исследования является четкое понимание того, что в реальном мире отсутствуют шварцшильдовские сингулярности».

Таким образом, идея черной дыры как реального физического объекта с большим трудом пробивала себе дорогу. В 1939 году американские ученые Оппенгеймер, Волков и Снайдер, рассмотрев сжатие (коллапс) звезды с использованием теории гравитации в рамках ОТО, пришли к выводу о неизбежности формирования черной дыры при коллапсе ядра звезды достаточно большой массы (больше 2–3 солнечных).

Вот что написали Оппенгеймер и Снайдер в аннотации к

своей статье: «после истощения всех источников термоядерной энергии достаточно массивная звезда претерпевает коллапс... Внешний наблюдатель видит, что звезда сжимается до своего гравитационного радиуса».

Далее в статье они подчеркивают, что в то время как внешний наблюдатель будет видеть, что поверхность коллапсирующей звезды приближается к сфере Шварцшильда и застывает, для наблюдателя, движущегося вместе с коллапсирующей материей, никакого «застывания» не будет, и звезда коллапсирует в черную дыру за конечное время. Несмотря на появление этой красивой и убедительной работы, сомнения в отношении теоретической возможности существования черных дыр во Вселенной оставались вплоть до 60-х годов 20-го века.

Даже Дж. Уилер, внесший большой вклад в развитие ОТО и теорию черных дыр, в своей публикации 1958 года все еще утверждал, что, если использовать более реалистическое уравнение состояния коллапсирующего вещества, то можно получить результаты, качественно отличные от тех, что были получены Оппенгеймером и Снайдером относительно формирования черных дыр при коллапсе массивных звезд.

А известный физик Фейнман, ученик Уилера, в своих знаменитых фейнмановских лекциях утверждает, что звезда, образованная не из идеализированного, а из «реального вещества», не может коллапсировать внутрь своей критической поверхности. Лишь в декабре 1967 года Уилер признал теоретическую возможность образования черных дыр при коллапсе ядер звезд достаточно большой массы.

Скептицизм сменяется энтузиазмом

Ослаблению скептицизма в отношении возможности существования черных дыр у многих физиков и астрономов способствовало открытие американским астрономом Мартином Шмидтом в 1963 году знаменитых квазаров — очень активных ядер галактик.

Эти активные ядра излучают больше энергии, чем их родительские галактики, и для объяснения этого явления была предложена гипотеза несферической аккреции (то есть выпадения) вещества на сверхмассивную черную дыру.

Советские ученые академик Я. Б. Зельдович и профессор И. Д. Новиков в 1964 году первыми предложили метод оценки массы сверхмассивной черной дыры в ядре галактики, основанный на сравнении наблюдаемой светимости ядра с его, так называемой эддингтоновской светимостью, при которой сила тяготения уравновешивается силой давления излучения.

Оказалось, что массы квазаров превышают сотни миллионов и миллиарды солнечных масс, а размеры этих компактных объектов, оцениваемые по быстрому изменению светимости, очень малы — меньше 0,01 парсека (1 парсек = 3×10^{18} см), что составляет всего около тысячи соответствующих гравитационных радиусов.

Поскольку устойчивое статическое состояние столь массивного и компактного объекта объяснить очень трудно, ученые стали привлекать для объяснения природы квазаров модель сверхмассивной черной дыры, которая, как впоследствии выяснилось, вполне оправдала их ожидания.

После открытия в 1967 году радиопульсаров — нейтронных звезд, скептицизм многих ученых по поводу существования черных дыр как-то очень быстро сменился энтузиазмом. В самом деле, радиус типичной нейтронной звезды всего в три раза больше радиуса черной дыры такой же массы ($\sim 1 M_{\odot}$).

Поэтому казалось, что достаточно «чуть-чуть» поджечь нейтронную звезду, увеличив ее массу до $3M_{\odot}$, чтобы она сколлапсировала в черную дыру.

В 1963 году австралийский математик Р. П. Керр получил точное частное решение уравнений ОТО, описывающее вращающуюся черную дыру. В 1967 году вышла в свет первая монография по релятивистской астрофизике, опубликованная Зельдовичем и Новиковым, в которой была последовательно рассмотрена теория черных дыр (в этой книге авторы еще не использовали термин «черная дыра», а применяли понятия «коллапсирующая звезда», «застывшая звезда»). В 1983–88 годах был опубликован ряд специальных монографий по теории черных дыр, из которых следует отметить монографию Новикова и Фролова, а также книгу Д. В. Гальцова.

С этого периода физическая и математическая теория черных дыр стала активно развиваться.

Открытие Хоукинга

Из особых достижений в теории черных дыр следует отметить открытие квантового испарения черных дыр, сделанное замечательным английским физиком С. Хоукингом в 1974 году. Оказалось, что ввиду гигантского искривления пространства—времени вблизи горизонта событий черной дыры из физического вакуума должны рождаться реальные частицы, главным образом, фотоны.

Поэтому черная дыра излучает фотоны с некоторой температурой, тем более высокой, чем меньше масса черной дыры.

Фотоны, родившиеся при квантовом испарении черной дыры, уносят энергию, поскольку рождение реального фотона происходит не в точности на горизонте событий (с которого ничего не может улететь), а с некоторой малой окрестности горизонта, определяемой длиной волны Де Бройля частицы (или, на языке квантовой механики, соотношением неопределенности между координатой и импульсом частицы).

Для массивных черных дыр, с массой более 10^{15} грамм (масса средней горы) время квантового испарения больше 10^{10} лет — времени существования Вселенной, поэтому испарение черной дыры звездной массы пренебрежимо мало. Однако все черные дыры с меньшей массой имеют времена квантового испарения менее возраста Вселенной. Поэтому, если в момент рождения Вселенной из-за сильных деформаций метрики пространства—времени формировались первичные черные дыры, то до нашей эпохи должны были дожить лишь черные дыры с массой более 10^{15} грамм.

Предсказание Зельдовича и Салпитера

Параллельно с теоретическими исследованиями физики черных дыр проводились работы по изучению их наблюдательных проявлений. В 1964 году Зельдовичем и независимо Салпитером (США) были опубликованы замечательные работы, в которых было показано, что при несферической аккреции (выпадении) вещества на черную дыру может выделяться гигантская энергия, порядка десяти процентов от mc^2 — энергии покоя падающего вещества, что в десятки раз выше, чем в случае энерговыделения при термоядерных реакциях.

Вещество, двигаясь к черной дыре, достигает вблизи горизонта событий огромной скорости, близкой к скорости света. Столкновение и взаимное трение высокоскоростных потоков вещества приводит к разогреву газа до температур в сотни миллионов градусов и гигантскому выделению энергии.

Эта энергия может излучаться в рентгеновском диапазоне спектра и регистрироваться с бортов космических аппаратов (земная атмосфера непрозрачна для рентгеновского излучения, идущего из космоса). Рентгеновское излучение формируется при высоких температурах и имеет очень короткую длину волны ~ 1 ангстрем (оптическое излучение имеет длину волны около 5000 ангстрем). Таким образом, хотя сама черная дыра невидима, можно наблюдать рентгеновский ореол вокруг нее, обусловленный аккрецией вещества.

В работе Новикова и Зельдовича было также отмечено, что двойные звезды являются очень удобным инструментом исследования черных дыр по двум причинам. Во-первых, нормальная оптическая звезда в двойной системе, содержащей черную дыру, является эффективным источником вещества, которое питает процесс аккреции на черную дыру. Во-вторых, изучая движение оптической звезды методами классической небесной механики, можно определить массу компактного объекта и тем самым идентифицировать его как кандидата в черные дыры.

Так как размеры орбит большинства двойных систем много больше гравитационного радиуса черной дыры, при изучении движения звезд можно использовать закон тяготения Ньютона.

Как отличить черную дыру от нейтронной звезды?

В двойной системе вещество, истекающее из нормальной оптической звезды солнечного типа, образует вращающийся диск вокруг черной дыры (рис. 3.6). Теория дисковой аккреции (выпадения) вещества на нейтронные звезды и черные дыры в двойных системах была развита в 1972-73 годы Н. И. Шакурой и Р. А. Сюняевым, Дж. Принглом и М. Рисом, И. Д. Новиковым и К. Торном.

Скорость движения вещества во внутренних частях такого, как его называют, аккреционного диска достигает огромного

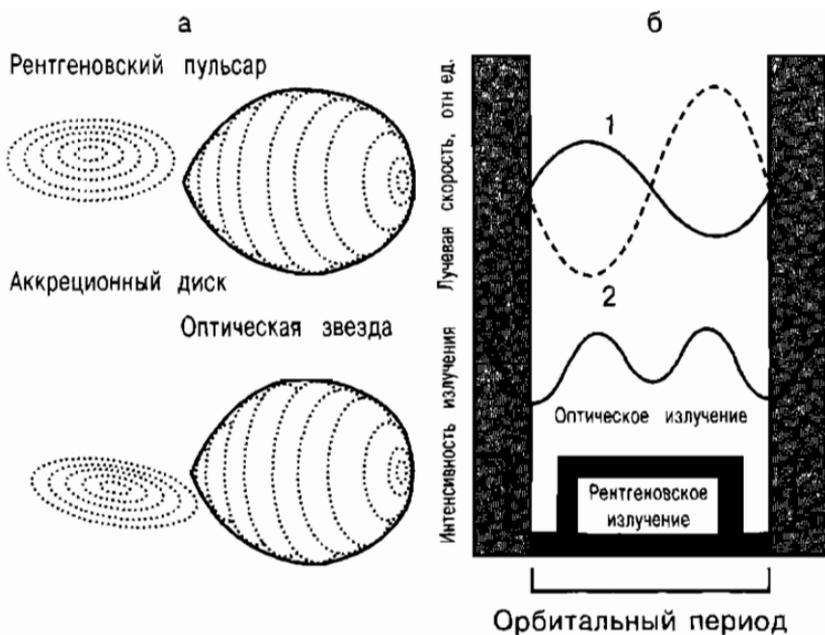


Рис. 3.6. Слева — модель рентгеновской двойной системы с прецессирующим аккреционным диском вокруг релятивистского объекта. Справа — наблюдательные проявления рентгеновской двойной системы, по которым определяется масса нейтронной звезды или черной дыры: кривая изменения потока рентгеновского излучения с затмениями рентгеновского источника оптической звездой, кривая изменения оптического блеска системы, обусловленная деформацией оптической звезды в поле тяжести релятивистского объекта, кривая лучевых скоростей оптической звезды и кривая лучевых скоростей рентгеновского пульсара (показана пунктирной линией).

значения, близкого к скорости света. Взаимное трение слоев диска, обусловленное вязкостью, приводит к разогреву газа до температуры в сотни миллионов градусов, и мощному выделению энергии в рентгеновском диапазоне спектра. Из-за вязкости внутренние части диска тормозятся, что обеспечивает выпадение вещества диска на черную дыру. Основное выделение энергии в виде квантов рентгеновского излучения происходит задолго до того, как вещество достигнет горизонта событий черной дыры, что позволяет излучению уходить на бесконечность и быть зарегистрированным внешним наблюдателем.

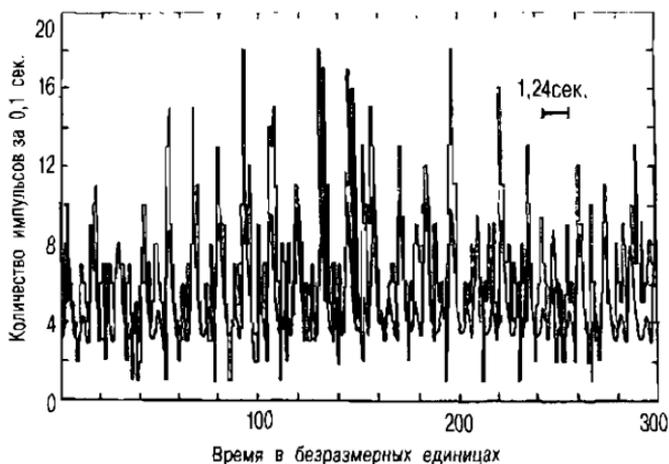


Рис. 3.7. Явление рентгеновского пульсара в рентгеновской двойной системе HerX-1, содержащей быстро вращающуюся сильно намагниченную нейтронную звезду.

Фаза строго периодических изменений интенсивности рентгеновского излучения пульсара держится постоянной на протяжении свыше 30 лет, что свидетельствует о наличии у нейтронной звезды наблюдаемой поверхности.

Если же центральным объектом является не черная дыра, а нейтронная звезда, то выпадение вещества из диска идет на ее поверхность. При сильном магнитном поле вещество из внутренних частей диска перетекает вдоль силовых линий поля к магнитным полюсам. Там оно сталкивается с поверхностью нейтронной звезды, разогревается до температуры в сотни миллионов градусов и образует горячие рентгеновские пятна.

Из-за вращения нейтронной звезды наблюдатель видит эффект маяка: горячие пятна то видны для наблюдателя, то экранируются телом нейтронной звезды. Поэтому аккрецирующая нейтронная звезда с сильным магнитным полем проявляет себя как рентгеновский пульсар: от нее наблюдаются строго периодические импульсы рентгеновского излучения, следующие с периодом вращения звезды (рис. 3.7).

Если же магнитное поле нейтронной звезды слабое, вещество из внутренних частей диска достигает экватора нейтронной звезды, образует там горячий пограничный слой и накапливается на поверхности.

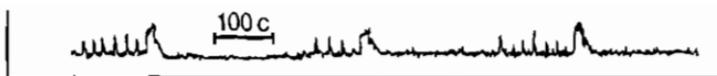


Рис. 3.8. Рентгеновский барстер 1-го типа: короткие и мощные вспышки рентгеновского излучения.

Если темп выпадения не очень велик, вещество, накопленное на поверхности, может испытывать термоядерный взрыв.

Это приводит к явлению рентгеновского барстера 1-го типа: коротким и мощным вспышкам рентгеновского излучения, распределенным нерегулярно во времени (рис. 3.8).

Таким образом, рентгеновский пульсар и рентгеновский барстер 1-го типа являются характерными признаками аккрецирующей нейтронной звезды с наблюдаемой поверхностью. Следует подчеркнуть, что это лишь достаточные, но отнюдь не необходимые признаки наличия наблюдаемой поверхности, поскольку они проявляются не у всех нейтронных звезд.

У аккрецирующих черных дыр явления рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера 1-го типа не должны наблюдаться, поскольку, согласно ОТО (Общей теории относительности), черные дыры не имеют наблюдаемой поверхности, а имеют лишь горизонт событий.

Открытие источника Лебедь X-1

Большинство описанных выше теоретических предсказаний для аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр было сделано до наступления эры рентгеновской астрономии, начало которой связывают с запуском на орбиту вокруг Земли первого специализированного американского рентгеновского спутника «UHURU» в 1971 году. Первый рентгеновский источник, расположенный за пределами солнечной системы, знаменитый объект Скорпион X-1 был открыт в 1962 году с борта американской ракеты «Аэроб». Однако массовое исследование компактных рентгеновских источников в двойных системах началось с 1971 года.

Одним из первых был открыт компактный рентгеновский источник Лебедь X-1, который оказался входящим в двойную систему с орбитальным периодом 5,6 дня, содержащую массивную ($M \approx 30M_{\odot}$) горячую звезду.

Английские астрономы Вебстер и Мардин и, независимо, американский астроном Болтон выполнили спектроскопические наблюдения оптической звезды в системе Лебедь X-1 и по доплеровским смещениям линий в ее спектре определили так называемую функцию масс $f_1(m)$, которая является абсолютным нижним пределом для массы рентгеновского источника:

$$m_1 > f_1(m) = 0,2M_{\odot}.$$

Эта функция масс оказалась много больше, чем для всех других двойных систем с рентгеновскими источниками (их стали называть рентгеновскими двойными системами).

В 1972 году Лютый, Сюняев и Черепашук обнаружили оптические изменения светимости системы Лебедь X-1 с периодом 5,6 дня, вызванные приливной деформацией оптической звезды и ее орбитальным обращением (эффект эллипсоидальности звезды). Оптическая звезда в рентгеновской двойной системе из-за своих больших размеров чаще всего имеет несферическую, эллипсоидальную и даже грушевидную форму. Части звезды, близкие к рентгеновскому источнику, притягиваются им сильнее, что приводит к деформации звезды. Земля также испытывает приливное воздействие со стороны Луны и Солнца, что вызывает хорошо известные явления морских приливов.

По амплитуде изменения светимости и функции масс $f_1(m)$ удалось оценить массу рентгеновского источника $m_1 > 5,6M_{\odot}$.

Специальные тщательные поиски периодических пульсаций рентгеновского излучения от источника Лебедь X-1 не показали явления рентгеновского пульсара: от объекта наблюдались лишь иррегулярные изменения рентгеновского излучения на временах вплоть до 10^{-3} секунды. Не было обнаружено и явления рентгеновского барстера 1-го типа.

Большая масса и отсутствие признаков наблюдаемой поверхности дали серьезные основания считать объект Лебедь X1 «кандидатом №1» в черные дыры.

Снова пессимизм...

То, что первый же детально исследованный компактный рентгеновский источник по всем признакам оказался кандидатом в черные дыры, вселило в ученых большой оптимизм и надежды на то, что дальнейшие наблюдения рентгеновских

двойных систем приведут к обнаружению значительного числа кандидатов в черные дыры. Появилась уверенность, что скоро будут получены окончательные доказательства существования черных дыр. Однако, как это часто бывает в науке, всем этим оптимистическим прогнозам не суждено было оправдаться так быстро, как этого хотелось.

На протяжении целых 11 лет объект Лебедь X-1 оставался единственным известным кандидатом в черные дыры.

Все остальные (несколько десятков) рентгеновские источники в двойных системах при детальном исследовании оказались либо рентгеновскими пульсарами, либо рентгеновскими барстерами 1-го типа, а измеренные массы тех из них, для которых удалось зарегистрировать доплеровские смещения линий в спектре оптической звезды, не превышали $3M_{\odot}$ — теоретического верхнего предела массы нейтронной звезды.

Мир компактных рентгеновских источников в двойных системах оказался состоящим сплошь из нейтронных звезд, и только один объект — Лебедь X-1, как редкий и бесценный бриллиант, был отождествлен с кандидатом в черные дыры.

Поэтому у ученых снова зародились сомнения — почему, несмотря на наличие столь мощных и эффективных средств исследований, в рентгеновских двойных открываются лишь нейтронные звезды? Может быть, черных дыр вообще не существует в природе, а объект Лебедь X-1 является не двойной, а тройной системой, содержащей нейтронную звезду со слабым магнитным полем?

Такая модель системы Лебедь X-1 была предложена в 1974 году группой американских и английских астрономов. Предполагалось, что система Лебедь X-1 состоит из двух массивных нормальных звезд и нейтронной звезды с массой в $1,5M_{\odot}$. Большая функция масс системы отражает суммарную массу нейтронной звезды и второй массивной оптической звезды этой тройной системы. С появлением модели тройной системы для объекта Лебедь X-1 надежды открыть черные дыры сильно ослабли, и первоначальный радостный оптимизм в этой области сменился черным пессимизмом. Черные дыры вновь оказались теми «неуловимыми мстителями», которые наказывали ученых за их чрезмерную самонадеянность.

Долгожданный успех

Лишь спустя 11 лет, в 1983 году, канадской ученой Энн Каули с сотрудниками удалось пробить брешь в этой стене и открыть второго кандидата в черные дыры, LMC X-3, причем не в нашей Галактике, а в другой, ближайшей к нам галактике — Большом Магеллановом Облаке, удаленном от нас на расстояние 55 килопарсек.

Название LMC означает Large Magellanic Cloud. Рентгеновская двойная система LMC X-3 состоит из массивной горячей оптической звезды с массой в $6M_{\odot}$ и рентгеновского источника с массой около $9M_{\odot}$. Орбитальный период системы 1,7 дня. Измеренная функция масс весьма велика $f_v(m) = 2,3 M_{\odot}$.

Почему же поиски черных дыр в течение первого десятилетия эры рентгеновской астрономии оказались столь неэффективными? Как выяснилось впоследствии, это произошло потому, что астрономы искали «там, где светло». Дело в том, что согласно теории звездной эволюции, двойные звезды образуются из межзвездного газа и пыли так, что чаще всего звезды — компоненты пары имеют близкие массы.

Поскольку черные дыры образуются из наиболее массивных звезд, астрономы предполагали, что черные дыры нужно искать в тех рентгеновских двойных системах, у которых массы оптических звезд наибольшие. И они просчитались! Природа оказалась, как всегда, значительно сложнее наших модельных представлений о ней.

К изумлению астрономов оказалось, что наиболее часто черные дыры встречаются в рентгеновских двойных системах со спутниками — маломассивными холодными звездами. Хотя доля двойных систем с большой разницей в массах компонент относительно невелика, из-за большого времени эволюции маломассивного спутника длительность стадии рентгеновской двойной системы в таких случаях значительно больше, чем в случае систем с массивными звездами.

Как только астрономы это поняли (первыми в данном случае оказались американские астрономы Макклиток и Ремиллард, которые в 1986 году открыли черную дыру в маломассивной рентгеновской двойной системе A0620-00), открытия черных дыр в двойных системах стали следовать одно за

другим. Если за первые 11 лет эры рентгеновской астрономии был открыт лишь один кандидат в черные дыры, то за последующие 20 лет число кандидатов возросло до 18.

В среднем в год измеряется масса 1–2 кандидатов в черные дыры, причем в подавляющем большинстве случаев в так называемых транзиентных (то есть временных) рентгеновских двойных системах — рентгеновских новых, со спутниками — маломассивными холодными оптическими звездами.

Наряду с успехами в поисках реальных кандидатов в черные дыры звездной массы (с массами в 5–15 M_{\odot}), в течение последнего десятилетия наметился настоящий прорыв в открытии и исследовании сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик (с массами от миллиона до миллиардов солнечных масс). По движению газа и звезд вблизи ядра галактики удалось оценить массы примерно сотни кандидатов в сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик.

Большую роль в этих исследованиях сыграл космический телескоп имени Хаббла, а также наземные телескопы нового поколения — 10-метровые телескопы Кека в США, телескоп VLT (Very Large Telescope — Очень большой телескоп) Южно-Европейской обсерватории в Чили и т. п.

Полное число кандидатов в черные дыры (звездной массы и сверхмассивных) в настоящее время превышает сотню. Замечательно, что все зарегистрированные наблюдательные проявления известных кандидатов в черные дыры согласуются с предсказаниями ОТО.

Как удачно выразился академик В. Л. Гинзбург, это сильно укрепляет нашу уверенность в реальном существовании черных дыр в природе. Поэтому астрономы, разумеется, с некоторой натяжкой, в настоящее время употребляют термин «черная дыра» вместо более осторожного выражения «кандидат в черные дыры». Хотя все необходимые условия, предсказываемые ОТО для наблюдательных проявлений черных дыр выполняются, достаточных критериев отбора пока не существует. Ученые интенсивно работают над оригинальными космическими и наземными проектами, которые в ближайшем будущем (можно надеяться, в течение ближайшего десятилетия) позволят получить достаточные наблюдательные критерии отбора.

Можно надеяться, что реализация этих проектов позволит окончательно доказать существование черных дыр во Вселенной. Поиск черных дыр представляется особенно интригующей проблемой ввиду того, что в последние годы предложены релятивистские теории гравитации, отличные от ОТО Эйнштейна, в которых отвергается существование черных дыр.

Например, как следует из работ академика Логунова и профессора Грищука, если ввести в уравнения, описывающие гравитационное поле, член, обусловленный ненулевой массой покоя гравитона (кванта гравитационного поля), то горизонт событий исчезает, и коллапсирующий объект большой массы (более $3M_{\odot}$) может иметь наблюдаемую поверхность. Этот вывод радикально отличается от предсказаний ОТО.

Окончательное слово в решении этого спора принадлежит астрономическим наблюдениям. Поэтому дальнейшие наблюдательные программы по исследованию кандидатов в черные дыры представляются весьма перспективными.

Как образуются черные дыры

Из изложенного ясно, что для того, чтобы образовать черную дыру, нужно сжать тело массы M до некоторой критической плотности так, чтобы радиус сжатого тела оказался равным его гравитационному радиусу $r_g = 2GM/c^2$. Величина этой критической плотности тем меньше, чем больше масса черной дыры. Действительно, плотность тела равна его массе, деленной на объем. Таким образом, критическая плотность обратно пропорциональна квадрату массы черной дыры. Точные вычисления дают следующую формулу для критической плотности:

$$\rho_{кр} = 2 \times 10^{16} (M_{\odot}/M)^2 \text{ г/см}^3.$$

Для типичной черной дыры звездной массы ($M = 10M_{\odot}$) гравитационный радиус равен 30 км, а критическая плотность составляет 2×10^{14} г/см³, то есть двести миллионов тонн в кубическом сантиметре. Эта плотность очень велика по сравнению со средней плотностью Земли ($5,5$ г/см³), она равна плотности вещества атомного ядра.

Для черной дыры в ядре галактики ($M = 10^{10}M_{\odot}$) гравитационный радиус равен 3×10^{15} см = 200 а. е., что в пять раз больше расстояния от Солнца до Плутона (примерно 40 а. е.). Критическая плотность при этом равна $0,2 \times 10^{-3}$ г/см³, что в несколько раз меньше плотности воздуха, равной $1,3 \times 10^{-3}$ г/см³ (!).

Для Земли ($M = 3 \times 10^{-6}M_{\odot}$) гравитационный радиус близок к 9 мм, а соответствующая критическая плотность чудовищно велика: $\rho_{кр} = 2 \times 10^{27}$ г/см³, что на 13 порядков выше плотности атомного ядра.

Если мы возьмем некий воображаемый сферический пресс и будем сжимать Землю, сохраняя ее массу, то когда мы уменьшим радиус Земли (6370 км) в четыре раза, ее вторая космическая скорость возрастет вдвое и станет равной 22,4 км/с. Если же мы сожмем Землю так, что ее радиус станет равным примерно 9 мм, то вторая космическая скорость примет значение, равное скорости света $c = 300000$ км/с.

Дальше пресс не понадобится — сжатая до таких размеров Земля уже сама будет сжиматься (в системе отсчета, связанной со сжимающимся веществом). В конце концов, на месте Земли образуется черная дыра, радиус горизонта событий которой будет близок к 9 мм (если пренебречь вращением образовавшейся черной дыры).

В реальных условиях, разумеется, никакого сверхмощного пресса нет. Роль такого пресса играет гравитация. Именно поэтому черные дыры могут образовываться лишь при коллапсе внутренних частей весьма массивных звезд, у которых гравитация достаточно сильна, чтобы сжать вещество до критической плотности.

Эволюция звезд

Черные дыры образуются на конечных стадиях эволюции массивных звезд. В недрах обычных звезд идут термоядерные реакции синтеза химических элементов, в результате чего выделяется огромная энергия и поддерживается высокая температура звездных недр (десятки и сотни миллионов градусов). Силы гравитации стремятся сжать звезду, а силы давления горячего газа и излучения противостоят этому сжатию. Поэтому звезда находится в гидростатическом равновесии.

Кроме того, в звезде может существовать тепловое равновесие, когда темп энерговыделения, обусловленного термоядерными реакциями в ее центре, в точности равен мощности, излучаемой звездой с поверхности. При сжатии и расширении звезды тепловое равновесие нарушается. В стационарной звезде между запасами потенциальной энергии U и тепловой энергии движения частиц газа E_T устанавливается так называемое вириальное соотношение:

$$2E_T = -U.$$

Таким образом, если звезда стационарна, то ее равновесие устанавливается так, что потенциальная энергия звезды (энергия гравитационного сжатия) по абсолютной величине всегда вдвое больше тепловой энергии. Следовательно, стационарная звезда «сидит» в глубокой потенциальной яме, что способствует ее устойчивому существованию и развитию. Например, в двойной звездной системе при перетекании вещества одной звезды на другую звезда может потерять более 50% своей массы. Однако звездный остаток при этом не разваливается, а сохраняется как гравитационно связанный объект именно потому, что запас гравитационной энергии у звезды существенно больше запаса ее тепловой энергии.

Благодаря тому, что отрицательная потенциальная энергия звезды по абсолютной величине вдвое больше ее тепловой энергии, звезда обладает удивительным свойством — отрицательной теплоемкостью. Обычные тела имеют положительную теплоемкость: нагретый кусок железа, остывая, то есть, теряя энергию, понижает свою температуру. У звезды же все наоборот: чем больше она теряет энергии в виде излучения, тем выше становится температура в ее центре.

Эта странная, на первый взгляд, особенность обычных звезд находит простое объяснение: звезда, излучая, теряет энергию и при этом медленно сжимается. При сжатии потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию падения слоев звезды, и недра звезды разогреваются. Поскольку потенциальная энергия звезды по модулю вдвое больше тепловой, тепловая энергия, приобретаемая звездой в результате ее сжатия, вдвое больше той энергии, которая теряется в виде излучения звезды. В итоге температура недр звезды становится тем выше, чем больше она теряет энергии.

Здесь уместно вспомнить задачу о падении искусственного спутника на Землю: из-за потерь энергии на трение в земной атмосфере спутник по спирали приближается к Земле, при этом его скорость, а следовательно, и кинетическая энергия, не убывает, а растет, несмотря на потери из-за трения. Здесь, как и в случае звезды, энергетические потери спутника из-за трения с лихвой компенсируются энергией, которая черпается из потенциальной энергии гравитационного поля.

Благодаря отрицательной теплоемкости в недрах звезды осуществляется непрерывный термоядерный синтез химических элементов, поскольку температура недр медленно, но неуклонно повышается.

Например, реакция преобразования водорода в гелий в нынешнем Солнце идет при температуре 15 миллионов градусов. Когда, через 4 миллиарда лет, в центре Солнца водород весь превратится в гелий, для дальнейшего синтеза атомов углерода из атомов гелия потребуется значительно более высокая температура, около 100 миллионов градусов (электрический заряд ядер гелия вдвое больше, чем ядер водорода, и чтобы сблизить ядра гелия на расстояние 10^{-11} см требуется гораздо большая температура). Именно такая температура будет обеспечена благодаря отрицательной теплоемкости Солнца к моменту зажигания в его недрах термоядерной реакции превращения гелия в углерод.

Белые карлики

Если масса звезды невелика, так что масса ее ядра, затронутого термоядерными превращениями, менее $1,4M_{\odot}$, термоядерный синтез химических элементов может прекратиться из-за так называемого вырождения электронного газа в ядре звезды.

Для электронов справедлив принцип Паули, согласно которому в одном энергетическом состоянии может находиться лишь один электрон. Поэтому распределение электронов по энергиям в веществе с высокой плотностью и достаточно низкой температурой описывается законом Ферми, а не классическим законом Больцмана. Такой электронный газ называется вырожденным и свойства его не совсем обычны. В частности, давление вырожденного газа зависит от плотности, но не зависит от температуры, поскольку энергия квантовых движений электронов много больше энергии их теплового движения.

Высокое давление вырожденного электронного газа, обусловленное квантовыми, а не тепловыми движениями электронов, эффективно противодействует силам гравитационного сжатия. Поскольку давление вырожденного вещества не зависит от температуры, потеря энергии звездой в виде излучения не приводит к сжатию ее ядра. Следовательно, не происходит

гравитационное сжатие, и гравитационная энергия не выделяется в виде добавочного тепла. Поэтому температура в эволюционирующем вырожденном ядре не растет, что приводит к прерыванию цепочки термоядерных реакций.

Внешняя водородная оболочка, не затронутая термоядерными реакциями, медленно отделяется от ядра звезды, удаляется от него и образует планетарную туманность, светящуюся в линиях излучения водорода, гелия и других элементов.

Центральное компактное и сравнительно горячее ядро прореволюционировавшей звезды небольшой массы представляет собой белый карлик — объект с радиусом, равным радиусу Земли ($\sim 10^4$ км), массой менее $1,4M_{\odot}$ и средней плотностью порядка тонны в кубическом сантиметре.

Белые карлики наблюдаются в больших количествах. Их полное число в Галактике достигает 10^{10} , то есть около 10% от всей массы наблюдаемого вещества Галактики (рис. 3.9).

Термоядерное горение в вырожденном белом карлике может быть неустойчивым и приводить к ядерному взрыву достаточно массивного белого карлика с массой, близкой к так называемому чандрасекаровскому пределу ($1,4M_{\odot}$).

Дело в том, что, как уже отмечалось, давление вырожденного вещества не зависит от температуры. Если по какой-то случайной причине в данной точке белого карлика температура слегка возрастет, это приведет к увеличению темпа выделения термоядерной энергии и дальнейшему росту температуры. Поскольку давление не меняется, газ не расширяется, не совершает работу против сил гравитации и не охлаждается.

Такое ничем не ограниченное возрастание температуры приводит к ядерному взрыву белого карлика.

У обычных, невырожденных звезд горячий газ расширяется, совершает работу против сил гравитации и охлаждается, что обеспечивает устойчивое существование звезды.

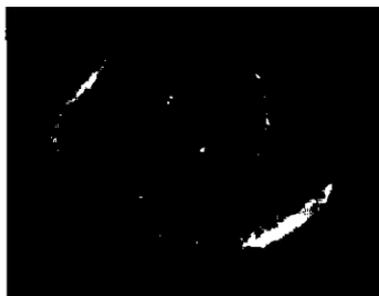


Рис. 3.9. Планетарная туманность с белым карликом в центре.

Термоядерные взрывы белых карликов с массами, близкими к чандрасекаровскому пределу, приводят к явлению вспышек сверхновых I типа, у которых в спектре нет линий водорода, а только линии гелия, углерода, кислорода и других сравнительно тяжелых элементов.

Нейтронные звезды

Итак, эволюция звезды с небольшой массой, в несколько солнечных, когда масса ее ядра менее $1,4M_{\odot}$, приводит к формированию белого карлика. Мы везде подчеркиваем, что нужно рассматривать именно массу проэволюционировавшего ядра звезды, поскольку внешняя водородная оболочка может быть потеряна разными способами в процессе ее эволюции: из-за обмена масс в двойной системе, из-за давления радиации и истечения в виде звездного ветра, из-за действия различных неустойчивостей на некоторых стадиях эволюции звезды, и т. п.

Что же произойдет с более массивной звездой, масса проэволюционировавшего ядра которой превышает $1,4M_{\odot}$? Если ядро звезды вырождено, то при приближении его массы к пределу $1,4M_{\odot}$ обычное вырождение электронного газа в ядре сменяется так называемым релятивистским вырождением.

Квантовые движения вырожденных электронов становятся такими быстрыми, что их скорости приближаются к скорости света. Поскольку скорость света ставит предел нарастанию скоростей движения электронов, упругость газа падает, его способность противодействовать силам гравитации уменьшается, и звезда испытывает гравитационный коллапс. Во время коллапса электроны захватываются протонами, и происходит нейтронизация вещества. Это ведет к формированию из массивного вырожденного ядра нейтронной звезды.

Если же исходная масса звезды велика, превышает $10M_{\odot}$, то в ее ядре достигается высокая температура, и вырождение электронов в ядре звезды не происходит на протяжении всей ее эволюции. В этом случае работает отрицательная теплоемкость: по мере потери энергии звездой в виде излучения температура в ее недрах растет, и идет непрерывная цепочка термоядерных реакций превращения водорода в гелий, гелия в углерод, углерода в кислород и так далее, вплоть до элементов группы железа.

Реакция термоядерного синтеза ядер элементов, более тяжелых, чем железо, идет уже не с выделением, а с поглощением энергии. Поэтому, если масса ядра звезды, состоящего в основном из элементов группы железа, превышает чандрасекаровский предел $1,4M_{\odot}$, но меньше так называемого предела Оппенгеймера–Волкова $\sim 3M_{\odot}$, то в конце ядерной эволюции звезды происходит гравитационный коллапс ядра, в результате которого внешняя водородная оболочка звезды сбрасывается, что наблюдается как вспышка сверхновой звезды II типа, в спектре которой наблюдаются мощные линии водорода.

Коллапс железного ядра приводит к формированию нейтронной звезды. В нейтронной звезде силам гравитационного притяжения противодействует градиент давления вырожденного нейтронного вещества. Огромные силы давления вырожденного нейтронного вещества обусловлены тем, что нейтроны, как и электроны, обладают полуцелым спином и подчиняются принципу Паули, согласно которому в данном энергетическом состоянии может находиться только один нейтрон.

При сжатии массивного ядра звезды, достигшей поздней стадии эволюции, температура поднимается до гигантских значений, достигающих миллиардов градусов, когда ядра атомов начинают разваливаться на нейтроны и протоны. Протоны поглощают электроны, превращаются в нейтроны, испуская при этом нейтрино. Нейтроны же, согласно квантово–механическому принципу Паули, при сильном сжатии начинают эффективно отталкиваться друг от друга.

Когда масса коллапсирующего ядра меньше $3M_{\odot}$, скорости нейтронов значительно меньше скорости света и упругость вещества, обусловленная эффективным отталкиванием нейтронов, может уравновесить силы гравитации и привести к образованию устойчивой нейтронной звезды.

Впервые возможность существования нейтронных звезд была предсказана в 1932 году выдающимся советским физиком Ландау сразу после открытия нейтрона в лабораторных экспериментах. Радиус нейтронной звезды близок к 10 км, ее средняя плотность составляет сотни миллионов тонн в кубическом сантиметре.

Черные дыры

Когда масса коллапсирующего ядра звезды больше $3M_{\odot}$ (современное значение предела Оппенгеймера—Волкова для массы нейтронной звезды, предсказываемое ОТО), то, согласно существующим представлениям, образующаяся нейтронная звезда, остывая, коллапсирует в черную дыру. Коллапсу нейтронной звезды в черную дыру способствует также обратное падение части оболочки звезды, сброшенной при взрыве сверхновой.

Нейтронная звезда, как правило, быстро вращается, поскольку породившая ее обычная звезда может иметь значительный угловой момент $I\omega$, где I — момент инерции звезды ($I \approx 0,1 MR^2$), ω — угловая скорость ее вращения. Когда ядро звезды коллапсирует в нейтронную звезду, характерные размеры звезды уменьшаются от $R = 10^5 \div 10^6$ км до $R \approx 10$ км.

С уменьшением размера звезды уменьшается ее момент инерции I . Для сохранения момента количества движения должна резко вырасти скорость осевого вращения. Вспомним, как убыстряется вращение фигуриста на льду, когда он прижимает руки к телу. Например, если Солнце, вращающееся с периодом около месяца, сжать до размеров нейтронной звезды, то из условия $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$ получим, что период вращения уменьшится до 10^{-3} секунды.

Поскольку при образовании нейтронной звезды размеры уменьшаются от 10^6 до 10 км, из условия сохранения потока магнитного поля: $H_1R_1^2 = H_2R_2^2$, где $H_1 \approx 100$ Гаусс, $R_1 \approx 10^6$ км, получим, что магнитное поле нейтронной звезды радиусом $R_2 = 10$ км достигает очень больших величин $H_2 \approx 10^{12}$ Гаусс.

Одиночные нейтронные звезды проявляют себя как радиопульсары — источники строго периодических импульсов радиоизлучения, возникающих при преобразовании энергии быстрого вращения нейтронной звезды в направленное радиоизлучение. В двойных системах аккрецирующие нейтронные звезды демонстрируют феномен рентгеновского пульсара и рентгеновского барстера I-го типа (см. выше).

У черной дыры строго периодических пульсаций излучения ожидать не приходится, поскольку черная дыра не имеет наблюдаемой поверхности и магнитного поля.

Как часто выражаются физики, черные дыры не имеют «волос» — все поля и все неоднородности вблизи горизонта событий излучаются при формировании черной дыры из коллапсирующей материи в виде потока гравитационных волн.

В итоге, у образовавшейся черной дыры имеются лишь три характеристики: масса, угловой момент и электрический заряд. Все индивидуальные свойства коллапсирующего вещества при образовании черной дыры забываются: например, черные дыры, образовавшиеся из железа и из воды, имеют при прочих равных условиях абсолютно одинаковые характеристики.

Как предсказывает ОТО, звезды, массы железных ядер которых в конце эволюции превышают $3M_{\odot}$, испытывают неограниченное сжатие (релятивистский коллапс) с образованием черной дыры. Это объясняется тем, что в ОТО силы гравитации, стремящиеся сжать звезду, определяются плотностью энергии, а при громадных плотностях вещества, достигаемых при сжатии столь массивного ядра звезды, главный вклад в плотность энергии вносит уже не энергия покоя частиц, а энергия их движения и взаимодействия.

Получается, что в ОТО давление вещества при очень больших плотностях как бы само «весит»: чем больше давление, тем больше плотность энергии и, следовательно, тем больше силы гравитации, стремящиеся сжать вещество. Кроме того, при сильных гравитационных полях становятся принципиально важными эффекты искривления пространства—времени, что также способствует неограниченному сжатию ядра звезды и превращению его в черную дыру (рис. 3.10).

В заключение отметим, что черные дыры, образовавшиеся в нашу эпоху (например, черная дыра в системе Лебедь X-1), строго говоря, не являются стопроцентными черными дырами, поскольку из-за релятивистского замедления хода времени для далекого наблюдателя горизонты событий у них еще не сформировались. Поверхности таких коллапсирующих звезд выглядят для земного наблюдателя как застывшие, бесконечно долго приближающиеся к своим горизонтам событий.

Чтобы черные дыры из таких коллапсирующих объектов сформировались окончательно, мы должны прождать все бесконечно большое время существования нашей Вселенной.

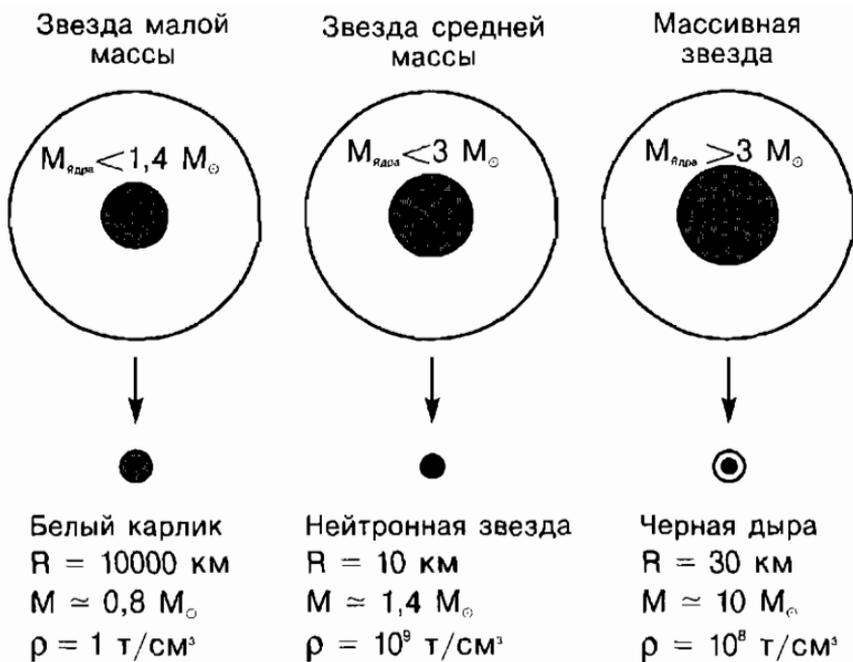


Рис. 3.10. Образование белого карлика, нейтронной звезды и черной дыры из звезд разных масс.

Напомним, что средняя плотность черной дыры определяется выражением $\rho_{\text{кр}} = 2 \times 10^{16} (M_{\odot}/M)^2 \text{ т/см}^3$.

Следует подчеркнуть, однако, что уже в первые секунды релятивистского коллапса поверхность коллапсирующей звезды для наблюдателя с Земли приближается очень близко к горизонту событий, и все процессы на этой поверхности бесконечно замедляются.

Как искать черные дыры

Как уже отмечалось, известно три типа черных дыр:

1. Черные дыры звездной массы $M = 3 \div 50 M_{\odot}$, образующиеся на поздних стадиях эволюции массивных звезд.
2. Сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик ($M = 10^6 \div 10^{10} M_{\odot}$).
3. Первичные черные дыры, сформировавшиеся на ранних стадиях образования Вселенной. Как уже отмечалось, до нашей эпохи должны были дожить лишь черные дыры с массой $M > 10^{15}$ грамм ввиду действия квантового механизма испарения, предложенного Хоукингом.

С наблюдательной точки зрения о первичных черных дырах известно очень мало.

В последнее время обсуждается вопрос о существовании черных дыр промежуточных масс $M = 10^2 \div 10^4 M_{\odot}$. Такие черные дыры могут существовать в околядерных областях галактик или в центрах массивных шаровых звездных скоплений. Пока окончательно вопрос о существовании черных дыр промежуточных масс не решен.

С астрономической точки зрения, чтобы обнаружить черную дыру, нужно:

1. Измерить массу M объекта.
2. Показать, что его радиус не превышает гравитационного радиуса $r_g = 2GM/c^2$.
3. Получить наблюдательные свидетельства того, что у объекта нет наблюдаемой поверхности, а имеется «практически» горизонт событий.

Массы черных дыр измеряются надежно по движению газа и звезд вблизи них. Так как в большинстве случаев характерные расстояния велики ($r \gg r_g$), для определения масс черных дыр достаточно использовать закон тяготения Ньютона.

В последнее время появилась возможность измерять массы одиночных черных дыр по эффектам гравитационного микролинзирования. Когда луч света от далекой звезды фона проходит вблизи более близкой черной дыры, он искривляется в ее гравитационном поле. Это приводит к возрастанию и последующему падению блеска далекой звезды.

Длительность такого изменения блеска при микролинзировании пропорциональна корню квадратному из массы передней черной дыры и при ее массе в $6M_\odot$ имеет величину порядка года. Измеряя эту длительность, можно оценить массу черной дыры. Сейчас уже имеются оценки масс трех черных дыр, выполненные таким способом: $M \approx 6M_\odot$.

Радиусы черных дыр измерять очень трудно. Пока используются лишь относительно грубые ($r < 10 \div 100r_g$) косвенные оценки: изучение мощной рентгеновской светимости и спектра рентгеновского излучения при выпадении вещества на черные дыры, анализ изменения светимости в рентгеновском диапазоне, исследование профилей спектральных линий в рентгеновском диапазоне и т. п.

Пока астрономы не имеют достаточных критериев отбора черных дыр, но следует подчеркнуть, что все необходимые критерии, сформулированные на основе ОТО, выполняются для всех известных кандидатов в черные дыры.

Черные дыры — объекты астрономических наблюдений

Особо оговорим, какой смысл астрономы-наблюдатели вкладывают в понятие «черная дыра». Хотя черные дыры «почти» открыты, окончательных доказательств их существования во Вселенной пока не получено. Тем не менее, астрономы с некоторой натяжкой применяют термин «черная дыра» к тем массивным и компактным объектам, для которых все известные к настоящему времени наблюдательные проявления согласуются с предсказаниями ОТО для черных дыр.

При этом главные наблюдательные критерии для черных дыр следующие:

1. Черные дыры звездной массы — в большинстве случаев поглощающие вещество соседней звезды компактные объекты в двойных звездных системах: большая масса ($M > 3M_{\odot}$), мощное (светимость $L_x = 10^{36} \div 10^{39}$ эрг/с) рентгеновское излучение при отсутствии явлений рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера 1-го типа, а также малый ($r < 10 \div 100 r_g$) радиус, оцениваемый, как правило, по быстрым изменениям жесткого рентгеновского излучения на временах $10^{-2} - 10^{-3}$ секунды.

В рентгеновских двойных системах также наблюдается явление рентгеновского барстера 2-го типа, которое вызвано проявлением неустойчивости в аккреционном диске вокруг компактного объекта и не связано с его наблюдаемой поверхностью. Рентгеновский барстер 2-го типа легко отличить от барстера 1-го типа по характерной зависимости температуры рентгеновского излучения от его интенсивности.

2. Сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик — большая масса ($\sim 10^6 \div 10^{10} M_{\odot}$), большое отношение массы к светимости ($M/L > 10 \div 1000$) для ядер спокойных галактик или полная светимость, близкая к эддингтоновскому пределу для ядер активных галактик, а также малый радиус, оцениваемый по быстрым изменениям излучения или с помощью прямых измерений размеров ядерной области методами высокого углового разрешения.

Наблюдательные исследования черных дыр ведутся в двух направлениях.

1. Поиски массивных компактных объектов — кандидатов в черные дыры. Здесь к настоящему времени имеется большой успех: число кандидатов в черные дыры (в рентгеновских двойных системах и в ядрах галактик) уже превышает 100.

2. Поиски достаточных критериев, позволяющих однозначно судить о том, что найденные кандидаты в черные дыры являются реальными черными дырами. Здесь много трудностей, но есть прогресс и большие надежды возлагаются на будущие космические рентгеновские, интерферометрические и гравитационно-волновые эксперименты.

Забегаая вперед, отметим, что на основе современных наблюдений с учетом наблюдательной селекции можно заключить, что в нашей Галактике, состоящей из 10^{11} звезд, имеется $\sim 10^{10}$ белых карликов, $\sim 10^8$ нейтронных звезд и $\sim 10^7$ черных дыр.

Определение масс черных дыр в ядрах галактик

Существуют два основных способа определения масс ядер галактик.

1. В предположении, что движение газа и звезд вблизи ядра контролируется его гравитационным полем, между скоростями V звезд или газовых облаков, окружающих ядро, и их расстоянием r от ядра должно выполняться соотношение $V^2 \sim G^{-1}$, следующее из закона тяготения Ньютона.

С помощью современных наблюдательных средств (космический телескоп Хаббл, крупнейшие наземные телескопы нового поколения с системами компенсации атмосферных искажений, межконтинентальные радиointерферометры для наблюдений мегамазеров и т. п.) во многих случаях удается непосредственно увидеть движущийся газ, а в случае ядра нашей Галактики, и отдельные звезды вблизи ядра.

Поэтому масса ядра находится прямым использованием закона тяготения Ньютона.

2. Второй метод оценки массы ядра галактики основан на гипотезе, что светимость ядра близка к эдингтоновскому пределу, при котором сила давления излучения уравнивает силу гравитационного притяжения ядра. У галактических ядер наибольшую светимость имеют квазары — до $10^{47} \div 10^{48}$ эрг/с (светимость ядра нашей Галактики $< 10^{35}$ эрг/с). Оценка массы по этой гипотезе для квазаров дает $M_x \geq 10^9 M_\odot$.

Как уже отмечалось, такой метод оценки массы квазара был впервые предложен Зельдовичем и Новиковым в 1964 г.

Определение масс черных дыр в рентгеновских двойных системах

Рентгеновская двойная система состоит из нормальной оптической звезды и аккрецирующей черной дыры или нейтронной звезды. Поскольку вблизи нейтронных звезд и черных дыр

гравитационные поля очень велики, а скорость движения вещества близка к скорости света, свойства этих объектов описываются законами не обычной, а релятивистской физики. Поэтому нейтронные звезды и черные дыры принято называть релятивистскими объектами.

Оптическая звезда деформирована в гравитационном поле релятивистского объекта и имеет грушевидную форму. Поверхность деформированной звезды близка к поверхности так называемой полости Роша — области, где гравитационное поле звезды преобладает. Если частица выходит за пределы полости Роша, она уже принадлежит всей двойной системе в целом и может попасть на вторую звезду из-за совместного действия сил гравитационного притяжения и центробежных сил, обусловленных орбитальным вращением системы. Поэтому оптическая звезда истекает на релятивистский объект, вокруг которого образуется аккреционный диск.

Расстояния до рентгеновских двойных систем очень велики, поэтому компоненты рентгеновской двойной системы отдельно не видны — система видна как одиночный точечный объект. По доплеровским смещениям линий в спектре оптической звезды измеряется кривая ее лучевых скоростей, а фотометрические наблюдения позволяют построить кривую блеска системы.

При орбитальном движении в двойной системе звезда движется то навстречу земному наблюдателю, то удаляется от него. Когда звезда движется навстречу наблюдателю, из-за действия эффекта Доплера линии в спектре звезды смещаются в синюю часть спектра, а когда звезда удаляется, линии смещаются в красную часть спектра.

Те, кто встречали своих родственников и друзей на железнодорожном вокзале, знают, что при приближении локомотива звук его гудка становится все более высоким, а при удалении локомотива звук гудка резко понижается. Это также есть проявления эффекта Доплера — звук, как и свет, представляет собой колебания, регистрируемая частота которых зависит от скорости источника относительно наблюдателя.

Если свет рентгеновской двойной системы с помощью спектрографа разложить в спектр, то, измеряя доплеровские смещения линий в спектре оптической звезды можно построить

зависимость ее скорости вдоль луча зрения от времени, которая называется кривой лучевых скоростей. Измеряя же с помощью электрофотометра полный поток оптического излучения рентгеновской двойной системы, можно построить зависимость этого потока (или, как говорят, блеска) от времени, которая называется кривой блеска.

Модель рентгеновской двойной системы, используемая при интерпретации ее оптической кривой блеска и кривой лучевых скоростей, учитывает четыре причины изменения оптических характеристик.

Во-первых, эффект эллипсоидальности оптической звезды, он связан с деформацией ее формы в гравитационном поле черной дыры; во-вторых, эффект «отражения», связанный с прогревом оптической звезды мощным рентгеновским излучением аккрецирующего релятивистского объекта и орбитальным движением компонент; в-третьих, взаимные затмения компонент; в-четвертых, прецессию аккреционного диска (аккреционный диск может быть наклонен к плоскости орбиты и медленно прецессировать, тогда в разных орбитальных циклах вклад диска в суммарный поток будет различным).

Эффекты эллипсоидальности и «отражения» были впервые обнаружены в рентгеновских двойных системах Лебедь X-1 и Геркулес X-1 советскими астрономами в 1972 году. Эти эффекты оказались типичными оптическими проявлениями рентгеновских двойных систем, они помогают осуществлять их надежное отождествление.

К настоящему времени с бортов специализированных рентгеновских спутников открыты многие сотни рентгеновских двойных систем. Космические рентгеновские и наземные оптические наблюдения в данном случае прекрасно дополняют друг друга: наличие мощного рентгеновского источника (со светимостью в сотни тысяч раз превышающей светимость Солнца) указывает на присутствие в двойной системе массивного объекта малых размеров (менее радиуса Земли), а спектральные и фотометрические наземные наблюдения оптического спутника позволяют измерить массу рентгеновского источника. Если его масса превышает $3M_{\odot}$, он может считаться кандидатом в черные дыры.

Таким образом, к настоящему времени развит мощный аппарат исследования рентгеновских двойных систем, который позволяет получать надежные оценки масс релятивистских объектов, в том числе, черных дыр.

Об определении радиусов черных дыр

Задача прямых определений радиусов сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик не кажется безнадежной. Ввиду своих огромных масс, черные дыры в ядрах близких галактик имеют угловые размеры, более 10^{-6} угловой секунды. Это делает перспективным создание соответствующих космических интерферометров для прямых измерений радиусов горизонтов событий черных дыр или, по крайней мере, радиусов последней устойчивой орбиты для них (для невращающейся черной дыры радиус последней устойчивой орбиты равен трем гравитационным радиусам).

В частности, гравитационный радиус у черной дыры в ядре нашей Галактики ($M_{\text{ч}} = 2,6 \times 10^6 M_{\odot}$) составляет 8×10^6 км или 0,05 а. е. Соответствующий угловой размер для расстояния до центра Галактики в 8 килопарсек составляет 6×10^{-6} секунды.

Угловой размер гравитационного радиуса черной дыры в ядре галактики Туманность Андромеды при массе черной дыры $M_{\text{ч}} = 7,5 \times 10^7 M_{\odot}$ составляет 3×10^{-6} секунды.

Эти величины вполне могут быть измерены будущими поколениями космических интерферометров. Например, планируемое угловое разрешение американского рентгеновского космического интерферометра будет достигать 10^{-7} секунды. Угловое разрешение российского интерферометра Радиоастрон будет порядка 10^{-6} секунды в радиодиапазоне. Реализация этих проектов планируется в ближайшее десятилетие.

Применение таких мощных технических средств к исследованию ядер галактик в будущем даст принципиальную возможность наблюдать физические процессы вблизи горизонта событий. Применение современных методов повышения углового разрешения, в том числе межконтинентальные радиоастрономические наблюдения, позволяет дать пока лишь грубые ограничения на радиусы черных дыр в ядрах галактик: $r < 10^3 - 10^4 r_g$.

Недавно с борта американского спутника «CHANDRA» было обнаружено значительное (в пять раз за время $\Delta t = 10$ минут) изменение интенсивности рентгеновского излучения ядра нашей Галактики. В этом случае можно оценить размер области, излучающей рентгеновский поток вблизи черной дыры: $r < c\Delta t$, что составляет всего $20r_g$. Таким образом, радиус массивного компактного тела в ядре нашей Галактики не превышает 20 гравитационных радиусов, что подкрепляет вывод о существовании там черной дыры.

Быстрое изменение интенсивности излучения также наблюдается для ядер некоторых активных галактик, значит их характерные размеры не превышают величины $c\Delta t$. Если бы размеры излучающей области были велики, излучение от разных частей области усреднялось бы, и быстрое изменение излучения было бы невозможно: известно, что звезды мерцают, а планеты — нет, потому что угловые размеры планет много больше, чем звезд.

Например, в ядре активной галактики Mkn478 по данным, полученным со спутников, наблюдались короткие вспышки рентгеновского излучения на временах порядка 500–800 сек. Тогда радиус ядра этой галактики $r < c\Delta t = 1,5 \times 10^{13}$ см. Поскольку масса черной дыры здесь равна $6 \times 10^7 M_\odot$, соответствующий гравитационный радиус равен $1,8 \times 10^{13}$ см. Отсюда делается вывод, что черная дыра в ядре галактики Mkn478 является вращающейся, поэтому горизонт событий в данном случае меньше гравитационного радиуса (!).

Другая возможность оценки радиуса черной дыры в ядре галактики связана с изучением редких явлений изменения наблюдаемого излучения ядер спокойных галактик, связанных с пролетом и разрушением вблизи черной дыры отдельных звезд галактики. Всего к настоящему времени насчитывается 5 транзитных (то есть временных) ядер галактик.

При пролете звезды вблизи сверхмассивной черной дыры последовательно происходят следующие явления: деформация звезды, ее разрушение, выпадение части вещества звезды на черную дыру с последующим захватом и, соответственно, гравитационным энерговыделением. Частота разрушения звезд вблизи сверхмассивной черной дыры в ядре галактики составляет 1 звезда за 10^4 лет на среднюю галактику.

Поскольку температура соответствующего аккреционного диска на трех гравитационных радиусах составляет $\sim 3 \times 10^5$ К, энерговыделение происходит в жестком ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах спектра.

В случае черных дыр звездной массы прямые измерения их радиусов представляют собой практически безнадежную задачу, поскольку угловой размер черной дыры с массой $10 M_{\odot}$, расположенной на типичном расстоянии 1 килопарсек составляет ничтожно малую величину $\sim 2 \times 10^{-10}$ угловой секунды. Кроме того, ввиду высокой плотности вещества во внутренних частях аккреционного диска ближайшие окрестности черной дыры могут быть в принципе ненаблюдаемы.

Поэтому для оценки радиусов черных дыр звездной массы применяют косвенные методы. Наиболее простой и надежный метод оценки основан на определении минимального времени изменения рентгеновской светимости. Например, в двойной системе Лебедь X-1 минимальное время рентгеновских изменений в низком состоянии системы, когда рентгеновский спектр жесткий и степенной, $\Delta t \approx 10^{-3}$ секунды. Тогда можно оценить характерные размеры источника:

$$r < c \Delta t = 300 \text{ км} = 10 r_g.$$

В заключение, еще раз подчеркнем, что в отличие от нейтронных звезд, у аккрецирующих черных дыр не должно наблюдаться явлений рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера 1-го типа, поскольку черные дыры не обладают наблюдаемыми поверхностями.

От аккрецирующих черных дыр можно ожидать лишь быстрого иррегулярного изменения рентгеновского излучения на временах вплоть до значений $r_g/c \approx 10^{-4}$ секунды для черных дыр звездной массы.

Сверхмассивные черные дыры в ядрах активных галактик

Галактики в большинстве случаев имеют в центральных частях компактные сгущения звезд и газа, которые принято называть ядрами (рис. 3.11).

Среди галактик выделяется сравнительно немногочисленная ($\sim 1\%$ от общего числа) группа галактик с активными ядрами.

В активных ядрах наблюдаются мощные нестационарные процессы, приводящие к высокой светимости ядер во всех диапазонах спектра. Хотя галактики с активными ядрами сравнительно немногочисленны, их изучение принципиально важно для выяснения природы галактических ядер.

Все галактики с активными ядрами показывают изменения оптического излучения ядер на временах от нескольких суток до многих лет. По максимальной скорости изменений (минимальному времени изменений Δt) оценивается характерный размер излучающей области $r \leq c\Delta t$, который составляет $3 \times 10^{15} \div 10^{17}$ см, то есть менее 0,1 парсека. Ввиду столь малого объема, в котором выделяется гигантская энергия, требуется привлечение особых механизмов энерговыделения.

Одним из таких механизмов принято считать выпадение вещества звезд и газа на сверхмассивную черную дыру, расположенную в ядре галактики. Поскольку эффективность энерговыделения при этом на два порядка выше, чем при ядерных реакциях, механизм аккреции вещества на черную дыру наиболее часто применяется для объяснения гигантской светимости квазаров и ядер активных галактик.

Мощное излучение ядра активной галактики затрудняет прямое изучение движения отдельных звезд или газовых облаков вблизи ядра, необходимое для оценки его массы. Однако в данном случае можно изучать движение газовых облаков вблизи ядра галактики опосредованно, наблюдая профили линий излучения в оптическом спектре ядра и изучая их изменения. Газовые облака вблизи ядра галактики двигаются по различным орбитам (круговым, эллиптическим и т. п.) с разными скоростями. Чем больше масса ядра галактики, тем больше при заданном расстоянии от ядра скорости движения газовых облаков. С увеличением расстояния r скорости газовых облаков в

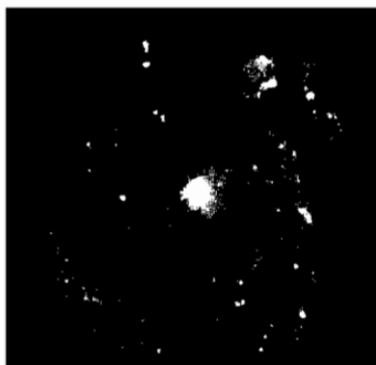


Рис. 3.11. Типичная спиральная галактика с хорошо выраженным ядром, в центре которого находится сверхмассивная черная дыра.

среднем убывают по кеплеровскому закону $V^2 \sim r^{-1}$, что позволяет оценить массу ядра:

$$M_{\text{я}} = \eta v^2 r / G,$$

где параметр $\eta = 1 \div 3$ учитывает модель движения газовых облаков (для движения по круговой орбите $\eta = 1$).

В соответствии с эффектом Доплера, движение газового облака вблизи ядра галактики приводит к смещению спектральных линий, излучаемых облаком, относительно их лабораторных положений. Для облаков, двигающихся вдоль луча зрения, эти доплеровские смещения максимальны, для облаков, двигающихся поперек луча зрения, они близки к нулю.

В итоге эмиссионная линия от всех облаков, двигающихся вокруг ядра галактики уширяется. По ширине линии можно оценивать среднестатистическую скорость движения облаков газа вблизи ядра галактики.

Чтобы оценить массу ядра нужно знать среднее расстояние газовых облаков от ядра галактики. Это можно сделать двумя способами. Можно построить теоретическую модель ядерной области и сравнить теоретическое спектральное распределение интенсивности с наблюдаемым. Так поступал известный советский астрофизик Дибай, который выполнил первые оценки масс ядер активных галактик.

Менее модельно зависимым методом определения r , широко применяемым в настоящее время, является так называемый метод эхокартирования ядра галактики, который использует информацию о запаздывании изменений интенсивности линий излучения относительно изменений интенсивности непрерывного спектра.

Из-за нестационарных процессов вблизи ядра галактики, центральный источник излучения является сильно переменным. Это излучение нагревает и возбуждает окружающие ядро газовые облака, что приводит к заметным изменениям в их эмиссионном спектре.

Если облака расположены в среднем на расстоянии r от ядра, то изменения в частотах их эмиссионных линий должны отставать от изменений непрерывного спектра центрального ядра на время, равное времени пролета Δt жестких ионизирующих квантов ядра до газовых облаков.

Тогда расстояние r газовых облаков от ядра оценивается простой формулой: $r \approx c\Delta t$. По этому значению r можно оценить и массу центрального ядра галактики M_x .

Впервые эффект запаздывания был открыт Лютым и Черепашуком в 1972 году. К настоящему времени с использованием описанного эффекта, надежно определены массы примерно трех десятков ядер галактик, которые лежат в диапазоне $10^7 \div 10^8 M_\odot$. В таблице 3.1 приведены массы черных дыр в ядрах активных галактик, найденные по эффекту запаздывания.

Оказалось, что между светимостью ядра активной галактики и его массой существует статистическая зависимость: чем больше масса ядра, тем больше оптическая светимость.

Массы сверхмассивных черных дыр в ядрах «нормальных» галактик

В случае «нормальных» галактик, у которых оптическое излучение ядер невелико по сравнению со звездной компонентой, можно непосредственно наблюдать движущиеся звезды и газ вблизи ядра. Это дает возможность получить наиболее надежные оценки масс черных дыр.

С борта космического телескопа Хаббл с высоким угловым разрешением в несколько сотых секунды в последние годы были открыты газопылевые диски вокруг ядер многих галактик, вращающихся по кеплеровскому закону, когда скорости в диске описываются формулой $v^2 \sim r^{-1}$. Радиусы этих структур лежат в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен парсек.

Наблюдая распределение лучевых скоростей путем исследования доплеровских смещений линий излучения, определяют массу, вокруг которой вращается диск.

Возможность прямого наблюдения околоядерной области позволяет также оценить отношение массы к светимости $M(r)/L(r)$ (где M и L – в солнечных единицах) и сравнить его с соответствующей величиной для внешних частей галактики ($M/L \approx 1 \div 10$).

Первой галактикой, у которой околоядерный газопылевой диск использовался для определения массы ядра, была галактика M87. Американский астроном Х. Форд с сотрудниками в 1994 году открыл дискообразную спиральную газопылевую

Таблица 3.1. Массы сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик, определенные методом эхо-картирования.

Название объекта	Запаздывание $\tau_{\text{сст}}$, дни	$M_{\text{ч.д}}$ ($10^7 M_{\odot}$)	Расстояние, Мпс
3C120	43,8	3,1	138
Akn120	38,6	19,3	135
F9	17,1	8,7	200
Mrk79	18,1	10,5	91
Mrk110	19,5	0,80	148
Mrk335	16,8	0,39	107
Mrk509	79,3	9,5	144
Mrk590	20,5	1,4	109
Mrk817	15,5	3,7	131
NGC3227	10,9	4,9	21
NGC3783	4,5	1,1	39
NGC4051	6,5	0,14	17
NGC4151	3,0	1,2	20
NGC5548	21,5	6,8	70
NGC7469	5,0	0,76	67
PG0804+762	100	21,9	430
PG0953+414	107,1	15,5	1118

Примечание: $\tau_{\text{сст}}$ — характерное время запаздывания переменности широкой компоненты линии излучения водорода относительно переменности непрерывного спектра, $M_{\text{ч.д}}$ — масса центральной черной дыры.

1 Мпс = 3,26 миллионов световых лет.

структуру, радиусом около 1 угловой секунды (73 парсека), окружающую ядро М87.

Спектры, полученные в разных частях этой структуры показали, что она вращается по кеплеровскому закону, причем лучевые скорости в двух диаметрально противоположных точках структуры $v = \pm 500$ км/с на расстоянии $r = 0,25$ угловой секунды (18 парсек) от ядра. Отсюда нашли массу ядра $M_c = (3,2 \pm 0,9) \times 10^9 M_\odot$, и отношение массы к светимости $M/L > 110$, много больше, чем для внеядерных областей галактики, что говорит о значительном избытке темной материи по сравнению со звездной компонентой в ядре.

Оцененная средняя плотность темного вещества в измеренной ядерной области галактики составляет $\sim 10^7 M_\odot/\text{пс}^3$, что в сто миллионов раз выше плотности звезд в окрестностях Солнца в нашей Галактике и в сто раз больше плотности звезд в самых плотных известных звездных скоплениях.

Все эти данные дают основания утверждать, что в ядре галактики М87 находится сверхмассивная черная дыра, аккреция вещества на которую является ответственной за многочисленные виды активности ядра М87.

К настоящему времени таким методом определены массы нескольких десятков ядер галактик.

Выдающиеся результаты по измерению масс черных дыр в ядрах галактик были получены в последние годы группой американских астрономов во главе с Дж. Мораном при изучении компактных мазерных источников методом межконтинентальной радиоастрономии.

Суть метода состоит в использовании многих телескопов, разнесенных на межконтинентальные расстояния и работающих в режиме единого интерферометра. Такой метод позволяет получать огромное разрешение, лучше 10^{-3} секунды.

Оказалось, что внутри газопылевых дисков, вращающихся вокруг ядер некоторых галактик, наблюдаются компактные области, из которых наблюдаются узкие и очень интенсивные линии излучения, характерные для мазеров, с которыми физики работают в лабораториях (мазер — то же самое, что и лазер, только в СВЧ-диапазоне). Для работы мазера нужно особое возбуждение атомных уровней рабочего вещества.

Оказывается, такие же процессы могут происходить не только в лабораторных условиях, но и в космосе.

Наблюдения ядра галактики NGC4258 с беспрецедентным угловым разрешением 200 микросекунд и спектральным разрешением 0,1 км/с выявили, что 17 компактных мазерных источников, излучающих чрезвычайно узкие линии водяного пара на длине волны 1,35 см, расположены в дискообразной оболочке радиусом $\sim 10^{17}$ см, видимой почти с ребра и вращающейся по кеплеровскому закону.

Внутренний орбитальный период 800 лет, внешний – 2200 лет. Наклонение оси диска к лучу зрения $i = 89^\circ$. Масса центральной черной дыры равна $3,5 \times 10^7 M_\odot$ (рис. 3.12).

Хотя внутренняя часть диска вращается с периодом 800 лет, огромная точность измерения положений мазерных источников позволила измерить их угловое перемещение на картинной плоскости за несколько лет наблюдений. Это дало возможность независимо определить расстояние до ядра галактики с точностью 4%. К настоящему времени этим методом исследованы 7 галактик, массы ядер которых лежат в пределах $(10^6 \div 3,5 \times 10^7) M_\odot$.

В окрестностях ядер галактик движется не только газ, но и звезды. У далеких галактик не представляется возможным наблюдать движение отдельных звезд, но можно изучать распределение средней дисперсии (разброса) скоростей многих звезд,

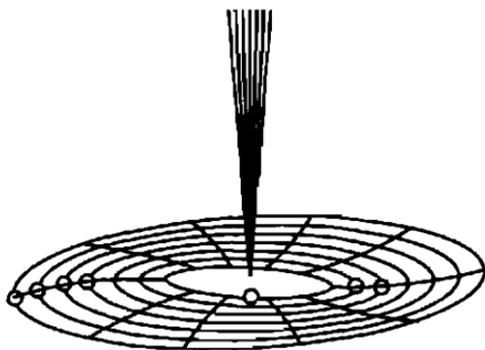


Рис. 3.12. Молекулярный газовый диск с компактными мазерными источниками вокруг сверхмассивной черной дыры в центре галактики NGC4258. (Дж. Моран и др.)

наблюдая доплеровское уширение линий поглощения в суммарном спектре окооядерной области.

Каждая звезда в отдельности имеет сравнительно узкие линии поглощения в своем спектре. Однако, поскольку звезд много и каждая из них движется со скоростями от десятка до многих сотен км/с, линии поглощения в суммарном спектре всех звезд уширяются: чем ближе к ядру, тем больше дисперсия скоростей звезд и тем больше ширина линий поглощения в суммарном спектре звезд.

По закону нарастания дисперсии скоростей звезд к центру галактики можно оценить массу ее ядра. В последние годы такие работы по измерению масс ядер галактик ведутся на космическом телескопе Хаббл с помощью двух приборов: FOS (спектрограф слабых объектов) — спектрографа с длинной входной щелью и STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph) — многощелевым спектрографом высокого разрешения.

Таким методом измерены массы нескольких десятков ядер галактик. В таблице 3.2. приведены массы черных дыр в ядрах некоторых «нормальных» галактик, определенные по движению газа и звезд.

Сверхмассивная черная дыра в ядре нашей Галактики

Ядро нашей Галактики расположено гораздо ближе к нам, чем другие галактики, поэтому здесь удается различать отдельные звезды и детально изучать их движение около ядра, что позволяет дать наиболее надежную оценку его массы. Эта задача очень непростая. Поскольку ядро нашей Галактики скрыто от земного наблюдателя мощным слоем межзвездной пыли, оно не видно в оптическом диапазоне и только в инфракрасном диапазоне, для которого пыль прозрачна, можно непосредственно увидеть звезды вблизи ядра.

Кроме того, чтобы детально проследить движения звезд, наиболее близких к ядру, нужно наблюдать ядро Галактики с максимальным угловым разрешением — в несколько сотых секунды.

Поэтому для изучения движения звезд вблизи ядра нашей Галактики используются крупнейшие наземные телескопы и

Таблица 3.2. Массы сверхмассивных черных дыр, определенные по кинематике газа и звезд.

$M_B(\text{bulge})$ — звездная величина балджа галактики, σ_* — дисперсия скоростей звезд балджа, $M_{\text{ч.д.}}$ — масса центральной черной дыры.

Галактика	Расстояние, Мпс	M_B (bulge)	σ_* , км/с	$M_{\text{ч.д.}}$ ($10^7 M_\odot$)
Milky Way	0,008	-17,65	103	0,18
NGC221=M32	0,81	-15,83	75	0,25
NGC224=M31	0,76	-19,00	160	4,5
NGC821	24,1	-20,41	209	3,7
NGC1023	11,4	-18,40	205	4,4
NGC1068	15,0	-18,82	151	1,5
NGC2778	22,9	-18,59	175	1,4
NGC2787	7,5	-17,28	140	4,1
NGC3115	9,7	-20,21	230	100
NGC3245	20,9	-19,65	205	21
NGC3377	11,2	-19,05	145	10
NGC3379	10,6	-19,94	206	10
NGC3384	11,6	-18,99	143	1,6
NGC3608	22,9	-19,86	182	19
NGC4258	7,2	-17,19	130	3,9
NGC4261	31,6	-21,09	315	52
NGC4291	26,2	-19,63	242	31
NGC4342	15,3	-17,04	225	30
NGC4459	16,1	-19,15	186	7,0
NGC4473	15,7	-19,89	190	11
NGC4486=M87	16,1	-21,53	375	300
NGC4564	15,0	-18,92	162	5,6
NGC4596	16,8	-19,48	152	7,8
NGC4649	16,8	-21,30	385	200
NGC4697	11,7	-20,24	177	17
NGC4742	15,5	-18,94	90	1,4
NGC5845	25,9	-18,72	234	24
NGC6251	93,0	-21,81	290	53
NGC7052	58,7	-21,31	266	33
NGC7457	13,2	-17,69	67	0,35
IC1459	29,2	-21,39	340	250

применяются инфракрасные панорамные приемники излучения, а также специальные методы компенсации атмосферных искажений изображения.

Именно с использованием таких мощных наблюдательных средств в последнее время удалось получить наиболее убедительные свидетельства наличия сверхмассивной черной дыры, массой около трех миллионов солнечных масс, в ядре нашей Галактики.

Наблюдения начались с 1992–93 годов двумя группами немецких и американских ученых. Оказалось, что звезды вблизи ядра Галактики заметно перемещаются, причем скорость движений звезд в среднем больше для звезд, более близких к ядру (рис. 3.13). Была измерена дисперсия скоростей собственных движений 90 звезд как функция расстояния до ядра Галактики, которая прекрасно согласуется с дисперсией лучевых скоростей этих звезд, измеренных спектральным методом, по доплеровским смещениям линий поглощения.

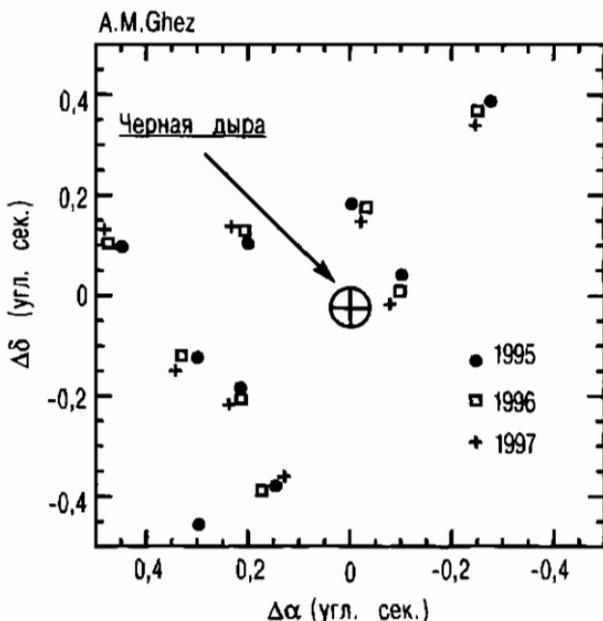


Рис. 3.13. Наблюдаемые в 1995–1997 гг. движения звезд вблизи сверхмассивной черной дыры массой $\sim 3 \times 10^6 M_{\odot}$ в центре нашей Галактики. $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ — угловые расстояния. (Гез и др.)

Это доказывает, что распределение скоростей звезд вблизи ядра изотропно, что согласуется с теоретическим распределением.

Сравнение наблюдаемого распределения дисперсии скоростей звезд вблизи ядра с теоретическим позволяет дать надежную оценку массы черной дыры в центре нашей Галактики, которая составляет $2,6 \times 10^6 M_{\odot}$ (напомним, что M_{\odot} означает масса Солнца).

Некоторые наиболее близкие к ядру звезды (в пределах 0,01 парсека) движутся со скоростями, превышающими 1000 км/с. Астрометрические перемещения трех звезд вблизи ядра Галактики оказались криволинейными, что дало возможность определить не только скорости этих звезд, но и их ускорения на орбитах, вызванные притяжением ядра Галактики.

В самое последнее время по наблюдениям 1992–2002 годов удалось построить орбиту движения одной звезды (S2) вокруг сверхмассивной черной дыры в ядре Галактики (рис. 3.14).

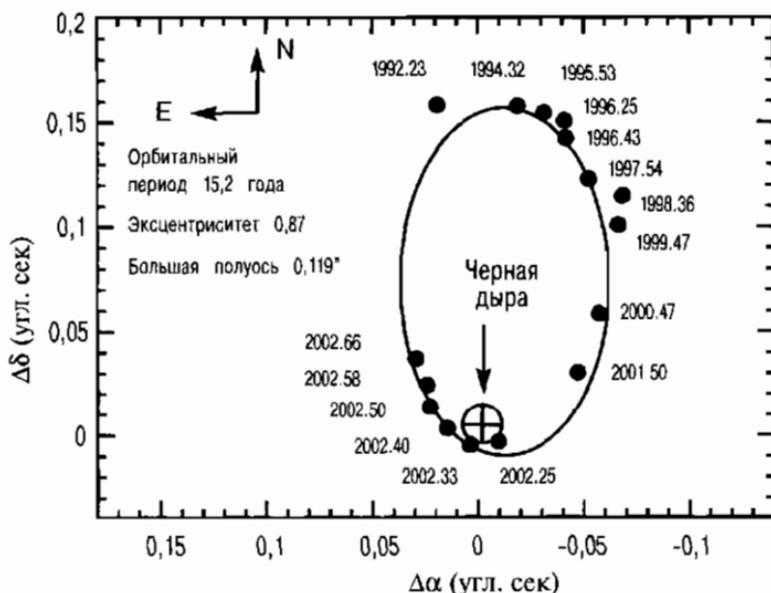


Рис. 3.14. Наблюдаемая в 1992–2002 гг. орбита звезды S2 вокруг сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики. $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ — угловые расстояния. (Шодель и др.)

Орбитальный период оказался равным 15,2 года, минимальное расстояние от черной дыры равно $0,6 \times 10^{-3}$ парсек (120 а. е.), что лишь в три раза больше радиуса Солнечной системы.

Масса черной дыры, независимо определенная по третьему закону Кеплера, равна $3,7 \times 10^6 M_{\odot}$, что хорошо согласуется с прежними определениями.

Оцененная на основе этих данных плотность в ядре Галактики на 18 порядков больше средней плотности звезд в окосолнечной окрестности и на 12 порядков превышает плотность звезд в самых плотных известных звездных скоплениях.

Эта плотность столь велика, что если бы в центре Галактики существовала не сверхмассивная черная дыра, а скопление отдельных темных тел (белых карликов низкой светимости, нейтронных звезд и черных дыр звездной массы), то это скопление всего за 10^5 лет испарилось бы (рассеялось) за счет коллективных взаимодействий объектов или сколлапсировало бы в сверхмассивную черную дыру. Поскольку возраст Галактики порядка 10^{10} лет, модель ядра Галактики в виде скопления объектов должна быть отвергнута.

Следовательно, в случае нашей Галактики доказано прямыми наблюдениями, что сверхмассивный компактный и темный объект в ее центре должен быть не скоплением звезд, а единым телом радиусом менее 20 гравитационных радиусов.

Если это не черная дыра, то что это такое? Будущие наблюдения ядра нашей Галактики с помощью космического рентгеновского интерферометра с угловым разрешением 10^{-7} секунды позволят непосредственно наблюдать процессы аккреции вещества вблизи этого сверхмассивного и чрезвычайно компактного объекта и окончательно решить вопрос о существовании черной дыры массой около трех миллионов солнечных масс в центре нашей Галактики.

Новейшие данные по звездным черным дырам

Перейдем теперь к рассмотрению наблюдательного статуса черных дыр звездной массы, которые изучаются в рентгеновских двойных системах. Черные дыры обнаруживаются в рентгеновских двойных системах двух типов:

1. Квазистационарные рентгеновские двойные системы со спутниками — массивными горячими звездами спектральных классов О-В (системы Cyg X-1, LMC X-1, и др.).

2. Транзиентные (то есть временные, вспыхивающие) рентгеновские двойные системы — рентгеновские новые, со спутниками, маломассивными холодными звездами спектральных классов А-М (системы A0620-00, V404 Cyg и др.).

Характерной особенностью типичной рентгеновской новой является наличие рентгеновских вспышек, когда рентгеновская светимость системы L_x быстро (за несколько суток) увеличивается от очень малой величины (менее 10^{30} – 10^{33} эрг/с, спокойное состояние системы) до 10^{37} – 10^{39} эрг/с в максимуме. В этот момент рентгеновский источник становится одним из самых ярких в Галактике.

Затем рентгеновская светимость системы спадает в течение нескольких месяцев к исходному уровню, на котором она пребывает в течение нескольких лет. Иногда, спустя 2–3 месяца, наблюдаются вторичные вспышки.

Во время рентгеновской вспышки наблюдается вспышка оптического излучения, вызванная прогревом мощным рентгеновским излучением поверхности оптической звезды и аккреционного диска вокруг релятивистского объекта.

Это позволяет проводить надежное отождествление рентгеновского источника с оптической звездой. Напомним, что ввиду очень малого углового расстояния между компонентами рентгеновской двойной системы (менее 10^{-5} секунды дуги), двойная система видна как один объект.

В спокойном состоянии рентгеновская светимость мала, эффекты рентгеновского прогрева незначительны, и в оптическом спектре двойной системы видны линии поглощения оптической звезды, а также линии излучения водорода, гелия и других элементов, характерные для вращающегося аккреционного диска. В составе рентгеновских новых встречаются как нейтронные звезды, так и черные дыры.

Запуск первого специализированного рентгеновского спутника UHURU в 1971 году привел, как уже отмечалось, к открытию около сотни рентгеновских двойных систем. К настоящему времени, благодаря запуску ряда спутников нового поколения

известно несколько тысяч рентгеновских двойных систем в нашей Галактике и других ближайших галактиках.

К настоящему времени измерены массы у 18 черных дыр в рентгеновских двойных системах, которые лежат в диапазоне $(4 \div 16) M_{\odot}$ (таблица 3.3). На рис. 3.15 приведена зависимость масс 19 нейтронных звезд и 18 черных дыр от масс спутников в рентгеновских двойных системах.

Таблица 3.3. Параметры двойных систем с черными дырами.

P_{orb} — орбитальный период, M_1 , M_2 — массы черной дыры и оптической звезды соответственно.

Система	P_{orb} , дни	M_1 (M_{\odot})	M_2 (M_{\odot})	Расстояние, св. годы	Примеч.
Cyg X-1	5,6	16	33	6000	стационар.
LMC X-3	1,7	9	6	160000	стационар.
LMC X-1	4,2	7	22	160000	стационар.
SS433	13,1	11	19	15000	стационар.
A0 620-00	0,3	10	0,6	2000	транзит.
GS 2023+338	6,5	12	0,7	12000	транзит.
GRS 1124-68	0,4	7	0,8	6000	транзит.
GS 2000+25	0,3	10	0,5	6000	транзит.
GRO J0422+32	0,2	10	0,4	6000	транзит.
GRO J1655-40	2,6	6,3	2,4	7000	транзит.
H 1705-250	0,5	6	0,4	9000	транзит.
4U 1543-47	1,1	5,4	~2,5	3000	транзит.
GRS 1009-45	0,3	4,1	0,6	6000	транзит.
SAX J1819.3-2525	2,8	9,6	6,5	30000	транзит.
XTE 1118+480	0,17	6,8	~0,3	6000	транзит.
GRS 1915+105	33,5	14	1,2	36000	транзит.
XTE J1550-564	1,54	9,6	~1	6000	транзит.
XTE J1859+226	0,38	10	~0,7	6000	транзит.

Из рисунка видно, что нет зависимости масс релятивистских объектов от масс их спутников: и нейтронные звезды, и черные дыры встречаются в двойных системах со спутниками разной массы. Также нет зависимости между массой черной дыры и массой спутника в рентгеновских двойных системах. В этом смысле тесные двойные системы с нейтронными звездами и черными дырами подобны классическим тесным двойным системам, где встречаются любые комбинации компонент.

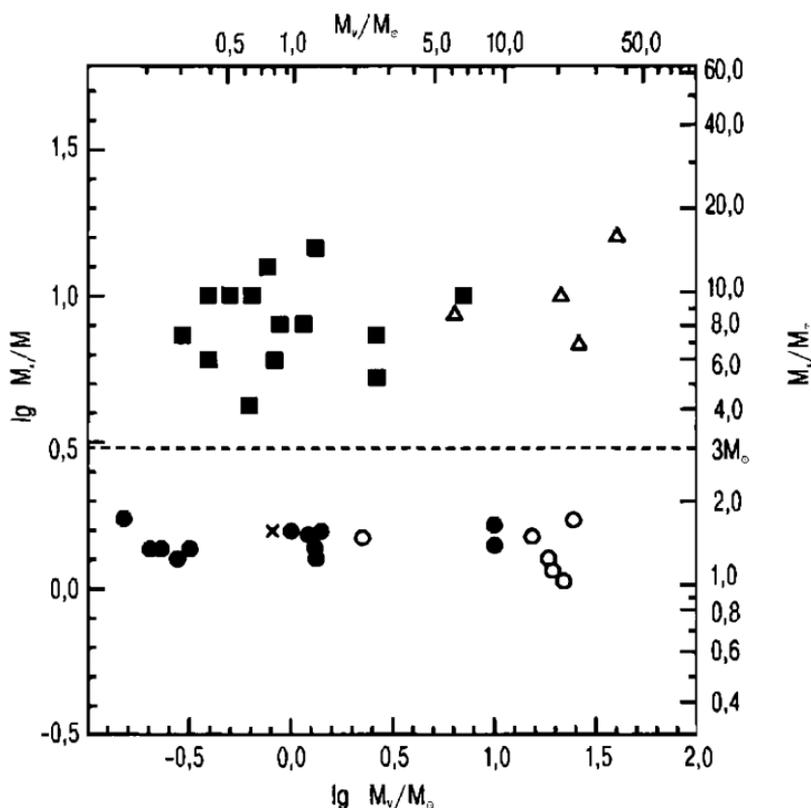


Рис. 3.15. Массы релятивистских объектов как функция масс спутников в двойных системах. Светлые кружки — рентгеновские пульсары, темные кружки — радиопулсары, крестик — рентгеновский барстер I-го типа. Светлые треугольники соответствуют черным дырам в квазистационарных рентгеновских двойных системах с массивными горячими звездами. Черные квадратики — черным дырам в рентгеновских новых.

Накопление сведений о массах релятивистских объектов в двойных системах укрепляет нашу уверенность в том, что черные дыры существуют. Действительно, во всех случаях, когда удается надежно измерить массу рентгеновского пульсара, радиопулсара или рентгеновского барстера 1-го типа (19 объектов — нейтронных звезд), масса такого компактного объекта, обладающего наблюдаемой поверхностью, не превышает $3M_{\odot}$ — абсолютного верхнего предела массы нейтронной звезды, предсказываемого ОТО Эйнштейна. Таким образом, в полном согласии с ОТО, измеренные массы нейтронных звезд, не превышают теоретического верхнего предела $3M_{\odot}$ (!).

В то же время, ни у одного (!) из 18 массивных компактных рентгеновских источников в двойных системах не наблюдается феноменов рентгеновского пульсара, радио пульсара или рентгеновского барстера 1-го типа, также в полном согласии с ОТО. Таким образом, ни один из 18 известных массивных компактных рентгеновских источников в двойных системах не показывает признаков наблюдаемой поверхности.

Большое число массивных компактных объектов (18) делает этот вывод весьма значимым. Подчеркнем также, что наблюдаются и более тонкие различия в наблюдательных проявлениях аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр, связанные с формой спектров их излучения. Эти различия также согласуются с предсказанием ОТО, что нейтронные звезды имеют наблюдаемую поверхность, а черные дыры таковых не имеют, а имеют лишь горизонт событий. Значимость вывода об отсутствии у массивных компактных объектов наблюдаемых поверхностей будет возрастать по мере дальнейшего накопления наблюдательных данных о массах релятивистских объектов.

Поэтому дальнейшие наблюдения и исследования рентгеновских двойных систем представляются в высшей степени перспективными для окончательного решения проблемы существования черных дыр во Вселенной.

Демография черных дыр

Ввиду большого числа (свыше 100) массивных компактных объектов с измеренными массами и оцененными радиусами (кандидатов в черные дыры) в последние годы получает развитие

новое направление в астрофизике — демография черных дыр. Как известно, демография обычно изучает разные виды народонаселения Земли и связь между ними.

Аналогично, демография черных дыр исследует статистические свойства этих объектов, их связь с другими объектами Вселенной — звездами, звездными агрегатами, галактиками разных типов и т. п.

Прежде всего, суммируем основные наблюдаемые характеристики черных дыр звездной массы и сверхмассивных черных дыр. К настоящему времени (май 2003 года) измерены массы 18 черных дыр в рентгеновских двойных системах, которые лежат в интервале $(4 \div 16)M_{\odot}$. Радиусы этих «тяжелых» релятивистских объектов не превышают $3000 \div 300$ км, что составляет $100 \div 10$ гравитационных радиусов.

Ни один из этих 18 «тяжелых» компактных объектов — кандидатов в черные дыры, в согласии с ОТО, не проявляет признаков наблюдаемой поверхности — рентгеновского пульсара, радиопулсара или рентгеновского барстера 1-го типа. В то же время, компактные объекты — нейтронные звезды, для которых наблюдаются признаки наблюдаемой поверхности (19 объектов), имеют массы, не превышающие $3M_{\odot}$ — абсолютного верхнего предела массы нейтронной звезды, предсказываемого ОТО. Таким образом, нейтронные звезды и черные дыры различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном количественном согласии с предсказанием ОТО: вблизи значения массы $3M_{\odot}$ наблюдается разрыв в наблюдательных проявлениях релятивистских объектов.

К маю 2003 года измерены массы около сотни сверхмассивных ($m_{\text{ч}} = 10^6 \div 10^{10}M_{\odot}$) компактных ($r < 10 \div 100 r_g$) объектов в ядрах галактик. Большое отношение массы к светимости позволяет заключить, что ядра этих галактик не могут быть скоплениями обычных звезд.

В ядрах двух галактик — нашей и галактики NGC4258, где удалось наблюдать движения звезд и компактных мазерных источников непосредственно вблизи ядра с наибольшим угловым разрешением, измеренная плотность вещества, заключенного в ядерной области, превышает $10^{17}M_{\odot}/\text{пс}^3$ для ядра нашей Галактики и $4,9 \times 10^{12}M_{\odot}/\text{пс}^3$ для ядра галактики NGC4258.

Радиусы сверхмассивных компактных объектов, измеренные по быстрым изменениям светимости, не превышают нескольких гравитационных радиусов. В частности, радиус ядра нашей Галактики, оцененный по быстрым изменениям его рентгеновской светимости, не превышает 20 гравитационных радиусов.

В ядрах ряда активных галактик ширина профиля линии железа на энергии 6,4 килоэлектронвольт соответствует скорости вращения газа во внутренних частях аккреционного диска порядка 100000 км/с или 1/3 скорости света. Это свидетельствует о чрезвычайной компактности сверхмассивного тела в ядре галактики.

Кроме того, широкая компонента линии железа в данном случае смещена в низкоэнергичную часть спектра на значительную величину. Если это смещение обусловлено гравитационным смещением в поле тяжести центрального сверхмассивного объекта, то радиус этого объекта не превышает 3–6 гравитационных радиусов.

Все эти наблюдательные данные сильно укрепляют нашу уверенность в реальном существовании черных дыр звездной массы и сверхмассивных черных дыр во Вселенной.

Сверхмассивные черные дыры

Рассмотрим демографию сверхмассивных черных дыр. Существует корреляция между массой сверхмассивной черной дыры и массой балджа галактики (рис. 3.16). Балдж — это сферическое сгущение старых звезд малой массы вблизи ядра, двигающихся с большими скоростями в сотни км/с. Звезды балджа имеют возраст, близкий к возрасту Вселенной.

Масса центральной сверхмассивной черной дыры в ядре галактики составляет приблизительно 0,12% массы балджа. Наличие подобной корреляции ставит серьезные ограничения на механизмы образования сверхмассивных черных дыр. В частности, представляется вполне вероятной модель роста сверхмассивной черной дыры в результате слияния менее массивных объектов и аккреции вещества в иерархических моделях формирования галактики, когда галактика образуется путем объединения ряда меньших галактик.

Массы сверхмассивных черных дыр не коррелируют с массами галактических дисков, которые состоят из звезд, более молодых, чем звезды балджа галактики. Для ядер активных галактик существует корреляция между массой центральной сверхмассивной черной дыры и светимостью ядра: светимость ядра возрастает с массой черной дыры.

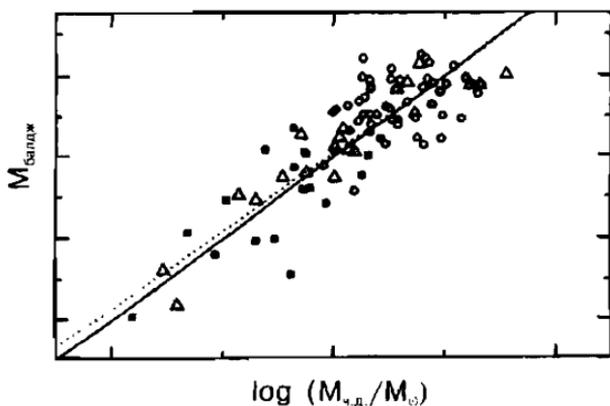


Рис. 3.16. Корреляция между массой сверхмассивной черной дыры в центре галктики и массой ее балджа. Масса центральной черной дыры составляет около 0,1% от массы балджа галактики.

Для ядер нормальных галактик корреляция между массой центральной черной дыры и рентгеновской или инфракрасной светимостью ядра слабо выражена. Однако наблюдается грубая корреляция между массой сверхмассивной черной дыры и светимостью ядра и всей галактики в радиодиапазоне, на сантиметровых волнах.

Таким образом, значительная полная радиосветимость галактики в сантиметровом диапазоне (так же, как и хорошо развитый балдж галактики) является указанием на наличие сверхмассивной черной дыры в ее центре. Поскольку статистика радиогалактик весьма богата, это позволяет косвенно оценить массы большого числа ядер галактик и построить распределение сверхмассивных черных дыр по массам в ближней части Вселенной.

Полная плотность массы сверхмассивных черных дыр в локальной Вселенной, оцененная из исследования ядер нормальных

галактик, составляет $\sim 5 \times 10^5 M_{\odot} / \text{Мпс}^3$ или $\sim 4 \times 10^{-35} \text{ г/см}^3$, что согласуется с полной плотностью массы черных дыр, выведенной из анализа наблюдений ядер активных галактик на больших расстояниях.

В последнее время все более утверждается точка зрения, что практически все галактики имеют в своих ядрах сверхмассивные черные дыры с массами от 10^6 до $10^{10} M_{\odot}$. Черные дыры меньших масс, возможно, также присутствуют в ядрах некоторых галактик, но их массы пока трудно измерить.

Звездные черные дыры

Рассмотрим теперь демографию черных дыр звездной массы. Если в случае ядер галактик выявляется эволюционная связь между сверхмассивной черной дырой и балджем галактики, состоящим из старых маломассивных звезд, то в случае черных дыр звездной массы в двойных системах необходимо рассмотреть связь черных дыр с так называемыми звездами Вольфа-Райе (WR).

По современным представлениям, звезды WR I типа населения Галактики (то есть концентрирующиеся вблизи галактической плоскости) являются обнаженными гелиевыми ядрами первоначально массивных звезд, потерявших основную часть своих водородных оболочек либо вследствие перетекания вещества в двойных системах, либо в результате интенсивной потери массы в виде звездного ветра.

Звездный ветер — это радиальное истечение атмосферы звезды, в случае массивных звезд вызванное главным образом давлением излучения. Звезды WR, как массивные, горячие, невырожденные, в основном гелиевые звезды, находящиеся на поздней стадии эволюции, должны взрываться как сверхновые и формировать в результате коллапса своих углеродно-кислородных ядер нейтронные звезды или черные дыры. В спектрах таких сверхновых не наблюдается линий водорода, а присутствуют лишь линии гелия и углерода.

Производителями нейтронных звезд и черных дыр могут быть не только звезды WR, но и другие массивные звезды, например, красные и голубые сверхгиганты нормального поверхностного химического состава.

В частности, знаменитая, сверхновая 1987А, вспыхнувшая в 1987 году в Большом Магеллановом облаке, связана с коллапсом ядра голубого сверхгиганта В31.

Поскольку мы изучаем массы релятивистских объектов исключительно в двойных системах, сравнение масс нейтронных звезд и черных дыр с массами звезд WR и их углеродно-кислородных (CO) ядер является корректным, поскольку в двойной системе под влиянием притяжения второй звезды массивная звезда всегда быстро теряет свою водородную оболочку и превращается в звезду WR.

В большинстве эволюционных сценариев для тесных двойных систем, содержащих массивную звезду, последняя, в конце концов, порождает звезду WR, которая, взрываясь как сверхновая, образует нейтронную звезду или черную дыру.

Таким образом, современные данные позволяют заключить, что все нейтронные звезды и черные дыры в рентгеновских двойных системах и большая часть радиопульсаров в двойных системах образуются в результате коллапса CO-ядер звезд WR.

Как видно из рис. 3.17, распределение масс релятивистских объектов в двойных системах не является непрерывным, а

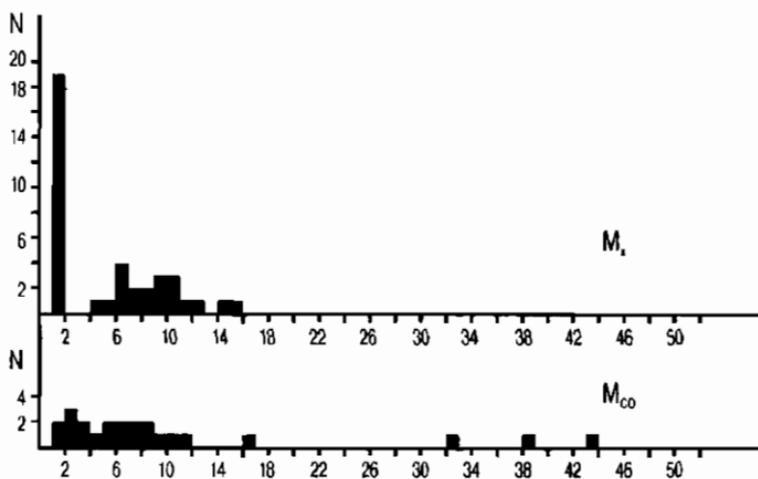


Рис. 3.17. Распределение масс релятивистских объектов M_1 и масс предсверхновых, производителей релятивистских объектов (CO-ядер звезд Вольфа-Райе в конце эволюции).

Массы выражены в солнечных единицах.

имеет два максимума (является бимодальным). Массы 19 нейтронных звезд лежат в узких пределах $(1-2)M_{\odot}$, среднее значение массы нейтронной звезды равно $(1,35 \pm 0,15)M_{\odot}$.

Измеренные значения масс 18 черных дыр в двойных системах лежат в пределах $(4-16)M_{\odot}$. Среднее значение массы черной дыры составляет $(8-10)M_{\odot}$. В интервале масс $(2-4)M_{\odot}$ в двойных системах не наблюдается ни нейтронных звезд, ни черных дыр, хотя число релятивистских объектов с измеренными массами уже приближается к 40.

Можно показать, что этот провал в распределении масс релятивистских объектов не может быть вызван влиянием наблюдательной селекции. У нас есть все основания считать провал в распределении масс релятивистских объектов в этом диапазоне реальным. По какой-то глубокой причине в природе не рождаются очень массивные $(> 2M_{\odot})$ нейтронные звезды (хотя ОТО допускает массу нейтронной звезды вплоть до $3M_{\odot}$) и маломассивные $(< 4M_{\odot})$ черные дыры.

В последнее время появились наблюдательные данные, свидетельствующие о том, что вспышки сверхновых, сопровождающие коллапсы СО-ядер, распределены по светимостям в максимуме также бимодально: имеются два класса этих сверхновых типа Ib/c (нормальные и яркие сверхновые), различающиеся по светимости в максимуме на порядок величины.

Различие в распределениях масс релятивистских объектов и их предшественников — СО ядер звезд WR дает основания предположить, что природу релятивистского объекта (нейтронная звезда или черная дыра) определяет не только масса предшественника, но и другие его параметры — магнитное поле, вращение и т. п.

В последние годы все более утверждается точка зрения о том, что коллапсы СО-ядер быстро вращающихся звезд WR, связанные с образованием предельно быстро вращающихся, так называемых керровских черных дыр в разных галактиках, могут быть источниками знаменитых и пока загадочных гамма-всплесков, при которых за время в несколько секунд выделяется гигантская энергия в гамма-диапазоне $\sim 10^{51}$ эрг. Это составляет около 10 процентов от энергии, выделяемой при аннигиляции целой солнечной массы.

Оценки, сделанные на основе описанных наблюдательных данных, показывают, что полное число черных дыр звездной массы в Галактике должно составлять $\sim 10^7$, то есть масса, заключенная в черных дырах составляет $\sim 10^8 M_{\odot}$ или около 0,1% от видимого вещества Галактики. Таким образом, суммарная масса черных дыр звездной массы на два порядка больше массы сверхмассивной черной дыры в ядре Галактики.

Накануне окончательного открытия

Наблюдения показывают, что все обнаруженные к настоящему времени релятивистские объекты звездной массы различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном согласии с ОТО. Если у релятивистского объекта есть признаки наблюдаемой поверхности, то его масса всегда не превышает $3M_{\odot}$ — абсолютного верхнего предела массы нейтронной звезды, предсказываемого ОТО. Если же масса релятивистского объекта превышает $3M_{\odot}$, то, в полном согласии с ОТО, у объекта нет признаков наблюдаемой поверхности.

Большое число релятивистских объектов с надежно измеренными массами (18 черных дыр и 19 нейтронных звезд) делает этот результат весьма значимым, хотя он, разумеется, еще окончательно не доказывает существование черных дыр. Поскольку достаточных критериев отбора черных дыр среди релятивистских объектов пока не существует, мы еще не можем считать, что черные дыры открыты. Астрономы по этому поводу говорят, что черные дыры «почти открыты».

История исследований звезд

Ситуация в данном случае подобна той, которая имела место до недавнего времени в понимании физики звезд. Действительно, в течение тысячелетий люди смотрели на звезды и не знали, почему они светят. В начале прошлого века бытовала точка зрения, что звезды светят за счет выделения энергии гравитационного сжатия.

Открытия геологов показали, однако, что возраст Земли составляет несколько миллиардов лет, в то время как запаса гравитационной энергии Солнца хватает лишь на сто миллионов лет, чтобы обеспечить его наблюдаемую светимость. Поэтому от гипотезы гравитационного энерговыделения в недрах Солнца пришлось отказаться.

Несмотря на непонимание механизма выделения энергии внутри звезд, наука о звездах — звездная астрономия — успешно развивалась: была открыта зависимость «спектр—светимость» для звезд, названная по именам ее первооткрывателей диаграммой Герцшпрунга—Рессела. Была также открыта зависимость «масса—светимость» для звезд, на основе анализа наблюдений двойных звезд и т. п.

Схожая ситуация имеет место в настоящее время и с черными дырами: мы имеем много наблюдательных данных по массивным и чрезвычайно компактным объектам, но окончательно их природа пока еще не выяснена — это дело будущих экспериментов.

Лишь после создания Эйнштейном специальной теории относительности и вывода им знаменитой формулы, связывающей массу и энергию $E = mc^2$, Эддингтон предположил, что звезды могут светить за счет выделения энергии при термоядерных реакциях. Он отметил, что масса ядра атома гелия, состоящего из двух протонов и двух нейтронов, примерно на один процент меньше, чем суммарная масса двух протонов и двух нейтронов, взятых по отдельности.

Эта разница, называемая дефектом массы, обусловлена сильным ядерным взаимодействием частиц ядра. Она и должна выделяться при термоядерных реакциях в недрах звезд. Один процент от энергии покоя вещества — это огромная величина. Запас ядерной энергии обеспечивает свечение Солнца на протяжении многих миллиардов лет.

Так, на качественном уровне была понята природа источников энергии звезд. Однако при этом оставалось много неясного. Прежде всего, оценки ожидаемых температур в недрах звезд, следующие из условия равновесия звезды, приводили к сравнительно низким значениям. Например, температура в центре Солнца составляет около 15 миллионов градусов.

В то же время, чтобы преодолеть потенциальный барьер, обусловленный электростатическим отталкиванием двух протонов, и сблизить два протона на расстояние $\sim 10^{-13}$ см (характерное расстояние ядерного взаимодействия), требуется температура в миллиард градусов.

Почему же, несмотря на сравнительно низкую температуру в недрах звезд, там эффективно протекают термоядерные реакции? Ответ на этот вопрос был дан Гамовым. Благодаря квантовым эффектам элементарные частицы с некоторой вероятностью могут преодолеть потенциальный барьер (совершить так называемый туннельный, или подбарьерный переход) при средних энергиях их движения, много меньших величины потенциального барьера.

Но и после разгадки этой тайны многое в физике звезд оставалось неясным. Лишь в 50-х – 60-х годах прошлого века трем физикам и астрофизикам, впоследствии нобелевским лауреатам, Г. Бете, У. Фаулеру и С. Чандрасекару удалось окончательно распутать цепочку термоядерных превращений в недрах звезд. В звездах малой массы, типа нашего Солнца, термоядерный синтез идет, в основном, в виде так называемого протон–протонного цикла, в массивных звездах — в виде углеродно–азотного цикла.

Но как экспериментально проверить эти теоретические расчеты? Многочисленные наблюдательные данные по исследованию масс, радиусов, температур звезд, химического состава их атмосфер, разнообразные статистические исследования звезд разных типов и возрастов, в особенности, диаграмм Герцшпрунга–Рессела для шаровых и рассеянных звездных скоплений, а также теоретические расчеты внутреннего строения и эволюции звезд косвенно подтверждали идеи Бете, Фаулера и Чандрасекара о термоядерном синтезе в недрах звезд.

Однако прямых доказательств этих идей не было (полная аналогия с современным статусом черных дыр). Лишь в начале 60-х годов американский физик Р. Дэвис предложил и реализовал смелый эксперимент по детектированию нейтрино от Солнца.

В 2002 году ему, совместно с японским коллегой, была присуждена Нобелевская премия.

В чем состоит суть идеи Дэвиса? Нейтрино рождаются при термоядерных реакциях в недрах звезд и являются прямыми свидетелями этих реакций. Благодаря своему очень малому взаимодействию со звездным веществом нейтрино, в отличие от фотонов, свободно выходят из недр звезды.

Если эти нейтрино зарегистрировать, то можно непосредственно наблюдать недра звезды в «нейтринных лучах» и тем самым получить прямые свидетельства наличия термоядерных превращений в недрах звезд.

Все это верно, но оказалось, что поток нейтрино высокой энергии, зарегистрированный на установке Дэвиса (расположенных глубоко под землей 400 кубометров четыреххлористого углерода, применяемого в химчистке), в три раза меньше, чем теоретический поток солнечных нейтрино, рассчитанный в рамках стандартной модели внутреннего строения Солнца.

Регистрация низкоэнергичных нейтрино, выполненная позднее группами российских и итальянских ученых (в России этот эксперимент проводится на галлий–германиевом детекторе, расположенном глубоко под горой в Баксанском ущелье, под руководством академика Матвеева), также показала, что наблюдаемый поток вдвое меньше теоретического.

Таким образом, хотя на качественном уровне наличие термоядерного синтеза в недрах звезд регистрацией нейтрино от Солнца было подтверждено, количественное расхождение в 2–3 раза между результатами наблюдений и теорией сохранялось на протяжении нескольких десятилетий.

И лишь совсем недавно, в декабре 2002 года, появились сообщения об открытии так называемых осцилляций нейтрино в лабораторных экспериментах, что позволило объяснить указанное расхождение между наблюдениями и теорией и окончательно, на уровне строгого количественного совпадения доказать термоядерную природу энергосвыделения в недрах Солнца.

Оказалось, что электронные нейтрино, к которым были чувствительны детекторы в описанных экспериментах, на пути от центра Солнца до Земли испытывают превращения в нейтрино других типов — мюонные и тау–нейтрино, к которым использованные детекторы нечувствительны.

С учетом превращений (осцилляций) нейтрино измеренные потоки как высокоэнергичных, так и низкоэнергичных нейтрино в точности согласуются с теоретическими, рассчитанными для стандартной солнечной модели. Так что можно считать, что лишь в конце 2002 года термоядерная природа энерговыделения в недрах Солнца была окончательно доказана, и мы теперь твердо знаем природу звезд.

Критические эксперименты для черных дыр

Аналогичная ситуация в настоящее время имеет место и с черными дырами. Хотя черные дыры «почти» открыты и накоплен богатый эмпирический материал по этим уникальным объектам, необходимо дождаться результатов критических экспериментов и наблюдений для того, чтобы окончательно доказать существование черных дыр во Вселенной. Перечислим важнейшие направления таких исследований.

1. Использование космических интерферометров с угловым разрешением до 10^{-7} секунды (например, описанного выше рентгеновского интерферометра). Поскольку угловой размер гравитационного радиуса сверхмассивной черной дыры в ядре нашей Галактики составляет 6×10^{-6} секунды, а в ядре галактики Андромеды $\sim 3 \times 10^{-6}$ секунды, с помощью таких наблюдений можно будет непосредственно изучать процессы падения вещества вблизи горизонта событий сверхмассивной черной дыры.

При наличии горизонта событий светимость порций вещества, падающих на центральный объект с последней устойчивой орбиты, должна монотонно ослабевать и стремиться к нулю. При наличии наблюдаемой поверхности удар падающих порций вещества об эту поверхность должен приводить к появлению ярких вспышек.

Изучение распределения яркости, температуры и поля скоростей в центральных частях аккреционного диска позволит оценить характеристики метрики пространства–времени вблизи центрального объекта и сравнить их с соответствующими ожидаемыми характеристиками. Можно надеяться, что в таких исследованиях удастся окончательно доказать, что сверхмассивные тела в ядрах галактик являются действительно черными дырами в смысле ОТО.

2. Поиск и исследование гравитационно–волновых всплесков от слияния черных дыр в двойных системах с помощью лазерных гравитационно–волновых антенн нового поколения (LIGO, LISA и т. п.). Эра гравитационно–волновой астрономии уже по существу наступила. Совсем недавно в США введена в строй гравитационно–волновая антенна LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory — Обсерватория лазерного гравитационно–волнового интерферометра). Сейчас идут работы по выведению этой антенны на режим работы с расчетной чувствительностью по относительным деформациям метрики пространства–времени $\Delta l/l \approx 10^{-21}$.

Согласно ОТО, ускоренно движущиеся гравитирующие тела вызывают изменения метрики пространства–времени, которые распространяются в пространстве в виде поперечных колебаний со скоростью света. Эти колебания называются гравитационными волнами. Если два объекта образуют двойную систему, их ускоренное движение по орбите вызывает излучение гравитационных волн, что ведет к потере энергии двойной системой и, как следствие, к уменьшению расстояния между компонентами системы и уменьшению орбитального периода. Именно такое уменьшение орбитального периода, в полном соответствии с предсказанием ОТО, наблюдается в знаменитом двойном радиопульсаре PSR 1913+16, состоящем из двух нейтронных звезд.

Если компонентами тесной двойной системы являются две черные дыры (а теория предсказывает существование таких двойных систем), то, благодаря потере энергии на излучение гравитационных волн, две черные дыры системы будут постепенно сближаться и, в конце концов, сольются, что приведет к интенсивному излучению потока гравитационных волн. Зависимость этого потока от времени представляет собой сложную осциллирующую функцию времени, которую можно рассчитать теоретически. Сравнение теоретической «кривой блеска» в лучах гравитационных волн с наблюдаемой дает возможность восстановить динамическую картину пространства–времени вблизи сливающихся черных дыр и получить достаточные критерии того, что процесс слияния происходит именно в системе из двух черных дыр.

Из-за чрезвычайной слабости гравитационного взаимодействия создание антенны для приема гравитационных волн представляет собой очень сложную и дорогостоящую проблему. Задача создания гравитационно-волновых антенн с нужной чувствительностью решалась в ряде стран (США, Италия, Германия, Япония) в течение последних 10 лет. Сейчас она близка к завершению, и в ближайшие годы человечество начнет осваивать принципиально новый канал информации из космоса — канал гравитационных волн.

Современные наиболее высокочувствительные гравитационно-волновые антенны строятся на базе лазерных интерферометров. Главная задача при этом — измерить с максимально возможной точностью относительные деформации метрики $\Delta l/l$, где Δl — изменение расстояния между пробными телами, разнесенными на расстояние l , вызванное прохождением гравитационных волн. Обычно абсолютная величина деформации Δl очень мала, много меньше размеров атомного ядра $\sim 10^{13}$ см. Предел точности измерений здесь определяется квантовыми эффектами. Поэтому при создании гравитационно-волновых антенн применяют большие значения базового расстояния l между пробными телами. Чем больше l , тем меньшие относительные изменения $\Delta l/l$ могут быть измерены.

Чтобы достичь необходимой чувствительности $\Delta l/l \approx 10^{-21}$, необходимо использовать значения l в сотни и тысячи километров, что технически сделать практически невозможно. Поэтому возникла идея использовать лазерный интерферометр, в котором перемещение свободно подвешенных отражающих зеркал измеряется путем анализа интерференционной картины, сформированной лазерным лучом, отраженным от двух зеркал. Коэффициент отражения применяемых зеркал очень велик, и лазерный луч отражается от них сотни и тысячи раз, практически не ослабевая. Если расстояние между зеркалами l , то благодаря многократному отражению света суммарная длина пути световых волн увеличивается до значения порядка сотни l . Это и позволяет достичь требуемой чувствительности гравитационно-волновой антенны.

Гравитационное поле принципиально отличается от полей других типов (электромагнитного, ядерного и т. п.) тем, что оно

может быть локально (в одной точке пространства) устранено выбором системы отсчета. Например, если мы сядем в свободно падающий лифт, то окажемся в состоянии невесомости — сила притяжения Земли исчезнет. Поэтому космонавты на орбите вокруг Земли живут в состоянии невесомости. Они испытывают лишь очень небольшие приливные воздействия со стороны Земли: разные части тела космонавта расположены на разных расстояниях от центра Земли и потому испытывают слегка разные гравитационные притяжения. Ввиду небольших размеров космонавта по сравнению с его расстоянием до центра Земли величина этих приливных воздействий весьма мала, но она отлична от нуля.

Переменное гравитационное поле гравитационной волны также воздействует на пробные тела приливным способом. Поэтому для регистрации гравитационно-волнового излучения необходимо использовать не одно, а два плеча лазерного интерферометра, перпендикулярные друг к другу. Американская лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая антенна LIGO состоит из двух взаимно перпендикулярных плеч. Каждое плечо представляет собой трубу с высоким вакуумом длиной около 4 километров. На концах труб подвешены пробные тела антенны — отражающие зеркала с огромным коэффициентом отражения. На эти зеркала падает луч света от мощного высокостабильного лазера. После многократных отражений от подвешенных зеркал лучи света интерферируют. Анализ темных и светлых полос интерференционной картины позволяет с огромной точностью измерить относительные перемещения Δl пробных тел — зеркал.

Эффективная длина пути, пройденного лучом света лазера при его многократных отражениях от зеркал интерферометра, составляет несколько сотен километров. Это и позволяет достичь огромной чувствительности антенны. На первых порах эта чувствительность достигает $\Delta l/l \approx 10^{-21}$, а в будущем предполагается увеличить ее до значения 10^{-23} . Ожидается, что при такой чувствительности можно будет регистрировать достаточно часто (несколько раз в год) гравитационно-волновые всплески от слияния черных дыр во многих удаленных галактиках нашей Вселенной.

3. Обнаружение и исследование движения радиопульсаров в двойных системах с черными дырами. Как уже отмечалось, радиопульсар в двойной системе представляет собой, с одной стороны, пробное тело в поле тяжести второй компоненты системы, с другой — это очень стабильные часы на орбите.

Если будет открыт радиопульсар на орбите вокруг черной дыры, то в случае вращающейся черной дыры тщательные исследования движения радиопульсара позволят измерить метрику пространства—времени вблизи черной дыры и исследовать эффекты, специфичные для вращающихся черных дыр.

Если же повезет еще больше, и плоскость орбиты радиопульсара вокруг черной дыры будет близка к лучу зрения, можно будет наблюдать эффекты гравитационного линзирования в движении пульсара при прохождении его радиоизлучения в окрестности горизонта событий и эргосферы черной дыры.

Сейчас известно примерно 1500 радиопульсаров, из них около 100 входят в двойные системы. Спутниками известных двойных радиопульсаров являются неактивные нейтронные звезды, белые карлики, массивные горячие звезды, а также планеты. Радиопульсары со спутниками — черными дырами пока не открыты.

Теория предсказывает, что на каждую тысячу радиопульсаров должен приходиться один пульсар в паре с черной дырой. Сейчас открыто уже 1500 пульсаров, причем открытия новых пульсаров продолжают, и число известных пульсаров непрерывно растет. Можно надеяться, что открытие радиопульсара в двойной системе с черной дырой уже не за горами.

4. Наблюдения и интерпретация эффектов гравитационного микролинзирования ядер галактик звездами более близких галактик — гравитационных линз. Угловое разрешение этого метода достигает 10^{-6} секунды, что позволяет изучать структуру ближайших окрестностей черных дыр в ядрах галактик.

Сейчас известно несколько десятков примеров так называемого гравитационного линзирования, когда искривление лучей света далекой галактики в гравитационном поле более близкой галактики или скопления галактик приводит к появлению нескольких оптических изображений («духов») далекой галактики.

Если далекая галактика нестационарна, изучая запаздывание изменения светимости одного «духа» относительно другого на временах в годы, можно независимо определять постоянную Хаббла H в законе расширения Вселенной, поскольку лучи света, образующие разные «духи», проходят разные пути во Вселенной.

Помимо долговременной переменности, «духи» далекой галактики испытывают также более быструю переменность на временах порядка месяца. Эта переменность связана с явлением микролинзирования. Передняя галактика — гравитационная линза является не сплошным телом, а состоит из миллиардов отдельных звезд, движущихся по своим орбитам вокруг центра галактики. Поэтому плоскость, в которой расположена далекая галактика, покрыта полем узких и протяженных образований (каустик), на которых коэффициент усиления света далекой галактики из-за гравитационного линзирования резко возрастает во много раз.

Когда ядро далекой галактики или квазара пересекается таким образованием, происходит кратковременное усиление его блеска, и наблюдатель видит явление микролинзирования — быстрое возрастание и затем падение блеска «духов» далекой галактики. Из анализа кривой блеска при микролинзировании можно восстановить распределение яркости в ближайших окрестностях ядра галактики и тем самым определить его угловые размеры с огромной точностью порядка 10^{-6} секунды.

5. Детальные исследования спектров, интенсивности, поляризации и изменений рентгеновского и гамма-излучения от аккрецирующих черных дыр с помощью орбитальных обсерваторий нового поколения. В частности, из таких наблюдений может быть получена уникальная информация о вращении черных дыр и о структуре пространства-времени вблизи горизонта событий.

У аккрецирующих черных дыр часто наблюдаются быстрые изменения светимости и квазипериодические (но не строго периодические) осцилляции интенсивности рентгеновского излучения. Это позволяет изучать свойства ближайших окрестностей черных дыр, непосредственно вблизи горизонта событий.

В связи с этим планируется запуск на орбиту вокруг Земли специализированной рентгеновской обсерватории для наблюдений аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр с максимально возможным временным разрешением.

6. Рутинное накопление сведений о массах черных дыр и нейтронных звезд, статистическое сравнение различий в наблюдательных проявлениях аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр.

Как показывает опыт предыдущих исследований релятивистских объектов, в среднем в год измеряется масса 1–2 черных дыр и 1–2 нейтронных звезд в двойных системах. Поэтому можно ожидать, что через 20 лет число релятивистских объектов в двойных системах с известными массами удвоится и будет близко к сотне (сейчас это число близко к сорока). Тогда, в силу возросшего числа изученных релятивистских объектов, значимость выводов о статистическом различии наблюдательных проявлений аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр существенно возрастет.

Возможны ли путешествия во времени?

Свойства черных дыр столь экстремальны и фантастичны, что с их окончательным открытием и исследованием можно ожидать настоящего прорыва в познании новых фундаментальных свойств материи и пространства—времени.

О центральной сингулярности

Особенно важно исследовать природу сингулярности в центре черной дыры, куда сколлапсировала (в падающей системе отсчета) образующая черную дыру материя. Плотность вещества в сингулярности формально бесконечно велика. Однако из соображений размерности можно предполагать, что на так называемых планковских масштабах, порядка 10^{-33} см (это на двадцать порядков меньше размеров атомного ядра) обычная теория гравитации, описываемая ОТО, уже несправедлива. На столь малых масштабах должны царить законы квантовой гравитации. Теория квантовой гравитации еще не создана, хотя в последние годы физики в этом направлении прилагают большие усилия.

Характерная плотность материи на планковских масштабах порядка 10^{93} г/см³, что на 80 порядков больше плотности вещества атомного ядра. Характерное планковское время порядка 10^{-43} секунды. На временах менее 10^{-43} секунды понятие непрерывно текущего времени теряет смысл, так же, как теряют смысл классические причинно—следственные связи. Поэтому в центре черной дыры, где царят законы квантовой гравитации, известная нам физика уже неприменима.

Возникает вопрос: как же мы можем строить теорию черной дыры, не зная законов новой физики?

В данном случае спасает то обстоятельство, что центральная квантовая сингулярность с точки зрения удаленного неподвижного наблюдателя находится в будущем по отношению к предшествующим и наружным слоям пространства—времени черной дыры. Следовательно, ее свойства, как бы необычны они ни были, не влияют на формирование горизонта событий и основной части внутренней структуры пространства—времени черной дыры. Если же рассмотреть не только временные, но и пространственные масштабы черной дыры, то вывод о применимости классической, не квантовой теории гравитации к описанию основных свойств черных дыр еще более усиливается.

Действительно, размеры известных черных дыр лежат в пределах от десятков километров до десятков миллиардов километров. Это более чем на сорок порядков больше планковского размера 10^{-33} см, на котором начинают сказываться законы квантовой гравитации.

В последние годы развиваются теории элементарных частиц в многомерных пространствах. В некоторых вариантах этой теории характерный масштаб, на котором возможно проявление эффектов квантовой гравитации, значительно больше планковского и близок к 10^{-17} см. Однако даже этот масштаб более чем на 20 порядков меньше размеров известных черных дыр. Поэтому окрестности горизонта событий и подавляющая часть внутренней черной дыры с огромной точностью могут быть описаны классической, не квантовой теорией гравитации в рамках ОТО.

О путешествиях во времени

Мы остановимся лишь на одной проблеме, непосредственно связанной с физикой черных дыр — на проблеме путешествия во времени. Большой вклад в проблему машины времени внес известный американский физик К. Торн и российский астрофизик, член—корреспондент РАН Новиков.

Мы уже упоминали о том, что горизонт событий черной дыры «чувствует» будущее. Если бы с точки зрения далекого наблюдателя космонавт попал внутрь черной дыры, под горизонт

событий, то он бы двигался к квантовой сингулярности уже не в пространстве, а во времени. Двигаясь к квантовой сингулярности, космонавт в случае невращающейся черной дыры, увидит свое будущее и другую Вселенную, расположенную по отношению к нашей Вселенной в абсолютном будущем. Чтобы попасть в эту Вселенную обычным способом, в отсутствие черной дыры, космонавту необходимо было бы двигаться со скоростью больше скорости света, что запрещено законами физики.

В связи с возможностью существования во Вселенной сверхмассивных черных дыр, вопрос о путешествии в пространстве—времени, в другие Вселенные, не кажется чрезмерно фантастическим. Вспомним, что средняя плотность черной дыры в миллиарды солнечных масс меньше плотности воздуха. Поэтому еще в 80-х годах прошлого века возможность путешествия в другие Вселенные через сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик всерьез обсуждалась рядом ученых.

Другая возможность путешествия во времени (в будущее) связана с использованием быстрого движения космонавта. Как следует из теории относительности, интервал времени между двумя событиями различен в разных системах отсчета. Время в системе отсчета, движущейся относительно наблюдателя, течет медленнее, чем в системе отсчета, в которой наблюдатель покоится. Этот эффект экспериментально проверен. Некоторые частицы космических лучей, прилетающих из Космоса на Землю со скоростью очень близкой к скорости света, имеют очень малое собственное время жизни, тем не менее, они пролетают огромные расстояния ввиду того, что с точки зрения земного наблюдателя ход времени в системе отсчета, связанной с частицей, сильно замедляется. Например, время жизни нейтрона в составе космических лучей из-за такого замедления хода времени увеличивается с 15 минут до 30 тысяч лет.

В связи с таким, как говорят, релятивистским замедлением хода времени (то есть характерным для скоростей движения, близких к скорости света) часто рассматривается известный парадокс близнецов.

Представим себе двух близнецов, родившихся одновременно на Земле, один из которых на мощной ракете отправляется к какой-либо звезде со скоростью, близкой к скорости света.

Посетив звезду, близнец возвращается на Землю и обнаруживает, что его брат сильно постарел по сравнению с ним. Таким образом, космонавт—близнец, полетав со скоростью, близкой к скорости света в космическом пространстве и вернувшись на Землю, оказался в будущем, то есть совершил путешествие не только в пространстве, но и во времени.

Поскольку ход времени замедляется также и в гравитационном поле, парадокс близнецов возможен и при путешествии к телам с сильным гравитационным полем, например, к нейтронным звездам и черным дырам.

Вспомним нашего космонавта, зависшего вблизи горизонта событий черной дыры. Как мы уже отмечали, из-за замедления хода времени вблизи черной дыры, такой космонавт увидит из иллюминатора своего корабля, как события внешней Вселенной пробегают в чрезвычайно ускоренном темпе.

Если теперь космонавт включит двигатели своего корабля на полную мощность, преодолеет притяжение черной дыры (это в принципе возможно, т. к. космонавт находится вне горизонта событий) и вернется назад на Землю, он обнаружит, что на Земле уже наступило далекое будущее и все его родственники давно умерли.

Парадоксы близнецов, связанные с быстрым движением и с сильным гравитационным полем в некотором смысле эквивалентны друг другу. Космонавт—близнец, отправляясь со скоростью близкой к скорости света к далекой звезде, чтобы вернуться назад на Землю и попасть в будущее, должен сначала разогнаться до высокой скорости, затем, при подлете к звезде он должен затормозиться до нулевой скорости, затем снова разогнаться до высокой скорости в противоположном направлении (к Земле) и далее, при подлете к Земле снова затормозиться до нулевой скорости.

При таких изменениях характера своего движения космонавт испытывает действие мощных ускорений, что, согласно общей теории относительности Эйнштейна, эквивалентно действию сильных гравитационных полей. Именно поэтому набегает большая разница в интервалах прошедшего времени.

Удивительные свойства черной дыры

Физика пространства—времени внутри вращающейся черной дыры очень сложна, и многие детали здесь окончательно не выяснены. После гравитационного коллапса объекта и образования черной дыры, ее внешнее гравитационное поле асимптотически приближается к предельной равновесной конфигурации — полю Керра—Ньюмена. Это поле не зависит от конкретной природы вещества, из которого образовалась черная дыра, и характеризуется лишь тремя параметрами: массой, угловым моментом и электрическим зарядом.

Граница черной дыры, ее горизонт событий, не содержит вещества и не является твердой поверхностью, а представляет собой лишь координатную особенность в пространстве—времени. Как образно выразились Новиков и Фролов, черная дыра — это и не тело, и не излучение, она представляет собой сгусток гравитации.

Горизонт событий черной дыры — это граница между различными сигналами, двигающимися со скоростью света. Одни из них могут уйти от черной дыры на пространственную бесконечность, другие не могут.

Сможет ли сигнал от черной дыры уйти на пространственную бесконечность — зависит от области пространства—времени, которая лежит в будущем по отношению к источнику сигнала. Следовательно, движение горизонта событий черной дыры зависит не от того, что произошло с ним в прошлом, а от того, что произойдет с ним в будущем (!). Эту необычную особенность горизонта событий черной дыры — его способность «чувствовать» будущее, физики иногда называют «теологической» природой горизонта.

Если говорить о внутренности вращающейся черной дыры, то структура и свойства пространства—времени внутри нее в сильной степени зависят от судьбы самой черной дыры в бесконечном будущем внешнего наблюдателя, например, от возможных столкновений черной дыры с другими объектами, от квантового испарения черной дыры и даже от будущего всей Вселенной.

Как отмечают Новиков и Фролов, в таких обстоятельствах физики-теоретики чувствуют себя весьма неудобно...

О машине времени

Поскольку черные дыры, скорее всего, существуют, путешествие во времени принципиально возможно. Отправившись на космическом корабле внутрь сверхмассивной черной дыры в ядре галактики, отважный космонавт увидит будущее. Но при этом он не сможет вернуться назад и не сможет передать нам какую-либо информацию об увиденном им будущем. Сделать это ему помешает горизонт событий черной дыры.

Таким образом, решившись путешествовать во времени внутри сверхмассивной черной дыры, космонавт обрекает себя на самоубийство — он никогда не вернется назад, в нашу Вселенную, а при приближении к центральной сингулярности будет разорван приливными силами. В то же время для наблюдателей с Земли он никогда не пересечет горизонт событий и не проникнет внутрь черной дыры. Незавидная участь — отважный космонавт даже в книгу рекордов Гиннеса не попадет как первопроходец.

ОТО Эйнштейна также допускает существование компактных объектов без горизонта событий. Для этого нужно, чтобы объект был сформирован не из обычной материи, а из экзотической, так называемой, вакуумоподобной материи, обладающей отрицательным давлением и анизотропными свойствами. Физики—теоретики считают, что сформировать такой объект, в принципе, возможно. Тогда получается компактный объект без горизонта событий, который принято называть «кротовой норой» или пространственно—временным туннелем.

Как это ни удивительно, но существуют методы наблюдений, позволяющие по кривой блеска при микролинзировании далекой звезды фона более близким компактным объектом отождествить этот объект с «кротовой норой». Сейчас поиски «кротовых нор» активно ведутся астрономами.

С помощью такого пространственно-временного туннеля можно, в принципе, сконструировать устройство, которое будет уже настоящей машиной времени. Например, человек может войти в туннель, где время течет назад по отношению ко времени во внешнем пространстве, и затем он окажется в прошлом, выйдя через устье туннеля. С помощью подобного устройства можно путешествовать и в будущее.

Новиков сравнивает поток времени с течением реки. Вдали от сильных гравитационных полей время, подобно воде в свободной реке, течет одинаково во всем пространстве от прошлого к будущему.

Однако в сильном поле тяготения пространство—время может быть очень сильно искривлено, подобно тому, как вода в реке, встречая препятствия, сильно искривляет свое течение.

Из-за действия сильного гравитационного поля может даже возникнуть «туннель в суперпространстве» («кротовая нора»), когда часть «потока времени» отделяется, входит в «туннель» и течет в противоположную сторону, выходя из «туннеля» в прошлое. Таким образом, под влиянием сильного гравитационного поля может образоваться так называемая «петля хода времени» (рис. 3.18).

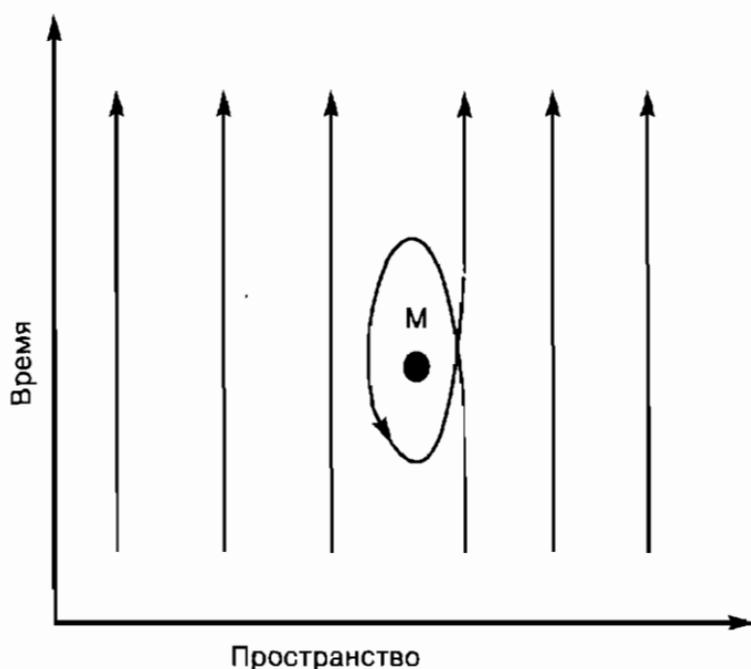


Рис. 3.18. Из-за влияния сильного гравитационного поля тела массы M течение времени искривляется и образуется «петля хода времени», когда события воздействуют друг на друга «по кругу».

Аналогичная ситуация имеет место в текущей воде: при наличии значительного препятствия, течение может не только искривляться, но и образовывать завихрения, порождающие воронки.

В этих завихрениях вода движется по кругу, подобно тому, как по кругу течет время в «петле хода времени».

Если человек путешествует во времени и направляется в прошлое, это означает, что он делает «петлю хода времени». В «петле хода времени» события уже не могут быть разделены на прошлое и будущее.

Все события в «петле хода времени» воздействуют друг на друга «по кругу». Поэтому в машине времени, где реализована «петля хода времени», сегодняшние события определяются не только прошлым, но и будущим (!).

Новиков также впервые сформулировал принцип самосогласованности для машины времени, который в настоящее время считается общепризнанным: при наличии машины времени сегодняшние события должны быть согласованы не только с прошлым, но и с будущим.

При путешествии в будущее принципиальных проблем не возникает. Проблемы возникают при путешествии в прошлое. Прежде всего, следует иметь в виду, что такой путешественник, оказавшись в прошлом, сам по себе моложе не станет, ввиду действия всемогущего закона неубывания энтропии.

Старение организма человека есть следствие фундаментального термодинамического закона неубывания беспорядка в организме, характеризуемого такой физической величиной, как энтропия. Накопленная организмом за время его жизни энтропия не может быть уменьшена одним изменением направления течения времени.

Но, очутившись в прошлом, путешественник может встретить самого себя молодого и даже своего отца, мать, бабушку и дедушку. Он может даже попасть в эпоху, когда он еще не родился (!).

В последние годы в научной литературе обсуждается вопрос о том, как будут работать законы физики при наличии машины времени. Обсуждается, в том числе, и так называемый «парадокс дедушки».

Он состоит в следующем. «Если человек может вернуться в прошлое, он может встретить своего дедушку, который еще очень молод.

Он может убить своего дедушку и тем самым сделать невозможным собственное рождение».

Хотя такое убийство порождает абсолютную бессмыслицу, это событие в принципе возможно, поскольку человек обладает определенной свободой воли (может поступать так, как ему заблагорассудится).

Действительно ли наличие «парадокса дедушки» свидетельствует о том, что путешествие во времени нереально? Ведь попав в прошлое и уничтожив дедушку — причину своего рождения, события, которое уже свершилось, путешественник, казалось бы, нарушает фундаментальный принцип науки — принцип причинности.

Новиков считает, что это не так. Поскольку в машине времени кроме обычного влияния прошлого на будущее, будущее также влияет на прошлое, все события происходят так, что это влияние принимается в расчет.

Однако с тех пор, как событие уже произошло (под совместным влиянием прошлого и будущего), оно уже не может быть переделано, ибо «то, что реально случилось, невозможно отменить». Ученые считают, что описанное выше убийство дедушки с помощью машины времени также, по-видимому, невозможно, поскольку свобода воли человека при использовании машины времени будет как-то ограничена законами физики.

Новиков приводит в этой связи высказывание К. Торна:

«...Что-то должно остановить вашу руку, если вы попытаетесь убить вашего деда. Что? Как? Ответ (если он есть) далек от очевидности, так как он связан со свободой воли человека. Совместимость свободы воли и строгого физического закона ужасно смутная проблема даже в отсутствие машины времени».

Приведем заключительное высказывание Новикова по поводу машины времени: «Хочу еще раз подчеркнуть, что если машина времени и будет когда-нибудь создана, то, по-видимому, только в отдаленном будущем. Предстоит решить еще много принципиальных проблем, не говоря уже о громадных технических трудностях...»

Мы хотим заключить эту главу цитатой из недавнего обзора Новикова и Фролова, посвященного черным дырам:

«Что касается практической реализации новых идей, мы хотели бы заключить обзор напоминанием о том, что в середине XIX века даже такая практическая (теперь) вещь, как электричество, казалась научной абстракцией.

Когда британский премьер—министр того времени спросил Фарадея о практической ценности электричества, Фарадей ответил: Когда-нибудь ваше правительство введет на него налог. Будучи оптимистами, мы верим в огромные перспективы в новой области физики и астрофизики черных дыр».

Авторы этой книги полностью согласны с этой оптимистической точкой зрения на черные дыры.

Глава 4

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Разбегание галактик

Наука о Вселенной

Черные дыры и космология — две новые и, несомненно, самые удивительные области исследований, которые породила эйнштейновская общая теория относительности. В этой главе речь пойдет о космологической науке, объектом изучения которой является Вселенная как целое.

Вселенная, рассматриваемая как единое целое, — физическая система со своими особыми свойствами, которые не сводятся к сумме свойств населяющих ее астрономических тел. Эти свойства проявляются в явлениях самых больших пространственно—временных масштабов. Главное из этих свойств — всеобщее разбегание галактик, о котором мы уже упоминали в первой, вводной главе.

Вселенная — самый крупный по масштабу объект науки. Он, очевидно, существует в единственном экземпляре. Из этих обстоятельств следует ряд особенностей космологии как науки. Действительно, Вселенную можно только наблюдать, экспериментировать с ней невозможно (что, конечно, только к лучшему). Никаких других вселенных нам не дано, и сравнивать нашу Вселенную не с чем. Этим космология отличается, например, от физики элементарных частиц, которая изучает объекты, имеющиеся в природе в большом количестве и допускающие разнообразное экспериментирование.

Еще одной особенностью науки о Вселенной является близкое родство с философскими идеями и исканиями, с попытками осмыслить место человека в мире.

И, тем не менее, космология — это все же настоящая естественно—научная дисциплина, в которой главное — конкретные факты, а любые теоретические выводы могут считаться правильными только тогда, когда они проверены и подтверждены прямыми астрономическими наблюдениями.

Основу современной космологии составляет теория, созданная Александром Александровичем Фридманом в 1922—24 гг. Эта теория полностью подтверждена всей совокупностью имеющихся сейчас наблюдательных данных о Вселенной как целом. Ее глубина, богатство физического содержания раскрываются все полнее с каждым новым наблюдательным открытием в космологии.



Рис. 4.1. Александр Александрович Фридман (1888—1925).

Его дед, Александр Иванович, служил по медицинской части при роте дворцовых гренадер и имел квартиру при Зимнем Дворце. В революционном 1905-м будущий космолог, а тогда гимназист и активист социал—демократического движения, прятал на квартире деда пачки революционных прокламаций.

Отец космолога, Александр Александрович, был артистом Мариинского балета, позже сочинял балетную музыку для той же труппы. Главным дирижером в Мариинском был другой дед космолога, Игнатий Воячек, тоже известный тогда композитор, родом из Моравии.

Знатком музыки был и сам Фридман. На филармонических концертах в Зале Дворянского собрания его видели сидящим в первых рядах с партитурой в руках — и в ранней молодости, и в зрелые годы.

Будучи директором Главной физической (геофизической) обсерватории, он отвечал за прогноз погоды. Однажды выходил быстрым шагом из здания Физико—Технического института в Сосновке и на

вопрос встречного знакомого, куда он так торопится, ответил на бегу: «В обсерваторию на Васильевский, пора выдавать прогноз погоды на завтра, а без меня они еще то прогнозируют!» Прогноз погоды был тогда скорее изящным искусством, чем технологией, особенно когда идут атмосферные фронты.

Самый грандиозный прогноз Фридмана оказался безошибочным: мир действительно расширяется! Масштаб этой фигуры был в ученом мире с самого начала очевиден. Но никто никогда не называл его «великим советским ученым». Большая Советская Энциклопедия глухо толковала о каких-то его идеологических заблуждениях. Через 12 лет после его смерти (да-да, в тысяча девятьсот тридцать проклятом) на Фридмана было заведено дело No.555: его разоблачили как «главаря антисоветской банды ученых-саботажников». Двое из его учеников были расстреляны.

В 1960-70-е годы академик Я. Б. Зельдович много сделал для пропаганды научного наследия Фридмана. Столетие Фридмана праздновали в Ленинграде в 1988 году с большим размахом, времена менялись. Только что был освобожден из ссылки Сахаров, и он сказал на международной юбилейной конференции: «Мы все еще находимся в состоянии потрясения от того, что сделано этим человеком». Фридмановская космология стала частью современной мировой культуры.

Главное у Фридмана — теория космологического расширения. Фридман смог предсказать этот грандиозный космический феномен и дать ему полное математическое описание.

В последние годы явление космологического расширения часто называют Большим Взрывом. В ходу также и менее общее понимание этого термина: под ним иногда подразумевают самые первые, начальные стадии космологического расширения. А иной раз — и сам физический механизм (до сих пор не разгаданный), благодаря которому это расширение началось. Мы будем здесь пользоваться этим термином в его самом широком значении.

Краткая история космологии

Современная космология берет начало в первые десятилетия XX века. Это была особая эпоха в истории науки. Тогда были созданы теория относительности и квантовая механика, составляющие фундамент всей физики.

За истекшие с тех пор десятилетия космология прошла путь от первых теоретических поисков, которые почти всем казались поначалу совершенно абстрактными и произвольными, если не фантастическими, к грандиозным наблюдательным открытиям, к формированию новой богатой содержанием и хорошо обоснованной картины мира.

История космологии складывается, если говорить совсем кратко, из трех крупнейших событий. Это открытия, которые и определили лицо науки о Вселенной к началу XXI века.

Первое из трех важнейших открытий сделано Эдвином Хабблом: в 1929 г. он обнаружил разбегание галактик, которое теперь понимают как всеобщее расширение Вселенной. Второе событие — регистрация реликтового излучения, равномерно заполняющего все пространство мира; это открытие было сделано в 1965 г. Арно Пензиасом и Робертом Вилсоном (Нобелевская премия 1976 г.). Наконец, третье и самое свежее событие — открытие космического вакуума двумя группами астрономов; это произошло совсем недавно, в 1998-99 гг.

Замечательно, что все три крупнейшие наблюдательные открытия были заранее предсказаны теоретиками. Расширение Вселенной было предсказано Фридманом в 1922 г. Реликтовое излучение тоже было предсказано — это заслуга Георгия Антоновича Гамова (1940–50-е годы). Существование же космического вакуума предвидел Эйнштейн (1917 г.).

Предвидение Эйнштейна дольше всего ждало своего наблюдательного подтверждения. Как и полагается в истории самых важных открытий, открытие вакуума оказалось неожиданным почти для всех. Несожданным, но далеко не случайным — это был результат многолетних хорошо продуманных усилий и тщательно разработанных наблюдательных программ, хотя и нацеленных поначалу на более скромные задачи. Нельзя сказать, что космологи были совершенно не подготовлены к этому событию. Скорее никто не мог представить себе, что судьбу эйнштейновской идеи удастся выяснить уже сейчас и притом с такой высокой степенью надежности.

Космический вакуум Эйнштейна, или как сейчас нередко говорят, темная энергия, — самый загадочный феномен физики и космологии.

Симметрии Вселенной

Давняя, уходящая к истокам классической науки традиция приписывала Вселенной в целом не только однородность, но также вечность и неизменность, как важнейшие, неотъемлемые ее свойства. Это был необычайно прочный элемент общего миропонимания, выработанного мыслителями многих поколений. Такой взгляд на мир питался идеями несотворимости Вселенной. Веками считалось, что научный подход требует признания ее тождественности себе самой во все времена.

Но откуда объективно могло быть известно, что космос статичен? Какие факты реального мира указывали на это?

На эту мысль наводило, несомненно, созерцание звездного неба, по видимости, вечного и неизменного. Это впечатление, как мы сейчас понимаем, обманчиво, оно лишь вводит в заблуждение, если распространять его на общее устройство Вселенной. Астрономам давно уже было известно, что очертания созвездий постепенно меняются со временем. Но чтобы эти изменения стали заметны и очевидны, требуются века и тысячелетия. По сути, представление о неизменности мира было гипотезой, как и представление о его пространственной однородности. Скорее, это было следствием глубокой убежденности в максимальном совершенстве и простоте устройства космоса, его идеальной симметрии.

Действительно, однородность пространства означает равноправность и одинаковость всех мест в мире, или всех его точек, если говорить математически. Это симметрия относительно перемещений, или сдвигов в пространстве от одной точки к любой другой: мир везде один и тот же, *куда* ни взгляни.

А неизменность мира во времени означает равноправность и одинаковость всех эпох, всех моментов в истории мира. Это симметрия относительно сдвигов по времени от одного момента к любому другому: мир всегда один и тот же, *когда* на него ни посмотри.

Как мы уже говорили, однородность мира — это теперь уже надежно установленный астрономический факт. Распределение галактик, скоплений и сверхскоплений в пространстве Вселенной равномерно в среднем по большим масштабам (300 миллионов световых лет и больше — гл. 1).

Что же касается симметрии во времени, она не подтвердилась в наблюдениях мира галактик. Напротив, наблюдения Хаббла показали, что распределение галактик в пространстве отнюдь не статично, галактики находятся в состоянии движения, они удаляются друг от друга.

Статический мир?

О разбегании галактик стало известно, как мы уже говорили, к концу 20-х годов XX века. Но первая космологическая теория Эйнштейна была создана за десять лет до этого, и ее автор твердо держался вековой космологической традиции, традиции неизменности Вселенной. Ссылаясь на доступные тогда астрономические сведения, Эйнштейн в действительности ни на минуту не сомневался в своей априорной установке. Данные же, о которых он упоминал в работе 1917 г., на деле не имели прямого отношения к космологической проблеме.



Рис. 4.2. Альберт Эйнштейн (1879–1955).

На этой фотографии он не такой уж молодой и заметно усталый. Это 1940-е годы в Принстоне. После мирового успеха в молодости он много и безрезультатно работал над созданием единой теории взаимодействий, которая соединяла бы общую теорию относительности с электромагнетизмом. Навещавший его в годы войны в Принстоне Г.А. Гамов видел в его домашнем кабинете множество листков с тензорными формулами, разбросанными всюду на столах и креслах. Это были очередные варианты единой теории поля. Но Эйнштейн никогда не говорил на эту тему.

Гамов привозил ему на экспертизу из Вашингтона различные военные проекты Морского флота США, они их вместе обсуждали до обеда, а потом гуляли и беседовали о новостях науки. Однажды Гамов рассказал Эйнштейну о том, что сверхплотная звезда с нулевой полной энергией (кинетической плюс гравитационной потенциальной) могла бы родиться «из ничего» без нарушения закона сохранения энергии. Это была идея известного теоретика Иордана, тогда совсем свежая. Эйнштейна она поразила. Он остановился и долго стоял в задумчиво-

сти. Они как раз переходили одну из улиц с оживленным движением, и автомобили или стояли, или медленно и аккуратно их объезжали. Теперь мы рассуждаем уже не о рождении звезд, а целых вселенных — из ничего, и в массовом порядке.

И все же теоретик остро ощущал необходимость реальных астрономических фактов, на которые он мог бы опереться. «Самое важное из всего, что нам известно из опыта о распределении материи, заключается в том, что скорости звезд очень малы по сравнению со скоростью света», — пишет Эйнштейн, и на первых нескольких страницах своей статьи он еще пять (!) раз упоминает об одном и том же — о равномерности пространственного распределения «неподвижных звезд» (прямо как у Коперника), о малости скоростей звезд по сравнению со скоростью света, о «незначительности скоростей звезд» и т. д. Но дело, как впоследствии выяснилось, вовсе не в звездах.

Работа Эйнштейна 1917 года была первой попыткой применить общую теорию относительности к космологии. Но эту теорию нужно было сначала создать. Как Ньютон изобрел механику вместе с теорией тяготения для описания динамики Солнечной системы, так Эйнштейн изобрел общую теорию относительности для описания всей Вселенной (и не только для этого). Теория Эйнштейна — прямое продолжение, развитие и обобщение теории Ньютона. В общей теории относительности ньютоновская механика и теория тяготения содержатся в качестве частного или предельного случая — это случай малых скоростей движения и слабых полей тяготения. В общем случае в теории Эйнштейна таких ограничений нет и именно поэтому она пригодна для описания всего мира как целого.

К немалому удивлению ее автора, общая теория относительности воспротивилась попытке вывести из нее вечность и неизменность мира. Теория не позволяла Вселенной быть статической. Все, о чем мы читаем в замечательной статье Эйнштейна, говорит о том, что он был немало удивлен и озадачен этим обстоятельством. Ситуация, однако, требовала решения. Возникла альтернатива: либо изменить взгляды и исходную установку, либо что-то радикально изменить в структуре новорожденной теории.

Эйнштейн избрал второй путь.

«Извилистый путь»

«...Я предлагаю читателю последовать по пройденному мной самым извилистому и неровному пути, поскольку, как мне кажется, только так будет интересен конечный результат». Это фраза не вполне обычна не только для современного сухого и сжатого стиля научных статей, но и для более свободного языка ученой прозы начала прошлого века.

Эйнштейн считал необходимым и возможным написать именно так, а не иначе. Тем самым он оставил нам драгоценное свидетельство о том, каким образом возникают в науке новые грандиозные идеи.

Вслед за приведенной выше фразой Эйнштейн делает крайне важное для него (и, похоже, не такое уж легкое) признание. «Я пришел к убеждению, что уравнения гравитационного поля, которых я до сих пор придерживался, нуждаются еще в некоторой модификации...» И далее: «...необходимо некоторое обобщение уравнений гравитационного поля».

Это обобщение и было осуществлено, и притом в исключительно логичной, простой и экономной форме, что было осознано, впрочем, много позже. Сначала же это казалось актом произвола.

В чем состояла модификация уравнений? В том, что (1915 г.) созданную общую теорию относительности ее автор внес нечто совершенно новое — космологическую константу Λ . Так в уравнениях теории появилась новая постоянная величина, о которой до того ничего не было известно ни в фундаментальной физике, ни тем более в астрономии.

Стоит заметить, что в исходном своем виде уравнения содержали только одну константу — эйнштейновскую гравитационную постоянную, $K = 8\pi G/c^4$, которая представляет собой комбинацию постоянной тяготения Ньютона G и «скорости света в вакууме» c .

Здесь сразу же нужно сказать, что понимается в физике под словом вакуум, когда говорят о «скорости света в вакууме».

В этом случае вакуум — это пустота в полном изначальном смысле этого слова. Точнее, это пустота как ее трактует специальная теория относительности. Это не только отсутствие какой-либо среды или частиц, но еще и отсутствие сильных полей

тяготения. В лишенном частиц и полей пространстве свет распространяется с постоянной скоростью и эта скорость есть универсальная постоянная $c = 3 \times 10^{10}$ см/сек.

Но вакуум Эйнштейна, о котором мы будем далее подробно говорить, — совсем не пустота, у него есть энергия; у него даже есть давление — см. ниже. Свет распространяется в таком не пустом вакууме совсем не обязательно со скоростью c .

Возвращаясь к работе Эйнштейна, подчеркнем весьма высокий, с теоретической точки зрения, статус космологической постоянной Λ — она появляется в модифицированной теории наравне с постоянной K . Других постоянных в уравнениях общей теории относительности нет. И эти две константы выступают как универсальные фундаментальные постоянные природы.

Дополненные космологической постоянной, уравнения общей теории относительности (или уравнения гравитационного поля, как их называет Эйнштейн) уже допускают статическое устройство Вселенной. Теперь возможность неизменного мира может быть теоретически доказана.

Мир Эйнштейна, данный в его первой космологической работе, — это вечная Вселенная в покое и без развития. Ее трехмерное пространство неэвклидово и подобно сфере. Такое трехмерное пространство называется гиперсферой. Эйнштейн считал, что это пространство должно иметь конечный объем и быть замкнутым в себе.

Двумерный аналог такого замкнутого, но безграничного пространства — сферическая поверхность, рассматриваемая целиком: ее площадь конечна, а сама она не имеет двумерных границ. Сфере и гиперсфере приписывается положительная кривизна.

В пространстве эйнштейновской Вселенной, как и на сфере, все точки равноправны и ни одна из них не является ни центральной, ни граничной. Такая Вселенная идеально симметрична во времени и пространстве.

Это была первая космологическая модель в новейшей науке о Вселенной. Первая, но далеко еще не окончательная.

Поставленная Эйнштейном цель была, казалось бы, достигнута. Было найдено точное решение уравнений общей теории относительности для космологической проблемы.

Решение определенно доказывало возможность статического мира. Но большого энтузиазма по этому поводу у автора не заметно. Вот заключительные фразы цитируемой статьи:

«Во всяком случае, это представление логически непротиворечиво и с точки зрения общей теории относительности является наиболее естественным. Мы не будем здесь рассматривать вопрос о том, приемлемо ли это представление с точки зрения современных астрономических знаний. Правда, для того, чтобы прийти к этому непротиворечивому представлению, мы должны были все же ввести новое обобщение уравнений гравитационного поля, не оправдываемое нашими действительными знаниями о тяготении». И, наконец, еще раз: космологическая постоянная «нам необходима для того, чтобы обеспечить возможность квазистатического распределения материи, соответствующего фактическим малым скоростям звезд».

Это конец статьи, но только самое начало большой, удивительной и противоречивой истории космологической постоянной.

Открытие космологического расширения в наблюдениях Хаббла (1929 г.) принесло Эйнштейну, судя по всему, немало разочарование. Оказалось, что дорогая ему идея статичности мира неверна. Статичность в мире звезд иллюзорна. А в мире галактик никакой статичности нет — галактики удаляются друг от друга и притом с немалыми скоростями. Модель вечной Вселенной приходится при таких обстоятельствах оставить. Космологическая константа теперь просто не нужна...

Случалось, Эйнштейн называл гипотезу о космологической постоянной самым большим своим промахом в науке. Это слышал от него Гамов в Принстоне в 1940-е годы.

В публичных высказываниях Эйнштейна тон бывал и иным. Он говорил, что, в конечном счете, все должен решить эксперимент. В 1934 г. он писал: «...при рассмотрении космологической проблемы представляется естественным отказаться пока от введения космологической постоянной, — до тех пор, пока для ее введения не возникнут опытные основания».

И, как мы теперь знаем, эксперимент, астрономические наблюдения вынесли, окончательное решение в пользу Эйнштейна, в пользу гипотезы космологической постоянной.

Более того, не только космологическая константа, но сама исходная идея статической Вселенной неожиданно обрела в наши дни новый вид и новую жизнь и притом благодаря тем же астрономическим наблюдениям. Но поразительней всего, пожалуй, то, что традиционная идея статичности мира находится в замечательном согласии с феноменом космологического расширения, как это ни покажется на первый взгляд странным — см. ниже.

Теория Фридмана

О космологическом расширении первым сказал Фридман. В 1922 г., через пять лет после первой космологической работы Эйнштейна и за семь лет до открытия Хаббла, Фридман обратился к модифицированным уравнениям общей теории относительности и доказал, что они богаче, чем об этом можно было судить по космологической модели Эйнштейна. Они допускают не только статический мир, но и мир, способный расширяться как целое или сжиматься.

А. А. Фридман принадлежал к знаменитой петербургской математической школе, основанной Леонардом Эйлером и взращенной Пафнутием Львовичем Чебышевым. Непосредственным учителем Фридмана был Владимир Андреевич Стеклов. За свою короткую жизнь (всего тридцать семь лет) Фридман создал крупную научную школу в теоретической гидромеханике, оставил обширные труды по динамической метеорологии, которые считаются классическими.

Он служил летчиком—разведчиком в Первую мировую войну, успел совершить рекордный подъем с научными целями в стратосферу на аэростате. В последние годы жизни он был директором Главной физической (геофизической) обсерватории в Ленинграде.

Космологии Фридман посвятил две статьи, одну написанную в 1922 г., другую — двумя годами позже, и отдельную главу в своей научно-популярной книге «Мир как пространство и время» (1923 г.). В них он детально изучил, описал и разъяснил динамику космологического расширения.

Оконченная 29 мая 1922 года, первая космологическая работа Фридмана носила название «О кривизне пространства». Речь

в ней, однако, шла не столько о геометрии, сколько о динамике мира. Цель своего исследования Фридман формулирует в следующих словах: «...указать возможность получения особого мира, кривизна пространства которого, постоянная относительно трех, принятых за пространственные, координат, меняется с течением времени, т.е. зависит от четвертой координаты, принятой за временную...» Предполагалось, что трехмерное пространство имеет всюду одинаковую положительную кривизну, — как и в космологии Эйнштейна (в его работе 1917 г.).

Что же касается поведения мира во времени, то вот как говорит об этом Фридман в своей книге: «...можно прийти, прежде всего, к двум типам Вселенной: 1) стационарный тип — кривизна пространства не меняется с течением времени и 2) пе-

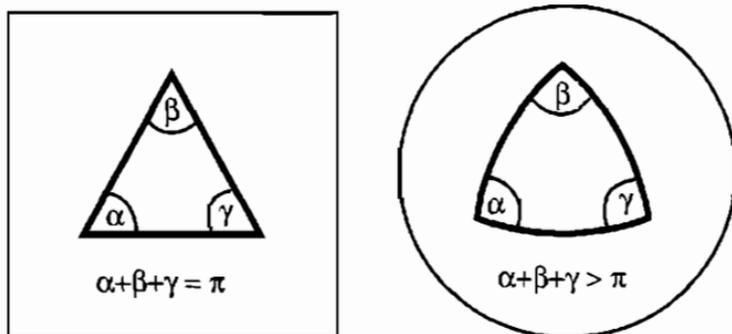


Рис. 4.3. Неевклидова геометрия на сфере: сумма углов сферического треугольника больше двух прямых. Сфера — двумерное изотропное пространство постоянной положительной кривизны. Двумерным евклидовым пространством является плоскость: в этом случае сумма углов треугольника равна двум прямым. Плоскость — двумерное изотропное пространство нулевой кривизны.

ременный тип — кривизна пространства меняется с течением времени. Иллюстрацией первого типа Вселенной может служить шар, радиус которого не меняется с течением времени; двумерная поверхность этого шара будет как раз двумерным пространством постоянной кривизны. Наоборот, второй тип Вселенной может быть изображен меняющимся все время шаром, то раздувающимся, то уменьшающимся, то есть уменьшающим свой радиус и как бы сжимающимся...

Переменный тип Вселенной представляет большое разнообразие случаев. Для этого типа возможны случаи, когда радиус кривизны мира... постоянно возрастает с течением времени. Возможны далее случаи, когда радиус кривизны меняется периодически: Вселенная сжимается в точку (в ничто), затем снова из точки доводит радиус свой до некоторого значения, далее опять, уменьшая радиус своей кривизны, обращается в точку и т.д.»

Фридман далее пишет: «Невольно вспоминается сказание индийской мифологии о периодах жизни, является возможность также говорить о сотворении мира из ничего, но все это пока должно рассматривать как курьезные факты, не могущие быть солидно подтвержденными недостаточным астрономическим экспериментальным материалом».

В пространстве Лобачевского

«О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной» — так называется вторая космологическая работа Фридмана, законченная в ноябре 1924 года. В ней снова речь идет о геометрии мира и его динамике. Судя по названиям, которые автор дал обеим статьям, он исходит в своих исследованиях, прежде всего из геометрии. Но геометрия мира оказывается тесно связанной с его динамикой.

Во второй работе Фридман делает следующий шаг в развитии своей теории — он вводит в космологию новое трехмерное искривленное пространство, которое имеет иную, чем гиперсфера, геометрию — геометрию Лобачевского. Кривизне такого пространства принято приписывать знак «минус». Двумерным аналогом для него является гиперboloид или седловидная поверхность.

Спустя 8 лет, в 1932 г., Эйнштейн и де Ситтер, развивая фридмановскую космологию, дополнили ее рассмотрением расширяющегося мира с плоским, евклидовым трехмерным пространством. Этими тремя вариантами и исчерпывается полный набор теоретических возможностей для пространственно-однородного мира.

Какой из вариантов трехмерной геометрии реализуется в том единственном мире, в котором (по словам Фридмана) «мы обречены жить?»

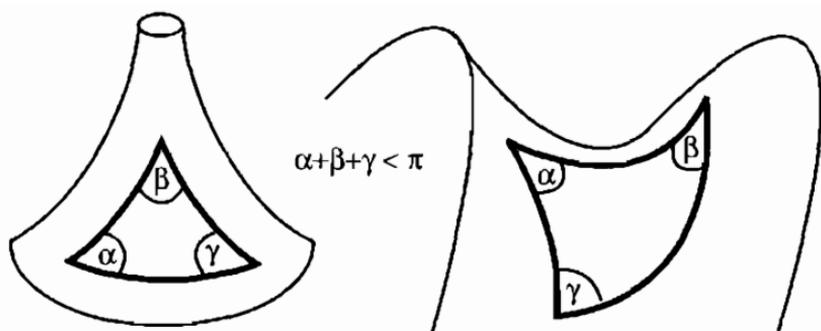


Рис. 4.4. Гиперболоид и седловидная поверхность — два примера поверхностей с геометрией Лобачевского: сумма углов треугольника в этом случае меньше двух прямых. Хотя эти поверхности и не очень похожи друг на друга по общему строению, их дифференциальная геометрия одинакова — это двумерные изотропные пространства постоянной отрицательной кривизны.

Общая теория относительности допускает как статический мир, так и мир эволюционирующий, и во втором случае имеется три варианта пространственной геометрии, включая вариант плоского пространства.

Вот что об этом можно сказать сейчас, через восемь десятилетий после Фридмана, в итоге всех трех упомянутых выше главных открытий в космологии. Статическая модель Эйнштейна не проходит в ее буквальном виде — мир галактик не статичен. Но вопрос о геометрии расширяющегося мира до сих пор не решен. Наблюдательные данные остаются на этот счет в значительной степени неопределенными.

Можно лишь ориентировочно полагать, исходя из всей совокупности современных данных о плотности всех видов вещества во Вселенной, наблюдаемых движениях галактик, возрасте наиболее старых звезд и атомных ядер и т. п., что, скорее всего, пространство мира либо строго плоское, как у Эйнштейна и де Ситтера, либо близкое к плоскому.

Возраст мира

Во всех трех случаях пространственной геометрии космологическое расширение мира начинается с состояния, когда, по словам Фридмана, «пространство было точкой». Это означает, в

частности, что начальная плотность вещества была неограниченно большой, бесконечной в начальный момент. Столь необычное, исключительное состояние мира называют космологической сингулярностью.

Как далеко от нас в прошлом лежал этот момент сингулярности, момент начала расширения? Фридман предупреждает, что ввиду неопределенности конкретных знаний о Вселенной любые цифры могут иметь лишь ориентировочный, иллюстративный характер. «Если все же начать подсчитывать, ради курса, время, прошедшее от момента, когда Вселенная создавалась из точки, до теперешнего ее состояния, ...то получатся числа в десятки миллиардов наших обычных лет». Это из книги. В первой статье для возраста мира, или, как Фридман говорит, времени, прошедшего «от сотворения мира» дается величина «порядка 10 миллиардов лет».

Как же Фридман нашел это число?

В расширяющемся мире существует простое приближенное соотношение между плотностью вещества в мире ρ и временем t , протекшим с начала космологического расширения:

$$G\rho t^2 \sim 1.$$

Здесь G — ньютоновская постоянная тяготения.

Легко проверить, что стоящее в этом уравнении выражение, включающее три величины, является единственно возможной комбинацией, которая могла бы равняться единице. Это вытекает просто из соображений размерности: только эта их комбинация является безразмерной, то есть одинаковой при любом выборе единиц измерения.

Чтобы получить оценку возраста мира, Фридман взял это соотношение и воспользовался еще астрономическими данными о плотности вещества в нашей Галактике. При этом он считал (вполне справедливо), что средняя плотность Галактики — это лишь верхний предел для средней плотности Вселенной, и реальная плотность вещества в мире должна быть заметно меньше той, что известна для Галактики.

Если принять в качестве ρ среднюю плотность звездного вещества Галактики, $\sim 10^{-24}$ г/см³, то из приведенного выше соотношения получится $t \sim 3 \times 10^{15}$ сек, т. е. сто миллионов лет. Но Фридман взял для плотности мира величину в десять тысяч раз

меньшую, и тогда это соотношение дает десять миллиардов лет.

По самым свежим (2003 г.) современным космологическим данным, возраст мира заключен в пределах от 13 до 15 миллиардов лет. Но это как раз и есть 10 миллиардов лет, если говорить о приближенном значении этой величины и оценивать ее по порядку величины, то есть с точностью до степени десятки в ее численном выражении.

Характерная черта Петербургской математической школы — доводить расчеты «до числа», пусть даже речь идет о таком, казалось бы, отвлеченном и необычном по тем временам объекте, как мир в целом. При этом нередко приходится делать некоторые правдоподобные предположения о численных значениях не очень хорошо известных или вовсе неизвестных исходных величин, которые нужны для оценки. И тут уже требуется развитая интуиция и немалая смелость. И тем и другим Фридман обладал, судя по всему, в полной мере.

В теории Фридмана с конечным возрастом мира связано одно важное следствие. За конечное время свет проходит конечное расстояние. Но это означает, что существует принципиальный предел дальности наблюдений: нельзя увидеть того, что лежит дальше расстояния, которое свет способен пройти за десять миллиардов лет жизни Вселенной. По порядку величины, это предельное расстояние составляет десять миллиардов световых лет. Все, что дальше, что за этим горизонтом, принципиально не наблюдаемо.

Дальность действия современных телескопов имеет тот же порядок величины. Самые далекие доступные наблюдению объекты (гигантские галактики и квазары) лежат на расстояниях как раз около десяти миллиардов лет, почти что у самого горизонта мира. Так что практически весь мир, принципиально доступный наблюдениям, реально и наблюдается — почти вплоть до его горизонта. Наблюдаемую часть мира иногда называют Метагалактикой («мета» значит «после», «за»).

Эйнштейн: «новый свет»

В 1920-е годы Фридман был одним из очень немногих, для кого ни математических, ни идейных сложностей в общей теории относительности не существовало.

Он решил задачу о космологическом расширении в искривленном неевклидовом пространстве со всей математической полнотой и разобрал все возможные частные случаи. Но случилось так, что Эйнштейн счел полученное Фридманом решение неправильным: он нашел у Фридмана математическую ошибку.

Эйнштейн написал об этом в 1922 г. в краткой журнальной заметке. В ней говорилось: «Результаты относительно нестационарного мира, содержащиеся в работе Фридмана, представляются мне подозрительными. В действительности оказывается, что указанное в ней решение не удовлетворяет уравнениям поля». Через год Эйнштейн пересмотрел свою точку зрения. Внимательнее прочитать работу Фридмана побудила его личная беседа с одним из друзей Фридмана, Ю. А. Круктовым.

В результате, в том же журнале появилась другая заметка Эйнштейна: «Я считаю результаты г. Фридмана правильными и проливающими новый свет».

В работах Фридмана Вселенная и в самом деле предстала в новом свете. В космологии впервые появились динамика, развитие. Как Коперник заставил Землю обращаться вокруг Солнца, так Фридман заставил Вселенную расширяться.

Динамика расширения

Следуя разъяснениям Фридмана (см. выше), представим себе шар конечных размеров, и пусть плотность вещества в нем будет однородной, т.е. всюду в нем одинаковой. Такой шар служит у Фридмана для иллюстрации динамики космологического расширения. И забудем временно об эйнштейновской космологической постоянной.

Допустим, что вещество шара — это газ каких-то частиц, все равно каких. Но требуется, чтобы давление этого газа было пренебрежимо мало. В пренебрежении давлением единственной силой, действующей на частицы газа, будет их взаимное притяжение. Притяжение стремится сблизить частицы, и это соответствовало бы сжатию шара.

Но представим себе, что шар расширяется. Это возможно, если в какой-то «начальный момент» всем частицам шара приданы скорости, направленные вовне — от центра шара наружу. Не будем пока задумываться о том, откуда эти скорости могли

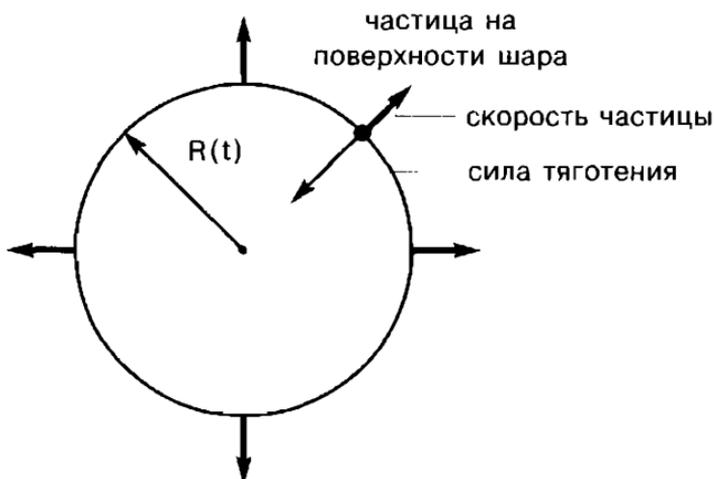


Рис. 4.5. Расширяющийся однородный шар.

бы взяться, и попробуем разобраться, что будет происходить с шаром дальше. Плотность шара — это отношение массы шара к его объему, и она будет уменьшаться при расширении шара. Но как это должно происходить? Как будет вести себя со временем радиус шара?

Проследим, например, за движением какой-либо частицы на поверхности шара. Из-за приданной ей начальной скорости эта частица будет удаляться от центра шара. Но сила притяжения, создаваемая всеми остальными частицами, направлена против этого движения, она стремится это движение остановить и обратить расширение в сжатие. Значит, движение рассматриваемой частицы будет замедляться, скорость ее удаления от центра будет со временем убывать. То есть, тяготение частиц шара тормозит его расширение.

Судьба расширения определяется, таким образом, противоборством тяготения и начального разгона частиц. Если тяготение велико, то оно остановит расширение шара и заставит шар сжиматься. Если же скорости так велики, что тяготению не удастся с ними справиться, расширение шара никогда не остановится и будет происходить вечно. Именно такие две динамические возможности и существуют в теории Фридмана применительно к расширению Вселенной.

Хотя мы рассуждали об этом на примере шара конечных размеров и к тому же руководствовались ньютоновскими представлениями о тяготении, соображения эти находятся в полном качественном согласии с теорией расширения, вытекающей из эйнштейновской общей теории относительности. Конечно, это не случайное совпадение. Так и должно быть, поскольку между обеими теориями существует глубокая и естественная связь: ньютоновская динамика — это частный случай эйнштейновской общей теории относительности.

Простая связь между плотностью и временем $G\rho t^2 \sim 1$, о которой уже говорилось выше, относится к случаю плоского трехмерного пространства. Это самый простой вариант не только по геометрии, но и по динамике.

В этом случае легко найти зависимость расстояний в мире от возраста Вселенной. Действительно, плотность — это масса, приходящаяся на единицу объема. Объем шара радиуса R есть $4\pi R^3/3$. Так как масса шара не меняется со временем, зависимость плотности от радиуса: $\rho \propto 1/R^3$. Тогда приведенное выше соотношение между плотностью и временем дает:

$$R \propto t^{2/3}.$$

Этот закон роста нужно сравнить с воображаемым случаем инерциального разлета, когда никакой гравитации вообще нет, и скорости движения тел не меняются со временем. Инерциальный разлет — это случай, когда при постоянных скоростях расстояния возрастают просто пропорционально времени: $R \propto t$. Как мы видим, в реальном случае, когда тяготение существенно, расширение происходит медленнее, чем по инерции. Это и означает, что оно замедляется со временем.

Замечательно, что при малых временах, считая от начала расширения, этот закон монотонного расширения справедлив не только в плоском, но и в искривленном пространстве.

А практически этот закон приближенно — и с весьма приличной точностью — верен все первые шесть—восемь, а то и десять миллиардов лет жизни Вселенной.

Фридман выяснил, что в простейшем случае, когда космологическая постоянная равна нулю, динамика и геометрия мира связаны друг с другом. Оказывается, что неограниченное расширение возможно в случае трехмерного пространства нулевой (как

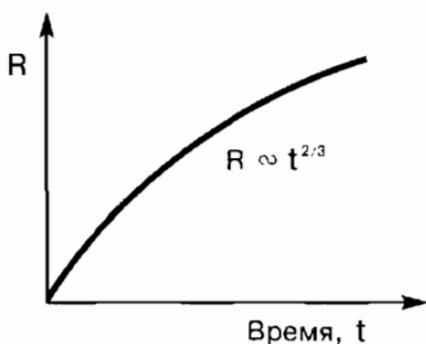


Рис. 4.6. Динамика параболического расширения: расстояния возрастают как время в степени $2/3$.

у Эвклида) и отрицательной (как у Лобачевского) кривизны. А обращение расширения сжатием имеет место в пространстве положительной кривизны, в гиперсфере.

Если же космологическая постоянная отлична от нуля, то возникает возможность неограниченного расширения для всех трех вариантов геометрии (см. ниже).

Что расширяется?

Теория Фридмана предполагает, что Вселенная однородна по распределению вещества в ней, и это действительно так. Как мы сейчас знаем (глава 1), крупномасштабное распределение галактик однородно в масштабах 300 миллионов световых лет и более. В этих космологических масштабах — от размера ячейки однородности и далее к самым большим расстояниям — и применима теория Фридмана.

Она описывает Вселенную как целое, и свойства Вселенной как целого проявляются лишь в самых крупных, но вполне доступных наблюдениям, масштабах.

Свойства пространства и времени определяются распределением и движением вещества, заполняющего пространство. Из этой базовой идеи общей теории относительности вытекает, что пространство, в котором вещество расширяется, и само должно расширяться. Найденный Фридманом закон расширения вещества — это также и закон расширения самого пространства мира.

Космологическое расширение определяется и управляется веществом через посредство собственного тяготения вещества.

Иногда не вполне точно говорят, что все без исключения расстояния в мире увеличиваются из-за космологического расширения. Это не так. Ничто на Земле не меняет своих размеров, и она сама не расширяется по «космологической причине». Не меняют из-за этого своих размеров ни планеты, ни звезды, ни галактики. На небольших расстояниях галактики могут и сближаться друг с другом. Например, ближайшая соседка нашей Галактики, сравнимая с ней по размерам и массе, — галактика Андромеды, не удаляется от нас, а приближается. Расстояние до центра этой галактики от центра нашей Галактики составляет два миллиона световых лет, и сближаются эти галактики со скоростью сто километров в секунду. Через пять—шесть миллиардов лет им предстоит столкнуться друг с другом.

В теории Фридмана космологическое расширение происходит изотропно, то есть одинаково по всем направлениям. Изотропия — это тоже свойство симметрии. Независимость от направлений или от углов означает симметрию относительно вращений в пространстве. Этим свойством космологическое расширение обладает в тех же самых крупных масштабах, где оно, собственно, и происходит.

Слайфер и туманности

Удивительно, но факт: когда в 1917 г. Эйнштейн опубликовал свою модель статической Вселенной, космологическое расширение было уже фактически открыто. Это было сделано американским астрономом Весто Слайфером. Он сообщил о своих наблюдениях в статье, вышедшей в том же знаменательном для космологии 1917-м. Правда, говоря о разбегании «космических туманностей», Слайфер не знал еще, по сути, и сам, что именно он открыл: ни расстояния до туманностей, ни их истинная природа тогда еще не были известны; естественно, что в его работе не было ни слова о космологии.

Семью годами позже, в 1924 г., Фридман обсуждал открытие Слайфера на одном из своих семинаров в Петроградском университете и, по свидетельству участника семинара Д. Д. Иваненко, рассматривал это открытие в космологическом

контексте, считая его — совершенно справедливо — прямым наблюдательным свидетельством в пользу теории расширяющейся Вселенной. Об открытии Слайфера сообщал и издававшийся в те годы в СССР научно-популярный журнал «Мироведение».

Закон Хаббла

Из фридмановской теории вытекает, что космологическое расширение должно происходить по линейному закону: в каждый данный момент истории мира скорость удаления объекта, находящегося на расстоянии R от нас, прямо пропорциональна этому расстоянию:

$$V = HR,$$

где H — постоянный коэффициент, который не зависит ни от расстояния до объекта, ни от направления на него на небе. Линейный закон скорости есть прямое следствие однородности и изотропии в мире галактик. Расширение с таким законом скорости увидит любой наблюдатель, где бы во Вселенной он ни находился и в каком бы направлении он ни смотрел. Линейный закон космологического расширения был открыт Хабблом в его наблюдениях 1927–1929 гг. Сам этот закон и постоянная H по справедливости носят с тех пор его имя.

Хаббл уже знал — из своих собственных исследований, — что Вселенная — это мир галактик. В его распоряжении был телескоп Обсерватории Маунт Вилсон, крупнейший в мире по тем временам; его зеркало имело диаметр 2,5 метра. Направив его на Туманность Андромеды, Хаббл смог разглядеть в ней отдельные звезды. И притом звезды определенного типа — переменные звезды, называемые цефеидами. Эти звезды изменяют свой блеск регулярным образом, почти строго периодически. Они замечательны тем, что период изменения их блеска определенным образом связан со светимостью. Это обстоятельство было установлено сначала по близким цефеидам нашей Галактики.

Собственная светимость — это энергия, излучаемая звездой во все стороны в единицу времени. А блеск (в астрономии) измеряется энергией, приходящей на единицу поверхности Земли в единицу времени. С помощью «стандартного» соотношения



Рис. 4.7. Эдвин Хаббл
(1889–1953).

Многие считают его величайшим астрономом—наблюдателем XX века. Он родился в штате Миссури, учился в США и в Англии, в Оксфорде, а потом всю жизнь наблюдал на Обсерватории Маунт Вилсон в Калифорнии.

С помощью 2,5-метрового телескопа этой обсерватории он установил истинную физическую природу внегалактических туманностей, обнаружил всеобщее разбегание галактик, дал классификацию галактик по их морфологии (т. е. наблюдаемому внешнему виду) и сделал еще целый ряд важных открытий в астрономии.

Он пошел добровольцем (как и другой космолог, Фридман) на фронт в Первую Мировую Войну и служил во Франции, а во Вторую Мировую был занят расчетом таблиц прицельного бомбометания (чем Фридман занимался в Первую Мировую).

Однажды, через много лет после своего космологического открытия, он неожиданно заявил на собрании Американского астрономического общества, что никакого космологического расширения в природе нет, а наблюдаемое красное смещение в спектрах галактик — всего лишь результат старения света на его пути к нам. По словам одного из участников собрания, это выглядело так, как если бы сэр Исаак Ньютон явился бы и сказал: «Кстати, о том яблоке, джентльмены. В действительности ведь оно, знаете ли, не падает».

между периодом изменения блеска и светимостью можно определить светимость звезды по легко измеряемому периоду изменения ее блеска. Но по закону обратных квадратов блеск пропорционален светимости и обратно пропорционален квадрату расстояния до звезды.

Так что, зная и блеск, и светимость, можно определить расстояние. (Заметим в скобках, что этот метод не свободен от систематических ошибок, которые удалось устранить лишь десятилетия спустя.)

Таким путем, с помощью наблюдения цефеид Андромеды, Хаббл обнаружил, что эта «туманность» находится вне нашей

Галактики и довольно далеко от нее. Это не облако газа, а тоже огромная и совсем отдельная галактика.

Затем, используя ярчайшие звезды (калиброванные по цефеидам в ближайших галактиках), Хаббл смог определить расстояния до двух десятков других «туманностей», которые ранее наблюдал Слайфер. Оказалось, что они тоже представляют собой галактики, хотя и не всегда такие крупные, как наша Галактика и Андромеда. Он воспользовался данными Слайфера и Хьюмасона о скоростях движения этих галактик и на основе этих данных и собственных оценок расстояний построил диаграмму зависимости скорости V от расстояния R .

Оригинальная хаббловская диаграмма воспроизводится на нашем рис 4.8. Это наглядная иллюстрация космологического расширения, его графический образ. Из нее следует линейный закон — закон прямой пропорциональности между скоростью удаления от нас галактики и расстоянием до нее.

На этой диаграмме нет галактики Андромеды. Дело в том, что она не удаляется от нас, а приближается к нам (как уже говорилось выше). Это близкая к нам галактика, расстояние до

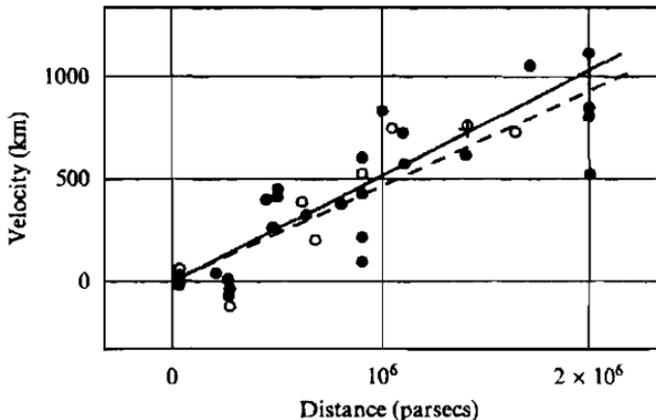


Рис. 4.8. Оригинальная Хаббловская диаграмма 1929 года.

Зависимость скорости удаления галактики (в км/сек) от расстояния до нее (в парсеках). Это графический образ самого грандиозного по масштабу явления природы — космологического расширения. Расстояния у Хаббла были занижены тогда почти в... 10 раз.

На оригинальной диаграмме по вертикальной оси ошибочно указано (km) — должно быть (km/s).

нее около двух миллионов световых лет. Регулярное же разбегание галактик по закону Хаббла обнаруживается, начиная с расстояний, которые приблизительно в два—три раза больше.

Стоит напомнить, что измерения скоростей и закон Хаббла основаны на измерениях красного смещения в спектрах галактик. Переход от спектров к скоростям предполагает объяснение красного смещения эффектом Дошлера. Суть его в том, что длина волны регистрируемого излучения изменяется при относительном движении источника и приемника. В частности, длина волны растет (а свет «краснеет»), когда расстояние между источником и приемником возрастает со временем.

Хаббл следовал доплеровскому толкованию красного смещения в своих первых публикациях и ясно говорил о движениях галактик, их скоростях и т. п. Но позже он был склонен понимать красное смещение, как некий совсем особый феномен природы — «космическое старение света». Для такого феномена нет никаких оснований в физике.

Хаббл, случалось, испытывал колебания, иногда был, кажется, готов согласиться со всеми, но потом возвращался к прежнему и снова стоял на своем. Как предполагали его коллеги, именно из-за этой своей нетвердой позиции Хаббл остался без Нобелевской премии.

А в том, что само по себе его открытие — это открытие «нобелевского» ранга, никто из космологов, конечно, не сомневался и не сомневается.

Постоянная Хаббла

Постоянная Хаббла измерена сейчас не очень точно. Ее размерность, как видно из закона Хаббла, — обратное время. Принято измерять ее в единицах км/сек на мегапарсек (Мпк). Парсек — расстояние, с которого диаметр земной орбиты виден под углом в одну секунду. Численно один парсек близок к трем световым годам. Мегапарсек это миллион парсек. В этих единицах современные измерения дают:

$$H = 65 \pm 10.$$

Последнее означает, что вероятное значение постоянной Хаббла заключено в пределах от 55 до 75 км/сек/Мпк. Точность, как мы видим, хуже десяти процентов.

Все дело в том, что расстояния до галактик измеряются все еще не очень точно. Это наблюдательная задача большой сложности. Сам Хаббл в 1927–29 гг. оценивал расстояния до галактик с немалой систематической ошибкой. Из-за этого у него получилось $H = 500$ км/сек/Мпк. Оценки расстояний в те времена были занижены почти в десять раз.

Если какая-то галактика находится от нас на расстоянии в миллиард световых лет, т. е. 300 миллионов парсек (далее мы чаще будем измерять расстояния в парсеках, а не в световых годах), то ее скорость составит — при принятом сейчас значении постоянной Хаббла — от 17 до 23 тысяч километров в секунду. Это не так уж далеко от скорости света (триста тысяч километров в секунду).

Хотя величину H называют константой, она является постоянной совсем не в том смысле, что, например, постоянная тяготения или космологическая постоянная. Постоянная Хаббла не зависит от направлений и расстояний в пространстве — таков смысл ее постоянства. Но она отнюдь не постоянна во времени. По теории Фридмана, величина H может меняться при космологическом расширении. В простейшем случае имеет место приближенное соотношение:

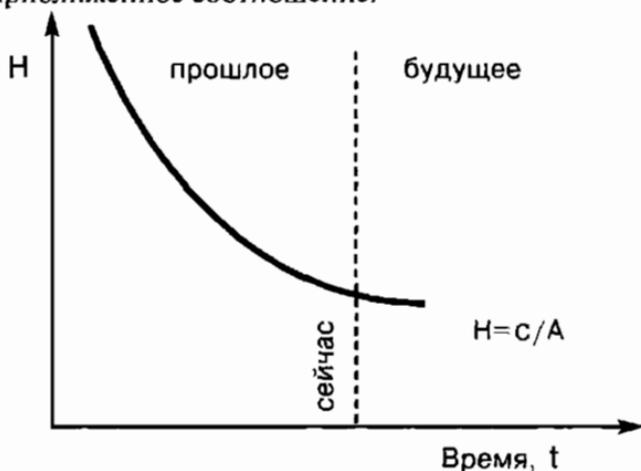


Рис. 4.9. «Постоянная» Хаббла, как функция времени.

В эпоху преобладания вещества она падает как $1/t$, но в эпоху безраздельного господства вакуума оказывается постоянной, не зависящей от времени.

$$H \sim 1/t.$$

Это соотношение верно тогда, когда и формула $G\rho t^2 \sim 1$ — см. выше. В соответствии с этим, постоянная Хаббла растет назад по времени и в начальной космологической сингулярности обращается в бесконечность. Так что исходная «точка» характеризуется двумя бесконечностями — бесконечной плотностью и бесконечной постоянной Хаббла. Одно, конечно, связано с другим, так как из двух только что записанных соотношений вытекает: $G\rho \sim H^2$.

С другой стороны связь постоянной Хаббла со временем означает, что по ее измеренному значению можно определить возраст мира в современную эпоху. Строго говоря, это будет лишь приближенная оценка. Но с той точностью, которую и следует от оценки ожидать, она дает вполне приемлемую, разумную величину. Действительно, если постоянная Хаббла заключена в пределах 55–75 км/сек/Мпк, то простой переход к обратной величине, $t \sim 1/H$, и пересчет на годы даст десять миллиардов лет, по порядку величины.

Горячее начало

Какой же была Вселенная 10–15 млрд. лет назад, в начале своей эволюции? Что было в самой «точке», о которой говорит Фридман, как о начальном состоянии мира? Ничего достоверного на этот счет пока не известно. И трудности в изучении этого состояния практически непреодолимы: в сингулярности или около нее Вселенной управляла совсем другая физика, отнюдь не сводящаяся к тому, что мы сейчас знаем о ее законах. Но если отступить от этого первого момента хотя бы на минуту, состояние Вселенной и дальнейший ход ее эволюции допускают уже полное и детальное исследование на основе твердо установленных физических законов.

О первых минутах космологического расширения сейчас известно действительно немало. Прежде всего, надежно установлено, что вещество Вселенной было тогда очень горячим. При возрасте мира в 200 секунд температура вещества составляла миллиард градусов, по порядку величины. Никаких планет, звезд, галактик при такой температуре не могло существовать. Не было атомов — вещество было полностью ионизованным,

электроны были оторваны от ядер атомов быстрыми хаотическими тепловыми движениями. Более того, при этой температуре не могли существовать даже сложные ядра.

Только самые простые ядра, ядра атома водорода — протоны — имелись в горячей космической смеси. Вместе с протонами в этой среде находились электроны и притом ровно в том же количестве, что и протоны, так что среда была электрически нейтральной. В ней были также нейтроны и нейтрино. Эта среда содержала также фотоны — кванты электромагнитного излучения. Они представляли собой газ, находившийся в термодинамическом равновесии с веществом и имевший ту же температуру. (Добавим в скобках, что присутствовали также и гипотетические частицы скрытой массы, о которых мы скажем отдельно.)

Такая картина ранней Вселенной была в 1940-50-е гг. описана Г. А. Гамовым, тогда профессором Университета Джорджа Вашингтона, а некогда студентом профессора Фридмана в Ленинградском университете. Гамов писал, что идею горячего начального состояния мира он заимствовал у своего учителя. Применительно к этой теории горячего начала мира и возник первоначально (с легкой руки Ф. Хойла) термин «Большой Взрыв». По Гамову, вначале был вселенский взрыв, который произошел одновременно и повсюду в мире, заполнив пространство горячим излучением и веществом, из которого через миллиарды лет образовались все астрономические тела и все, что на них, — «считая и нас с вами», как писал Гамов в одной из своих научно-популярных книг.

Исходным мотивом этих исследований было стремление объяснить происхождение химических элементов, их относительную распространенность во Вселенной. Известно, что Солнце состоит в основном из водорода и гелия в пропорции приблизительно 3:1 по массе. Все другие, более тяжелые элементы присутствуют в виде примеси, на которую приходится около двух процентов по массе. Тот же состав имеет подавляющее большинство других звезд и межзвездный газ, заполняющий пространство между ними.

Как же сложился универсальный химический состав космического вещества?

Рис. 4.10. Георгий Антонович Гамов (1904—1968). Ему принадлежат три научных достижения высочайшего, «нобелевского» ранга.

В 1928 г. он впервые применил квантовую механику (которая тогда была еще только—только создана) к атомному ядру и на этой основе дал объяснение одному из видов радиоактивности — альфа—распаду атомных ядер.

В 1948 г. Гамов выдвинул теорию «горячей» Вселенной и в ее рамках смог предсказать (вместе со своими учениками Ральфом Альфером и Робертом Херманом) реликтовое излучение — остаточное излучение, сохранившееся в мире с самых ранних стадий его расширения.

В 1954 г. он заинтересовался биофизикой и вскоре разгадал ключевую загадку универсального генетического кода.

Гамов родился в Одессе, в семье преподавателей гимназии, учился в Ленинградском университете, где его приятелями были Ландау, Бронштейн, Иваненко, а среди учителей — Фридман. Гамов начинал дипломную работу по космологии под его руководством, но неожиданная смерть Фридмана помешала этим планам. Друг Фридмана профессор Крутков предложил Гамову другую тему, по квантовой механике. После окончания университета его направляют для научной стажировки в Геттинген, Копенгаген. Кембридж по рекомендации профессоров Хвольсона и Круткова.

В 1931 г. Гамова избирают членом—корреспондентом Академии Наук. Через 10 лет исключают из Академии (в списке исключенных стояли вместе с его именем и другие известные имена: Ю. А. Крутков, А. Н. Туполев, астроном Б.В. Нумеров...), а еще через полвека, в 1990 г., снова в ней восстанавливают (посмертно, увы). Гамова исключили за «невозвращенство», как это тогда называлось: в 1933 г. он уехал за границу на научную конференцию и не вернулся. Работал сначала в Европе, а потом в США.

Он был широко известен на Западе (в СССР его имя долгое время было под запретом) не только как выдающийся теоретик, но и как автор исключительно удачных научно—популярных книг; он написал их два десятка, и все они многократно издавались на разных языках. В ученом мире Гамов был знаменит неистощимым запасом шуток и анекдотов, а главное — безграничной любовью к физике. Наука была для него скорее азартным увлечением, чем тяжким повседневным трудом. В глазах окружающих он был веселым и забавным, но не очень солидным (и это при росте под 2 метра) и совсем не деловым.



Как возникло, прежде всего, космическое соотношение между водородом и гелием? Вот проблема, за решением которой физики 1940-х годов обратились сначала к звездным недрам, где, как уже тогда было известно, интенсивно протекают реакции превращения атомных ядер. Вскоре, однако, выяснилось, что при обычных физических условиях, которые осуществляются в центральных областях звезд, подобных Солнцу, никакие элементы тяжелее гелия не могут образоваться в сколь-нибудь существенных количествах.

А что, если все элементы были «сварены» не в звездах, а сразу во всей Вселенной на первых этапах космологического расширения? Универсальность химического состава при этом автоматически обеспечивается. Что же касается физических условий, то в ранней Вселенной ее вещество несомненно было плотным, как в недрах звезд, а то и еще плотнее. Высокая плотность среды — неперемнное условие эффективного протекания ядерных реакций синтеза элементов. Для этих реакций необходима также и высокая температура. Потому-то Гамов и выдвигает предположение о том, что вещество ранней Вселенной было не только плотным, но и очень горячим.

Ранняя Вселенная была, по идее Гамова, тем естественным ядерным реактором, в котором при известной (довольно умеренной) плотности и гигантской температуре произошел синтез всех химических элементов природы.

Космический ядерный реактор

Фридман открыл динамику и геометрию мира. Гамов привнес в космологию термодинамику и ядерную физику.

Трактовка ранней Вселенной в духе общих законов термодинамики и ядерной физики была в 40-е гг. для большинства физиков и астрономов немалой неожиданностью. Искать в гипотетических уже самих по себе космологических теориях ответ на конкретные вопросы о реальном составе космического вещества представлялось дерзкой и рискованной затеей.

Тем более что космология в те годы, казалось, зашла в тупик, она давала слишком низкую оценку возраста мира, всего 2 миллиарда лет, тогда как возраст Солнца 5 миллиардов лет. Это противоречие было связано с ошибкой в тогдашних измерениях

постоянной Хаббла; оно оказалось окончательно снятым лишь к концу 50-х годов.

Но Гамов это временное затруднение, судя по всему, совсем не смущало. Его вера в правильность фридмановской теории была столь велика, что он не сомневался — «кризис возраста» в космологии будет так или иначе преодолен.

Подробная статья о ядерных реакциях в ранней горячей Вселенной, подготовленная Гамовым и его учеником Ральфом Альфером, появилась в печати за... тремя именами: Альфер, Бете, Гамов. Это была одна из «научных шуток» в стиле Гамова: имя Бете было вписано в уже готовый текст. Так возникла ставшая впоследствии знаменитой Альфа-Бета-Гамма-теория.

Синтез гелия

Теория совершенствовалась со временем благодаря консультациям и критическим замечаниям, которые высказывали по ходу дела в ее адрес Э. Ферми, С. Хаяши, Ф. Хойл, У. Фаулер, М. Бербидж, Дж. Бербидж. В дальнейшем процесс космологического нуклеосинтеза заново изучали в более строгой постановке, ставшей возможной благодаря уточнению данных ядерной физики, Зельдович и его сотрудник Якубов в 1964-1965 гг. Вместе с тем шло уточнение наблюдательных астрономических данных о химическом составе вещества Вселенной.

В итоге большой многолетней коллективной работы специалистов разных стран, инициированной Гамовым, стало очевидным, что космическая распространенность двух главных элементов — водорода и гелия — действительно может быть объяснена ядерными реакциями в горячем веществе ранней Вселенной.

Процесс образования гелия из протонов и нейтронов протекает так. При температуре в миллиард градусов Кельвина протон и нейтрон могут, столкнувшись при своих быстрых тепловых движениях, слиться и образовать ядро дейтерия. Это уже составное ядро, но все же еще ядро водорода, ядро тяжелого водорола.

Следующее звено в цепочке ядерных превращений таково. Два только что образовавшихся ядра дейтерия сталкиваются друг с другом и образуют ядро трития, выбрасывая при этом

один свободный протон. Тритий — это тоже водород, но самый тяжелый, в его ядре три частицы: один протон и два нейтрона. После этого ядро трития может столкнуться с другим ядром дейтерия. Слияние их ведет к образованию нового химического элемента — гелия, второго после водорода в таблице Менделеева. В ядре гелия, возникающем таким путем, содержится два протона и два нейтрона; это гелий-4, самый распространенный в природе изотоп гелия.

В той же реакции освобождается один нейтрон из тех трех, что были в исходных ядрах трития и дейтерия.

На этом цепочка ядерных превращений не обрывается. В ходе столкновений и слияний частиц и легких ядер образуется гелий-3, легкий изотоп гелия. Но этих ядер образуется много меньше, чем ядер гелия-4. Образуются и ядра лития, третьего элемента таблицы Менделеева, но их возникает и еще меньше, чем ядер гелия-3.

Процесс ядерных превращений останавливается из-за падения температуры среды в ходе космологического расширения. При более низких температурах столкновения частиц уже не

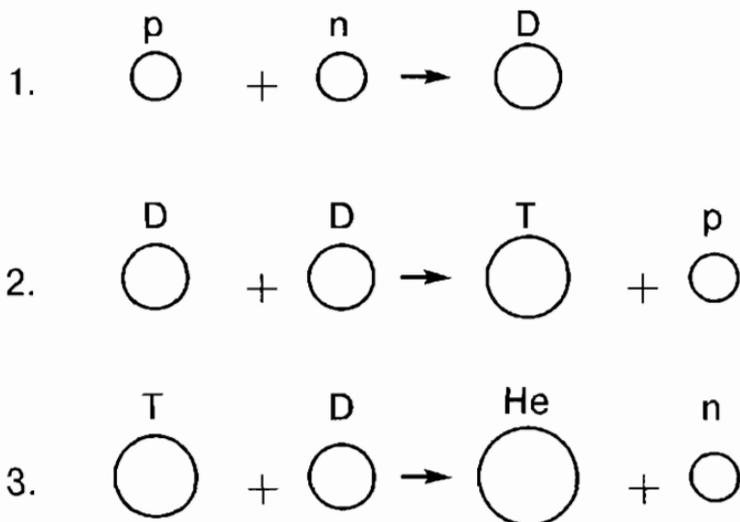


Рис.4.11. Синтез гелия в горячей Вселенной.

Ядра гелия (He) возникают в результате цепочки из трех ядерных реакций, в которых участвуют протоны (p), нейтроны (n) и ядра тяжелого водорода — дейтерий(D) и тритий (T).

приводят к их слияниям, и дальше самых легких ядер процесс синтеза элементов в горячей ранней Вселенной не заходит. Основной продукт этого процесса — гелий-4, на который с тех пор приходится около четверти массы звезд и межзвездного газа.

Что же касается всех более тяжелых элементов — кислорода, углерода, кремния и т. д. — они должны, по-видимому, синтезироваться иным, не космологическим путем, например, при вспышках сверхновых звезд. Как уже сказано, на них приходится всего около двух процентов массы звезд и межзвездного газа.

Реликтовое излучение

Но имеется и еще один «продукт» ранней горячей Вселенной — это газ фотонов, квантов электромагнитного излучения. При температурах в миллиард градусов газ фотонов имелся во Вселенной вместе с горячим веществом — этого требуют законы термодинамики. Средняя энергия одного фотона при таких обстоятельствах близка к средней энергии теплового движения других частиц, образующих горячую космическую плазму. Число же фотонов много больше числа протонов — приблизительно в десять миллиардов раз.

Но это означает, что полная энергия фотонов во столько же раз больше полной тепловой энергии частиц плазмы. Даже если учесть не только тепловую энергию плазмы, но и энергию покоя ее частиц, все равно фотоны будут доминировать по энергии над плазмой.

Фотоны и космическая плазма охлаждались в ходе общего космологического расширения. При этом преобладание фотонов над протонами и нейтронами по энергии продолжало существовать в первые сто тысяч лет жизни Вселенной. После этого доминировали по энергии уже частицы. Но фотоны никуда не исчезли. Охлаждаясь и дальше, они продолжали существовать во Вселенной.

Те самые фотоны, которые имелись в эпоху ядерных реакций в ранней Вселенной, сохранились и до наших дней. Такое предсказание явным образом вытекало из теории Гамова. Ему удалось даже примерно указать, какой должна быть температура излучения в современную эпоху. По расчетам Гамова и его учеников и сотрудников Ральфа Альфера и Роберта Хермана

(оба они, между прочим, из семей с российскими корнями) получалось, что в нашу эпоху температура фотонов должна быть весьма близкой к абсолютному нулю, всего в пределах от 1 до 10 градусов Кельвина. Эти холодные фотоны должны равномерно заполнять все пространство и создавать тем самым общий космический фон электромагнитного излучения.

В 1965 г. фотоны, образующие космическое фоновое излучение, были обнаружены радиоастрономами А. Пензиасом и Р. Вилсоном. Температура излучения оказалась близкой к трем градусам Кельвина. Так теория горячей Вселенной получила прямое наблюдательное подтверждение. А измеренные три градуса очень хорошо согласуются с теоретическим предсказанием — температура попадает точно в расчетный интервал.

Между прочим, в одной из своих многочисленных научно-популярных статей Гамов написал (в 1950 г.), что температура фонового излучения должна быть около трех градусов — это середина (логарифмическая) расчетного интервала температур. Гамов угадал — так и оказалось.

За семь лет до Пензиаса и Вилсона трехградусное космическое излучение реально регистрировалось в Пулковской обсерватории с помощью рупорной антенны, построенной Хайкиным, Кайдановским и Шмаоновым. Но никто, увы, не придал тогда этому значения...

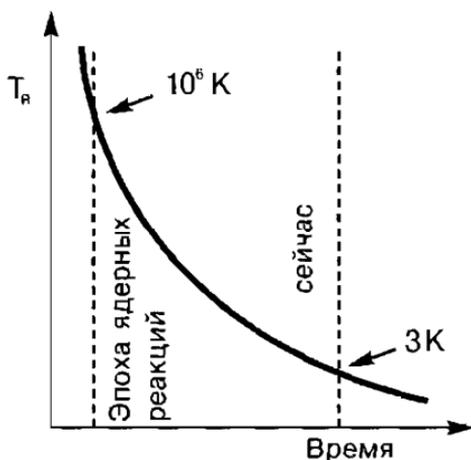


Рис.4.12. Температура излучения в расширяющейся Вселенной.

Удивительный космический феномен — остаточное излучение ранней горячей Вселенной — получил, по предложению Шкловского, название реликтового излучения. В англоязычной литературе чаще говорят «космическое микроволновое фоновое излучение».

Открытие реликтового излучения было подтверждением не только

идеи горячего начала мира. Это было также и подтверждение общей концепции эволюции мира, созданной Фридманом. Динамика и геометрия мира, описываемые теорией Фридмана, вместе с термодинамикой и ядерной физикой космической среды, разработанными Гамовым, составляют главное содержание современной науки о Вселенной.

Изучение реликтового излучения показало, что оно заполняет пространство равномерно, и эта равномерность почти идеальна. Из-за своей почти идеально однородной плотности, реликтовое излучение приходит к нам равномерно из всех направлений, т. е. оно изотропно. Степень изотропии исключительно высока: относительные отклонения от нее не превышают сотых долей процента. Это рекордно высокая точность для космологии. Ее стоит сравнить с точностью, с которой измерена равномерность распределения галактик, однородность плотности светящегося вещества Вселенной; точность по галактикам составляет примерно тридцать процентов.

Так что однородность и изотропия реликтового излучения — это самое весомое наблюдательное подтверждение высокой пространственной симметрии модели Фридмана.

Мировой эфир

Вскоре после его открытия, а особенно в самые последние годы, реликтовое излучение превратилось, можно сказать, из объекта исследования в инструмент исследования мира. Из наблюдений этого излучения удалось определить движение Земли относительно этого фона. Это стало возможно опять-таки благодаря эффекту Доплера. Если радиоантенна, или радиометр, как предпочитают сейчас говорить радиоастрономы, движется относительно реликтового фона, то встречные реликтовые фотоны будут иметь чуть меньшую длину волны, чем в случае, когда радиометр покоится относительно фона. Точно так же догоняющие радиометр фотоны будут иметь несколько большую длину волны. Измеряя эти два сдвига или любой из них, можно определить скорость радиометра относительно реликтового фона.

Так что для движущегося наблюдателя реликтовое излучение уже не выглядит строго изотропным. При этом возникает

сдвиг длин волн в направлении вперед—назад, который называют дипольной анизотропией излучения.

Дипольная анизотропия реликтового фона была реально обнаружена с помощью радиометров, вынесенных за пределы земной атмосферы (чтобы она не мешала наблюдениям) на высотных самолетах и аэростатах. Оказалось, что в направлении на созвездие Льва имеется сдвиг в сторону более коротких волн, а в противоположном направлении — в сторону длинных. Разница составляла приблизительно две десятых процента, и, пересчитав ее на скорость по эффекту Доплера, наблюдатели нашли, что скорость Земли относительно реликтового фона составляет приблизительно триста километров в секунду. Это одна тысячная скорости света, т. е. одна десятая процента от нее; так и должно быть, ибо относительный сдвиг длины волны равен — в каждом из обоих направлений — отношению скорости движения к скорости света.

Итак, Земля движется в направлении на созвездие Льва со скоростью приблизительно в 300 км/сек относительно реликтового фона. С такой скоростью мы мчимся в «мировом эфире», роль которого в современной космологии исполняет реликтовый фон.

Этот фон служит идеально устроенной и очень удобной системой отсчета для измерения движений различных тел в космологии. (Но реликтовое излучение не имеет ничего общего с тем гипотетическим мировым эфиром, который обсуждался в доэйнштейновской физике в качестве особой, специальной среды, в которой якобы только и мог распространяться свет.)

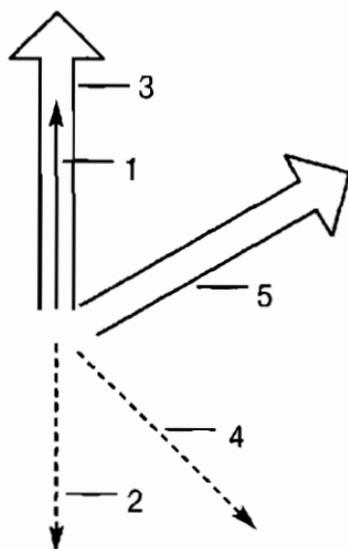
Находясь на Земле, астроном—наблюдатель измеряет скорости других галактик относительно Земли. Выходит, что для определения «истинных» скоростей галактик, т. е. их скоростей относительно реликтового фона, нужно из измеренной скорости вычесть скорость Земли.

Если наблюдаются галактики на расстояниях в двести мегапарсек, то их скорости составят по закону Хаббла приблизительно 10000 км/сек. Тогда поправка на движение Земли, очевидно, не очень существенна, она составит всего три процента, не более. Но для близких галактик эта поправка относительно больше и ее нужно принимать во внимание.

Скорость Земли относительно реликтового фона в десять раз больше скорости обращения Земли вокруг Солнца (30 км/сек). Она близка к скорости обращения Солнца вокруг центра Галактики (220 км/сек). Но по направлению скорость Земли относительно реликтового фона почти в точности противоположна орбитальной скорости Солнца.

Рис. 4.13. Движение Земли (вместе с Солнцем), Галактики и группы близких галактик.

- 1 — скорость Земли относительно реликтового фона;
- 2 — скорость Земли относительно центра Галактики;
- 3 — скорость центра Галактики относительно реликтового фона;
- 4 — скорость центра Галактики относительно группы близких галактик;
- 5 — скорость центра масс группы галактик относительно реликтового фона.



Нетрудно сообразить, что из последнего вытекает значение скорости центра Галактики относительно реликтового фона — эта скорость равна сумме скоростей 300 и 220 км/сек, т. е. составляет примерно 500 км/сек.

Более того, из последней цифры — вместе с данными о движениях других галактик относительно нашей Галактики — вытекает, что большая совокупность галактик в объеме с размером в 50–100 мегапарсек движется, как целое, относительно реликтового фона со скоростью 500–600 км/сек. То, что такая большая масса столь быстро движется в «мировом эфире», оказалось полным сюрпризом для астрономов. Прежде считалось, что центр этой массы должен скорее почти покоиться относительно фона. Мы еще вернемся далее к обсуждению этого факта.

Всемирное антитяготение

Гипотеза Эйнштейна

С конца 1920-х годов гипотеза эйнштейновской космологической постоянной сошла, казалось, со сцены. Действительно, раз мир не статичен и расширяется, в ней уже просто нет нужды. Так считал Эйнштейн, так думали и другие теоретики, среди них Л. Д. Ландау и В. Паули. Об умонастроении Ландау в 1940–50 гг. пишет В. Л. Гинзбург: «Л. Д. Ландау даже слышать не хотел о Λ -члене, но добиться от него причины такой позиции мне не удалось».

И, тем не менее, интерес к гипотезе Эйнштейна не пропал совсем. Десятилетие за десятилетием, начиная с работ В. де Ситтера и Ж. Леметра, складывалось понимание того, что же, в сущности, стоит за этой новой константой природы, — если только она не равна нулю.

Постепенно стало ясно, что в своей первой космологической работе Эйнштейн предложил гипотезу о том, что наряду с обычным веществом, все частицы которого — протоны, электроны, нейтроны и т. д. — испытывают взаимное притяжение, в мире существует и совсем необычная среда, создающая не притяжение, а антипритяжение, отталкивание. Эта неизвестная до того — ни в теории, ни в эксперименте — среда действует на обычное вещество Вселенной и способна уменьшить или даже вовсе компенсировать взаимное притяжение его частиц, а то и пересилить его.

Антигравитирующая среда представлена в модифицированных уравнениях всего одной константой — эйнштейновской

космологической постоянной Λ . Величина космологической постоянной не выводится из какой-либо фундаментальной теории, а подлежит наблюдательному определению. В модели Эйнштейна ее значение должно быть таким, чтобы обеспечить точную компенсацию тяготения антитяготением.

Если такая компенсация имеет место, то сумма сил, приложенных к каждой частице космического вещества, оказывается равной нулю, и потому все частицы в мире могут находиться в покое. Если все частицы покоятся, Вселенная как целое, тоже лишена движения — она неподвижна и статична, она не меняется со временем. Именно это состояние баланса сил и описывается, по сути, космологией Эйнштейна.

Так из, казалось бы, вынужденного предположения о новой постоянной природы родилась грандиозная гипотеза всемирного антитяготения.

Ни в первой своей космологической работе, ни позднее Эйнштейн не говорит об антитяготении, вакууме, темной энергии и т. п. Но дело не в словах и названиях. Он вообще воздерживается от какой-либо физической интерпретации космологической постоянной. У него не говорится и о компенсации тяготения космического вещества за счет физического эффекта, описываемого этой постоянной.

Сейчас считается, что космологическая постоянная представляет собой количественную характеристику космического вакуума. Такая точка зрения была впервые высказана Э. Б. Глинером в 1965 г. Космический вакуум — это такое состояние космической среды, которое обладает постоянной во времени и всюду одинаковой в пространстве плотностью — и притом в любой системе отсчета. По этим свойствам вакуум принципиально отличается от всех других, обычных форм космической среды, плотность которых неоднородна в пространстве, падает со временем в ходе космологического расширения и может быть разной в разных системах отсчета.

Если оставить в стороне представление о статичности Вселенной, то гипотеза Эйнштейна была в действительности предположением о существовании в мире космического вакуума. И это предположение, наконец, подтвердилось в астрономических наблюдениях.

Открытие

В 1998–99 гг. две группы астрономов открыли всемирное антитяготение и космический вакуум. В работе участвовало большое число астрономов (около ста, в общей сложности), одной группой руководили Брайан Смит и Адам Райес, другой — Сол Перлмуттер; исследования продолжаются и сейчас, они приобретают все больший размах, в них включаются новые и новые наблюдатели, а за ними и теоретики.

Главный смысл новейших открытий в космологии таков. В наблюдаемой Вселенной доминирует вакуум, — в точности тот, который математически описывается эйнштейновской космологической постоянной. По плотности энергии он превосходит все «обычные» формы космического вещества вместе взятые. Вакуум создает космическое антитяготение, антигравитацию, которая управляет динамикой космологического расширения в современную эпоху.

Открытие сделано на основании изучения далеких вспышек сверхновых звезд. Из-за их исключительной яркости, сверхновые можно наблюдать на очень больших, по-настоящему космологических, расстояниях. Опуская другие детали, скажем, что использовались данные о сверхновых определенного типа (Ia), которые принято считать «стандартными свечами»; их собственная светимость в максимуме блеска действительно лежит в довольно узких пределах (эксперты по сверхновым продолжают между тем спорить, в каких именно).

На возможность использования сверхновых звезд в качестве «стандартных свечей» впервые указал Ю. П. Псковский в 1977 году.

Сверхновые типа Ia заняли сейчас то место в космологии, которое во времена Хаббла принадлежало гораздо менее ярким звездам цефеидам. Сверхновые служат для определения таких больших космологических расстояний, на которых цефеиды и другие «обычные» звезды уже не видны даже в самые крупные современные телескопы. Самые далекие сверхновые наблюдаются с помощью космического телескопа, носящего имя Хаббла.

Хаббловский космический телескоп находится на околоземной орбите уже много лет и исправно служит астрономии и космологии. Его зеркало имеет почти в точности тот же диаметр

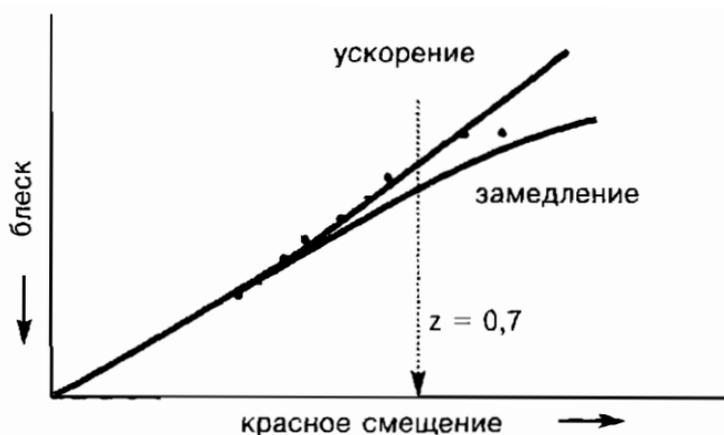


Рис. 4.14. Сверхновые звезды и ускорение Вселенной:
зависимость блеска звезды от красного смещения.

Наблюдательные точки ложатся на верхнюю из двух теоретических кривых. Это означает, что космологическое расширение происходит с ускорением.

Блеск измеряется в логарифмической шкале и возрастает на вертикальной оси сверху вниз.

(2,4 метра), что и у Хаббла на обсерватории Маунт Вилсон. Но его мощь гораздо сильнее из-за отсутствия атмосферных помех. И, кроме того, установленные на нем совершенные приемники света делают эффективность наблюдений гораздо более высокой, чем это было в 1920-е годы, — сейчас учитывается и регистрируется чуть ли не каждый падающий на зеркало фотон.

Одно плохо со сверхновыми — этих звезд очень мало. В среднем на обычную галактику приходится одна вспышка сверхновой за примерно сто лет, да и длится эта вспышка всего несколько месяцев, а то и недель.

Первая группа наблюдателей, сообщившая о своих результатах в 1998 г., располагала данными о всего нескольких сверхновых нужного типа на нужных расстояниях; но уже и этого было достаточно, чтобы заметить космологический эффект в законе убывания видимого блеска с расстоянием.

В наблюдениях свехновых непосредственно измеряются две величины: блеск звезды (т. е. энергия, приходящая от нее на Землю в единицу времени на единицу площади) и красное смещение.

Красное смещение в спектре возникает из-за общего космологического расширения. Галактика, в которой находится звезда, удаляется от нас по закону Хаббла. Поэтому все длины волн света от нее смещены (см. «Разбегание галактик»). Мерой смещения служит величина

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0,$$

где λ — длина волны регистрируемого света, λ_0 — длина волны испускаемого света. Величина z (как и сам феномен, который она характеризует) называется красным смещением.

Измерив блеск сверхновой и ее красное смещение, астрономы ставят соответствующую точку на графике блеск—красное смещение (рис. 4.14).

На этом графике показаны две линии, которые отображают теоретическую зависимость блеска от красного смещения. При малых z обе линии сливаются в одну.

В этом случае связь между измеряемыми величинами очень простая — она соответствует обычному закону обратных квадратов: блеск F убывает с расстоянием R по закону

$$F \propto R^{-2}.$$

Так как в соответствии с эффектом Доплера $z = V/c$, а по закону Хаббла $V = HR$, то можно получить связь между расстоянием и красным смещением для малых z :

$$R = cz/H.$$

В результате блеск убывает с красным смещением по закону обратных квадратов (справедливо для малых z):

$$F \propto z^{-2}.$$

Эта зависимость и изображена совпадающими начальными участками обеих теоретических кривых на рис. 4.14.

Но при не малых красных смещениях связь между расстоянием и красным смещением становится сложнее.

В эту связь оказывается вовлеченной не только скорость разбегания V , но и ускорение, с которым это разбегание происходит. Это отражено на рис. 4.14. Теоретическая кривая для ускоряющегося расширения проходит выше, чем для замедляющегося.

А это означает, что по виду зависимости блеска от красного смещения можно определить ускоряется космологическое расширение или замедляется. Для этого нужно наблюдать побольше

сверхновых на таких больших расстояниях, где две теоретические кривые различны, и смотреть, как наблюдательные точки лягут на график.

Наблюдения сверхновых звезд определенно указывают на то, что точки ложатся на верхнюю кривую. А это означает, что Вселенная расширяется с ускорением. Ускорение же может создать только космический вакуум с его антигравитацией: антигравитация стремится удалить тела друг от друга и тем самым подгоняет разлет галактик и скоплений.

По этому ускорению космологического расширения и удалось распознать космический вакуум и даже весьма точно измерить плотность его энергии. Оказалось, что плотность энергии вакуума составляет $\approx 5 \times 10^{-30}$ г/см³, если выразить ее в единицах плотности массы. Как известно, масса и энергия связаны между собой знаменитой формулой $E=mc^2$. Чтобы пересчитать плотность массы на плотность энергии, нужно умножить ее на c^2 .

Напомним, что в тех же единицах г/см³ средняя плотность светящегося вещества звезд составляет $\approx 2 \times 10^{-31}$ г/см³, а средняя плотность темной материи $\approx 2 \times 10^{-30}$ г/см³. На вакуум приходится, таким образом, 67% всей энергии мира, на темное вещество — приблизительно 30%, на барионы (обычное вещество) — около 3%, а на излучение — еще раз в сто меньше!

Итак, космический вакуум — самая плотная среда во Вселенной. Плотность вакуума больше и каждой из трех других плотностей в отдельности, и их суммы. Вакуума оказалось явно больше, чем требуется для компенсации тяготения в модели Эйнштейна.

При этом плотность вакуума идеально одинакова во всем мире. Он присутствует всюду и везде имеет строго одну и ту же плотность. Плотности же светящегося и темного вещества одинаковы лишь в среднем по очень большим объемам с размерами в 300 миллионов световых лет и более.

«Измерительной установкой» для обнаружения вакуума и определения его плотности послужила, можно сказать, сама Вселенная с ее галактиками и звездами. А системой отсчета, в которой эти измерения были сделаны, было общее распределение галактик, в которых наблюдались сверхновые звезды нужного типа.

Численное значение плотности вакуума всегда и везде одно и то же. Измерив это значение в системе отсчета, сопутствующей расширяющемуся веществу, как это реально и сделано с помощью наблюдений сверхновых, мы знаем, что оно в точности такое и при любых других способах измерений в какой угодно системе отсчета.

Для космического вакуума, после того как он был открыт, стали придумывать новые названия. Одно из них — темная энергия — получает сейчас распространение. Вакуум действительно является темным в том смысле, что он не излучает света. Это название, кажется, больше нравится пишущим о науке журналистам, чем самим «практикующим» космологам: звучит таинственно. Но в астрономии уже есть темное вещество, а вакуум — это нечто совсем иное, чем темное вещество, хотя тоже чрезвычайно загадочное. Впрочем, темного и загадочного в астрономии всегда было предостаточно.

Почему анти-?

Почему же вакуум создает не тяготение, а антитяготение? Вакуум явился в космологию с эйнштейновской космологической постоянной Λ , и его плотность выражается через значение этой постоянной:

$$\rho_v = \Lambda c^2 / (8\pi G).$$

Какова бы ни была его физическая природа, вакуум Эйнштейна обладает не только определенной плотностью, но и давлением. Так он с самого начала задан космологической постоянной. Если плотность вакуума положительна, то его давление отрицательно.

Отрицательное давление — не вполне обычное явление в физике. При «нормальных условиях» давление в «нормальной» жидкости или газе, как правило, положительно. Но и в жидкости (например, в потоках воды) и в твердых телах (например, во всесторонне растянутой стальной болванке) отрицательное давление тоже может возникать.

Это требует особых, специальных условий, но само по себе не является чем-то особенно экзотическим. Однако в случае вакуума ситуация исключительная. Связь между давлением и плотностью, т. е. уравнение состояния этой «среды», имеет вид

$$\rho_v = -c^2 \rho_v.$$

Ничего подобного нет ни в одной другой среде. Это абсолютно и исключительно свойство одного вакуума и только его.

Это — и только это — уравнение состояния совместимо с определением вакуума как формы энергии с всюду и всегда постоянной плотностью, независимо от системы отсчета.

Из этого уравнения состояния и вытекает антитяготение вакуума.

Согласно общей теории относительности, тяготение создается не только плотностью среды, но и ее давлением в комбинации

$$\rho + 3p/c^2.$$

Это формула из фридмановской космологии однородной и изотропной Вселенной. Вакуум вызывает антигравитацию именно потому, что его эффективная гравитирующая энергия,

$$\rho_G = \rho_v + 3p_v/c^2 = -2\rho_v,$$

отрицательна при положительной плотности.

По наблюдательным данным о сверхновых, о которых мы упоминали, плотность вакуума превышает суммарную плотность всех остальных видов космической энергии. Но это означает, что в наблюдаемой Вселенной антитяготение сильнее тяготения. При таком условии космологическое расширение обязано происходить с ускорением.

Это ускорение и было замечено и реально измерено по наблюдениям сверхновых звезд в далеких галактиках.

Посмотрим еще раз на рис. 4.14, который отображает зависимость блеска сверхновых от красного смещения, и обратим внимание на одну наблюдательную точку в самом верш графика — она явно сползает вниз с верхней кривой.

Это далеко не случайное обстоятельство. Дело в том, что красное смещение служит не только мерой расстояния, но и мерой времени: чем больше z , тем больше расстояние, но, значит, тем дольше шел к нам свет от звезды. Мы видим звезду или галактику такой, какой она была в момент испускания света.

При красном смещении $z = 0,7$ мы видим звезды, галактики и всю Вселенную какими они были 6–8 миллиардов лет назад. Но, как мы теперь знаем, приблизительно в эту эпоху замедляющееся расширение превратилось в ускоряющееся.

Красным смещениям, превышающим 0,7, отвечает ранняя эпоха, когда расширение замедлялось.

Поэтому можно предсказать, что на больших z наблюдательные точки будут ложиться не на верхнюю, а на нижнюю кривую. Наблюдать сверхновые при больших красных смещениях — очередная трудная задача для астрономов. И все же мало кто сомневается, что дальнейшие наблюдения подтвердят это предсказание теории.

Ускоренное расширение

В отличие от всемирного тяготения, всемирное антитяготение стремится не сблизить тела, а, напротив, удалить их друг от друга. Но и наблюдаемые скорости разбегания галактик тоже приводят к их удалению друг от друга.

Это означает, что сила антитяготения направлена вдоль скорости, и потому она помогает галактикам разбегаться, все время увеличивая их скорость.

Раз наблюдаемое расширение происходит с ускорением, оно будет продолжаться неограниченно долго — ничто уже не способно этому помешать. Действительно, средняя плотность вещества и излучения будет при расширении только убывать. Но это означает, что тяготение никогда уже не будет преобладать во Вселенной. Динамическое доминирование вакуума будет только усиливаться, а разбегание галактик будет происходить все

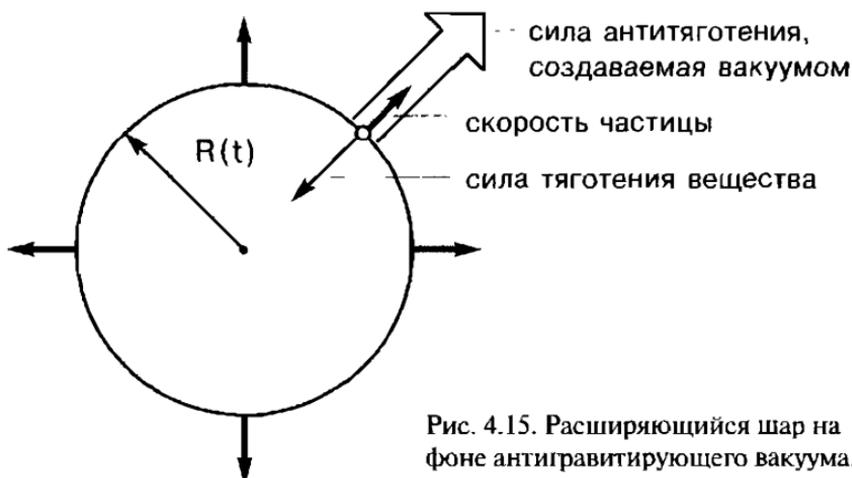


Рис. 4.15. Расширяющийся шар на фоне антигравитирующего вакуума.

быстрее и быстрее. Очень важно, что это заключение относится ко всем трем вариантам геометрии трехмерного пространства. Трехмерное пространство может иметь положительную, нулевую или отрицательную кривизну, а расширение все равно будет продолжаться вечно.

Так вакуум с его антитяготением меняет прежнее предсказание теории о судьбе мира. В космологических моделях с нулевой энергией вакуума был возможен вариант смены расширения сжатием при положительной кривизне пространства.

Теперь такое предсказание уже отпадает. Только неограниченное расширение — таково новое предсказание теории, ставшее возможным с открытием космического вакуума.

Еще немного математики

При полном и подавляющем преобладании вакуума расстояния между галактиками и их системами возрастают со временем экспоненциально:

$$R(t) \sim \exp [ct/A].$$

Здесь константа A размерности длины определяется плотностью вакуума:

$$A = (\kappa \rho_v)^{-1/2} \sim 10^{28} \text{ см.}$$

Эта зависимость расстояний от времени содержится в теории Фридмана в качестве предельного случая, когда все в мире определяет вакуум, а влиянием невакуумных компонент космической среды можно полностью пренебречь. Закон экспоненциального расширения показан графически на рис. 4.16 (после момента t_v).

По свойству экспоненциальной функции, в таком экспоненциально расширяющемся мире скорость взаимного разбегания тел пропорциональна расстоянию между ними. (Скажем для тех, кто не против математики: последнее вытекает из того, что скорость есть производная по времени от расстояния, а производная от экспоненты — тоже экспонента.)

Но тогда в законе Хаббла $V = HR$, постоянная H будет независимой не только от направлений и расстояний в пространстве, но также и от времени:

$$H = c/A.$$

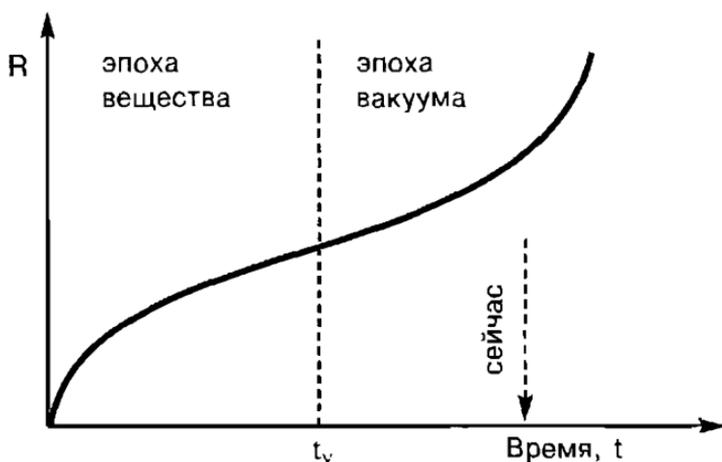


Рис. 4.16. Изменение расстояний в реальном мире.

Сейчас расширение происходит с ускорением по (почти) экспоненциальному закону. Раньше оно происходило с замедлением — как на рис. 4.6. Переход к ускоренному расширению произошел при возрасте мира $t_v \sim 6\text{--}8$ миллиардов лет.

Космологической длине A отвечает время $A/c \sim 10$ млрд. лет. Близость по порядку величины к современному возрасту мира — не случайное совпадение (см. ниже).

Обратимся теперь не к будущему, а к прошлому Вселенной. Вакуум доминировал в мире не всегда. Его плотность не меняется со временем, тогда как плотность темного вещества падает при расширении мира и, значит, растет назад — в прошлое. По простейшему соотношению, которое мы приводили в начале данной главы, $G\rho t^2 \sim 1$, плотность вещества меняется обратно пропорционально квадрату возраста мира. Все это означает, что антигравитация вакуума была несущественно в достаточно отдаленном прошлом.

В ранней Вселенной безраздельно господствовало всемирное тяготение невакуумных компонент космической среды. А эпоха антигравитации наступила только при возрасте мира в 6–8 миллиардов лет: в этот момент плотность темного вещества упала до значения плотности вакуума (см. рис. 4.17). Но тогда точные измерения космологического расширения по сверхновым должны прямо на это указать, — если только удастся найти

сверхновые, находящиеся от нас на расстоянии в 6–8 и более миллиардов световых лет. Как мы уже сказали, такие примеры очень далеких сверхновых в самое последнее время найдены, и они определенно подтверждают, что в далеком прошлом расширение действительно происходило не с ускорением, а с замедлением — по закону

$$R \propto t^{2/3},$$

о котором тоже уже говорилось выше. Это закон замедляющегося расширения — оно тормозится тяготением и потому происходит медленнее, чем по инерции.

Скорость расширения в этом случае $V \propto R/t$ (как легко увидит любитель дифференцирования). При этом «постоянная» Хаббла $H \sim 1/t$. В реальном мире этот закон расширения справедлив, как мы уже говорили, с очень хорошей точностью для всех трех типов пространственной геометрии, если возраст мира не превышает 6–8 миллиардов лет.

Это эпоха доминирования темного вещества. А вскоре после того, как плотность темного вещества становится меньше плотности вакуума, справедлив экспоненциальный закон расширения.

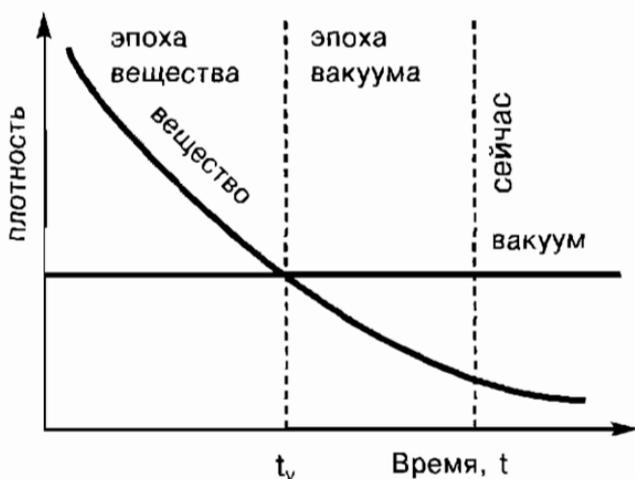


Рис. 4.17. Вещество и вакуум в расширяющемся мире.

Плотность вещества (темное вещество и барионы) падает при расширении. Плотность вакуума со временем не меняется; она преобладает начиная с возраста мира $t_v \sim 6$ –8 миллиардов лет.

Так что практически вся история расширения Вселенной может быть описана с помощью этих двух соотношений: сначала степенной закон расширения, а потом экспоненциальный.

В эпоху, когда плотности темного вещества и вакуума сравниваются по величине, приближенно справедливы обе выписанные выше формулы для постоянной Хаббла. Значит, в эту эпоху

$$c/A \sim 1/t.$$

И тогда $A/c \sim t \sim 10$ млрд. лет.

Если записать последнее равенство с несколько большей точностью, то из него и получится указанный выше характерный возраст 6—8 миллиардов лет, как граница между стадией преобладания тяготения и следующей за ней стадией преобладания антитяготения.

Остается добавить для полноты картины, что в самые первые несколько сотен тысяч лет (тогда по плотности доминировало излучение) расширение происходит по закону

$$R \propto t^{1/2}.$$

Это, естественно, замедляющееся расширение, более медленное, чем инерциальный разлет.

Итак, можно сказать, что первую половину своей жизни Вселенная замедлялась, а во вторую ускорялась. В будущем ее ждет дальнейшее ускоренное расширение, которое никогда не окончится.

Мир вакуума

Обсудим теперь четырехмерную геометрию мира. До сих пор, говоря о геометрии, мы всегда имели в виду геометрию собственно пространства. Теперь же обратимся к геометрии пространства—времени. Пространство вместе со временем образуют единое многообразие, четырехмерное пространство, в котором три координаты относятся к собственно пространству, а четвертая координата есть время. Именно так описывает мир теория относительности.

Согласно общей теории относительности, геометрия четырехмерного пространства—времени определяется распределением и движением вещества. Вещество распределено в пространстве и движется во времени. Связь между веществом и

пространством—временем осуществляет тяготение вещества. Эту связь и описывают уравнения общей теории относительности. В них содержится «связывающая» геометрию и вещество постоянная тяготения.

Связь эта взаимная: не только вещество влияет на геометрию пространства—времени, но и пространство—время способно влиять на распределение и движение вещества в нем.

Только вакуум, он один, способен влиять и не испытывать на себе обратного влияния. Действительно, тот факт, что плотность и давление вакуума неизменны, означает, что на вакуум ничто, нигде и никогда не влияет. Он действует на вещество своим антитяготением, он влияет на свойства пространства—времени или даже полностью их определяет. А сам не испытывает ни обратного влияния вещества, ни обратного влияния геометрии мира. Он оказывает действие, но не испытывает противодействия. Это единственный известный в физике пример, когда действие не равно противодействию — вопреки третьему закону Ньютона. Таков уж вакуум...

В космологии Фридмана вещество распределено однородно в пространстве. Из этого вытекает, что и само пространство, однородно заполненное веществом, должно быть однородно. Движение вещества — это его общее расширение. Отсюда возникает нестатичность, подвижность мира, его развитие во времени.

Что же происходит с миром Фридмана, когда в нем начинает доминировать вакуум?

Если пренебречь влиянием всего невакуумного вещества, то только вакуум и будет определять свойства пространства—времени. Как мы знаем, вакуум — это особая форма космической энергии. Его плотность не меняется со временем. Его давление, которое есть плотность со знаком минус, умноженная на c^2 , тоже не меняется со временем. С вакуумом вообще ничего не происходит, он всюду и всегда один и тот же.

Но раз неизменный вакуум, и только он, определяет свойства пространства—времени, то и само пространство—время всюду и всегда должно быть одним и тем же. Это означает, что мир, в котором безраздельно господствует вакуум, должен быть неизменным во времени, статичным.

В полном соответствии с этим рассуждением космология Фридмана описывает мир вакуума как мир статичный и неизменный.

Но каким образом происходит это превращение мира подвижного в мир неподвижный? Как из мира Фридмана исчезает эволюция? Ведь разбегание галактик в нем продолжается...

Да, галактики удаляются друг от друга в мире вакуума и притом с все возрастающими скоростями. Но чем быстрее они разбегаются, тем меньше плотность их распределения, и, значит, тем слабее их влияние — через их собственное тяготение — на свойства пространства—времени. А влияние вакуума — через его антитяготение — становится тем временем все более и более безраздельным.

В итоге, галактики, да и вообще все невакуумное вещество, оказываются в мире, свойства которого определяются не ими, а вакуумом. Так эволюция мира в целом затухает, его пространственно—временной каркас застывает и остается таким «замороженным» навсегда.

Модель де Ситтера

О застывшем мире вакуума известно из теории относительности уже давно. Модель мира, в котором присутствует только вакуум, была описана в работе де Ситтера, опубликованной в 1917 г. — еще до решений Фридмана и сразу после модели статического мира Эйнштейна. В модели де Ситтера нет вещества, а вакуум представлен эйнштейновской космологической постоянной.

Такая модель — частный случай теории Фридмана, отвечающий формально полному отсутствию в мире невакуумных форм материи. Пробными, т. е. негравитирующими, становятся в этом предельном случае все невакуумные компоненты космической среды.

Самое важное свойство модели де Ситтера состоит в том, что описываемое им пространство—время статично. И действительно, мир, заполненный вакуумной энергией с ее постоянной и неизменной во времени и пространстве плотностью, и сам должен быть неизменным во времени и однородным в пространстве.

В таком мире все события, т. е. четырехмерные точки, неразличимы, а это означает, что в нем нигде ничего не происходит, и потому этот мир вечен, неизменен и идеально симметричен по своим геометрическим свойствам.

Этим своим свойством мир де Ситтера напоминает статический мир Эйнштейна. Но в мире Эйнштейна покой достигался равновесием тяготения вещества и антитяготения вакуума. В мире де Ситтера такого равновесия нет: антитяготение вакуума ничем не уравновешено и, тем не менее, этот мир тоже находится в покое.

Оказывается, что покой не обязательно предполагает равновесие сил — если речь идет о вакууме, это необязательно. Будучи сам неизменным, он делает и мир неизменным в отсутствие других сил.

Галактики в мире вакуума

Обратимся снова к эволюционной истории мира. Из сказанного становится ясным, что переход в расширяющейся Вселенной от стадии преобладания обычного вещества к стадии преобладания вакуума означает постепенное исчезновение динамики в четырехмерном пространстве—времени.

Пространственно—временной каркас мира перестает изменяться со временем и оказывается в результате зафиксированным навечно.

Но в погруженном в этот вечный и неизменный мир веществе многое еще происходит и будет происходить (например, вспыхивают сверхновые, по которым мы узнаем об ускоряющемся расширении). Однако на геометрию четырехмерного мира эти процессы, события, превращения в веществе практически никак не влияют сейчас, и еще меньше будут влиять в будущем. Можно сказать, что чем сильнее ускоряется космологическое расширение под воздействием антигравитирующего вакуума, тем ближе наш четырехмерный мир к абсолютной статике, неизменности и полному покою.

Таков самый важный динамический и геометрический эффект вакуума в космологии.

Как мы уже сказали, от выбора между тремя возможными моделями трехмерной геометрии не зависит ответ на вопрос о

судьбе космологического расширения — будет ли оно продолжаться вечно или сменится в будущем сжатием. Разбегание галактик происходит неограниченно долго во всех трех моделях.

Эти модели различаются между собой лишь тем, что их трехмерные пространства выделены тремя разными способами из одного и того же единого четырехмерного пространства—времени — мира де Ситтера.

По способу выделения, эти трехмерные объемы могут иметь нулевую или ненулевую кривизну. Конечно, интересно знать, какой именно знак имеет кривизна «нашего» конкретного трехмерного пространства, в котором наблюдаемое нами космологическое расширение происходит однородно и изотропно.

Проблема плоскостности

Пространство, непосредственно доступное нам в повседневной жизни, несомненно является плоским, евклидовым. Но оказывается, что и трехмерное пространство в масштабе всей наблюдаемой Вселенной тоже является почти плоским, а может быть, и строго плоским. Почему? Этот вопрос составляет содержание проблемы, которая называется проблемой плоскостности в космологии.

«Плоскостность» — калька с английского «flatness» — не очень складное слово; но это уже устоявшийся термин, так что приходится им пользоваться, нравится он нам или нет.

Речь идет о пространстве, в котором происходит космологическое расширение и в котором распределение вещества является однородным. Это сопутствующее веществу пространство, «точками» которого являются сами разбегающиеся галактики.

Мы говорили ранее о трех теоретически допустимых типах изотропного пространства — это плоское пространство, пространство гиперсферы и пространство Лобачевского. Выбор между этими тремя вариантами возможен по наблюдениям, но до сих пор он не сделан. Производить прямые геометрические измерения с приемлемой точностью в космических масштабах пока невозможно.

Но теория Фридмана говорит нам, что тип геометрии связан взаимно-однозначным образом с соотношением между гравитационной потенциальной и кинетической энергией космоло-

гического расширения; а эти величины уже поддаются весьма точному измерению.

Согласно фридмановской теории, пространство должно быть плоским, если кинетическая энергия точно равна потенциальной (по модулю). Если кинетическая энергия преобладает над потенциальной, то пространство должно быть пространством Лобачевского. В противоположном случае пространство должно быть гиперсферой.

Чтобы знать потенциальную энергию, нужно измерить полную плотность мира ρ , которая есть сумма плотностей вакуума, темного вещества, барионов (обычного вещества) и излучения. А для оценки кинетической энергии нужно измерить постоянную Хаббла и по ней вычислить так называемую критическую плотность

$$\rho_c = 3H^2/(8\pi G).$$

Тогда отношение модуля потенциальной энергии к энергии кинетической будет отношением плотностей:

$$\Omega = \rho/\rho_c.$$

Значит, если Ω равна единице, то пространство плоское, а если эта величина отлична от единицы, то пространство искривлено, оно неевклидово. Когда Ω больше единицы, это пространство гиперсферы, а когда она меньше единицы, это пространство Лобачевского. По самым свежим современным наблюдательным данным, учитывающим всю совокупность конкретных сведений о реальном мире,

$$\Omega = 1,02 \pm 0,02.$$

Это совсем недавно опубликованный (февраль 2003 г.) рекордный по точности результат, полученный с помощью космического аппарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), созданного Принстонским университетом и НАСА (Вилкинсон — принстонский экспериментатор, один из пионеров исследования реликтового излучения в середине 1960-х годов). Тридцать лет назад данные были такими: $0,3 < \Omega < 10$. А всего за год-два до WMAP ошибка определения величины Ω была в 2-3 раза больше, чем сейчас. Прогресс значителен и очевиден.

Когда говорят о том, что пространство близко к плоскому или строго плоское, как раз и имеют в виду тот факт, что

наблюдаемая величина Ω близка к единице, а может быть, точно равна единице. Отличие этой величины от единицы — наблюдаемая мера неевклидовости сопутствующего пространства. Других независимых указаний на этот счет не существует. Обратимся снова к космологической теории.

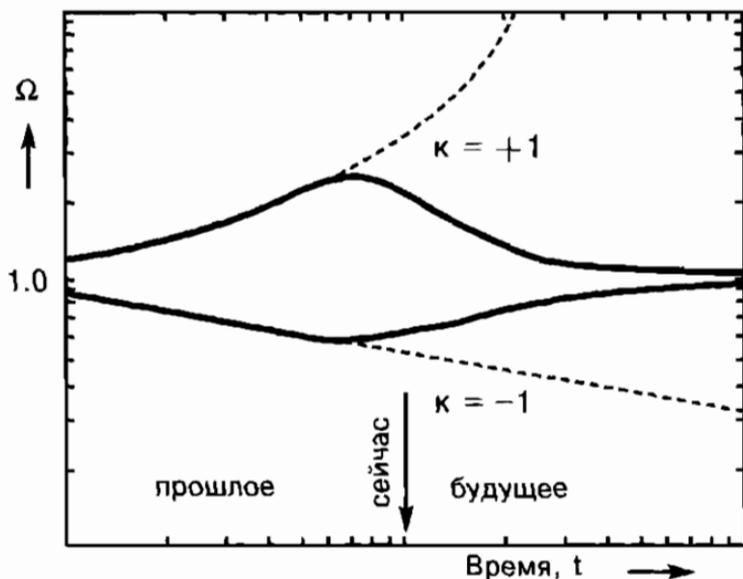


Рис. 4.18. Поведение величины Ω в ходе космологического расширения.

Верхняя кривая — для пространства положительной ($k > 0$) кривизны (гиперсфера), нижняя — для пространства отрицательной ($k < 0$) кривизны (пространство Лобачевского). Видно, что отклонения величины Ω от единицы всегда невелики и, во всяком случае, конечны и ограничены в мире Фридмана с космическим вакуумом.

Когда вакуум не был еще открыт, картина представлялась совсем иной. При уходе в прошлое обе кривые по-прежнему стремились к значению 1. Но настоящее и будущее без вакуума было другим. В мире положительной кривизны, если в нем нет вакуума, за расширением неизбежно следует сжатие. В момент смены расширения сжатием величина Ω уходит в бесконечность.

В мире отрицательной кривизны величина Ω стремится в отсутствие вакуума к нулю, когда время стремится к бесконечности. Варианты без вакуума показаны пунктиром.

По обеим осям здесь принята логарифмическая шкала.

С учетом всех видов космической энергии — вакуума, вещества, излучения — теория Фридмана дает ясное представление о том, как величина Ω ведет себя в прошлом, настоящем и будущем. Это показано графически на рис. 4.18.

На этом рисунке можно увидеть, что (при $k \neq 0$) величина Ω стремится к единице, когда время мало, т. е. когда оно, говоря математически, стремится к нулю. Но эта величина стремится к единице также и в пределе, когда время стремится к бесконечности. Так что слишком больших отклонений от единицы не возникает ни в прошлом, ни в будущем.

Даже самые точные измерения WMAP не исключают, что трехмерное пространство мира может быть и искривленным, а не только евклидовым. Мерой кривизны пространства служит его радиус кривизны. В случае, например, сферического пространства, радиус кривизны — это просто радиус сферы.

Если наше пространство искривлено, его радиус кривизны составляет в современную эпоху, как минимум, около ста миллиардов световых лет, по порядку величины.

Хотя трехмерная кривизна мира остается, строго говоря, не известной, с открытием вакуума, как мы уже сказали, стала известна четырехмерная геометрия пространства–времени. И об этой геометрии мы знаем все, именно все(!), что только вообще можно узнать из *общей теории относительности*: это статическое пространство–время постоянной положительной кривизны, причем численное значение кривизны (см. выше) довольно точно измерено.

Топология Вселенной

Но чего нельзя ожидать от общей теории относительности, это описания топологии четырехмерного мира, т. е. его геометрического строения как целого.

Общая теория относительности строится на дифференциальной геометрии, это ее математический аппарат. Дифференциальная геометрия описывает локальные, «местные» свойства пространства. В космологии, где изучаются самые большие из доступных реальному наблюдению протяженности в пространстве, локальными, местными считаются свойства пространства в масштабах сотен мегапарсек и более.

Дифференциальная геометрия позволяет судить о том, совпадает ли геометрия данной области с геометрией Эвклида, геометрией Лобачевского или гиперсферической геометрией. При этом речь идет именно о локальных свойствах пространства, а не о его устройстве в целом.

Приведем пример. В случае двумерного пространства Лобачевского его устройство в целом может иметь вид гиперboloида, а может иметь вид седла (см. рис. 4.4). Гиперболоид и седло сильно отличаются друг от друга по своему «строению в целом». Но их дифференциальная, локальная геометрия одна и та же — это в обоих случаях двумерное пространство постоянной отрицательной кривизны.

В уже упоминавшейся книге «Мир как пространство и время» Фридман специально обращает внимание на то, что общая теория относительности позволяет судить лишь о дифференциальной геометрии мира (Фридман, между прочим, читал курс дифференциальной геометрии в Петроградском университете), а топологии в ней нет. Дифференциальная геометрия дает для топологии лишь некоторые ограничения общего характера, но не определяет ее.

Это замечание Фридмана имело не только педагогический, но и полемический смысл. Он счёл необходимым возразить Эйнштейну. Дело в том, что в своей первой космологической статье Эйнштейн полагал, что найденное им статическое космологическое решение для трехмерного пространства с положительной кривизной описывает Вселенную, трехмерное пространство которой — гиперсфера — в целом является закрытым, замкнутым в себе, подобно двумерной сфере.

Но по существу это было произвольной дополнительной гипотезой, никак не вытекающей из общей теории относительности как таковой.

Фридмановские модели часто называют открытой (когда трехмерное пространство — пространство Лобачевского) и закрытой (гиперсфера). При этом говорится, что в первом случае объем мира бесконечен, а во втором конечен. Но это не обязательно так, возможны различные варианты топологии таких пространств, а от этого зависят и свойства замкнутости и незамкнутости, конечности и бесконечности их объемов и т.п.

Слова «замкнутая модель», «открытая модель» не должны вводить в заблуждение относительно топологии трехмерных пространств в этих моделях, — о ней реально ничего не известно. Ничего не известно и о полных объемах этих пространств. Общая теория относительности ничего об этом сказать не может. И наблюдения ничего об этом пока не говорят.

Еще не создана «топологическая общая теория относительности», т. е. такая теория пространства и пространства—времени, которая ставила бы топологию мира в соответствие с развивающимися в нем физическими процессами. Возможно, это дело будущего. Хотя ничто не мешает теоретикам уже сейчас пытаться представить себе возможную топологию Вселенной, а наблюдателям — пытаться искать проявления этой топологии в реальных свойствах мира.

Все это в полной мере касается, конечно, и мира де Ситтера; известна его четырехмерная дифференциальная геометрия, но его топология, его геометрия в целом, остается полностью открытой проблемой. Имеется множество интересных и разнообразных математически допустимых вариантов глобального строения такого мира. Но удастся ли когда-нибудь проверить эти варианты в наблюдениях и выбрать один из них? Как бы то ни было, топология мира становится теперь самым принципиальным, если не единственным по-настоящему важным вопросом геометрического характера в космологии современной Вселенной.

Заметим, что в другом (не о топологии) заочном споре между Эйнштейном и Фридманом, споре о том, является ли мир статичным или эволюционирующим (см. выше), оба классика оказываются в итоге правы, но каждый по-своему. Идея Эйнштейна о неизменной и вечной Вселенной реализуется хотя и не в его статической модели, но зато в идеально симметричном решении де Ситтера. А идея нестационарной Вселенной Фридмана — в его общей теории эволюции Вселенной и в наблюдаемом феномене хаббловского разбегания галактик.

В некотором смысле, идея Фридмана включает в себя, в частности, и идею статичности Эйнштейна — в качестве предельного случая вакуумного мира.

Загадка Хаббла

Вернемся к истокам наблюдательной космологии, в 1920-е годы, когда Хаббл изучал только что открытый им поток космологического расширения. Имевшиеся в его распоряжении скорости галактик были лишь немногим больше тысячи км/сек в наблюдениях 1927—29 гг.

Если воспользоваться принятым сейчас значением постоянной Хаббла, $H = 55\text{--}75$ км/сек/Мпк, то легко увидеть, что расстояния в его наблюдениях не превышали 20 Мпк. Сам Хаббл думал тогда, что предел расстояний у него — 2 Мпк; такой была тогда систематическая ошибка оценки расстояний, почти в десять раз (мы уже упоминали об этом).

В ближайшей окрестности нашей Галактики, в объеме с радиусом в 20 Мпк, никакой однородности в распределении вещества нет. В мире галактик это свойство наблюдается лишь в масштабах 300 миллионов световых лет и более. Распределение же вещества в ближнем объеме, напротив, крайне неравномерно: здесь имеются группы галактик с размерами около 1 Мпк, все они входят в большое скопление галактик Вирго (т. е. Дева), центр которого лежит в направлении на одноименное созвездие и находится от нас на расстоянии приблизительно в те же 20 Мпк, и т. п.

Как при таких условиях здесь возможен регулярный космологический поток расширения с линейной зависимостью скорости от расстояния? Ведь по теории Фридмана такое регулярное расширение возможно лишь в случае однородности вещества в пространстве!

Приглядимся снова к хаббловской диаграмме (рис. 4.8). Наименьшие скорости удаления у Хаббла составляют всего одну—две сотни км/сек; и это означает, что хаббловский поток берет начало очень близко от нас, на расстояниях всего в несколько Мпк.

Но это катастрофически не тот, не космологический пространственный масштаб.

Остается лишь спросить: а имеет ли открытие Хаббла какое-либо отношение к космологии?

К настоящему времени наблюдениям стали доступны галактики со скоростями разбегания вплоть до сотни тысяч км/сек,

что соответствует расстояниям в тысячи Мпк. Это бесспорно космологические масштабы. На таких масштабах линейный закон расширения надежно и уверенно установлен, — в полном соответствии с теоретическими ожиданиями в духе фридмановской теории. Но что поразительней всего, для этих глобальных космологических масштабов постоянная Хаббла имеет практически то же самое численное значение, что и в локальном объеме до расстояний всего в 10–20 Мпк.

Согласно Алану Сэндиджу, космологическое расширение прослеживается вплоть до 1,5–2 Мпк от нас, и локальный темп подобен глобальному, если только он не совпадет с ним точно, на уровне ~ 10%. Это данные из статьи Сэндиджа, опубликованной в 1999 г., ровно через 70 лет после первой космологической публикации Хаббла.

Говоря иными словами, общая картина расширения выглядит так, как если бы глобальный космологический поток и в самом деле начинался прямо вблизи нас и, простираясь далее чуть не до горизонта мира, сохранял всюду свою кинематическую идентичность. Как же это может быть?

Такова загадка, существующая в космологии со времен Хаббла. Сэндидж, один из самых крупных космологов–наблюдателей наших дней, прямо пишет в работе 1999 г.: «мы так и остаемся с этой тайной».

Вакуум вблизи нас

Приведем самые свежие наблюдательные данные о движениях галактик в нашей ближайшей окрестности Вселенной, в местном объеме, как говорят об этом астрономы. Они получены И. Д. Караченцевым и его сотрудниками, астрономами Специальной астрофизической обсерватории РАН. Ими проведены новые тщательные наблюдения около двухсот близких галактик, чтобы заново и максимально точно определить расстояния до них. В работе использовался Большой телескоп САО (с диаметром зеркала шесть метров) и Хаббловский космический телескоп.

Основной результат таков: на гораздо большем наблюдательном материале, чем тот, который был в распоряжении Хаббла в 1929 г., и с гораздо более высокой степенью точности

подтверждено и продемонстрировано существование регулярного потока расширения с линейным законом скорости для расстояний от 2 до 8 Мпк.

Караченцев представил недавно два варианта хаббловской диаграммы (рис. 4.19, 4.20). Первый из них (рис. 4.19) включает в себя данные о движениях 145 галактик до расстояний 8 Мпк. Скорости измерены с точностью не хуже 5 км/сек, точность расстояний 20%. Скорости даны в системе отсчета центра масс Местной Группы.

Эта группа включает в себя нашу Галактику и сравнимую с ней по массе гигантскую галактику Андромеда, находящуюся от нас на расстоянии 700 клк; эти две галактики составляют основную массу группы. В группе имеется еще несколько десятков менее массивных галактик, среди которых большинство составляют совсем небольшие галактики—карлики. Общий размер Местной Группы приблизительно 1 Мпк. Подавляющее большинство других галактик, находящихся вне Местной группы на расстояниях до 8 Мпк (а их там не меньше двух сотен), это тоже карлики.

Измеренная по данным о 145 галактиках постоянная Хаббла составляет 64 ± 10 км/сек/Мпк. Это практически совпадает с

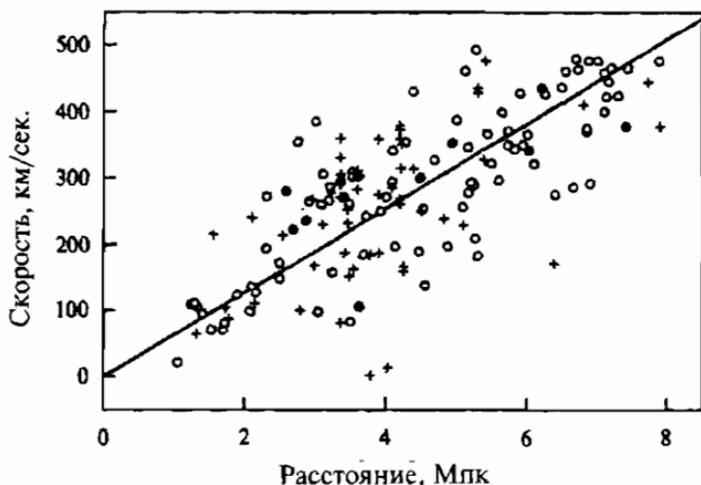


Рис. 4.19. Современный вид хаббловской диаграммы до расстояний 8 мегапарсек (И. Д. Караченцев и др., 2001).

«глобальным» значением этой величины, измеренным на масштабах в тысячи Мпк: 65 ± 10 км/сек/Мпк.

Особенно интересна для наших целей диаграмма (рис. 4.20) для 20 галактик с высокоточными, не хуже 7%, определениями расстояний. Это галактики-карлики, находящиеся от нас на расстояниях не дальше 3 Мпк и, за редким исключением, не входящие в группы; их кинематика отражает в наиболее чистом виде динамическую обстановку в нашем ближайшем окружении. Не искаженные участием во внутригрупповых движениях, скорости этих галактик обнаруживают поразительно малый разброс вокруг линейного закона — всего 25 км/сек.

Это первая надежная оценка хаотических движений галактик местного объема, которая заведомо превышает ошибки наблюдений (около 15 км/сек). С точки зрения динамики, эти галактики служат в качестве очень хорошего измерительного инструмента для анализа поля скоростей, а значит и поля тяготения в местном объеме.

Высокая степень регулярности движений ближних галактик резко контрастирует с крайней степенью нерегулярности, сильной неоднородностью их пространственного распределения. По данным П. Теерикорпи (Турку) и Ж. Патуреля (Лион),

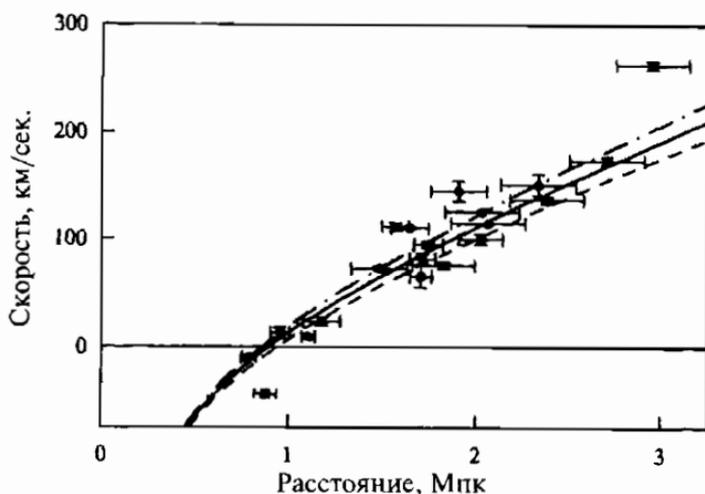


Рис. 4.20. Хаббловская диаграмма со сверхточными расстояниями до 3 мегапарсек (И. Д. Караченцев и др., 2001).

особенно сильные нерегулярности и неоднородности наблюдаются как раз в пределах 2–3 Мпк, а дальше они постепенно сглаживаются (в среднем по возрастающим объемам), оставаясь, однако, и там далеко не слабыми, вплоть до расстояний в 100–200 Мпк.

Из всей этой наблюдаемой картины напрашивается один вывод: кинематика галактик в местном объеме имеет мало общего с их пространственным распределением. Кинематика исключительно регулярна, тогда как пространственное распределение сильно неоднородно, как в этом объеме, так даже и в более обширных объемах вокруг нас. За наблюдаемой кинематикой галактик стоит динамика, которая, следовательно, с распределением масс галактик фактически не связана.

Но если не массы самих галактик, то что же тогда управляет движением этих тел в местном объеме?

В духе новейших открытий в космологии можно предположить, что хаббловским потоком управляет космологический вакуум. Это относится ко всем расстояниям — от нескольких мегапарсек и почти что до горизонта мира.

Действительно, с открытием вакуума Вселенная в целом предстала перед нами более однородной, чем об этом можно было судить ранее только по распределению галактик в ней. В ней доминирует вакуум с его идеально однородной плотностью. В этом смысле Вселенная однородна не только в собственно космологических масштабах 100–300 Мпк и более. В динамическом смысле она однородна вокруг нас уже с расстояний в несколько Мпк.

Можно сказать, что космология начинается теперь не с сотен Мпк, а с нескольких Мпк от нас. Она подступает почти вплотную к нам, к Млечному пути. И все это из-за динамического доминирования вакуума, как по Вселенной в целом, так и в самых малых ее объемах, вроде местного объема.

Начиная с расстояний в несколько Мпк, галактики хаббловского потока движутся как пробные частицы на идеально регулярном фоне вакуума, который их разгоняет (верней, подгоняет). Критический пункт этих рассуждений — кинематическая идентичность хаббловского потока на всем интервале масштабов от нескольких Мпк до самых больших расстояний в

мире галактик. Этот вопрос, который до сих пор ставил в тупик думающих астрономов—наблюдателей, теперь, кажется, проясняется. Действительно, раз во всех этих масштабах доминирует вакуум с его всюду одинаковой плотностью, то и темп расширения, характеризуемый постоянной Хаббла, должен быть везде почти одинаков, поскольку постоянная Хаббла определяется почти исключительно одной только плотностью вакуума.

В этом, возможно, и состоит разгадка той «тайны», которая существовала со времен работы Хаббла 1929 г. и о которой совсем недавно говорил Сэндидж.

Мы видим, что только с открытием космического вакуума стали по-настоящему ясны космологическое значение и реальный физический смысл открытия, сделанного Хабблом по наблюдениям в местном объеме Вселенной.

Да, глубоко внутри ячейки однородности общего распределения галактик Хаббл открыл глобальный космологический феномен расширения Вселенной. Но по существу он тем самым открыл еще и космологический вакуум.

Вакуум и общее движение местного объема

В динамике ближней области мира есть и еще один небезынтесный аспект. Как мы сказали, диаграммы на Рис. 4.19—4.20 показывают скорости удаления галактик в системе центра масс Местной Группы; центр масс лежит на прямой между центрами основных галактик группы, ближе к Андромеде, так как она несколько массивней нашей Галактики. Но в космологии есть своя особая система отсчета; она опирается на реликтовое излучение и охватывает всю Вселенную. Это действительно глобальная система отсчета, и именно в ней, в этой системе отсчета, трехмерное пространство фридмановской модели является однородным и изотропным.

Солнце, а с ним и Земля движутся относительно реликтового излучения со скоростью около 300 км/сек. Но оказывается, что и центр масс Местной группы тоже не покоится относительно реликтового излучения — он движется относительно него со скоростью примерно 500 км/сек.

Наблюдения указывают на то, что имеет место общее сносовое движение всего местного объема относительно реликтового

излучения с весьма немалой скоростью 500—600 км/сек. Причем местный объем движется практически как целое в составе гораздо большей по размеру области с размером до 100 Мпк — мы уже упоминали об этом (см. рис. 4.13).

Вся совокупность галактик в этом большом объеме совместно движется в сторону Большого Аттрактора, как иногда называют это направление в пространстве.

Заметим, что скорость сносового движения больше скорости регулярного расширения до расстояний в 10 Мпк. Она в 10—20 раз больше разброса скоростей в пределах тех же расстояний. Так что это отнюдь не слабое возмущение, а сильный кинематический эффект для масштабов местного объема.

Вопрос, который до сих пор оставался открытым, состоит в следующем: Как совместить все три наблюдаемые свойства местного объема: 1) сильную неоднородность плотности вещества, 2) общее сносовое течение, 3) регулярное хаббловское расширение внутри местного объема.

В динамике, управляемой гравитацией самих галактик, такая картина совершенно невозможна. Но три свойства местного объема оказываются вполне совместимыми, если динамикой галактик в местном объеме управляет не их самогравитация, а главным образом космический вакуум.

Замечательным образом в этом астрономическом феномене проявляется основное механическое свойство вакуума, согласно которому он не может служить системой отсчета. Действительно, покой и движение относительно вакуума неразличимы, потому что вакуум всюду и везде, в любой системе отсчета один и тот же.

Реликтовое излучение тоже практически идеально однородно и изотропно, — но только в системе отсчета, связанной с ним самим. Радиометр, движущийся относительно реликтового излучения, покажет наблюдателю, что для него реликтовое излучение имеет (уже упоминавшуюся выше) дипольную анизотропию, а из нее сразу находят скорость прибора относительно реликтового фона.

Но нет и не может быть такого прибора, который бы измерял свою скорость относительно вакуума, потому что эта величина не имеет физического смысла. Вернее, эта величина

тождественно равна нулю: в любой произвольной системе отсчета вакуум выглядит абсолютно одинаково, и любая система отсчета является для вакуума сопутствующей. Или другими словами: две системы отсчета могут двигаться друг относительно друга с любой скоростью, но вакуум будет сопутствовать каждой из них.

У вакуума есть и еще одно свойство, которым только он и обладает: воздействуя на все тела природы своей антигравитацией, он сам никакому обратному гравитационному воздействию этих тел не поддается. Третий закон Ньютона «действие равно противодействию» на него, как мы уже говорили, не распространяется. Можно сказать, что у вакуума есть отличная от нуля (и притом отрицательная) активная гравитационная масса, а его пассивная гравитационная масса и инерциальная масса — обе равны нулю.

Заметим, что все это относится к физическим условиям, при которых гравитационные поля (и все другие поля вообще) являются слабыми; в сильных полях возможна поляризация вакуума и ряд других эффектов, в которых локальные свойства вакуума меняются под сильным внешним воздействием.

В местном объеме вакуум действует своей антигравитацией на галактики так, как если бы он сам двигался вместе с центром масс Местной группы. По своему главному механическому свойству, он сопутствует местному объему и управляет его динамикой точно так же, как он управляет глобальной динамикой космологического расширения.

А так как никакому обратному воздействию галактик он не поддается, то и его динамический эффект никак не зависит от самих галактик, — ни от их распределения в пространстве, ни от их движения. Это и позволяет местному объему расширяться как отдельной маленькой вселенной внутри всей большой Вселенной с ее глобальным хаббловским потоком.

Но важно то, что оба эти потока, глобальный и локальный, имеют одну и ту же кинематику и один и тот же темп расширения, определяемый постоянной Хаббла, потому что вакуум одинаков и для всей Вселенной и для местного объема.

Темное вещество

Далее в этом разделе мы расскажем о физической природе той энергии, или массы, которая заполняет Вселенную. Самый большой вклад в эту энергию вносит вакуум. За ним следует скрытая масса, или, как чаще в последнее время говорят, темное вещество: его плотность приблизительно втрое меньше плотности вакуума. С темного вещества мы и начнем.

Пожалуй, плотность — это то, что, как раз лучше всего известно об этой компоненте космической среды. Темное вещество не излучает ни света, ни других электромагнитных волн, и вообще практически не взаимодействует с электромагнитным излучением. В нашей Галактике, как мы уже говорили, темного вещества приблизительно в 10 раз больше, чем светящегося вещества звезд. Оно образует обширную невидимую корону, или гало, вокруг звездного диска Млечного Пути. Подобные темные гало имеются, по-видимому, у всех достаточно массивных изолированных галактик. Темное вещество содержится также в группах галактик и в самых больших космических системах — скоплениях и сверхскоплениях галактик.

Как и в нашей Галактике, темное вещество составляет до 90%, а иногда и более, полной массы всех этих систем. Оно проявляется только благодаря создаваемому им тяготению.

Именно по своему гравитационному эффекту оно и было впервые обнаружено (точнее, заподозрено) еще в 1930-е годы Ф. Цвикки, который изучал динамику богатого скопления галактик в созвездии Кома (или Волосы Вероники).

Галактики в этом скоплении движутся со скоростями около тысячи километров в секунду, и при таких скоростях удержать их в наблюдаемом объеме скопления можно лишь при условии, что полная масса скопления раз в десять больше суммарной массы составляющих его галактик. Эту добавочную невидимую массу и сообщает скоплению темное вещество.

Важность проблемы темного вещества очевидна, но не менее очевидна и ее чрезвычайная сложность. До сих пор не известна физическая природа носителей темного вещества. Обсуждается очень широкий набор возможностей — от элементарных частиц с малой (меньше массы электрона) массой до звезд-карликов, массивных (больше массы солнца) черных

дыр и т. п. Массы кандидатов на эту роль различаются, таким образом, на добрых 60 порядков величины, — такова реальная численная мера имеющейся в настоящее время неопределенности в этом вопросе.

Пожалуй, неплохие перспективы имеет предположение, что скрытая масса состоит из довольно массивных элементарных частиц. Каждая из них имеет массу приблизительно в тысячу раз превышающую массу протона или нейтрона.

Эти гипотетические частицы не имеют электрического заряда, так что они не излучают электромагнитных волн и вообще никак не взаимодействуют со светом и другими электромагнитными полями. Они не испытывают и ядерного взаимодействия, которое удерживает протоны и нейтроны в атомных ядрах. Для них существует лишь слабое взаимодействие (известное, например, по бета-распаду атомных ядер) и, конечно, тяготение.

Особенно интересно, что такие частицы могут быть реально зарегистрированы, если их имеется по одной в среднем на тысячу кубических метров объема Вселенной (столько их должно быть, чтобы обеспечить среднюю наблюдаемую плотность темного вещества). Поиски ведутся в нескольких крупных лабораториях и результат — положительный или отрицательный — ожидается уже в ближайшие годы. В этом смысле и говорят в таких случаях о неплохих перспективах: вопрос так или иначе прояснится в обозримое время.

Но что уже надежно известно о скрытом веществе, так это то, что оно, скорее всего не содержит протонов и нейтронов. Точнее, если в составе скрытого вещества и присутствуют эти хорошо известные в физике частицы, то их вклад не должен превышать нескольких процентов по массе.

Этот сильный результат следует из детальной теории ядерных реакций в ранней горячей Вселенной. Оказывается, что наблюдательным данным о распространенности гелия-4 и других продуктов этих реакций противоречило бы существование слишком большого количества нейтронов и протонов.

Барионы

За темным веществом следует по плотности светящееся вещество звезд и галактик; в соответствии с уже сказанным, его

космическая плотность (средняя по всему наблюдаемому объему мира) раз в десять меньше плотности темного вещества. Это обычное вещество, состоящее из протонов, нейтронов и электронов. Часто обычное вещество называют барионным веществом или просто барионами. Это название одного класса тяжелых элементарных частиц; в этот класс входят протоны и нейтроны. То «обычное» вещество Вселенной, из которого состоят Земля (и все, что на ней), другие планеты и звезды, — это барионы (протоны, нейтроны) и электроны в числе, равном числу протонов. Что же касается соответствующих античастиц, т. е. антибарионов (антипротонов, антинейтронов), позитронов, то они присутствуют в ничтожных количествах и обязаны вторичным процессам рождения частиц и античастиц при столкновениях частиц высоких энергий, например, в космических лучах или на мощных ускорителях.

Численную меру такого рода зарядовой асимметрии можно определить, зная современные значения плотности барионов и реликтового излучения. Дело в том, что в горячей ранней Вселенной при высоких температурах, превышающих массу покоя барионов, барионы и антибарионы (а точнее, составляющие их кварки и антикварки) должны были иметься в почти равных количествах, причем концентрация (число частиц в единице объема) тех и других должна была почти точно совпадать с концентрацией реликтовых фотонов. Позднее антибарионы и равное им число барионов аннигилировали, а избыток частиц над античастицами уцелел и дал современное наблюдаемое значение плотности барионов.

Так как с тех пор число реликтовых фотонов практически не менялось, то современное отношение концентрации барионов к концентрации реликтовых фотонов дает отношение исходного избыточного числа барионов к их исходному полному числу.

При современной плотности барионов $\rho_B \approx 10^{31}$ г/см³, их концентрация составляет в среднем $n_B \approx 10^7$ в кубическом сантиметре. А концентрация реликтовых фотонов $n_R \approx 500$ в кубическом сантиметре. Так получается величина $b = n_B/n_R \sim 10^{10}$, которая называется космическим барионным числом и служит мерой изначальной зарядовой асимметрии мира по отношению к барионам и антибарионам.

Именно это малое безразмерное космическое число обеспечило выживание обычного вещества в ранней эволюционирующей Вселенной и его существование в сегодняшнем мире.

Принципиально допустимы две возможности истолкования такого избытка частиц над античастицами. Можно принять, что этот избыток существовал в природе с самого начала, т. е. что Вселенная родилась уже резко асимметричной по отношению к частицам и античастицам. Эта точка зрения активно обсуждалась в начале 1960-х годов, причем иногда предполагалось, что первичное превышение числа частиц над числом античастиц могло бы быть одной из фундаментальных констант природы, имеющей тот же статус, что и, скажем, постоянная Планка.

Другой подход к проблеме зарядовой асимметрии мира предполагает, что величина b , характеризующая эту асимметрию, не столь фундаментальна по своей природе и в действительности должна «выводиться» из более общих законов физики. В этом случае предполагается, что Вселенная с самого начала могла быть строго симметричной относительно барионов и антибарионов, а избыток барионов над антибарионами возник в ранней Вселенной эволюционным путем. Такая точка зрения была впервые высказана более 30 лет назад в работах А. Д. Сахарова и В. А. Кузьмина.

Возникновение барионного заряда Вселенной, или, как говорят, космический бариогенез, требует, согласно этим работам, выполнения ряда условий, главное из которых — нестабильность протона. Необходимо также нарушение C - и CP -инвариантности (т. е. симметрии между частицами C и комбинированной симметрии C вместе с зеркальной симметрией P). Кроме того, требуется нестационарность мира, быстрое космологическое расширение, чтобы процессы взаимодействия первичных частиц космической среды протекали в термодинамически неравновесных условиях.

Если последнее условие казалось естественным для ранней Вселенной, то нестабильность протона являлась чрезвычайно смелой по тем временам гипотезой. Но именно эта гипотеза и сделала, как позже выяснилось, эволюционный подход к проблеме перспективным и плодотворным.

К концу 1970-х годов стало известно, что распад протона представляет собой одно из следствий идеи Большого Объединения, предполагающей единую природу сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий.

Характерное время распада протона очень велико, не меньше 10^{31} – 10^{32} лет. Что же касается нарушения С– и СР–инвариантности, то это явление непосредственно наблюдается в распадах K^0 и анти- K^0 мезонов. Так что соединение новейших идей и экспериментальных фактов физики элементарных частиц с космологией определенно указывает на реальную возможность выполнения всех трех необходимых условий бариогенеза в ранней Вселенной.

Нужно заметить, что «вывод» космического барионного числа $b \sim 10^{10}$ из фундаментальной теории все еще остается нерешенной задачей. Успешно показано, что это в принципе возможно, что само число лежит в естественных для теории пределах величин; но получить его удастся пока только в рамках специальных моделей, а не непосредственно из первых принципов физики. Но может быть, это число и не настолько в действительности принципиально, что оно обязательно должно иметь это и только это значение в той единственной Вселенной, которая нам известна?

Излучение

Наконец, третьей «невакуумной» компонентой космологической среды является реликтовое излучение с плотностью, которая приблизительно в десять тысяч раз меньше плотности вакуума. Среди всех ингредиентов космической среды только реликтовое излучение можно считать простым и полностью понятным по своему физическому происхождению.

Это электромагнитные волны, или фотоны, которые находились в термодинамическом равновесии с горячей космической плазмой, а при температуре ≈ 3000 К и возрасте мира ≈ 1 млн. лет, когда плазма охладилась из-за общего расширения и в ней произошла рекомбинация атомов водорода, излучение перестало взаимодействовать с веществом.

С тех пор этот газ фотонов продолжает участвовать в космологическом расширении, оставаясь практически идеально

однородным, изотропным и термодинамически равновесным. Его современная температура измерена исключительно точно, по космологическим меркам: $2,736 \pm 0,003$ К. В каждом кубическом сантиметре Вселенной содержится, как мы уже сказали выше, приблизительно $n_r \approx 500$ реликтовых фотонов.

Вместе с реликтовым излучением в состав релятивистской компоненты космической среды входят безмассовые и/или легкие нейтрино и антинейтрино (в равном числе). Их почти столько же по полному числу частиц и античастиц, сколько и релятивистских фотонов — приблизительно 400 в кубическом сантиметре. Полный вклад нейтрино всех сортов в плотность релятивистской компоненты может быть и больше вклада реликтового излучения.

Нейтрино и антинейтрино тоже вначале находились в термодинамическом равновесии с космической плазмой, но из-за слабого взаимодействия с электронами они отделились от плазмы гораздо раньше, чем фотоны; это произошло при возрасте мира ≈ 1 сек.

Нейтрино слабо взаимодействуют друг с другом, и потому нейтрино и антинейтрино не аннигилировали и смогли сохраниться до сих пор как еще один реликт горячего начального состояния мира. Их современная температура около 2 К.

Гораздо меньше известно о других возможных релятивистских частицах и полях космологической природы. Среди них наверняка должны присутствовать первичные гравитоны, кванты гравитационных волн. Не исключено, что гравитонов и возможных других частиц, о которых сейчас известно мало или ничего, может оказаться заметно больше, чем реликтовых фотонов.

Темное вещество, барионы (обычное вещество) и излучение — три основные невакуумные формы энергии во Вселенной. Иногда их называют невакуумными формами космической энергии. Каждая из этих трех форм материи несет в себе свои загадки. Даже обычное вещество, барионы, как мы видели, обязаны своим происхождением процессам, которые все еще остаются не до конца изученными. Что же тогда говорить о космическом вакууме — самом загадочном состоянии космической энергии.

Вакуум в физике

Самый трудный вопрос космологии — физическая природа космического вакуума. Нужно сказать сразу: о ней пока ничего достоверно не известно. Распространенная точка зрения состоит в том, что хотя вакуум и называют космическим, это тот же вакуум, что и в атомной физике и микрофизике, где он давно известен. В физическом вакууме разыгрываются взаимодействия элементарных частиц.

Физический вакуум представляет собой наименьшее энергетическое состояние квантовых полей. В этом состоянии энергия не равна нулю. Поэтому вакуум обладает энергией. Энергия в расчете на единицу объема — это плотность энергии. Деленная на C^2 , плотность энергии дает плотность массы.

Физический вакуум непосредственно проявляется экспериментально (см. далее). В таких экспериментах присутствие вакуума несомненно, но при этом значение его энергии ускользает от измерения. Последнее связано с тем принципиальным обстоятельством, что во всех — кроме гравитации! — физических взаимодействиях проявляется только разность энергий физической системы в различные моменты времени и/или в различных точках пространства. Но не вся величина энергии в данном состоянии физической системы. Лишь гравитация «чувствует» саму энергию, всю ее, а не ее разности.

В принципиальном плане проблема вакуума, его физическая природа является наиболее важной и вместе с тем самой сложной во всей современной фундаментальной физике.

Что же известно о природе физического вакуума и, прежде всего, о происхождении его энергии?

На заре релятивистской квантовой теории, когда впервые возник вопрос о вакууме, о значении его энергии, Гамов говорил, что вакуум должен обнаружить себя через гравитацию. На семинарах и особенно в коридорах теоретического отдела Ленинградского Физико-технического института и тогда, и много лет спустя (в 60–70 гг. прошлого века) это была одна из неизменных тем оживленных обсуждений, часто со ссылками на Гамова, некогда участника семинаров в тех же стенах.

Бесконечна ли плотность вакуума? Но тогда он должен сильнейшим образом «прогибать» пространство, так что про-

странственная кривизна должна быть бесконечной. Если же радиус кривизны пространства не меньше расстояния до горизонта, то отсюда вытекает верхний предел плотности вакуума. И шутили вслед за Я. И. Померанчуком: вакуум не пустота, он полон глубокого физического содержания...

Планковская плотность

Тем временем за океаном вопрос о численном значении плотности вакуума получил название «проблемы естественности в теоретической физике». Считалось, что для такой базовой величины как плотность вакуума нужно ожидать какого-то весьма сильно выделенного значения, и обсуждаемых вариантов было два — либо нуль, либо планковская плотность.

Планковская плотность — самая большая плотность, обсуждаемая в физике. Ее значение получается в результате несложной процедуры.

Нужно взять три фундаментальные физические постоянные — постоянную тяготения Ньютона $G \approx 7 \times 10^{-8} \text{ г}^{-1} \text{ сек}^{-2} \text{ см}^3$, скорость света в вакууме $c = 3 \times 10^{10} \text{ см/сек}$ и квантовую постоянную Планка $\hbar = 1 \times 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$. Из этих трех размерных величин можно составить одну и только одну комбинацию с размерностью плотности:

$$\rho_p = c^5 / \hbar G^2.$$

Это и есть планковская плотность. Ее численное значение $\sim 5 \times 10^{93} \text{ г/см}^3$.

Нигде в природе и ни в каком физическом эксперименте такая плотность никогда не наблюдалась. Она более чем на 80 порядков величины больше плотности атомных ядер. Считается, что при такой чудовищной плотности, или около нее, гравитация теряет тот смысл, который открыли в ней Ньютон и Эйнштейн, и становится существенно квантовым явлением. Но тогда и само пространство, а с ним и время, перестают быть непрерывными, и должны быть «квантованными», то есть прерывистыми, дискретными.

Если бы вакуум с огромной планковской плотностью заполнял реальное пространство мира, оно было бы невообразимо сильно искривленным. Так что эта плотность абсолютно недопустима.

Другой предельный случай — нулевая плотность. Но если плотность вакуума есть нуль, это никогда не удастся строго доказать экспериментально...

Действительная плотность, измеренная благодаря гравитационному эффекту вакуума (что и имел в виду Гамов, хотя об антигравитации и ускоряющемся расширении он, кажется, не говорил), теперь известна. Она составляет, как мы уже говорили, $\approx 5 \times 10^{-30}$ г/см³. Эта величина вполне согласуется с соображениями о верхнем пределе, который вытекает из ограничения снизу на радиус кривизны пространства.

В духе «аргумента естественности» она должна представляться неестественно малой — по сравнению с планковской плотностью она на сто двадцать три порядка меньше. А по сравнению с нулем она, очевидно, бесконечна велика.

Соотношение неопределенностей

Но обратимся к принципиальной стороне вопроса. Откуда вообще берется энергия вакуума? Почему нужно говорить (как выше) о квантовых полях? И откуда известно, что минимальная энергия этих полей не равна нулю?

Напомним, прежде всего, что речь пока что идет о вакууме в физике, и никто не знает, тот ли в точности это вакуум, который открыли в космологии. Но в физике вакуум несомненно обладает ненулевой энергией.

Физика только в учебниках делится на квантовую и классическую. Все реальные процессы в природе, все явления реального мира имеют принципиально квантовую природу. Другое дело, что в большинстве случаев квантовая природа физики не проявляется напрямую. Именно так и обстоит дело, например, в потоках воды в реках или океанах, движениях планет и звезд, разбегании галактик и т.д.

И тогда можно пользоваться для описания этих явлений классической, т. е. неквантовой, теорией, которая будет давать очень хорошую, вполне достаточную для любых практических целей картину. Но на глубинном уровне и в этих случаях все происходит по квантовым законам.

Классическое, не квантовое описание определенно не годится, когда речь идет, например, о поведении электрона в атоме

водорода. Электрон может испустить (в виде электромагнитного излучения) часть своей энергии δE и это происходит всегда дискретными порциями, квантами. Кроме того, изменение энергии никогда не бывает мгновенным, оно требует некоторого конечного времени δt . При этом обе эти величины связаны между собой:

$$\Delta E \times \delta t \sim \hbar,$$

где \hbar — уже упоминавшаяся выше квантовая постоянная Планка.

Это соотношение называется соотношением неопределенностей Гейзенберга. Неопределенность в данном случае состоит в том, что акту испускания энергии нельзя приписать никакого мгновенного значения времени. С одной стороны, квант энергии неделим, и нельзя сказать, что энергия испускалась непрерывно или более мелкими порциями в течение времени δt .

А с другой стороны, хоть это и происходит единым актом, остается неопределенным момент, когда этот акт имеет место. Время испускания принципиально известно не абсолютно точно, а с неопределенностью δt .

Соотношение Гейзенберга применимо не только к электрону в атоме. Оно распространяется на любой квантовый процесс изменения энергии. Из него следует, что неопределенность во времени тем больше, чем меньше испускаемая энергия. Оно говорит также, что если момент изменения энергии зафиксирован с точностью до некоторого δt , то точность измерения энергии составит δE , и две эти величины будут связаны соотношением неопределенностей. Ничего подобного классическая механика не знает, таких связей и ограничений в ней нет.

Соотношение неопределенностей имеет очень общее значение и лежит в основе основ квантового описания природы. Конечно, в квантовых эффектах речь идет о малых — микроскопических — порциях энергии δE и малых временах δt , и мерой их малости служит постоянная Планка.

Квантовый осциллятор

Со времен Галилея физикам исправно служил маятник как простейший образец многих и многих физических систем. На примере маятника очевиден, например, закон сохранения

энергии. При его колебаниях сумма кинетической энергии и потенциальной энергии остается неизменной.

В нижнем положении маятника, в то мгновение, когда ось маятника оказывается вертикальной, его потенциальная энергия минимальна, а кинетическая энергия максимальна. При отклонении от вертикали кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная увеличивается.

Если маятник остановить, он повиснет в вертикальном положении. Это его положение равновесия, в котором потенциальная энергия будет минимальна, а кинетическая энергия будет равна нулю. Но этот нуль — только приближенный нуль. Нулевая энергия вытекает только из классического описания. В действительности строгого нуля кинетическая энергия никогда не достигает. Маятник никогда не сможет оставаться в покое со строго вертикальной осью.

Дело не в каких-либо влияниях извне вроде, например, тепловых движений молекул окружающего воздуха. Даже в «безвоздушном пространстве» маятник не будет строго неподвижен. Маятник будет раскачиваться, хотя и с очень малой амплитудой, так что его кинетическая энергия будет все время меняться. Она практически всегда будет хоть мало, но отличаться от нуля. Период колебаний при этом остается неизменным, он определяется только характеристиками самого маятника (его длиной). Если период маятника T принять за δt , то, согласно соотношению неопределенностей, его минимальная средняя кинетическая энергия будет $\delta E \sim \hbar/\delta t = \hbar/T$.

Если, например, период колебаний составляет одну секунду, эта энергия равна, по порядку величины, 10^{-27} эрг. Это очень малая энергия. Она близка, например, к кинетической энергии одного электрона, движущегося со скоростью 1 см/сек. Тогда как у маятника массой, скажем, в один килограмм, движущегося с той же скоростью, энергия будет порядка 1000 эрг, что на тридцать (!) порядков величины больше. Этот пример показывает, что маятник — из-за квантовых эффектов — имеет в наименьшем энергетическом состоянии неустранимую кинетическую энергию. Эта энергия конечна, хотя и очень мала.

Системы, колеблющиеся около положения равновесия, в физике называют осцилляторами, и маятник — это пример таких

систем. Общая формула для энергии квантового осциллятора выглядит так:

$$E = \hbar\omega(n + 1/2),$$

где $\omega = 2\pi/T$ — частота колебаний маятника, n — целое число, которое принимает значения 0, 1, 2, 3... Энергия может иметь только дискретные значения, соответствующие этому числу n .

Различие между энергиями двух соседних состояний составляет $\hbar\omega$. Когда это число n очень велико, различие между энергиями соседних состояний может быть очень мало по сравнению с самими этими энергиями. При таких условиях дискретность энергий может быть практически незаметной, и в таком случае систему можно описывать с помощью классической, не квантовой теории, в которой энергия системы может меняться непрерывно. Но при малых значениях числа n квантовые эффекты сильны. Самый важный из них — ненулевая энергия в состоянии $n = 0$. Это, очевидно, наименьшее энергетическое состояние, и в нем энергия осциллятора равна $\hbar\omega/2$ — в полном соответствии с тем, что было сказано выше. Это энергия «нулевых колебаний», как их называют.

Нулевые колебания

Замечательное обстоятельство состоит в том, что любое волновое электромагнитное поле можно представить и описать как совокупность квантовых осцилляторов с различными частотами колебаний. Более того, таким способом можно описать и вообще все квантовые поля. В наименьшем энергетическом состоянии этих полей n равно нулю.

Это и есть состояние вакуума, в котором частицы данного поля (например, фотоны в случае электромагнитных волн) отсутствуют. Но в отсутствие частиц поле не исчезает — остаются его нулевые колебания. Поэтому вакуум имеет отличную от нуля энергию. Таков принципиальный ответ на вопрос о происхождении энергии физического вакуума, который дает теория квантовых полей. Но реально подсчитать соответствующую плотность энергии, связанную с нулевыми колебаниями, квантовая теория поля не позволяет. Дело в том, что в вакууме присутствуют все возможные частоты нулевых колебаний квантовых полей — от $\omega = 0$ и до бесконечных значений ω .

Если суммировать энергию нулевых колебаний по всем возможным их частотам вплоть до бесконечности, то результатом и будет бесконечная энергия и бесконечная плотность энергии вакуума. Чтобы избежать бесконечностей, прибегают к ограничению диапазона частот сверху на некотором значении частоты, которое принимается за предельное. Зная уже из космологии действительное значение плотности вакуума — если, конечно, это тот самый вакуум нулевых колебаний, — нужно выбрать предельную частоту на уровне $\Omega \sim 10^{-13}$ сек⁻¹.

Предельной частоте отвечает длина волны, которая составляет приблизительно 1 мм. Эта длина очень велика по сравнению с характерными пространственными масштабами микромира $\sim 10^{-13} - 10^{-15}$ см и очень мала по сравнению с космологическими масштабами $A \sim 10^{28}$ см, но как ни странно, очень близка к привычным для человека меркам.

Важнее, однако, то обстоятельство, что характерная длина волны лежит в пределах масштабов, для которых экспериментально проверены законы гравитации. В этом смысле такой подход к теории физического вакуума не требует экстраполяции известных законов физики в область масштабов, где эти законы остаются непроверенными. Но какова физическая причина, создающая ограничение сверху на частоты нулевых колебаний? На этот важнейший вопрос пока нет ответа...

Море Дирака

О равномерном однородном фоне энергии физики рассуждают и спорят с 1928 г., когда Поль Дирак предложил релятивистскую теорию электрона. В этой теории предполагается, что наряду с «обычными» электронами (такими, как в электрических проводах) в мире существуют еще необычные электроны — электроны с отрицательной энергией. Считается, что они присутствуют везде в мире и притом с... бесконечной концентрацией. Им соответствует и бесконечная плотность энергии. Но это отрицательная энергия и ее плотность равна минус бесконечности.

Эту бесконечную отрицательную энергию называют морем Дирака. При всей своей необычности, море Дирака позволяет делать теоретические предсказания, которые неизменно подтверждаются в экспериментах с электронами.

Одним из таких предсказаний было предсказание существования позитрона — античастицы по отношению к электрону.

По идее Дирака, позитроны — это «дырки» в море электронов с отрицательной энергией. Само это море не наблюдаемо, т. е. не проявляется ни в каких экспериментах. Наблюдаются лишь изменения в состоянии моря. Такими изменениями являются, например, акты квантового рождения пары электрон—позитрон. Само же это море служит вакуумом квантового поля электронов. Море Дирака должно, однако, гравитировать и проявлять себя в явлениях тяготения — это тот тип экспериментов, где эффект зависит не только от изменений состояний поля, но и от его полной энергии. Об этом и говорил Гамов, как уже упоминалось выше, — в связи с теорией Дирака.

А что если бесконечная отрицательная энергия вакуума электронов точно компенсируется бесконечной положительной энергией другого поля (например, поля фотонов)? Такую возможность давно уже обсуждают в физике. С ней связывают надежды и сейчас, когда вакуум обнаружил себя в космологии.

Но почему такая компенсация оказалась не точной и осталась малая положительная энергия космического вакуума? Какова физическая причина этого? Ответа нет...

Два эффекта

Подчеркнем еще и еще раз: физический вакуум — несомненная реальность, он вызывает эффекты, наблюдаемые и измеряемые в лабораторных экспериментах. Один из эффектов вакуума проявляется в спектрах излучения атомов. Дело в том, что нулевые колебания электромагнитного поля заставляют дрожать электрон в атоме. В результате электрон ведет себя не как точечный заряд, а как шарик с радиусом, равным амплитуде этого дрожания. Такой шарик слабее взаимодействует с ядром, чем точечный электрон. В результате появляется небольшой, но вполне измеримый сдвиг уровней энергии атома. Этот эффект называют лэмбовским сдвигом, по имени обнаружившего его экспериментатора, Виллиса Лэмба.

Другой эффект вакуума — так называемые виртуальные частицы. Виртуальные частицы отличаются от реальных тем, что возникают спонтанно, сами собой и тут же сами собой исчезают,

аннигилируют. Нулевые колебания полей, описывающих электроны и позитроны, проявляются во временном существовании такого рода виртуальных частиц. Возникают они не поодиночке, а парами — электрон с его античастицей позитроном. Эти пары постоянно рождаются и почти немедленно исчезают. Но если происходит столкновение какого-либо реального электрона с реальным позитроном, часть энергии этих двух частиц захватывается виртуальными парами и в результате виртуальные частицы превращаются в реальные.

При очень больших энергиях столкновений из вакуума могут рождаться таким путем целые снопы различных частиц и античастиц. Такие процессы реально наблюдаются. Замечательно, что, как и в случае с лэмбовским сдвигом, сталкивающиеся частицы высоких энергий ведут себя как шарики, а не как точечные частицы. Размеры этих шариков тем больше, чем больше энергия частицы.

Можно сказать, что каждая из сталкивающихся частиц окружена облаком виртуальных частиц. Когда частицы задевают друг друга краями своих облаков, виртуальные частицы превращаются в реальные. Ясно, что этот процесс тем эффективнее, чем крупнее облака; но это означает, что рождение новых частиц должно происходить тем легче, чем выше энергия сталкивающихся частиц. Эта закономерность и обнаруживается в реальных экспериментах.

Недостатка в виртуальных частицах никогда нет. Как говорят экспериментаторы, вакуум так и кишит у них на глазах виртуальными частицами... Никто, кажется, не сомневается в существовании физического вакуума. Но тождествен ли он, по существу, вакууму космическому? Вопрос открыт, как открыты в действительности все вообще конкретные вопросы, касающиеся физической природы вакуума.

Не исключено, в частности, что космический вакуум никак не связан с вакуумом квантовых полей, а является проявлением дополнительных измерений пространства. Об этой возможности мы расскажем в заключительном разделе книги.

Рождение Вселенной

«Прометеева стихия»

В 1929 г. Эйнштейн писал: «Говоря откровенно, мы хотим не только узнать, как устроена природа, ...но и по возможности достичь цели утопической и дерзкой на вид — понять, почему природа является именно такой, как она есть... Такова прометеева стихия научного творчества».

В этом последнем разделе книги мы расскажем о самых дерзких идеях и гипотезах в космологии. Все они — именно все, а не некоторые или даже большинство — еще не прошли настоящей проверки, проверки в экспериментах и реальных наблюдениях. И потому не исключено, что они просто неверны.

Тем не менее, некоторые из современных догадок космологов настолько интересны сами по себе, что, несомненно, заслуживают внимания и обсуждения, — даже и независимо от того, что скажут о них не сегодня, а завтра или послезавтра, когда — и в этом тоже не приходится сомневаться — большая их часть будет опровергнута тем или иным образом, а то и просто забыта.

После такого предупреждения стоит, может быть, снова напомнить читателю об одном примере дерзкой идеи, до сих пор не доказанной и не опровергнутой — о гипотезе жизни на других планетах, выдвинутой Джордано Бруно. Его самого она привела на костер инквизиции, а многим поколениям исследователей после него послужила образцом научной смелости. Это поразительно — гипотеза оказалась исключительно продуктивной (см. главу 1), даже и не будучи доказанной.

Мы не решились бы сказать, что среди современных космологических гипотез имеется хотя бы одна, которая сравнилась по силе с этим примером. Все они не доказаны, как гипотеза Бруно, но ни одна из них пока не оказалась столь же продуктивной. Впрочем, на этот счет могут быть и иные мнения — особенно у самих авторов этих идей. Поэтому мы не будем пытаться давать им какую-либо оценку, а просто расскажем о самом интересном, что мы находим в них.

При этом мы не станем претендовать ни на полноту, ни на систематичность изложения. И будем следовать здравому совету Бориса Заходера, вынесенному в эпиграф этой книги.

Космологическая сингулярность

В центре космологических дискуссий сегодня — острые вопросы, поставленные фридмановской космологией. Сама эта теория не подвергается сомнению: по общему признанию, она дает правильное описание современного состояния мира, его прошлого и будущего. Что касается настоящего, на этот счет имеется обширный комплекс наблюдательных данных, которые полностью эту теорию подтверждают.

История Вселенной прослеживается и документируется наблюдениями вплоть до первых минут истории мира, до эпохи ядерных реакций. Но трудных проблем остается еще немало. Мы уже упоминали о том, сколь катастрофически мало известно о физической природе темного вещества, как сложна загадка космического вакуума и т. д. Существует еще один круг проблем, которые касаются скорее эволюции и общего строения мира, а не того, чем этот мир заполнен.

Самая главная из них — проблема начальной космологической сингулярности, того исходного состояния мира, когда (снова процитируем Фридмана) пространство было точкой, а плотность мира — бесконечной.

Еще в 1940-е годы Л. Д. Ландау говорил, что все дело в высокой степени пространственной симметрии, в изотропии мира, которая предполагается решением Фридмана. Будь симметрия не столь высокой, и результат был бы другим. Лучше всего, если бы удалось найти самое общее решение эйнштейновских уравнений, в котором никакой изотропии не было бы заранее

заложено, а вместо этого допускалась любая произвольная геометрия, любая зависимость геометрии от расстояний и направлений в пространстве. В таком самом общем космологическом решении, как считал Ландау, начальная сингулярность должна отсутствовать. Если так, то и самого по себе начала не должно быть, и история Вселенной продолжалась бы неограниченно далеко в прошлое.

Желательно вообще избавиться от заранее принимаемых предположений. Было бы замечательно, по мысли Ландау, если бы космология могла доказать, что современное состояние крупномасштабной однородности и изотропии неизбежно возникает в ходе эволюции из любого сколь угодно неоднородного и анизотропного состояния в прошлом Вселенной.

Изучение такой возможности потребовало немало изобретательности и высокого теоретического искусства. Многолетняя работа учеников Ландау, в дальнейшем академиков Е. М. Лифшица и И. М. Халатникова, а также А. Л. Зельманова, Я. Б. Зельдовича и его школы привела к гораздо лучшему пониманию проблемы. Анизотропная космология была построена, достигнута значительная общность решений, выяснены условия их изотропизации, т. е. приближения к состоянию полной пространственной симметрии в ходе космологического расширения.

Параллельно и столь же успешно в Кембридже развивался иной подход к проблеме. Условия существования космологической сингулярности изучались не на языке конкретных решений уравнений общей теории относительности, а с помощью теорем, которые можно формулировать и доказывать на основе тех же уравнений.

Так возникла знаменитая теорема С. Хокинга и Р. Пенроуза, согласно которой космологическая сингулярность неизбежна: ее никак нельзя ликвидировать, она внутренне присуща сильным гравитационным полям.

Это ответ на вопрос о сингулярностях в общей теории относительности. Но в реальном мире картина сложнее, разнообразнее и богаче, чем даже в этой исключительно сложной теории. Действительно, при экстремально высоких плотностях вблизи начальной космологической сингулярности одной

только общей теории относительности уже недостаточно. При таких условиях вступают в игру квантовые эффекты, а они в этой теории отсутствуют.

Квантовые эффекты не допускают никаких «строгих точек нулевого размера» в реальном пространстве—времени — это исключается соотношением неопределенностей, о котором мы уже упоминали не раз. Такие точки должны быть на самом деле размыты в объекты конечных размеров. Но тогда, следовательно, конечной, а не бесконечной, должна быть и плотность мира. При этом имеется хороший кандидат на роль предельно высокой плотности — это планковская плотность. Как мы уже говорили, при такой плотности гравитация становится существенно квантовым явлением.

При планковской плотности и сам мир должен быть квантовым объектом. Но что это фактически означает, на самом деле, не очень известно. Ведь до сих пор квантовой теории тяготения не существует. Теоретики бьются над созданием этой теории с начала 1930-х годов, когда был сделан первый шаг к синтезу двух фундаментальных теорий физики — квантовой механики и общей теории относительности. Этот шаг был сделан М. П. Бронштейном, приятелем Гамова и Ландау по Ленинградскому университету; он погиб совсем молодым в годы сталинского террора.

Бронштейн доказал, что в природе должна существовать до того неизвестная элементарная частица, гравитон, которая переносит гравитационное взаимодействие. Она не имеет массы покоя, а ее спин (момент собственного вращения) должен быть равен 2, в принятых в квантовой механике единицах. Гравитон — квант гравитационного поля в том же самом смысле, в каком фотон — квант электромагнитного поля. Масса фотона тоже равна нулю, а его спин равен единице. Экспериментально гравитоны до сих пор не открыты, но никто, кажется, не сомневается, что они реально существуют.

Мало кто сомневается и в реальности «квантового испарения» черных дыр, открытого Хокингом в 1970-е годы (об этом уже упоминалось в главе 3). Это тоже существенно квантовое явление, в котором действует квантовое соотношение неопределенностей.

Из-за этого поверхность Шварцшильда должна быть размыта, с нее могут срываться пары виртуальных частиц и античастиц. Некоторые пары частиц могут быть разорваны полем тяготения, и тогда частицы такой пары из виртуальных становятся реальными. Эти уже реальные частицы будут, как падать внутрь черной дыры, так и улетать от нее. Те частицы, которые улетают вовне, и создают эффект испарения.

Это относится к черным дырам небольшой массы (до 10^{15} грамм). Испарение черных дыр больших масс идет столь медленно, что это практически незаметно. (Возможность квантового испарения была ясна ленинградскому теоретику В. Н. Грибову за несколько лет до Хокинга; Грибов говорил об этом Зельдовичу, но не смог его заинтересовать.)

Эти два замечательных результата показывают, что квантовая теория гравитации может быть создана, это посильная для теоретиков задача. Но чтобы ее решить, потребуются новые глубокие идеи, подобные идеям Бронштейна и Хокинга, а может быть, и совсем не похожие на них.

Скорее всего, Ландау прав: сингулярность отсутствует в самой общей постановке задачи, и эта задача должна ставиться на основе релятивистской квантовой теории тяготения. Пока такая теория отсутствует, главная проблема космологии остается открытой, — физическую природу космологической сингулярности еще предстоит выяснить.

Другой важнейший вопрос тоже относится к самой ранней стадии существования мира — это вопрос о причине космологического расширения. На этот счет имеется замечательная гипотеза, о которой мы ниже расскажем подробно. В ее основе лежит предположение о том, что начальным состоянием вселенной был вакуум — это гипотеза, выдвинутая в середине 1960-х годов Э. Б. Глинером в Физико-Техническом институте им. А. Ф. Иоффе в Ленинграде. Стоит заметить, что на такое особое физическое состояние, как вакуум, не распространяется теорема Хокинга—Пенроуза о неизбежности сингулярности.

Проблема происхождения однородности и изотропии мира, о которой говорил Ландау, тоже остается фактически открытой: на вопрос «почему пространство столь симметрично?» до сих пор нет полного и общего ответа.

Гипотеза Глинера

В 1965 г. Э. Б. Глинер выдвинул предположение, что начальным состоянием всего вещества Вселенной был вакуум. Не тот вакуум, который позднее, через три десятилетия после этого, был открыт с помощью сверхновых звезд, а иной, первичный, изначальный вакуум, плотность которого была во много раз больше плотности реального наблюдаемого вакуума в современном состоянии мира.

Но по всем остальным свойствам, кроме плотности, первичный вакуум был очень близок к современному наблюдаемому вакууму. Его плотность должна быть положительной, а давление — отрицательным и равным по абсолютной величине плотности, умноженной на квадрат скорости света:

$$p = -\rho c^2.$$

Это то самое «уравнение состояния» вакуума, о котором мы выше говорили. Напомним, что эта и только эта связь давления с плотностью обеспечивает вакууму его главное механическое свойство — быть одним и тем же везде и всюду, в любой момент времени и в любой системе отсчета.

Первичный вакуум обладает антитяготением, т. е. создает отталкивание между любыми двумя помещенными в него частицами «обычного» вещества. Сами частицы притягиваются друг к другу благодаря взаимному тяготению их масс. Но лежащий между ними вакуум способен преодолеть их тяготение и заставить частицы двигаться друг от друга прочь, разлетаться с ускорением. При своей колоссальной плотности (ниже мы скажем, о каких конкретно плотностях говорят в этом случае теоретики) первичный вакуум мог создать такой разгон, что частицы двигались бы потом десять миллиардов лет и больше, сохраняя энергию этого «первоначального толчка».

В этом суть гипотезы Глинера: первичный вакуум вызывает разлет вещества и тем самым порождает космологическое расширение. Речь идет о самых первых мгновениях космологического расширения: все должно было случиться еще до эпохи ядерных реакций, за время, много меньшее нескольких минут.

Скажем сразу, что до сих пор не вполне ясно, откуда берется вещество в начальном состоянии мира, и куда потом девается вакуум.

Возможно, вещество самопроизвольно рождается из вакуума — это допускается законами квантовой физики. Например, из вакуума может родиться пара частица—античастица. Без вакуума она столь же самопроизвольно и притом очень быстро исчезает, аннигилирует. Но на фоне антигравитирующего вакуума такая виртуальная пара могла бы стать реальной. Действительно, отталкивая частицу и античастицу друг от друга, вакуум способен помешать им снова встретиться и аннигилировать. Если уже частицы и античастицы родились в вакууме, им ничего не остается, как и дальше разлетаться друг от друга.

Инфляция

Гипотезу Глинера сначала резко критиковали — самым энергичным критиком был Зельдович. Ей симпатизировали А. Д. Сахаров и Л. Э. Гуревич; в середине 1970-х годов ее успешно развивала И. Г. Дымникова. А с начала 1980-х идея Глинера оказалась чуть ли не центральной в теоретической космологии. За ее разработку взялись и Зельдович (публично заявивший о пересмотре своей позиции) и многие другие теоретики, особенно энергично и изобретательно А. А. Старобинский, А. Гут, А. Д. Линде и П. Стейнхард.

Причем, как нередко бывает в таких случаях, не все ясно понимали или отчетливо помнили, чью именно идею они так успешно развивают и пропагандируют.

Это направление исследований вскоре стало широко известно под названием «инфляция». Инфляция, или раздувание, — процесс первоначального ускоренного расширения Вселенной под действием антигравитации вакуума. Как мы уже говорили, расширение под действием вакуума происходит по экспоненциальному закону. (По тому же закону развивается и денежная инфляция.)

В работе по этой теме участвовали сотни теоретиков, как собственно космологов, так и специалистов, пришедших в космологию из физики элементарных частиц. За два десятилетия работы опубликовано немало книг (десятки) и статей (десятки тысяч). Но такое «раздувание» не привело к «инфляционному обесцениванию» первоначальной идеи. Скорее, было сделано почти все возможное для ее развития и конкретизации.

Побочным продуктом инфляционной деятельности стали новые идеи на стыке космологии и физики элементарных частиц, некоторые из которых имеют, возможно, и независимую научную ценность.

И все же мы так до сих пор и не понимаем, как в точности первичный вакуум породил тот мир, который мы знаем. Имеется ряд интересных инфляционных моделей, но какая именно из них верна, никто пока не решится сказать. Может быть, и ни одна из имеющихся в наличии.

В чем сходятся почти все популярные сейчас модели инфляции, так это в оценке плотности первоначального вакуума: она близка к планковской плотности, о которой мы уже говорили выше. Ее значение на 122(!) порядка величины превышает плотность реально наблюдаемого космического вакуума. Что же касается длительности первоначального ускорения, то оно заняло немислимо малый промежуток времени — 10^{-36} секунды или около того. И в начале этого процесса размер рассматриваемых в этих моделях областей пространства составлял не более 10^{-33} сантиметров.

В теоретическом, а точнее, математическом плане модели сходны в том, что первичный вакуум описывается или имитируется гипотетическим полем, до того не известным в теории или эксперименте. Поле заполняет, по предположению, все доступное пространство. Оно обладает плотностью и создает давление. Связь между ними в точности или почти в точности такая, как у вакуума. Представление об инфляционном поле позволяет применять в космологии многие результаты, полученные ранее в теории квантовых полей, — это и привлекло в космологию специалистов по физике элементарных частиц.

С помощью представления об инфляционном поле удалось представить себе возможную природу тех изначально слабых сгущений вещества, из которых впоследствии сформировались галактики, их скопления и вся крупномасштабная структура Вселенной. Идея состоит в том, что протогалактические сгущения обязаны своим происхождением квантовым флуктуациям инфляционного поля.

Эту идею выдвинули В. Ф. Муханов и Г. В. Чибисов (Физический институт им. П. Н. Лебедева в Москве), когда слово

«инфляция» еще не было в ходу. Они рассмотрели квантовые флуктуации в мире де Ситтера, и их результат очень хорошо укладывается в рамки разумных моделей инфляции. Позднее этот вопрос изучали А. А. Старобинский, С. Хокинг, А. Гут, А. Д. Линде, А. Виленкин.

Квантовые флуктуации неизбежны во всех полях, во всех физических системах, и весьма естественным путем они возникают и в инфляционном поле при планковских плотностях.

Другой важный результат инфляционных моделей относится к проблеме плоскостности, которую мы уже обсуждали выше в данной главе. Согласно этим моделям, реальное пространство мира является плоским или почти плоским благодаря первоначальному инфляционному раздуванию. Предлагается и наглядное объяснение этому явлению.

Взглянем на раздувающийся воздушный шар: чем сильнее он раздувается, тем ближе к плоскому будет какой-то небольшой участок поверхности шара. Поверхность шара неевклидова, и всегда остается неевклидовой. Но что касается малого участка, за которым мы следим, то для него видимая неевклидовость будет со временем убывать. В пределе, когда размер участка будет гораздо меньше радиуса шара, его отличие от куска плоскости будет исчезающе мало.

Роль «малого участка» играет наблюдаемый трехмерный объем Вселенной с современным размером в десять миллиардов световых лет, по порядку величины. Этот размер, как считается, очень мал по сравнению с размером «всего пространства».

Такое объяснение годится в действительности только в том случае, когда динамикой расширения управляет вакуум. Это может быть ранняя стадия инфляции с ее гипотетическим сверхплотным вакуумом или реальная современная стадия преобладания наблюдаемого космического вакуума. На стадии же преобладания вещества мера неевклидовости возрастает со временем — несмотря на всеобщее расширение мира. Под «размером всего пространства» нужно в этом случае понимать радиус кривизны сопутствующего пространства.

В инфляционных моделях начальное — накануне раздувания — состояние мира предполагается приготовленным специальным образом. Именно, берется объем конечного, но

достаточно большого размера, чтобы в нем поместилось все то, что составляет сейчас доступную наблюдениям область с нынешним размером в 10 миллиардов световых лет. Размер «всего объема» берется таким, чтобы к концу инфляции он был, скажем, в 30–100 раз больше размера его «малой» части.

Тогда предсказывается, что величина Ω отличается в современную эпоху от единицы не больше чем на десятую долю процента. Чтобы эту цифру проверить в наблюдениях, требуется заметно уменьшить ошибку измерения величины Ω .

Пока что можно сказать, что предсказание не противоречит наблюдениям, хорошо согласуется с ними, хотя и непосредственно не подтверждается ими. Заметим, что в наиболее продвинутых в количественном отношении инфляционных моделях принимают, что пространство с самого начала инфляции было уже однородным как в малом, так и в большом масштабе.

Вопреки распространенному (популяризаторами) мнению, инфляционные модели не утверждают, что мир должен быть строго плоским. Они говорят лишь, что если мир и неевклидов, то количественная мера неевклидовости сейчас мала. Это достигается специальным подбором упомянутых выше «малого» и «большого» размеров. Такой подбор разумен, но непосредственное физическое основание для него еще предстоит найти.

Было бы удачей, если бы модели инфляции позволили предсказать существование космического вакуума в современную эпоху и вычислить заранее его плотность. Увы, этого не произошло, шанс был упущен.

Открытие космического вакуума застигло, как кажется, теоретиков инфляции врасплох — похоже, никто из них не ожидал, что астрономы—наблюдатели так скоро произведут очередной переворот в космологии, и что этот переворот будет таким решительным и глубоким.

Стоит подчеркнуть, что модели инфляции ни в каком смысле не отвергают теорию Фридмана и не заменяют ее. Напротив, они расширяют область применимости фридмановской теории, открывают возможность ее экстраполяции в более далекое прошлое мира — по сравнению с тем, на что указывают прямые наблюдения.

Как мы говорили, наблюдения обосновывают применимость фридмановской космологии, начиная с первых минут существования мира. В инфляционных моделях фридмановская космология считается применимой сразу после окончания стадии инфляции, т. е. уже при временах, которые измеряются мельчайшими долями секунды.

Рождение миров

Как писал Фридман, в самом начале существования мира пространство было точкой (см. выше). Точкой нулевых размеров вряд ли — этого не позволяет квантовое соотношение неопределенностей. Но она могла быть тогда сравнима по размеру с элементарной частицей. Если так, почему бы Вселенной не родиться «из ничего», как рождаются из вакуума элементарные частицы?

Первым высказал эту дерзкую мысль П. И. Фомин три десятка лет назад. В моделях инфляции эта идея нашла второе рождение. При этом стали говорить уже не об одной Вселенной, а о множестве различных вселенных — элементарных частиц тоже ведь имеется множество, и их разнообразие хорошо известно.

Множественное рождение вселенных — это самая увлекательная из идей, рожденных гипотезой первичного вакуума.

В современных моделях инфляции рассматривается возможность того, что инфляционное поле (имитирующее первичный вакуум) изначально имело разную плотность в разных областях пространства. Предполагается, что распределение этой плотности было случайным, хаотически неоднородным. Тогда в тех областях, где плотность слишком мала, инфляция никогда не начинается. Но там, где плотность изначально велика, раздувание было быстрым, и таким путем в мире возникли «острова в океане хаоса», как пишет об этом А. Д. Линде, автор модели хаотической инфляции. Предполагается, что размер каждого такого острова гораздо больше размеров реально наблюдаемого мира.

Совсем необязательно, чтобы все космологические острова или континенты, различающиеся между собой массой и размерами, возникли одновременно. Наоборот, более естественна

картина множества вселенных, которые возникают в разных местах в разное время. Не нужно единого Большого Взрыва. Достаточно, чтобы среди множества отдельных и тоже, конечно, грандиозных взрывов нашлись бы такие, которые напоминали бы «взрыв» нашей Вселенной, как мы знаем ее с первых нескольких минут ее жизни.

Ясно, что при таком подходе наша Вселенная оказывается отнюдь не уникальным созданием природы, а всего лишь одной из возможных реализаций ее (природы) творческих способностей. Но что в этом плохого? Вряд ли такой взгляд на вещи в космологическом масштабе может вызывать какие-то принципиальные возражения. Скорее это должно нравиться — ведь таким путем делается еще один шаг к освобождению от старых предрассудков антропоцентризма.

Действительно, человек — не перл творения, а Земля не единственная обитаемая планета и далеко не центр мира. Но и наша Вселенная не обязана быть единственной и неповторимой только потому, что именно мы живем в одной из ее многочисленных звездных систем. Другой вопрос: не выходят ли теоретики в таких рассуждениях за границы физики. Не оказываемся ли и мы вместе с ними в кругу проблем, составляющих предмет совсем другой науки?

У Аристотеля, в его своде наук, за физикой следует метафизика (последнее слово буквально значит «за физикой»). В метафизике Аристотеля говорится об общих взглядах на мир и месте в нем человека. У метафизики свой предмет, свои проблемы и идеи. Ею занимаются не физики, а соответствующие специалисты, философы. Физики не очень любят, когда философы объясняют им, что в естественных науках верно, а что — неверно. Но и физики оказываются, бывает, в не очень выигрышном положении, когда берутся судить о том, в чем они не специалисты.

Границы физики определяются простым критерием: можно ли данное утверждение проверить в эксперименте или наблюдении, — хотя бы в принципе? Если да, это физика.

В этом смысле модель множественных вселенных выходит за рамки физики. Ее принципиально невозможно проверить, потому что наблюдению доступна лишь наша Вселенная, та, в которой «мы обречены жить», — как говорил Фридман.

Мы ничего не видим и никогда(!) не увидим за пределами горизонта мира. Область размером в десять миллиардов световых лет — вот все, что способна изучать физика, а с нею и наблюдательная астрономия. Как сказано в «Фаусте», — «Вселенная во весь объем доступна только Провиденью». И физика на «весь объем» не претендует.

В вопросе о научном статусе инфляционных моделей имеется и еще один немаловажный аспект. Дело в том, что теоретическое изучение космологического раздувания при указанных выше немислимых плотностях вакуума за указанные выше немислимые времена требует очень далекой экстраполяции надежно установленных физических законов.

Например, законы тяготения проверены в области малых расстояний до долей миллиметра. Только от долей миллиметра и к более крупным масштабам надежно установлен ньютоновский закон обратных квадратов для силы притяжения. Как ведут себя силы притяжения в меньших масштабах никто не знает. Возможно, ничего особенного в микронных или, скажем, нанометровых масштабах пространства нет, и гравитация там такая же, как в больших масштабах.

Но для инфляционных моделей требуется знать эти законы вплоть до длин порядка 10^{-31} сантиметров (см. выше). Вот в этом смысле плотности, времена и размеры, фигурирующие в инфляционной теории, и кажутся немислимыми: их не осмыслишь на основе надежно установленных законов физики.

Инфляция требует ухода в область неизвестного. Ей придется прибегать к очень далекой экстраполяции законов физики. В этом ее вины нет: просто современная физическая наука еще не созрела для решения тех задач, которые возникают в моделях инфляции.

У инфляционной теории много сторонников—энтузиастов и мало критиков—скептиков (авторы этих строк не принадлежат ни к тем, ни к другим). Для полноты картины нужно, наверное, сказать и о критике. Тем более, что вопросы критиков касаются не деталей, а сути дела. Например: если «в начале» имеется лишь вакуум (или, что то же, имитирующее его специальное поле), то четырехмерный мир есть мир де Ситтера, и этот мир статичен. Но тогда что именно раздувается при инфляции?

На это обычно отвечают, что в инфляционной модели увеличивается по экспоненциальному закону (или близко к нему) масштабный фактор, пропорционально которому растут все расстояния в данной системе координат, и происходит расширение распределения тех частиц, которые рождаются из-за распада скалярного поля в конце стадии инфляции.

Но скептиков такой ответ не вполне удовлетворяет; они спрашивают: а что же тогда расширяется не в конце, а в начале этой стадии? И спор продолжается. Критики находят новые и новые аргументы, а сторонники—энтузиасты уверены, что инфляционная модель способна устоять перед любой критикой. И победить ее может лишь новая идея, еще более остроумная, чем идея Глинера.

В чем все согласны, так это в том, что инфляционные модели не прошли еще настоящей проверки в лабораторном эксперименте или астрономических наблюдениях. И их перспективы в этом смысле не очень ясны. Эксперименту и наблюдениям и принадлежит, как всегда, последнее слово в спорах теоретиков.

И все же исключительно увлекательна сама по себе идея множественных миров! Она не поможет раздвинуть горизонт реальных наблюдений, не пополнит запас конкретных знаний о Вселенной. Но она, несомненно, расширяет круг наших общих воззрений на возможное устройство мира. Вернее, не мира, а мультимира, как называют всю совокупность многих и многих вселенных. Удивительно и волнующе это вечное существование кипящего вакуума, самопроизвольно порождающего новые и новые вселенные в процессе, которому не было начала и не будет конца.

Почему 3+1?

Чтобы указать положение тела в пространстве, нужно назвать его координаты, три числа. Чтобы указать момент времени достаточно назвать одно число. В этом выражается трехмерность пространства и одномерность времени.

Реальный четырехмерный мир физических явлений имеет размерность 3+1.

Но в 1930-е годы Артур Эддингтон выдвинул гипотезу о том, что трехмерность пространства и одномерность времени — это

свойства лишь близкой к нам области мира. Не исключено, что в каких-то очень удаленных от нас областях мира время могло бы оказаться не одномерным, а, скажем, двумерным. Тогда для указания момента времени требовалось бы указать уже не одно, а два числа. И пространство могло бы иметь в этих областях другую размерность.

В духе новейших представлений о мультивмире эту идею можно понимать как возможность иных измерений пространства и времени в каких-то других вселенных. Ничто в физике, как кажется, такой возможности заранее не запрещает.

Если возможны различные размерности мира, то хотелось бы понять, почему именно в нашей Вселенной пространство трехмерно, а время одномерно.

Трехмерность пространства и одномерность времени представляют собой очевиднейшие свойства нашего мира. О трехмерности пространства рассуждали еще Платон и Аристотель. Но физический подход к проблеме был развит только в 1920-е годы. Пауль Эренфест (одно время он жил в России, и его звали Павел Сигизмундович) выяснил, что трехмерность пространства исключительно важна для самого существования мира реальных вещей. Если бы, например, число пространственных переменных было не 3, а 4, то, как оказывается, не существовало бы замкнутых орбит планет, и Солнечная система не могла бы образоваться.

В 1970-е годы Л. Э. Гуревич и В. М. Мостепаненко распространили этот анализ на квантовую механику и доказали, что в четырехмерном пространстве не существовало бы и замкнутых орбит электронов в атомах, так что была бы невозможна атомная структура вещества. Из этих примеров видно, что число пространственных переменных — исключительно важный факт природы.

Несомненно, то же нужно сказать и о размерности времени. Его одномерность, осознанная людьми гораздо позже, чем трехмерность пространства, представляет собой факт фундаментальной важности.

У идеи Эддингтона есть и еще один аспект, который гораздо ближе к реальной физике. Именно: как проверить, что наша собственная Вселенная действительно имеет ту размерность

пространства и времени, которая для нас очевидна и привычна? Не существует ли, например, каких-то дополнительных измерений пространства, которые мы пока в нашем мире не замечали?

Последний вопрос оказался сейчас в центре внимания физиков, космологов и астрономов. Возможность дополнительных измерений пространства серьезно изучается, в частности, в теории струн. С теорией струн связывают немалые ожидания: есть надежда, что она явится «теорией всего» — всех частиц и полей, включая гравитацию. Но до этой цели, как кажется, все еще очень далеко.

Главный объект этой теории — гипотетические одномерные «палочки» и «колечки», которые и называют струнами. Палочки — это незамкнутые струны, а колечки — замкнутые. У струн нет толщины, а их протяженность исключительно мала — порядка 10^{-33} см.

Эта величина называется планковской длиной. Она получается из тех же фундаментальных физических постоянных (постоянная тяготения Ньютона G , постоянная Планка \hbar , скорость света c), что и упоминавшаяся выше планковская плотность. Планковская длина L_p — это единственная комбинация этих трех констант, имеющая размерность длины:

$$L_p = (G\hbar/c^3)^{1/2}.$$

Ее численное значение $L_p = 2 \times 10^{-33}$ сантиметров. В теории струн эта исключительно малая длина играет самую важную роль.

Оказывается, что непротиворечивую теорию струн можно построить только при условии, что время одномерно, а у пространства имеется как минимум шесть дополнительных измерений. Дополнительные измерения пространства имеют очень малую протяженность, приблизительно равную той же планковской длине.

Эти протяженности столь малы, что они не поддаются обнаружению и прямому измерению ни в каких до сих пор проводившихся экспериментах. Об этих длинах можно будет судить только косвенно по тем специфическим эффектам, которые создаются струнами в мире элементарных частиц. Пока что не вполне ясно, когда необходимые для этого эксперименты можно будет реально осуществить.

Считается, что колебания струн способны породить все возможные физические поля и частицы. В том числе, конечно, частицы темной материи, барионы, фотоны и вообще все частицы, которые хорошо известны по осуществленным до сих пор физическим экспериментам и астрономическим наблюдениям. При этом «обычные» частицы и физические поля «живут» только в реальном мире с числом измерений $3+1$.

Дополнительные измерения пространства им, как предполагается, недоступны. Лишь поля тяготения не знают этого ограничения и действуют в полном объеме многомерного пространства.

В недавно найденных в Петербурге рукописях Иммануила Канта есть фраза, созвучная новейшим идеям: «Пространство и время возможны только как части еще большего количества».

Дополнительные измерения

Известно, что Кант, классик немецкой философии, был первым, кто указал на глубокую связь ньютоновского закона всемирного тяготения с тем фактом, что наше пространство трехмерно. Только в трехмерном пространстве сила взаимного притяжения двух масс обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Если, например, пространство было бы четырехмерным, то это был бы не закон обратных квадратов, а закон обратных кубов. В девятимерном пространстве сила тяготения обратно пропорциональна восьмой степени расстояния.

В общем случае в пространстве с числом измерений N сила тяготения убывает обратно пропорционально расстоянию в степени $N-1$.

В электростатике известен закон Кулона, дающий силу притяжения (или отталкивания) между двумя электрическими зарядами разных знаков (или одного знака). Это тоже закон обратных квадратов.

Если верно, что только гравитация проникает в дополнительные измерения пространства, а электромагнитное взаимодействие существует лишь в трехмерном пространстве, то на законе Кулона — в отличие от закона Ньютона — дополнительные измерения пространства сказаться не должны.

Недавно в фундаментальной физике появились новые идеи о характере дополнительных пространственных измерений. Именно, было высказано предположение, что наряду с шестью дополнительными измерениями теории струн, а может быть, и совсем независимо от их существования (или несуществования) имеются два дополнительных измерения сравнительно больших протяженностей. Конкретно, считается, что дополнительные измерения имеют протяженность L , около долей миллиметра.

Это на 30 порядков величины больше планковской длины и вполне соизмеримо с нашими привычными повседневными масштабами длины. Авторы этой гипотезы — Н. Аркани-Хамед и его сотрудники в США.

Конечная протяженность двух дополнительных измерений (как и шести в теории струн) означает, что при путешествии в пространстве дополнительных измерений нельзя уйти сколь угодно далеко от исходной точки. Достигнув максимально возможного удаления и продолжая двигаться в том же направлении, путешественник будет не уходить, а приближаться к исходной точке.

Это вполне похоже на путешествия на Земле. Двигаясь, например, вдоль экватора, мы не смогли бы уйти сколь угодно далеко от дома, а, продолжая движение, рано или поздно вернулись бы к исходной точке. При этом максимальное удаление от дома составляет половину длины экватора. Это и есть точный аналог конечной протяженности дополнительных пространственных измерений.

Конечность пространственной протяженности называется компактностью пространства вдоль соответствующего направления в нем. Так что поверхность Земли — компактное двумерное пространство.

В гипотезе двух субмиллиметровых дополнительных измерений пространство компактно вдоль них. А вдоль трех «обычных» направлений пространство может простирается сколь угодно далеко и, во всяком случае, допускать удаление вплоть до радиуса горизонта в космологии (десять миллиардов световых лет, по порядку величины).

Если иметь дело с расстояниями, которые заметно меньше,

чем L_3 , пространство будет восприниматься как пятимерное. На расстояниях, которые гораздо больше, чем L_3 , пространство не будет обнаруживать своих двух дополнительных измерений, оно будет просто трехмерным.

Как же проверить — подтвердить или опровергнуть — существование двух субмиллиметровых пространственных измерений? Для этого нужно провести эксперимент с тяготением на расстояниях, заметно меньших протяженности дополнительных измерений. В таком случае нам станет доступно пятимерное пространство.

В пространстве пяти измерений сила тяготения между двумя массами убывает с расстоянием как его четвертая степень, т. е. быстрее, чем по закону обратных квадратов. Если эксперимент обнаружит такой закон обратных четвертых степеней расстояния, это будет означать, что два дополнительных измерения действительно существуют.

Точно такой же эксперимент с электростатическим взаимодействием не должен обнаружить отклонений от закона Кулона — все поля и взаимодействия, кроме гравитации, к дополнительным пространственным измерениям нечувствительны, они «живут» лишь в трехмерном пространстве и замечают только три обычных измерения.

Трехмерное пространство всех негравитационных полей и частиц часто называют мембраной (или коротко — «браной») в пятимерном пространстве.

Предполагается, что описанный выше эксперимент можно будет воспроизвести в лаборатории еще в этом десятилетии. Пока что измерениям доступны расстояния около миллиметра, т. е. очень близкие к протяженности дополнительных измерений, но все же превышающие ее. На таких расстояниях (как мы уже упоминали) никаких отклонений от ньютоновского закона обратных квадратов не обнаружено.

Продвижение к меньшим пространственным масштабам требует значительных усилий. Но оно вполне реально. Не принесет ли такое проникновение в пятимерное пространство чего-либо и совсем неожиданного и необыкновенного? Как знать, вполне возможно. Ждать, во всяком случае, осталось не так долго.

Истинно фундаментальные константы?

Гипотеза дополнительных субмиллиметровых измерений возникла в физике элементарных частиц. Из нее вытекает ряд интересных следствий, которые не ограничиваются только законом тяготения. Она предсказывает также существование новых типов элементарных частиц. Такие частицы, как предполагается, могут быть обнаружены в экспериментах на строящемся сейчас в ЦЕРН (Европейский центр ядерных исследований) ускорителе на встречных пучках, Большом адронном коллайдере.

С точки зрения фундаментальной физики обсуждаемая гипотеза интересна не только дополнительными измерениями как таковыми, но еще и тем, что вместе с новой константой L , она вводит и новую константу, имеющую смысл фундаментальной массы. Эта константа близка по величине к тысяче масс протона, или, скорее, к десятку тысяч масс протона:

$$M_* \sim (1000 - 10\,000) m.$$

Здесь $m \sim 10^{-24}$ г — масса протона.

До сих пор «самой фундаментальной» массой в физике считалась планковская масса. Как и планковская плотность или планковская длина, планковская масса M_p представляет собой комбинацию трех физических констант:

$$M_p = (\hbar c/G)^{1/2} = 2 \times 10^{-5} \text{ г.}$$

Почему же планковская масса считалась (и все еще пока считается) такой принципиально важной в физике?

Дело в том, что, по общему мнению, планковские величины характеризуют физические условия, при которых одинаково существенную роль играют и квантовые эффекты, и эффекты общей теории относительности. Можно сказать, что это область квантово-гравитационных явлений. Но насколько легко найти эту область по известным константам физики, настолько же трудно выяснить, что именно представляют собой эти квантово-гравитационные явления.

Остается лишь догадываться, что на пространственных интервалах, сравнимых с планковской длиной, пространство уже не может рассматриваться как непрерывное. Оно должно быть «квантованным», дискретным. Внутри таких «квантов пространства» нельзя распознать какие-то более мелкие расстояния, и

значит, при таких условиях теряют смысл понятия «ближе» или «дальше».

То же относится и к времени. Имеется планковское время

$$T_p = L_p / c,$$

которое есть просто отношение планковской длины к скорости света. Ее численное значение $T_p = 5 \times 10^{-44}$ секунды. На промежутках, сравнимых с планковским временем T_p , само время должно быть «квантованным», т.е. прерывистым, дискретным.

Внутри «квантов времени» более короткие временные промежутки распознать невозможно, так что теряют смысл понятия «раньше» или «позже».

Но что это в действительности означает и, главное, как это изучить в эксперименте, до сих пор остается неизвестным. Вернее, можно представить себе, что для экспериментального изучения квантово-гравитационных явлений требуется разгонять элементарные частицы на ускорителях до энергии, равной планковской массе, умноженной на c^2 . Однако, такие энергии просто недостижимы и никогда не будут достижимы: всех целиком земных энергетических ресурсов для этого было бы недостаточно. Не существует до сих пор и последовательной теории квантово-гравитационных явлений (мы об этом уже не раз упоминали).

Вот почему так важны в фундаментальной физике планковская масса и другие планковские величины — они очерчивают границы, в пределах которых справедливы наши обычные представления о непрерывном пространстве и непрерывном времени.

Но новая фундаментальная масса M , лишает планковскую массу ее принципиального значения в фундаментальной физике. Согласно гипотезе двух дополнительных измерений пространства, квантово-гравитационные явления возможны уже при гораздо более скромных энергиях частиц — не при $M_p c^2$, а при $M_c c^2$, что на целых пятнадцать или шестнадцать порядков величины меньше. Такие энергии уже реальны, их могут иметь частицы в экспериментах на ускорителях, которые сейчас находятся в стадии строительства.

Не существует теории, которая была бы способна доказать «истинно фундаментальный» характер массы M_c . Ее численное

значение, умноженное на квадрат скорости света, близко к характерной энергии электрослабых процессов. Это процессы, при которых электромагнитное и слабое взаимодействие элементарных частиц выступают как одно единое взаимодействие. Этот последний факт считается надежно установленным. По существу, выбор массы M_* означает, что электрослабым энергиям и электрослабым процессам принадлежит центральная роль в физике элементарных частиц.

Это очень значительный пересмотр прежних представлений фундаментальной физики. Новый взгляд на вещи решительно меняет картину миру в той ее части, которая касается основы основ физики. Этот взгляд не противоречит никаким экспериментальным или наблюдательным фактам. Поэтому, по идее, новая картина, по крайней мере, ничуть не хуже старой. В действительности, она даже богаче и интереснее. И, главное, она имеет реальные перспективы экспериментальной проверки.

Этот круг идей привлекает сейчас немалое внимание и теоретиков и экспериментаторов — полным ходом идет конкретное обсуждение будущих проверочных экспериментов. Это будут и эксперименты на ускорителях, и лабораторные эксперименты с гравитацией на расстояниях, меньших размера дополнительных измерений пространства.

Планковские величины, а вместе с ними и, например, постоянная тяготения Ньютона, изменяют свой статус при этом новом взгляде на фундамент физики: они оказываются производными от новых «истинно фундаментальных» констант M_* и L_* . В физике элементарных частиц часто используется система единиц, в которой $\hbar = c = 1$. В такой «специальной» системе единиц планковская масса выражается через эти две константы следующим образом:

$$M_p = M_*^2 L_*.$$

Через новые «истинно фундаментальные» константы L_* и M_* ньютоновская постоянная тяготения выражается (в той же системе единиц) так:

$$G = M_*^{-4} L_*^{-2}.$$

Выходит, что, и планковская масса и ньютонова постоянная выглядят лишь как трехмерные тени истинно фундаментальных констант физики пяти пространственных измерений.

Вакуум и дополнительные измерения

С точки зрения космологии гипотеза дополнительных измерений интересна тем, что она способна пролить новый свет на природу космического вакуума. Или, по крайней мере, расширить круг возможных решений этой проблемы.

Связь дополнительных измерений с вакуумом возникает при условии, что носителями темного вещества являются тяжелые слабовзаимодействующие частицы с массой порядка тысячи масс протона. Последняя величина близка к значению истинно фундаментальной массы M_* . Мы уже упоминали выше о такой возможности для темного вещества; у нее неплохая перспектива экспериментальной проверки.

Темное вещество такой природы способно возникнуть в ранней Вселенной в результате процесса, на протекание которого влияет наблюдаемый космический вакуум — через общие параметры космологической модели, описывающей физические условия в эту раннюю эпоху.

Не вдаваясь в дальнейшие подробности, скажем сразу о результате. В пространстве с двумя дополнительными измерениями плотность вакуума (в той же специальной системе единиц) целиком определяется протяженностью дополнительных измерений:

$$\rho_v \sim L_*^{-4}$$

Эта формула устроена так, что величина $1/L_*$ дает массу вакуума в объеме пространства с размером L_* . Тогда плотность получается путем деления этой массы на этот объем. При $L_* \sim 10^{-3}$ см имеем плотность $\rho_v \approx 3 \times 10^{-30}$ г/см³, которая действительно очень близка к наблюдаемой.

Удивительно, но факт: плотность вакуума не зависит в таком случае от истинно фундаментальной массы.

Стоит заметить, что протяженность дополнительных измерений близка по величине к длине волны, которая (см. предыдущий раздел) служила для «обрезания» энергии нулевых колебаний. Такое совпадение, конечно, не случайно: при наличии «обрезания» формула для плотности массы нулевых колебаний имеет в точности тот же вид, что и записанная выше наша формула для плотности вакуума в пространстве с двумя дополнительными измерениями.

Означает ли последнее, что дополнительные измерения и осуществляют каким-то образом эффективное обрезание энергии нулевых колебаний? Если да, то космический вакуум действительно имеет ту же природу, что и вакуум квантовых полей.

А если нет, то тогда нужно признать, что у космического вакуума совсем другое происхождение: он целиком обязан дополнительным измерениям и, следовательно, зависит только от их числа и протяженности, — без какой-либо связи с квантовыми полями.

В пользу последнего варианта говорит следующее соображение. Вакуум существует во всех пространственных масштабах. Он существует и в масштабах, много меньших протяженности дополнительных измерений. Значит, вакуум заполняет полное пятимерное пространство. В таком пространстве его плотность, как можно видеть, $\rho \sim L^{-6}$.

Но, как предполагается, в дополнительных измерениях квантовые негравитационные поля «не живут», они и их нулевые колебания существуют лишь на трехмерной бране. И значит, не поля создают вакуум пятимерного пространства.

Если так, наблюдаемый нами космический вакуум — это лишь трехмерная тень «истинно фундаментального» пятимерного вакуума.

Но тогда и эйнштейновская космологическая постоянная Λ тоже тень «истинно фундаментальной» константы, которой является протяженность дополнительных измерений L . Связь между ними такова:

$$\Lambda = 8\pi G L^{-4}$$

Заметим, что в исходной гипотезе Аркани–Хамеда и др. протяженность дополнительных измерений была первоначально введена без какой-либо связи с космологической константой или плотностью вакуума. Величина протяженности диктовалась соображениями исключительно физики элементарных частиц.

Но, как видно, в природе и в самом деле чуть ли не все взаимосвязано и взаимообусловлено (как учит метафизика и/или диалектика). Особенно на фундаментальном уровне.

Постоянны ли постоянные?

Новая революция в астрономии набирает ход и увлекает в движение фундаментальную физику. При этом затрагиваются не те ее области, которые надежно проверены и подтверждены в эксперименте. Речь идет о другом, об общих теоретических представлениях, которые принимались на веру, как очевидные или само собой разумеющиеся постулаты. Пример — трехмерность пространства и одномерность времени.

Под сомнение ставится чуть ли не все, что до сих пор считалось прочным и незыблемым в самой основе физики. И вот, как мы видим, оказывается, что константы, которые мы знаем в трехмерном пространстве, могут и не быть истинными константами природы. Но «развенчание» трехмерных констант может пойти и дальше. И тогда нужно спросить: а постоянны ли они вообще?

Это, очевидно, принципиально важный вопрос. Он важен даже и независимо от конкретных соображений, которые нас на него натолкнули. Постоянство констант, их независимость от времени нужно в любом случае проверять экспериментально и наблюдательно. И до сих пор все как будто обстояло в этом плане благополучно. Но астрономия и здесь преподнесла недавно сюрприз фундаментальной физике.

Дж. Вебб и руководимая им группа астрономов наблюдали спектры поглощения в излучении далеких квазаров. Изучались спектральные линии, которые возникают в свете квазаров, когда этот свет на его пути от квазара к нам проходит сквозь облака газа.

Атомы различных химических элементов поглощают свет определенных длин волн и тем самым создают в спектре квазара темные линии, линии поглощения. Положение этих линий в спектре зависит — по эффекту Доплера — от относительного движения поглощающего свет облака и приемника на Земле. *Линии сдвинуты, конечно, к красному концу спектра.*

Расстояния же между линиями от красного смещения не меняются. Они определяются строением электронных оболочек данного атома и зависят от физической константы, которая обозначается буквой α и называется постоянной тонкой структуры.

Постоянная тонкой структуры представляет собой комбинацию трех стандартных физических констант — заряда электрона e , постоянной Планка \hbar и скорости света c :

$$\alpha = e^2/(\hbar c).$$

Численная величина α составляет приблизительно $1/137$; она измерена в лаборатории с хорошей точностью, не хуже чем до девятого знака после запятой: $\alpha = 7,297352533(27) \times 10^{-3}$.

Вот эта-то константа и оказалась под подозрением. Если в далеком прошлом, то есть тогда, когда свет квазара проходил через облако, постоянная тонкой структуры была, скажем, слегка меньше, чем сейчас, то это сделает одни расстояния между линиями поглощения больше, а другие меньше.

Наблюдалось около полутора сотен квазаров, работа заняла два года и состояла не только в собственно наблюдениях, но также и в детальном компьютерном анализе процесса прохождения света через облака космического газа.

В итоге оказалось, что постоянная тонкой структуры в прошлом была заметно меньше, чем сейчас. Разница составляет приблизительно семь десятитысячных процента. При этом объявленная точность наблюдений такова, что возможная ошибка составляет приблизительно две десятитысячных процента.

Это первый случай в физике, когда с должной точностью удалось зарегистрировать изменение величины, которая всегда считалась константой. Изменение на семь десятитысячных долей процента произошло за время, равное среднему времени распространения света от квазаров к нам — это приблизительно два миллиарда лет.

Какая из трех констант, составляющих постоянную тонкой структуры, является не вполне постоянной? Или, может быть, две из них? А то и все три? На эти вопросы пока нет ответа. Нет и убедительного теоретического объяснения этому эксперименту в целом. Высказываются лишь догадки, что изменение константы могло бы быть связано с каким-то влиянием дополнительных измерений пространства, если последние действительно существуют.

Между тем среди астрономов—наблюдателей отсутствует пока согласие относительно самого по себе результата наблюдений. Имеются опасения, что в наблюдениях и обработке

данных может содержаться немалая систематическая ошибка, которая превышает в действительности объявленную техническую ошибку наблюдений.

Нужны новые независимые высокоточные наблюдения, нужен новый критический анализ данных.

Над этим работает сейчас группа академика Д. А. Варшаловича в Физико-Техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, в исследования активно включаются все новые и новые группы астрономов и физиков в Европе и США. Полагают, что окончательное решение вопроса — дело скорее месяцев, чем лет.

Антропный принцип

Но почему постоянная тонкой структуры — даже если она и не совсем постоянна в пятой или шестой значащей цифре — имеет именно значение около $1/137$? И вообще: почему физические константы имеют те, а не какие-либо другие значения? Этот вопрос распространяется и на массы элементарных частиц. В каком порядке ни выстраивай список масс частиц, в нем не видно никакой системы.

Самый очевидный вопрос: почему масса электрона в тысячу восемьсот раз меньше массы протона? На этот и другие вопросы физика не знает ответа.

Между тем давно уже было замечено, что будь физические константы иными, наш мир был бы абсолютно не похож на то, что мы видим вокруг нас. В мире с другими физическими константами могло бы и вообще не быть наблюдателя.

Действительно, было выяснено, что если бы постоянная тонкой структуры, масса электрона или постоянная тяготения отличались бы всего в 2–3 раза от тех их значений, которые мы знаем, жизнь во Вселенной — по крайней мере, в ее земной форме — не могла бы возникнуть.

Мы уже упоминали о числе измерений пространства: будь пространство не трехмерным, а четырехмерным, в нем не было бы замкнутых планетных орбит и стационарных состояний электронов в атомах — в таких обстоятельствах Вселенная была бы абсолютно безжизненной.

Эти и многие другие соображения подобного рода, выдвинутые и детально проанализированные в последние десятилетия,

вновь возвращают нас к проблеме жизни во Вселенной, которую мы обсуждали во 2-й главе книги. Как мы видим, у этой проблемы имеется ряд принципиальных аспектов и один из них касается фундаментальных основ физики.

Но не одна лишь физика с астрономией и космологией ставит такого рода вопросы. Имеется многовековая традиция рассуждений о мире и человеке, восходящая к мыслителям классической древности, мудрецам и провидцам мировых религий. В этой традиции вызревал универсальный ответ на весь комплекс подобных вопросов. Этот ответ, говоря совсем коротко, сводится к следующему.

Мир таков, каков он есть, и жизнь, разум, человек существуют в нем потому, что именно так он и был замыслен Творцом Вселенной. На эту тему написаны сотни книг, полных глубоких, остроумных, изобретательных и прочувствованных размышлений. Это направление мысли (оно называется телеологией) основано на идее исходного замысла и предназначения мира, как творения, имеющего заранее поставленную цель, и эта цель — идеальный человек. В отдаляющихся от религии вариантах этой доктрины вместо Творца говорят о Природе, у которой, как в этом случае предполагается, имеется своя внутренняя и естественная цель развития.

Не без влияния телеологической традиции, хотя чаще всего в порядке научного отрицания ее, развивается ставший в последние десятилетия популярным крут идей и соображений, составляющих содержание так называемого антропного принципа. Прилагательного «антропный» в нашем языке до сих пор не существовало; было слово «антропологический» с тем же греческим корнем, но его в этом случае не используют, предпочитая более короткое слово, похожее на английское «антропик» — тоже новое слово, которого в словарях (например, в «Webster») нет. Кому-то это нравится, кому-то нет, но ничего лучшего придумано не было — «человечный» или «человеческий» тут явно не подходит.

Что же утверждает антропный принцип? Одну из первых формулировок (не лишённую иронии) дал еще в 1960-е годы, когда и самого названия антропного принципа еще не существовало, знаменитый московский космолог А. Л. Зельманов:

наблюдаемая Вселенная такая, какая она есть, ибо другие вселенные развиваются без наблюдателя.

Ироническое, если не сказать сильнее, отношение к антропному принципу сопровождало его с самого начала. Но даже и критики готовы согласиться с тем, что в антропном принципе присутствует привлекательная здравая мысль.

Основательные физические и астрономические аргументы (некоторые из них упомянуты выше) в рамках этого подхода были предложены в разные годы Б. Картером, И. Л. Розенталем, Р. Дикке, Дж. Барроу, другими физиками и космологами. Вопреки ощущению поэта, «агитатора, горлана, главаря», творцы и сторонники антропного принципа находят, что наша Вселенная для жизни неплохо оборудована.

Действительно, она не слишком мала и не слишком велика для человека. Она соразмерна нам. Мы видим ее практически всю — вплоть до принципиального предела наблюдения. Будь она заметно меньше, нам было бы в ней тесновато. Она не очень сложно устроена и, кажется, доступна нашему уму и воображению. Она, несомненно, находится в зрелом возрасте: в ней многие звезды успели проэволюционировать и произвести достаточно углерода, составляющего атомарную основу живого.

Ей $13,7 \pm 0,2$ миллиарда лет, по самым последним и самым точным измерениям (WMAP, 2003). Но она все еще в цветущем возрасте, в ней светло и тепло, чего не будет уже через, скажем, 30–50 миллиардов лет, когда все звезды погаснут, а материал для образования новых светил будет исчерпан. Благоприятен для возникновения и развития жизни набор физических констант в нашем мире, а также и управляющие им основные законы природы.

Естественно желание осмыслить эти факты и найти им некое общее объяснение. На предположении, что такое общее объяснение действительно существует, и основаны современные исследования в русле антропного принципа.

Специалисты различают *слабый антропный принцип* и *сильный антропный принцип*. Слабый принцип утверждает: если в мире много разнообразных вселенных, мы находимся там, где наша жизнь возможна. Сильный принцип звучит суровее: наша вселенная должна быть создана такой, чтобы в ней с

самого начала была предусмотрена возможность нашего естественного существования. Во втором случае допускается, что других вселенных в мире может и не быть, но тогда наша Вселенная могла быть сотворена, возможно, не с первой попытки.

В последние годы антропный принцип развивают на основе инфляционных моделей, описывающих множественное рождение вселенных. Действительно, если вселенных много или даже бесконечно много, то почему бы среди них не быть и таких, которые похожи на нашу.

В этом духе обсуждается и вопрос о природе физических констант в нашем мире: «наш» набор констант — всего лишь дело случая, он возник как одна счастливая комбинация из огромного множества всех возможных наборов случайных величин. Тогда вселенных или попыток ее сотворения должно было бы быть неисчислимо много, чтобы реализовались все возможные комбинации констант, физических законов, возможных форм жизни, допускающих существование наблюдателя и т. д.

Но, как всегда в физике, возникает критический вопрос: что нужно пронаблюдать и измерить в реальном мире, чтобы проверить антропный принцип в любом из его вариантов? Ответа нет и, скажем прямо, не предвидится.

Факт, однако, остается фактом: Вселенная явно дружелюбна нам, как ни посмотри.

Принцип называется антропным, так как в центре всех рассуждений — возможность разумной жизни во Вселенной, существование в ней человека, наблюдателя и исследователя, стремящегося понять самую суть ее устройства. Но это отнюдь не возврат к старому докоперниковскому геоцентризму и антропоцентризму. Нет, это попытка более широкого взгляда на главные вопросы познания природы на основе современных достижений естественных наук, от космологии до генетики.

Замыкая круг обсуждений, мы снова пришли в конце книги к теме жизни, разума, человека. И немудрено: как сказал Паскаль, в конечном счете, интереснее всего человек.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

А

Аккреция — выпадение вещества на черную дыру, нейтронную звезду или любой другой объект.

Аккреционный диск — газовый диск вокруг компактного объекта (*белого карлика, нейтронной звезды или черной дыры*) в двойной звездной системе, состоящей из нормальной оптической звезды и компактного объекта.

Андромеда (Туманность Андромеды) — близкая к нам звездная система, сравнимая по размерам с нашей Галактикой. Наша Галактика вместе с галактикой Андромеды и тремя десятками менее крупных галактик образуют Местную группу. Местная группа входит в скопление галактик, а это скопление составляет вместе с несколькими другими примерно такими же скоплениями систему, которая называется Местным сверхскоплением. Местное сверхскопление не имеет четко очерченной формы, его наибольший размер достигает многих миллионов световых лет. Приблизительно так же устроены и другие скопления и сверхскопления галактик. Сверхскопления — самые крупные образования, которые наблюдаются во Вселенной.

Античастицы — элементарные частицы, обладающие теми же свойствами, что и обычные частицы, но имеющие противоположный по знаку электрический заряд. Например: электрон — позитрон, протон — антипротон и т. п.

Астероиды — малые планеты с приблизительно круговыми орбитами, лежащими между орбитами Марса и Юпитера.

Самый крупный астероид Церера имеет диаметр около 1000 км. Предполагается, что астероиды образовались в результате разрушения планеты.

Астрономическая единица (а. е.) — единица длины, применяемая в астрономии, равна среднему расстоянию от Земли до Солнца: 1 а. е. = $1,496 \times 10^{11}$ м = 150 млн. км.

Б

Балдж — сферическое сгущение старых звезд малой массы вблизи ядра Галактики,двигающихся с большими скоростями порядка сотен километров в секунду. Звезды балджа имеют возраст, близкий к возрасту Вселенной.

Белый карлик — горячая звезда с очень высокой плотностью (размер порядка размера Земли, а масса порядка массы Солнца). У белых карликов прекратился термоядерный синтез, и они слабо светятся только за счет остаточного тепла. Считается, что белый карлик — типичная конечная стадия эволюции звезд небольшой массы.

Большой взрыв — элемент космологической теории расширяющейся Вселенной. Считается, что порядка 15 миллиардов лет назад во Вселенной произошел Большой взрыв, а все, что мы сейчас наблюдаем, есть осколки этого взрыва. В пользу этой теории говорит существование излучения, дошедшего с того времени (см. *реликтовое излучение*), а также наблюдаемое разбегание галактик.

В

Водород — самый легкий химический элемент, состоящий из одного протона и одного электрона. Водород образовался на самых ранних стадиях эволюции Вселенной и составляет в настоящее время по массе три четверти ее вещества.

Вторая космическая скорость — скорость, позволяющая космическому кораблю, молекуле атмосферы и т. п. преодолеть силу притяжения массивного тела и покинуть его. Иногда ее называют параболической скоростью, так как объект, имеющий эту скорость, движется по траектории, близкой к параболе. В астрономии используется термин «скорость убегания». Для Земли скорость убегания равна 11,2 км/сек.

Г

Галактика — объединение звезд, связанных между собой силой гравитации. Основной структурный элемент Вселенной. Наша Галактика — Млечный путь — содержит около 100 миллиардов звезд. В отличие от других галактик название нашей Галактики пишется с прописной буквы.

Гало — структурный элемент Галактики, приблизительно сферической формы. В гало нет звезд. Оно состоит из скрытых масс или, как сейчас говорят, темного вещества. Из гало не исходит никакого света. Темное вещество нельзя увидеть, оно проявляет себя только своим тяготением — по этому эффекту притяжения о его существовании и узнали. Масса темного вещества в гало в 10 раз больше массы всех звезд в Галактике. Физическая природа темного вещества — острая и далекая от решения проблема современной космологии.

Гамма-лучи — коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны меньше 10^{-8} см и, вследствие этого, ярко выраженными корпускулярными свойствами.

Гелий — химический элемент, состоящий из 2 протонов, 2 нейтронов и 2 электронов. Образовался на ранних стадиях эволюции Вселенной и составляет по массе в настоящее время четверть ее вещества. Синтезируется при термоядерных реакциях внутри звезд.

Ген — единица наследственной информации, определяющая данный признак живого организма. Фактически, ген — участок молекулы ДНК, кодирующий белок определенного типа. Число генов в составе ДНК человека около 50–60 тысяч, что составляет только 3 % общей длины ДНК.

Геном — совокупность всех наследственных признаков организма (генов).

Гомеостаз — стремление живых организмов к состоянию устойчивого равновесия и обособлению от внешней среды при наличии обмена энергией и веществом с нею.

Горизонт событий — граница области пространства–времени вокруг черной дыры. Все, что находится внутри горизонта событий, недоступно внешнему наблюдателю. Для невращающейся черной дыры радиус горизонта событий равен *гравитационному радиусу*.

Гравитационный радиус — значение радиуса тела с заданной массой, при котором вторая космическая скорость равна скорости света. Если тело сжимается до гравитационного радиуса, оно становится черной дырой. Гравитационный радиус Земли приблизительно равен 9 мм, Солнца — 3 км.

Гравитация (тяготение) — универсальное взаимодействие между любыми видами материи. Взаимное притяжение тел.

Д

Доплера эффект — изменение частоты колебаний или длины волны, воспринимаемой наблюдателем, при движении источника колебаний и наблюдателя относительно друг друга. Если источник колебаний движется в сторону наблюдателя — воспринимаемая длина волны уменьшается, при удалении источника от наблюдателя — увеличивается. Назван в честь австрийского физика К. Доплера, теоретически предсказавшего его в 1842 г. В астрофизике эффект Доплера используется для определения скорости движения звезд. Измерения доплеровского смещения линий в спектрах излучения удаленных галактик привели к выводу о расширяющейся Вселенной (см. *Красное смещение*).

ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота, носитель наследственной информации об организме.

З

Звезда — раскаленное небесное тело, находящееся в гидростатическом и тепловом равновесии. Гидростатическое равновесие обеспечивается равенством сил тяготения и сил внутреннего давления. Тепловое равновесие соответствует равенству мощности, выделяемой в недрах звезды, и мощности, излучаемой с ее поверхности.

По своему состоянию звезды делятся на три главные группы: 1) нормальные, например, Солнце; 2) *Белые карлики*; 3) *Нейтронные звезды* — малые и сверхплотные.

Земля — наша родная планета. Возраст — 4,5 млрд. лет, земной жизни — 3,8 млрд. лет, человека — 1 млн. лет. Масса — 6×10^{27} г, радиус — 6370 км, плотность — $5,5 \text{ г/см}^3$. Лучше не бывает.

К

Квезары — мощные внегалактические источники электромагнитного излучения, представляют собой очень активные ядра далеких галактик.

Кварки — элементарные частицы с дробным зарядом, из которых по современным представлениям состоят все сильно-взаимодействующие (внутриядерные) частицы.

Комета — маломассивное небесное тело, состоящее в основном из льда и пыли и движущееся вокруг Солнца по сильно вытянутой орбите. При приближении к Солнцу у кометы образуется хвост, состоящий из газа и пыли. Хвост всегда направлен в сторону от Солнца. Предполагается, что вокруг Солнца вращается около триллиона комет.

Космические лучи — поток элементарных частиц высокой энергии, приходящих на Землю со всех направлений космического пространства, а также рожденное ими в атмосфере Земли вторичное излучение, в котором встречаются практически все элементарные частицы.

Космология — учение о Вселенной как едином целом и обо всей охваченной астрономическими наблюдениями области Вселенной как части целого.

Красное смещение — увеличение длин волн линий в спектре источника по сравнению с линиями эталонных спектров (смещение линий в красную часть спектра).

Л

Лучевая скорость — проекция вектора скорости тела на луч зрения (линию наблюдения).

М

Млечный путь — название Галактики, в которой находится Солнечная система. На ночном небе Млечный путь выглядит слабосветящейся полосой.

Н

Нейтрино — электрически нейтральная элементарная частица. Отличительное свойство нейтрино — очень слабое взаимодействие с веществом и, следовательно, огромная проника-

ющая способность. Это, с одной стороны, затрудняет детектирование нейтрино, с другой — позволяет изучать с их помощью внутреннее строение и эволюцию космических объектов.

Нейтрон — электрически нейтральная частица с массой порядка массы протона. Из нейтронов и протонов (общее название — нуклоны) состоят ядра всех атомов вещества.

Нейтронная звезда — небольшая по размеру (порядка десятка километров) сверхплотная (около 100 млн. т/см^3), состоящая в основном из нейтронов вращающаяся звезда, обладающая, как правило, сильным магнитным полем (в миллиарды раз больше, чем у Земли).

П

Парсек — единица длины, применяемая в астрономии. Радиус земной орбиты с расстояния в один парсек виден под углом 1 секунда. 1 парсек (пк) = $206265 \text{ а. е.} = 3,0857 \times 10^{16} \text{ м.}$

Планеты — массивные космические объекты, образовавшиеся из газа и пыли, окружающих звезду. Если масса планеты более чем в 80 раз превысит массу Юпитера, то давление и температура внутри могут оказаться достаточными для начала термоядерной реакции, и планета превратится в *Звезду*.

Приливная деформация — деформация оптической звезды в двойной системе, вызванная разностью сил притяжения разных частей звезды (из-за разного расстояния) к своему спутнику.

Прокариоты — живые организмы, клетки которых не имеют ядра.

Протон — стабильная положительно заряженная частица, ядро атома водорода.

Пульсар — переменный строго периодический источник импульсного космического электромагнитного излучения. Согласно современным представлениям, радиопульсары — быстро вращающиеся сильно намагниченные нейтронные звезды.

Р

Реликтовое излучение — равномерно распределенное во Вселенной электромагнитное излучение, сохранившееся до наших

дней со времени образования Вселенной. Спектральный максимум реликтового излучения соответствует температуре 3 К и длине волны 1,5 мм.

Однородность и изотропность реликтового излучения позволяет использовать его как удобную систему отсчета, например, для определения скорости движения Солнечной системы и Галактики.

Рентгеновский барстер 1-го типа — короткие (длительностью в секунды) и мощные вспышки рентгеновского излучения, распределенные нерегулярно во времени. Источником излучения являются термоядерные взрывы вещества, истекающего из оптической звезды в двойной системе и накапливающегося на поверхности нейтронной звезды. Рентгеновский барстер 1-го типа свидетельствует о наличии наблюдаемой поверхности и, стало быть, о том, что объект является нейтронной звездой, а не черной дырой.

РНК — рибонуклеиновая кислота, служит для переноса информации и синтеза белка.

С

Светимость — полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени.

Световой год — единица длины, применяемая в астрономии.
 $1 \text{ с. г.} = 0,3 \text{ парсек} = 9,46 \times 10^{15} \text{ м.}$

Симбиогенез — процесс возникновения сложных организмов за счет слияния нескольких простых.

Сфера Шварцшильда — горизонт событий для невращающейся черной дыры.

Темная энергия (космический вакуум) — состояние космической среды, которое характеризуется постоянной во времени и одинаковой в пространстве плотностью. По этим свойствам вакуум принципиально отличается от всех других, обычных форм космической среды, плотность которых неоднородна в пространстве и падает со временем в ходе космологического расширения. По плотности энергии космический вакуум превосходит все «обычные» формы космического вещества вместе взятые. Вакуум создает космическое антитяготение — антигравитацию, которая управляет

динамикой космологического расширения в современную эпоху.

Т

Темное вещество — скрытая масса (см. *Гало*).

Ф

Фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения, распространяющаяся в пространстве с предельно возможной скоростью 300 000 км/с. Масса покоя фотона равна нулю.

Ц

Цианобионты — первые фотосинтезирующие живые организмы, производящие биогенный молекулярный кислород в атмосфере Земли (которая вначале состояла в основном из углекислого газа).

Ч

Черная дыра — космический объект, возникающий в результате сжатия тела гравитационными силами до размеров, равных его гравитационному радиусу (для внешнего наблюдателя). Основное свойство черной дыры заключается в том, что никакие сигналы (свет, частицы), испускаемые из внутренней части черной дыры, не могут выйти наружу, так как не могут преодолеть силы притяжения.

Э

Эксцентриситет — мера вытянутости орбиты, равная отношению расстояния между фокусами к большой оси. При $e = 0$ орбита имеет форму окружности, при $0 < e < 1$ — эллипса, при $e = 1$ — параболы и при $e > 1$ — гиперболы.

Электрон — первая элементарная частица, открытая в физике. Имеет малую массу покоя $9,1 \times 10^{-28}$ г и минимальный электрический заряд $1,6 \times 10^{-19}$ Кл.

Элементарные частицы — первичные неделимые частицы, у которых не обнаружено внутренней структуры, и из которых, по предположению, состоит вся материя.

Эргосфера — пространство, окружающее горизонт событий вращающейся черной дыры и содержащее вихревое гравитационное поле. Под действием последнего все тела, частицы и фотоны должны непрерывно двигаться. Из эргосферы вращающейся черной дыры можно извлекать энергию с эффективностью, в сотни раз превосходящей эффективность выделения энергии при термоядерных реакциях.

Эукариоты — живые организмы с клеточным ядром.

Я

Ядро атома — центральная массивная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов.

Ядра галактик — компактные массивные сгущения в центральных областях многих галактик.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	6
Глава 1. АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА	9
Истоки астрономии	9
Мир Аристотеля	10
Система Птолемея	10
Коперниковская революция:	
гелиоцентрическая Вселенная	12
Мир звезд	17
Гипотеза Бруно	18
Млечный Путь — наша Галактика	20
Хаббл и вторая революция в астрономии:	
Вселенная — мир галактик	21
Мир в динамике	25
Канун третьей революции в астрономии?	26
Глава 2. ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ	29
<i>От романтической — к реалистической</i>	
<i>постановке задачи</i>	29
Оптимистические надежды	30
Разочарования	31
Энтузиазм неиссякаем	35
Три типа цивилизаций	37
Где и как искать?	37
Поиски братьев по разуму	38
<i>Поговорим о жизни</i>	42
Молекулярные механизмы	43

Открытие Уотсона и Крика	45
Генетический код	46
Репликация ДНК	47
Открытие рибозимов	48
Восстановление генетических повреждений	49
О механизмах зарождения жизни	50
Гипотеза панспермии	51
О происхождении генетического кода	53
Естественный отбор	54
Родословные деревья живых организмов	55
Программа «Геном человека»	56
Система органического мира на Земле	58
Разум и человек	61
Эволюционный характер разума	62
Цивилизация	63
Планеты во Вселенной	65
Что такое планеты	66
Как искать планеты вокруг звезд	68
Планеты вокруг нейтронных звезд	71
О происхождении планет	
вокруг нейтронных звезд	73
Планеты вокруг звезд	
солнечного типа (экзопланеты)	74
Свойства экзопланет	77
Новейшие открытия	79
Как победить молчание Космоса	82
Проект «Дарвин»	84
Концепция проекта	85
Спектры атмосфер планет	88
Фотосинтез	89
Реалистическая постановка задачи	
поиска внеземной жизни	90
Марс	93
Венера	98
Другие планеты Солнечной системы	100
Спутники планет	100
Ио	101
Европа	102

Глава 3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ	105
Надежды, разочарования, успехи	105
Ранние представления	105
Современные представления	108
Решение Шварцшильда	113
Скептицизм усиливается.....	115
Скептицизм сменяется энтузиазмом.....	117
Открытие Хоукинга.....	119
Предсказание Зельдовича и Салпитера	119
Как отличить черную дыру от нейтронной звезды?	120
Открытие источника Лебедь X-1	123
Снова пессимизм... ..	124
Долгожданный успех	126
Как образуются черные дыры	129
Эволюция звезд	130
Белые карлики	132
Нейтронные звезды	134
Черные дыры	136
Как искать черные дыры	139
Черные дыры—объекты астрономических наблюдений	140
Определение масс черных дыр в ядрах галактик	142
Определение масс черных дыр в рентгеновских двойных системах	142
Об определении радиусов черных дыр	145
Сверхмассивные черные дыры в ядрах активных галактик	147
Массы сверхмассивных черных дыр в ядрах “нормальных” галактик	150
Сверхмассивная черная дыра в ядре нашей Галактики	154
Новейшие данные по звездным черным дырам	158
Демография черных дыр	162
Сверхмассивные черные дыры	164
Звездные черные дыры	166
Накануне окончательного открытия	170
История исследований звезд	170

Критические эксперименты для черных дыр	174
Возможны ли путешествия во времени?	181
О центральной сингулярности	181
О путешествиях во времени	182
Удивительные свойства черной дыры	185
О машине времени	186
Глава 4. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ	191
Разбегание галактик	191
Наука о Вселенной	191
Краткая история космологии	193
Симметрии Вселенной	195
Статический мир?	196
«Извилистый путь»	198
Теория Фридмана	201
В пространстве Лобачевского	203
Возраст мира	204
Эйнштейн: «новый свет»	206
Динамика расширения	207
Что расширяется?	210
Слайфер и туманности	211
Закон Хаббла	212
Постоянная Хаббла	215
Горячее начало	217
Космический ядерный реактор	220
Синтез гелия	221
Реликтовое излучение	223
Мировой эфир	225
Всемирное антияготение	228
Гипотеза Эйнштейна	228
Открытие	230
Почему анти-?	234
Ускоренное расширение	236
Еще немного математики	237
Мир вакуума	240
Модель де Ситтера	242
Галактики в мире вакуума	243
Проблема плоскостности	244

Топология Вселенной	247
Загадка Хаббла	250
Вакуум вблизи нас	251
Вакуум и общее движение местного объема	255
Темное вещество	258
Барионы	259
Излучение	262
Вакуум в физике	264
Планковская плотность	265
Соотношение неопределенностей	266
Квантовый осциллятор	267
Нулевые колебания	269
Море Дирака	270
Два эффекта	271
Рождение Вселенной	273
«Прометеева стихия»	273
Космологическая сингулярность	274
Гипотеза Глинера	278
Инфляция	279
Рождение миров	283
Почему 3+1?	286
Дополнительные измерения	289
Истинно фундаментальные константы?	292
Вакуум и дополнительные измерения	295
Постоянны ли постоянные?	297
Антропный принцип	299

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	303
-------------------------------	-----

«Наука для всех»

Геном, клонирование, происхождение человека

Под редакцией члена-корреспондента РАН
Л. И. Корочкина

Что такое геном человека, чем отличается клонирование от копирования, как гены определяют развитие организма и социальное поведение человека, что такое генная инженерия и как она используется в производстве продуктов и лекарств.

Последние достижения генетики, в том числе сенсационные результаты в решении проблемы происхождения и миграции человека, изложены на высоком научном уровне и в доступной для широкого читателя форме.

«Наука для всех»

Е. Л. Фейнберг

**Две культуры.
Интуиция и логика
в искусстве и науке**

Что такое искусство и зачем оно нужно человеку. Каковы взаимоотношения искусства и науки. Где кончается логика и начинается интуиция.

Общие проблемы «двух культур» — естественнонаучного знания, с одной стороны, искусства и гуманитарных наук — с другой рассматриваются с философской точки зрения известным физиком, академиком Е. Л. Фейнбергом.

Третье, расширенное и дополненное издание.

«Наука для всех»

В. Г. Ротштейн

Психиатрия — наука или искусство?

Психические расстройства: что нужно знать всем, а что — пациентам и их родственникам. Как психиатры ставят диагноз и насколько он достоверен. Проблема баланса между правами личности, пользой для больного и интересами общества.

Впервые на русском языке в доступной для широкого читателя форме изложены основные понятия традиционно закрытой области — психиатрии.

Научно-популярное издание

Черепашук Анатолий Михайлович,

Чернин Артур Давидович

Вселенная, жизнь, черные дыры

Подп. в печ. 28.09.2004. Формат 84×108/32.
Усл. п. л. 16,8. Тираж 2500 экз. Заказ № 4900.

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино-5, Моск. обл., а/я 107.
Тел. (095) 365-43-55,

Москва, Измайловское ш. 48а.

Изд. Лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов
на ОАО «Можайский полиграфкомбинат»
143200, г.Можайск, ул. Мира, 93.



9 785850 991425