

50 ИДЕЙ,  
*о которых нужно знать*

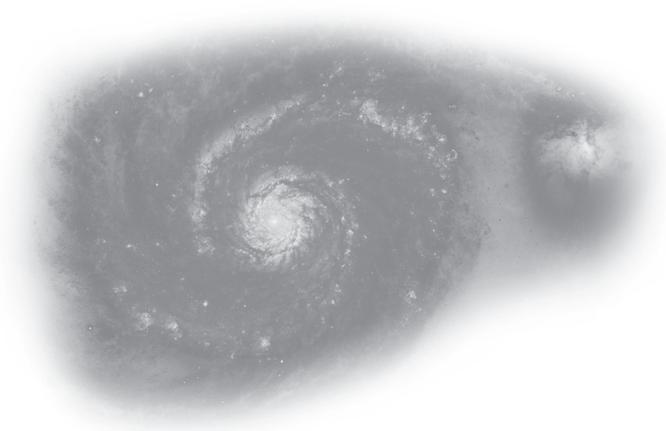
# ВСЕЛЕННАЯ



ДЖОАНН БЕЙКЕР

Джоанн Бейкер

# ВСЕЛЕННАЯ



50 ИДЕЙ,  
*о которых нужно знать*

phantom press

## Оглавление

Вступление	3	26 Бозон Хиггса	100
<b>ОТКРЫВАЯ ВСЕЛЕННУЮ</b>		27 Теория струн	104
01 Планеты	4	28 Антропный принцип	108
02 Гелиоцентризм	8	<b>ГАЛАКТИКИ</b>	
03 Законы Кеплера	12	29 Последовательность галактик Хаббла	112
04 Ньютоновский закон всемирного тяготения	16	30 Скопления галактик	114
05 Ньютоновская теория оптики	20	31 Структура в крупном масштабе	118
06 Телескоп	24	32 Радиоастрономия	122
07 Фраунгоферовы линии	28	33 Квазары	126
08 Эффект Доплера	32	34 Рентгеновский фон	130
09 Параллакс	36	35 Сверхмассивные черные дыры	134
10 Великий спор	40	36 Эволюция галактик	138
<b>КОСМОЛОГИЯ</b>		37 Гравитационное линзирование	144
11 Парадокс Ольберса	44	<b>ЗВЕЗДЫ</b>	
12 Закон Хаббла	48	38 Спектральные классы звезд	148
13 Шкала расстояний в астрономии	52	39 Звездная эволюция	152
14 Большой взрыв	56	40 Звездные рождения	156
15 Реликтовое излучение	60	41 Звездные смерти	160
16 Ядерный синтез Большого взрыва	64	42 Пульсары	164
17 Антиматерия	68	43 Гамма-всплески	172
18 Темная материя	72	44 Переменность	176
19 Космическая инфляция	76	45 Солнце	180
20 Космологическая постоянная	80	46 Экзопланеты	184
<b>ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ И ЗА ЕГО ПРЕДЕЛАМИ</b>		47 Формирование Солнечной системы	188
21 Принцип Маха	80	48 Луны	192
22 Специальная теория относительности	84	49 Астробиология	196
23 Общая теория относительности	88	50 Парадокс Ферми	200
24 Черные дыры	92	Словарь терминов	204
25 Астрофизика частиц	96	Предметный указатель	206

## Вступление

Астрономия — одна из самых древних и глубоких наук.

Благодаря знаниям, накопленным человечеством с тех пор, как наши предки начали следить за движением Солнца и звезд, представление о месте человека во Вселенной изменилось радикально. Каждый прорыв в науке отзывался и в общественной жизни: в XVII веке за спорное учение о том, что Земля вращается вокруг Солнца, арестовали Галилея. Сходное недоверие вызвали и доказательства того, что Солнечная система размещается не в центре Млечного Пути. А Эдвин Хаббл в 1920-х заставил спорщиков умолкнуть, обнаружив, что Млечный Путь — одна из миллиардов галактик, разбросанных по обширной и расширяющейся Вселенной, которой 14 миллиардов лет.

В XX веке открытий было сделано еще больше — спасибо современным технологиям. В начале века мы стали лучше понимать устройство звезд и их двигателя — ядерного синтеза, а одновременно обрели и знания о ядерной энергии и радиации; тогда же работали и атомную бомбу. Во время и после Второй мировой войны стала развиваться радиоастрономия, были обнаружены пульсары, квазары и черные дыры. Распахнулись новые окна во Вселенную — от реликтового излучения до небесных рентгеновских и гамма-лучей, и каждая частота приносила свои открытия.

Эта книга — экскурс в астрофизику с точки зрения современной науки. Первые главы описывают великие философские прорывы в нашем понимании масштабов Вселенной, а попутно рассказывают об основах — от законов тяготения до устройства телескопа. Следующий раздел — о том, что мы знаем о космологии, об изучении Вселенной как целого, ее составляющих, истории и эволюции. Далее описаны теоретические аспекты Вселенной, в том числе теория относительности, черные дыры и мультивселенные. Последняя часть предлагает подробности того, что мы знаем о галактиках, звездах и Солнечной системе — от квазаров и эволюции галактик до экзопланет и астробиологии. Открытия совершаются все чаще; может быть, в ближайшие десятилетия нам предстоит новый великий сдвиг парадигмы — обнаружение внеземной жизни.

# 01 Планеты

**Сколько всего планет? Еще совсем недавно любой мог ответить: девять. Сегодня это спорный вопрос. Астрономы запутали ситуацию: они обнаружили в ледяном пространстве на границах Солнечной системы новые каменные небесные тела, сопоставимые с Плутоном, и открыли сотни планет, обращающихся вокруг далеких звезд. Определение планеты пришлось переосмыслить, и теперь ученые считают, что существует восемь настоящих планет плюс несколько карликовых, вроде Плутона.**

С незапамятных времен мы знали, что планеты отличаются от звезд. Планеты, чье название происходит от греческого слова «странник», путешествуют по ночному небу на неизменном звездном фоне. Звезды ежедневно складываются в одни и те же узоры. Созвездия медленно и согласованно вращаются вокруг Северного и Южного полюсов, любая звезда за день описывает на небе круг. А вот планеты с каждым днем слегка смещаются относительно звезд, следуя наклонной кривой, которая называется эклиптикой. Вращаясь вокруг Солнца, все планеты движутся в плоскости эклиптики, которую можно изобразить в виде линии на небе.

Большие планеты, помимо Земли, — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн — известны не одно тысячелетие. Их легко увидеть невооруженным глазом, они зачастую светят ярче своих звездных соседей, а их противодвижение по небу сделало их мифологическими персонажами. Появление телескопов в XVII веке породило еще больше благоговения: Сатурн оказывается, опоясан прекрасными кольцами, у Юпитера целый гарем лун, а поверхность Марса испещрена темными каналами.

**Планета X** Эту небесную однозначность подпортил в 1781 году британский астроном Уильям Гершель, когда открыл планету Уран. Не столь

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**350 до н. э.**

Аристотель определяет, что Земля круглая

**1543**

Коперник обнаруживает свою гелиоцентрическую теорию

**1610**

Галилео Галилей при помощи телескопа открывает спутники Юпитера

**1781**

Уильям Гершель открывает Уран

яркий и быстрый, как другие планеты, Уран вначале считался блуждающей звездой. Но точные наблюдения Гершеля бесспорно подтвердили, что Уран вращается вокруг Солнца, и тем самым закрепили за ним статус планеты.

После этого открытия Гершель грелся в лучах славы и даже завоевал расположение короля Георга III, ненадолго назвав планету в честь английского монарха.

Но предстояли новые открытия. Небольшие аномалии орбиты Урана привели к предсказанию, что на него влияет другое небесное тело, находящееся дальше него от Солнца. Астрономы пристально изучали область, где должен был располагаться бродячий возмутитель спокойствия, и в 1846 году француз Урбен Жан Жозеф Леверье открыл Нептун, совсем ненамного опередив британского астронома Джона Кауча Адамса.

Затем, в 1930 году, было подтверждено существование Плутона. Как и в случае с Нептуном, легкие отклонения в ожидаемом движении внешних планет предполагали существование еще одного небесного тела — в тот момент названного Планетой X. Клайд Томбо в Лоуэллской обсерватории в США заметил этот объект, сравнивая фотографии неба, снятые в разное время: планета выдала себя движением. Но дать ей название выпало школьнице: Венеция Бёрни из Оксфорда, Англия, победила в конкурсе названий с предложением, вдохновленным мифами, — Плутон, бог подземного мира. Открытие Плутона широко отразилось в популярной культуре того времени — от имени собаки из мультфильма до свежееоткрытого химического элемента плутония.

**Плутон свергнут с трона** Девятипланетной наша Солнечная система оставалась еще 75 лет, пока Майкл Браун из Калифорнийского технологического института и его коллеги не открыли, что Плутон не одинок. Они обнаружили группу

## Определение планеты

Планета — небесное тело, которое:

- (а) обращается по орбите вокруг Солнца,
- (б) обладает достаточной массой, чтобы его собственная гравитация преодолела сопротивление составляющего материала и придала ему округлую форму, и
- (в) очистило окрестности своей орбиты от других небесных тел.

**«Как и континенты, планеты определяет, скорее, то, что мы думаем о них, а не чьи-либо официальные уведомления»**

Майкл Браун, «Нью-Йорк таймс», 16 августа 2006 г.

**1843–1846**

Адамс и Леверье предсказывают и обнаруживают Нептун

**1930**

Клайд Томбо открывает Плутон

**1962**

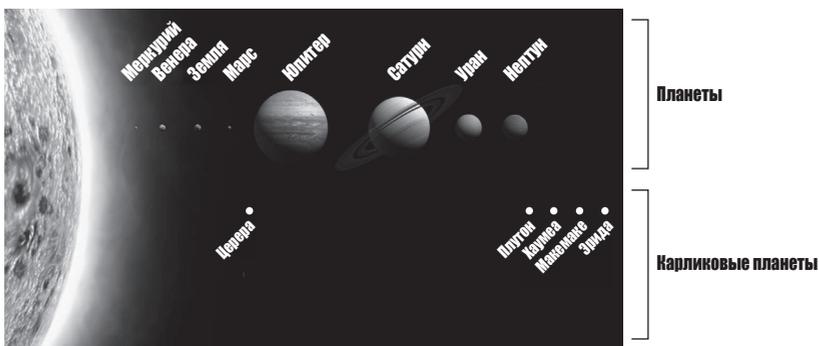
«Маринер-2»: первые изображения Венеры — поверхности другой планеты

**1992**

Открыта первая планета за пределами Солнечной системы

**2005**

Браун открывает Эриду



крупных объектов недалеко от орбиты Плутона, у ледяных границ Солнечной системы, и один из них оказался даже крупнее Плутона. Они назвали его Эридой. Астрономическому сообществу предстояло решить, признать ли открытое Брауном небесное тело десятой планетой?

А что делать с другими ледяными небесными телами около Плутона и Эриды? Статус Плутона как планеты оказался под вопросом. Окраины Солнечной системы забиты оледенелыми объектами, Плутон и Эрида – попросту самые крупные. Более того, каменные астероиды похожих размеров, как было известно, имеются и в других местах, в том числе Церера, астероид 950 км в диаметре, обнаруженный между Марсом и Юпитером в ходе поисков Нептуна в 1801 году.

Судьбу Плутона определили в 2005 году на заседании комитета Международного астрономического союза, профессиональной организации астрономов. Браун и некоторые другие астрономы хотели защитить статус Плутона, поскольку так устоялось в культуре. По их мнению, Эриду тоже следовало

### Уильям Гершель (1738–1822)

Родившись в немецком Ганновере в 1738 году, Фредерик Уильям Гершель эмигрировал в Англию в 1757-м и зарабатывал на жизнь как музыкант. Он развил живой интерес к астрономии, свойственный и его сестре Кэролайн, которую он привез в Англию в 1772 году. Гершели собрали телескоп, чтобы изучать ночное небо, и каталогизи-

ровали сотни двойных звезд и тысячи туманностей. Гершель открыл Уран и назвал его *Georgium Sidus* (Звезда Георга), в честь короля Георга III, который сделал Гершеля придворным астрономом. Другие открытия Гершеля включают природу двойных звезд, сезонные изменения полярных шапок Марса и спутники Урана и Сатурна.

считать планетой. Кое-кто считал, что все ледяные небесные тела за орбитой Нептуна не были настоящими планетами. Вопрос был вынесен на голосование на конференции

Международного астрономического союза 2006 года. Решением его стало новое определение планеты. Прежде точного определения не существовало. Некоторых смущала сама идея; они приводили в пример определение континента: если Австралия — континент, как быть с Гренландией? Где кончается Европа и начинается Азия? Но астрофизики договорились о нескольких правилах.

Планетой называется небесное тело, которое обращается по орбите вокруг Солнца, обладает достаточной массой, чтобы его собственная гравитация придала ему округлую форму, и очистило окрестности своей орбиты от других небесных тел. Согласно этим правилам Плутон не был планетой, поскольку третьему пункту не соответствовал. Плутон и Эрида стали именоваться карликовыми планетами, как и Церера. Более мелкие тела, кроме спутников, остались без определения.

**Не Солнцем единым** Это определение планеты сформулировано для нашей Солнечной системы. Но его можно применять и шире. На сегодняшний день нам известно несколько сотен планет, которые обращаются вокруг других звезд. Мы знаем о них в основном благодаря слабым воздействиям, которые они оказывают на движение и свет своих звезд. Большинство этих планет — массивные газовые гиганты вроде Юпитера. Но современные космические аппараты, подобные «Кеплеру», запущенному в 2009 году, соревнуются в способности обнаруживать планеты поменьше, которые могут оказаться похожими на Землю.

Другое определение, оказавшееся в последнее время под вопросом, — определение звезды. Звезды — это газовые шары, как Солнце, достаточно крупные, чтобы в их ядрах происходил термоядерный синтез. Звезда светится благодаря его энергии. Однако неочевидно, где проходит грань между газовыми шарами планетарных размеров, вроде Юпитера, и самыми маленькими, бледными звездами, вроде коричневых карликов. В космосе может оказаться множество незагоревшихся звезд и даже свободно дрейфующих планет.

## ‘**Может, наш мир — ад какой-то другой планеты**’\*

Олдос Хаксли

\* Цит. по:  
*Peters*  
*Quotations:*  
*Ideas for Our*  
*Time* (1979),  
*Laurence*  
*J. Peter.* —  
*Здесь и далее*  
*примеч. перев.*

# В сухом остатке: Планеты выделяются из толпы

# 02 Гелиоцентризм

**Хотя сейчас мы знаем, что Земля и планеты обращаются вокруг Солнца, эту идею отвергали вплоть до XVII века, пока не накопилось достаточно доказательств. Это пошатнуло наше мировосприятие: оказалось, человек — не центр Вселенной, что противоречило главенствующей философии и религии тех времен. Споры о месте человека в космосе — между креационистской догматикой и рациональными космологическими взглядами — продолжаются до сих пор.**

Древним человеческим сообществам хотелось, чтобы Вселенная буквально вращалась вокруг них. Первые модели космоса помещали Землю в центр, а все остальное — вокруг нее. Считалось, что небесные тела прикреплены к хрустальным сферам, вращающимся вокруг Земли. Таким образом, звезды, вделанные в эти сферы или видимые сквозь крошечные дырочки в них, каждую ночь обращаются вокруг северного и южного небесных полюсов. Ключевая роль человека в устройстве Вселенной не подлежала сомнению.

Тем не менее, судя по некоторым наблюдениям, эта утешительная модель неверна. Над этим ломали голову целые поколения натурфилософов. Предположение, что небеса вращаются вокруг Солнца, а не вокруг Земли — гелиоцентрическая модель, от греческого слова *гелиос*, Солнце, — была предложена древнегреческими философами ни много ни мало в 270 году до н. э. К этим выводам пришел в своих трудах Аристарх Самосский. Рассчитав относительные размеры Земли и Солнца, Аристарх понял, что Солнце значительно крупнее. Разумнее было предположить, что это маленькая Земля движется, а не большое Солнце.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**270** до н. э.

Древние греки предлагают гелиоцентрическую модель

**2** век н. э.

Птолемей добавляет эпициклы для объяснения ретроградного движения

Птолемей во II веке н. э. математически предсказал движение звезд и планет. Получилось довольно точно, однако существовали очевидные закономерности, которые не вписывались в его уравнения. Главная загадка: планеты время от времени начинали двигаться в обратном направлении — ретроградно.

Птолемей, который, как и его предшественники, предполагал, что планеты вращаются на обширных колесах в небе, придумал объяснение, введя в орбиты дополнительные шестеренки. Он предположил, что планеты вращаются по дополнительным меньшим орбитам, проходя по своему основному пути, — как в огромном диковинном заводном механизме. Эти дополнительные эпициклы создавали впечатление, будто планеты время от времени движутся в обратную сторону.

Идея эпициклов закрепилась — и в последующие годы дополнилась. Философов привлекала мысль, что природа любит безупречную геометрию. Но по мере того как астрономы тщательнее изучали движение планет, математика «заводного механизма» все меньше отвечала действительности. С уточнением данных расхождения между расчетами и наблюдениями лишь прирастали.

**Модель Коперника** Обсуждение гелиоцентрических взглядов шло не один век, но всерьез их не воспринимали. Геоцентрические представления интуитивно казались предпочтительнее, а альтернативные теории считались спорной игрой ума. И потому модель с Солнцем в центре не развивали вплоть до XVI века. В своей книге 1543 года *De Revolutionibus* польский астроном Николай Коперник описал математически проработанную гелиоцентрическую модель и объяснил обратное движение планет как проекцию их движения вокруг Солнца, наблюдаемую с также движущейся Земли.

Модель Коперника поставила под сомнение вселенское господство человечества, и это имело последствия. Церковь и общество благоволили птолемеевским



**Мы наконец должны  
поставить само Солнце в центр Вселенной ?**

**Николай Коперник, «О вращении небесных сфер» (1543)**

**1543**

Коперник обнаруживает гелиоцентрическую модель

**1609**

Галилей открывает спутники Юпитера; Кеплер моделирует эллиптические орбиты

**1633**

Галилей осужден за проповедование гелиоцентризма

**Николай Коперник (1473–1543)**

Коперник родился в польском городе Торунь и готовился стать священником — изучал право, медицину, астрономию и астрологию. Он живо интересовался идеями Птолемея об устройстве Вселенной, но относился к ним критически и разработал собственную систему, где Земля и другие планеты вращаются вокруг Солнца.

Работа Коперника *De Revolutionibus Orbium Coelestium* («О вращении небесных сфер»), опубликованная в марте 1543 года — всего за два месяца до его смерти, — стала краеугольным камнем в утверждении Вселенной с Солнцем в центре. Тем не менее от идей современной астрономии она далека.

геоцентрическим взглядам. Коперник был осторожен и отложил публикацию работы до года своей смерти. Его посмертный довод был принят и тихо отложен в сторону. Эстафета перешла к более громкой фигуре.

**Процесс Галилея** Итальянский астроном Галилео Галилей бросил дерзкий вызов Католической церкви: он отстаивал гелиоцентризм. Его отвагу подкрепляли наблюдения, произведенные посредством свежесобретенного телескопа. Разглядев небеса с большей четкостью, чем его предшественники, Галилей обнаружил свидетельства того, что Земля — вовсе не в центре всего. Вокруг Юпитера обращались спутники, а у Венеры были фазы, как у Луны. Он опубликовал свои открытия в 1610 году в книге *Sidereus Nuncius* — «Звездный вестник».

Галилей, уверенный в гелиоцентрических взглядах, отстаивал свои позиции в письме к великой герцогине Кристине. Когда он заявил, что иллюзия движения Солнца по небу происходит от движения Земли, его вызвали в Рим. Ватикан признал, что его наблюдения верны, поскольку астрономы-иезуиты видели в телескопы то же самое. Но Церковь отказывалась принять теорию Галилея, утверждая, что это лишь гипотеза и ее нельзя воспринимать буквально, как бы привлекательна она ни была в своей простоте. В 1616 году Церковь запретила Галилею распространять идеи гелиоцентризма и самому защищать эту возмутительную идею или даже придерживаться ее.

**Аргумент Кеплера** Тем временем немецкий астроном Иоганн Кеплер, который тоже работал над математикой движения планет, опубликовал свой анализ орбиты Марса в книге *Astronomia Nova* (1609) — в том же году, когда Галилей навел на небо свой телескоп. Кеплер обнаружил, что более точное описание движения красной планеты вокруг Солнца дает не окружность, а эллипс. Отказавшись от идеальных окружностей, он продвинулся дальше модели Коперника и точнее предсказал движение планет. Сейчас

## «Объявлять ересью веру в то, что доказано несомненно, вредно для души»

Галилео Галилей, из письма «Авторитет писаний в философских противоречиях» (1614)

воззрения Кеплера считаются базовыми законами физики, но для своего времени они были передовыми, и приняли их далеко не сразу. Галилей, к примеру, не обратил на них внимания.

Как бы его ни порицали, Галилей не усомнился в гелиоцентрических воззрениях. Папа Урбан VIII попросил его написать взвешенное изложение обеих точек зрения, но Галилей расстроил понтифика: «Диалог о двух главнейших системах мира» оказался предвзятым в пользу воззрений автора, а не Церкви. Ватикан вновь призвал Галилея в Рим и в 1633 году отдал под суд за нарушение запрета. Галилея посадили под домашний арест на всю оставшуюся жизнь. Он умер в 1642 году. Официальные извинения от Ватикана последовали лишь спустя несколько веков, в преддверии юбилея публикации его возмутительной книги.

**Постепенное принятие** Доказательства гелиоцентрических взглядов на устройство Солнечной системы накапливались не один век. Кеплеровская механика орбит оказалась верной и повлияла на ньютоновскую теорию тяготения. С открытием новых планет их движение вокруг Солнца становилось очевидным. Идея человека в центре всего оказалась несостоятельной.

# В сухом остатке: Солнце в центре

# 03 Законы Кеплера

Три закона движения планет Иоганна Кеплера — краеугольный камень современной физики. Они описывают эллиптические орбиты, по которым планеты движутся вокруг Солнца, время, нужное на один оборот, и различия в скоростях: далекие от Солнца планеты движутся вокруг него медленнее близких. Хотя Кеплер и опередил свое время, он вряд ли мог представить, что в наши дни его законы будут применяться и к планетам, обращающимся вокруг далеких звезд, и для обнаружения темной материи.

Современная астрономия началась в 1609 году, когда Кеплер опубликовал свою великую работу *Astronomia Nova*. Немецкий математик вывел уравнения, описывающие орбиты планет, основываясь на тщательных наблюдениях движения Марса, записанных датским астрономом-аристократом Тихо Браге, у которого Кеплер работал ассистентом. Тихо был талантливым проектировщиком инструментов, и его измерения движений красной планеты были намного точнее всех предыдущих. Кеплер же собрал все данные воедино — в новую теорию.

**Эллипсы орбит** В трактате Кеплера говорилось о двух орбитальных законах, третий был обнаружен в 1619 году. Первый закон Кеплера гласит, что планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов эллипса находится Солнце. Это прозрение радикальнее, чем кажется: астрономы издавна считали, что орбиты — идеальные окружности. Со времен древних греков особого почтения удостоивались круг, квадрат, тетраэдр и другие простые геометрические формы. Считалось, что природа любит совершенство и не выносит отклонений от него. Кеплер унаследовал эти представления, изначально

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Около **580** до н. э.

Пифагор предполагает, что планеты движутся по поверхности идеальных сфер

Около **150** до н. э.

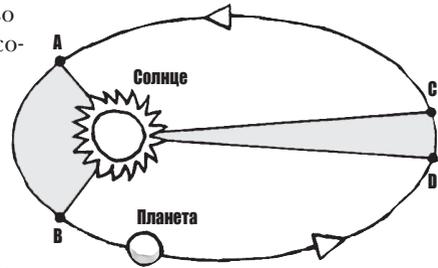
Птолемей объясняет ретроградное движение эпициклами

**1543**

Коперник выдвигает идею, что планеты вращаются вокруг Солнца

думая, что планеты распределены вокруг Солнца во вложенных хрустальных сферах, расположенных согласно математическим отношениям, выведенным из правильных многоугольников. Но данные Тихо заставили его изменить мнение.

Подсказка заключалась в природе движений Марса. Его орбита более вытянута, чем у других планет Солнечной системы, кроме Меркурия, поэтому его путь по небу самый неравномерный. По наблюдениям с Земли, скорость Марса очень переменчива, а иногда он движется в обратную сторону, выписывая на небе петли. До Кеплера астрономы пытались объяснить эти странные ретроградные движения, добавляя к большим основным орбитам маленькие дополнительные круги, именуемые эпициклами. Кеплер заметил, что эллипс гораздо лучше объясняет причудливые движения Марса. Нам иногда кажется, что другие планеты движутся в обратную сторону, потому что мы сами наблюдаем Солнечную систему с движущейся точки. Кеплер разрешил загадку, веками не дававшую астрономам покоя.



Вторым законом Кеплер описал скорость движения планеты по орбите: двигаясь по эллипсу, она покрывает сегменты одинаковой площади за одинаковое время. Площадь сегмента можно измерить, как кусок пирога, проведя линии от планеты к Солнцу в начале и в конце заданного периода (между A и B или между C и D). Когда планета близко к Солнцу, она движется быстро и покрывает широкий кусок «пирога»; когда она дальше от Солнца, она движется медленнее, сдвигаясь на меньший угол за то же самое время. Но, как гласит второй закон Кеплера, площадь этого длинного узкого куска «пирога» такая же, как у короткого и широкого. Кеплер вывел этот закон, наблюдая скорость движения Марса в разных точках орбиты.

**Уроки науки должны быть и экспериментальными. Вид планеты в телескоп стоит целого курса астрономии; электрическая искра в локоть перевешивает все теории; вкус веселящего газа, извержение искусственного вулкана лучше целых томов по химии**

Ральф Уолдо Эмерсон, из очерка «Реформаторы Новой Англии» (1844)

1576

Тихо Браге описывает расположение планет

1609

Кеплер публикует первый и второй законы

1619

Кеплер публикует третий закон

1687

Ньютон предлагает теорию тяготения

2009

НАСА запускает спутник «Кеплер» для обнаружения планет вокруг далеких звезд

## Законы Кеплера

**Первый закон:** планеты обращаются по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

**Второй закон:** обращаясь вокруг Солнца, каждая планета покрывает сегменты одинаковой площади за одинаковое время.

**Третий закон:** квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит планет.

Третий закон Кеплера делает следующий шаг и говорит нам о том, как периоды обращения планет соотносятся для эллипсов разного размера на разных расстояниях от Солнца. Он гласит: квадраты периодов обращения пропорциональны кубам больших полуосей эллиптических орбит. Чем больше эллиптическая орбита, тем больше времени нужно на полный оборот. Таким образом, планеты, которые дальше от Солнца, обращаются вокруг него медленнее, чем близкие планеты. Оборот Марса вокруг Солнца занимает почти два земных года, оборот Сатурна — 29 земных лет, а Нептуна — 165. Меркурий же обращается вокруг Солнца всего за 80 земных дней. Если бы Юпитер двигался с той же скоростью, он бы делал полный оборот за 3,5 земного года, а на деле это занимает у него 12 лет.

**Современный человек** Четыре столетия спустя можно сказать, что законы Кеплера выдержали проверку временем. Они приложимы к любому телу, вращающемуся вокруг другого, — от комет, астероидов и спутников в нашей Солнечной системе до планет вокруг других звезд и даже искусственных спутников, носящихся вокруг Земли. Более того, Кеплер одним из первых использовал научный метод, который в ходу и по сей день: он наблюдал и анализировал данные, чтобы проверить гипотезы об устройстве Вселенной.

«Прежде я измерял небеса, теперь меряю мрак;  
ум мой был с небом — тело покоится с землей»

Эпитафия Кеплеру

**«Система за всем этим простая. Это общее для всех наших законов, они все оказываются чем-то простым в теории, но сложным в действительности»**

**Ричард Фейнман, из лекции «Закон всемирного тяготения как пример физического закона» (1964)**

Кеплеру удалось воплотить принципы в геометрические законы, но он не знал, почему эти законы действуют. Он считал, что они происходят от фундаментальных геометрических схем природы. Чтобы привести эти законы к общей теории тяготения, нужен был Ньютон.

### **Иоганн Кеплер (1571–1630)**

Иоганн Кеплер вырос в Германии с матерью, на постоялом дворе своего деда. Он интересовался астрономией с детства, писал в своем дневнике о комете и лунном затмении, когда ему не было и десяти лет. Получив образование в университете Тюбингена, он преподавал математику в Граце. Кеплер был набожен и считал, что Господь создал Вселенную согласно математически выверенному плану. Его космологическая теория была опубликована в *Mysterium Cosmographicum* («Тайна

мироздания»). Позже он ассистировал Тихо Браге в обсерватории в пригороде Праги и в 1601 году стал его преемником на посту императорского математика. Кеплер составлял гороскопы для императора и анализировал астрономические таблицы Тихо; свои теории некруговых орбит и первый и второй законы движения планет он опубликовал в *Astronomia Nova* («Новая астрономия»). Третий закон движения планет был опубликован в *Harmonices Mundi* («Гармония мира»).

**В сухом остатке:  
Закон миров**

# 04 НЬЮТОНОВСКИЙ ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ

Исаак Ньютон утверждал, что все тела притягиваются друг к другу гравитационной силой и что это притяжение уменьшается с квадратом расстояния. Его идея связала небеса и Землю, объяснила и орбиты планет, и причины падения предметов на землю. Хотя общая теория относительности и потеснила его, закон тяготения остается одной из самых влиятельных идей в физике: он объясняет движение и в нашем мире, и во всей Вселенной.

Считается, что Ньютон пришел к идее тяготения, — точнее, она снизошла на него — в размышлениях о том, почему яблоко падает с дерева. В книге 1728 года «Система мира» он описывает иной мысленный эксперимент: пушка на высокой горе. Если ядро вылетит медленно, оно быстро упадет на землю. Если оно выпущено с большей скоростью — пролетит дальше. На некоей критической скорости его траектория будет стремиться к Земле, но ядро не упадет, а продолжит движение вокруг планеты. На еще большей скорости — улетит в космос.

**Центробежная сила** Из более ранних своих законов движения, которые описывают поведение предметов, если их тянут или толкают, Ньютон сделал вывод: если выстрелить из пушки и на снаряд не будут действовать никакие внешние силы, снаряд полетит по прямой. Сила, приложенная к массе, меняет направление или скорость объекта, придавая ему ускорение, пропорциональное этой силе. Раз траектория ядра искривлена, значит, на ядро явно действует дополнительная сила. Эта сила, направленная к центру Земли, — сила тяготения. Любой падающий предмет имеет ускорение в 9,81 метра в секунду.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**350** до н. э.

Аристотель рассуждает о том, почему предметы падают

**1609**

Кеплер открывает законы планетарных орбит

### Исаак Ньютон (1643–1727)

Исаак Ньютон был первым ученым Британии, посвященным в рыцари. Несмотря на то что он был «нерадивым» и «невнимательным» в школе и ничем не выдающимся студентом в Кембриджском университете, его талант неожиданно раскрылся, когда летом 1665 года занятия в университете отменили из-за чумы. Вернувшись домой в Линкольншир, он посвятил себя математике, физике и астрономии и даже заложил начала математического анализа. Тогда же он создал ранние версии трех законов движения и вывел закон обратных квадратов. После этого выдающегося всплеска идей в 1669 году Ньютон был избран на пост Лукасовского профессора математики\*, а ему исполнилось всего 27 лет. Обратив свое внимание на оптику, он при помощи призмы открыл, что белый

свет состоит из цветов радуги, — знаменитый спор с Робертом Гуком и Кристианом Гюйгенсом — именно об этом. Ньютон написал две основные работы — *Philosophiæ naturalis principia mathematica* («Математические начала натуральной философии») и *Opticks* («Оптика»). На исходе жизни Ньютон увлекся политикой. Он защищал академические свободы, когда король Яков II пытался вмешаться в дела университета, а в 1689 году стал членом Парламента. Ньютон был человеком противоречивым: с одной стороны, он хотел внимания, с другой — искал уединения и старался избегать критики, а свое положение использовал в борьбе со своими учеными недоброжелателями и оставался в центре споров вплоть до самой смерти.

\* Лукасовский профессор математики — одно из самых почетных званий в Кембриджском университете.

Как олимпийским метателям молота нужно сильно натягивать струну, чтобы молот продолжал вращаться по кругу, так и притяжение Земли — это крепкая, хоть и невидимая струна. Как только спортсмен отпускает струну и прекращает прикладывать силу, молот улетает по прямой. То же и с ньютоновским снарядом — и с чем угодно другим. Ньютон рассудил, что тяготение — причина и того, что Луна держится в небе. Таким же образом Земля и другие планеты остаются на орбитах вокруг Солнца. Что было применимо к простому яблоку, распространилось на целый космос.

Разбираясь в тонкостях своих выводов, Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения. Он обнаружил, что сила притяжения пропорциональна

**Тяготение —  
лишь кора дерева  
мудрости, но она  
сохраняет его**  
Конфуций

\*\* Цит. по: Samuel Arthur Bent. *Short Sayings of Great Men* (1882).

1687

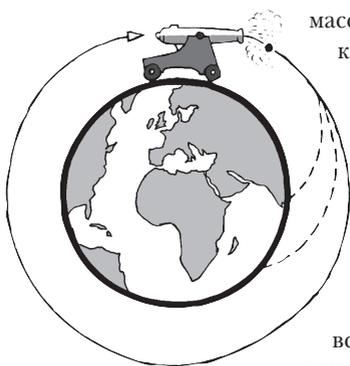
Опубликованы «Начала» Ньютона

1905

Эйнштейн обнаруживает специальную теорию относительности

1915

Эйнштейн обнаруживает общую теорию относительности



массе объекта. Из-за больших размеров Земли притяжение к ее центру намного сильнее, чем обратное притяжение объектов на ее поверхности – например, людей или муравьев. И те и другие создают притяжение, но массивная Земля преодолевает его, потому что она гораздо крупнее. Луна заметно влияет на земные океаны – вызывает приливы и отливы. А Юпитер достаточно велик, чтобы слегка колебать все планеты и затягивать кометы в свои грозные облака.

**Вес** Именно тяготение придает смысл весу. Когда мы встаем на весы в ванной, они измеряют силу, с которой мы давим на них. Их показания изменились бы на Луне или на Марсе – небесных телах поменьше, где тяготение слабее. Ваш вес на Луне составлял бы одну шестую земного, вот почему астронавты могли скакать по поверхности нашего спутника и играть при этом в гольф. На Марсе вы тоже были бы легче, чем на Земле, – примерно 40 процентов вашего обычного веса. А вот на Юпитере – в два с лишним раза тяжелее. Из-за этих расхождений ученые используют понятие массы, которое примерно соответствует тому, сколько атомов содержит данное количество вещества или сколько энергии нужно, чтобы привести это количество вещества в движение. В отличие от веса масса не зависит от того, где вы находитесь.

Ньютон также заметил, что тяготение действует на расстоянии. Луна испытывает на себе притяжение Земли, хоть и не касается ее. Ньютон вывел, что тяготение подчиняется закону обратных квадратов: сила притяжения падает пропорционально квадрату расстояния от тела. Если бы Луна была вдвое дальше от Земли, она бы испытывала четверть ее притяжения, втрое дальше – одну девятую.

## Изменчивые тяготения

Если присмотреться, на Земле можно уловить крошечные изменения локальной силы тяготения. Массивные горы и камни разной плотности могут увеличивать или уменьшать силу тяготения возле себя, поэтому можно измерять тяготение, чтобы строить геологические карты и изучать структуру земной коры. А еще археологи иногда используют небольшие изменения тяготения, чтобы находить и раскапывать древние поселения. Недавно ученые использовали спутники, измеряющие тяготение, чтобы зарегистрировать (уменьшающийся) объем льда на полюсах Земли, а также чтобы отследить изменения земной коры после крупных землетрясений.

**Каждый предмет во Вселенной притягивает каждый другой предмет по линии, соединяющей центры масс предметов, пропорционально массе соответствующего предмета и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними**

**Исаак Ньютон, «Математические начала натуральной философии» (1687)**

Ньютоновский закон тяготения одним уравнением объясняет все, что Иоганн Кеплер описал в своих трех законах (см. с. 14). Планеты, следуя эллиптическим орбитам, движутся быстрее, когда на них действует более сильное тяготение вблизи Солнца. Планета отлетает от Солнца на высокой скорости и постепенно замедляется, пока снова не начнет приближаться к нему.

Ньютон изложил все, что думал о тяготении, в одной книге, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, известной как *Principia* («Начала»). Она увидела свет в 1687 году и до сих пор считается важной вехой в истории науки. Теория всемирного тяготения объяснила не только движение планет и спутников, но и снарядов, маятников и яблок. Ньютон описал орбиты комет, возникновение приливов и колебания земной оси. Эта работа укрепила его репутацию одного из величайших ученых в истории.

Ньютоновское тяготение распространяется и на большинство видимых нами объектов, и на поведение планет, комет и астероидов в Солнечной системе, которые дальше от Солнца, там, где тяготение слабее. Закон тяготения Ньютона смог предсказать положение Нептуна, открытого в 1846 году на ожидаемом месте, за Ураном. Но орбита Меркурия потребовала более глубоких физических изысканий. В случаях очень сильного тяготения — к примеру, в непосредственной близости от Солнца, звезд или черных дыр — требуется общая теория относительности.

## Ускорение

На поверхности Земли ускорение тела, падающего под действием тяготения ( $g$ ), равняется 9,81 метра в секунду.

**В сухом остатке:  
Притяжение масс**

# 05 НЬЮТОНОВСКАЯ ТЕОРИЯ ОПТИКИ

Астрономы раскрывают множество секретов Вселенной, изучая физику света. Одним из первых попытался понять его природу Исаак Ньютон. Он обнаружил, что, проходя сквозь стеклянную призму, белый свет распадается на оттенки радуги, и показал, что эти цвета содержатся в самом белом свете, а не в призме. Сегодня мы знаем, что видимый свет — часть спектра электромагнитного излучения, который простирается от радиоволн до гамма-лучей.

Пропустите пучок белого света через призму — и на выходе луч расщепится на цветную радугу. Радуга в небе появляется так же: солнечный свет дробится в водяных каплях на знакомые оттенки: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Экспериментируя с лучами света и призмами в 1660-х годах, Исаак Ньютон показал, что смешение разных цветов света дает белый свет. Цвета — базовые составляющие, а не результат смешения или порождение стекла призмы, как думали раньше. Ньютон выделил лучи красного и синего цвета и показал, что, если пропустить эти отдельные цвета через другие призмы, дальнейшего расщепления не происходит.

**Волны света** Из дальнейших экспериментов он сделал вывод, что свет во многом ведет себя, как волны на воде. Свет огибает препятствия, как морские волны огибают пирс. Лучи света можно соединять, чтобы усилить или погасить их яркость, — как и волны на воде. Как волны на воде — это массовые перемещения невидимых молекул воды, так и световые волны, по мнению Ньютона, по сути — колебания крошечных частиц света, или «корпускул», которые мельче атомов.

«Свет приносит нам новости Вселенной»

Сэр Уильям Брэгг,  
«Мир света» (1933)

СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1672

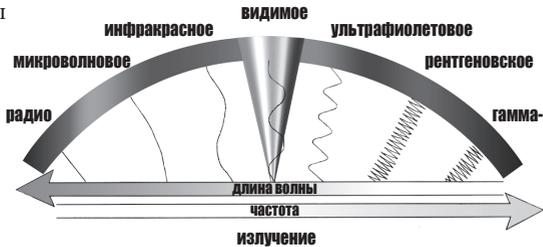
Ньютон объясняет природу радуги

1678

Кристиан Гюйгенс публикует волновую теорию света

Но кое-чего Ньютон не знал, и обнаружилось это лишь спустя несколько веков: световые волны имеют электромагнитную природу — это совмещение электрических и магнитных полей, а не колебания твердых частиц. С открытием электромагнитно-волнового поведения света идею Ньютона о корпускулах отложили. Она воскресла по-новому, когда Альберт Эйнштейн показал, что свет может вести себя как поток частиц, которые несут энергию, но не имеют массы.

**Сквозь спектр** Разным цветам света соответствуют разные длины электромагнитных волн. Длина волны — расстояние между двумя последовательными пиками волны. Белый свет, проходя сквозь призму, расщепляется на множество оттенков, потому что каждый оттенок по-разному преломляется в стекле. Призма преломляет световые волны под углом, зависящим от длины волны: красный свет преломляется слабее, а синий — сильнее всех остальных, и так образуется радужная последовательность. Спектр видимого света явлен по порядку длин волн: красный с самыми длинными волнами, далее зеленый и следом синий — с самыми короткими.



Что лежит на концах радуги? Видимый свет — лишь часть электромагнитного спектра. Человеческое зрение развилось так, чтобы воспринимать эту чувствительную часть спектра. Длины волн видимого света (сотни миллиардных долей метра) сопоставимы с размерами атомов и молекул, и поэтому сильны взаимодействия света и атомов вещества.

Видимый свет несет очень много информации об атомной структуре вещества — именно поэтому он для нас и видимый: наши глаза эволюционировали, чтобы получать эту информацию и различать предметы. Устройство человеческого зрения завораживало Ньютона, он даже вводил себе в глазное яблоко штопальную иглу — проверить, как давление влияет на восприятие цвета.

За красным светом следует инфракрасный, с длинами волны в миллионные доли метра. Инфракрасные лучи несут тепло Солнца, их можно уловить очками ночного видения, которые позволяют «видеть» тепло тел. Еще длиннее

**1839**

Александр Беккерель наблюдает фотоэлектрический эффект

**1873**

Уравнения Джеймса Клерка Максвелла представляют свет как электромагнитную волну

**1895**

Вильгельм Рентген открывает X-лучи, позднее названные в его честь

**1905**

Эйнштейн показывает, что свет в определенных условиях может вести себя как поток частиц

микроволны, их длины колеблются в диапазоне от миллиметра до сантиметра, и радиоволны — длиной в несколько метров и более. В микроволновых печах применяют микроволновое электромагнитное излучение, которое передает энергию молекулам воды в пище и тем подогревает ее. На другом конце спектра, за синим, следует ультрафиолетовый свет. Это обжигающий свет Солнца, он может повредить человеческой коже, хотя большую его часть поглощает озоновый слой Земли. Еще более короткие волны — у рентгеновских лучей, их используют в медицине, поскольку они проходят сквозь ткани человеческого тела; самые короткие волны — у гамма-лучей. Астрономы изучают Вселенную на всех длинах волн.

**ФОТОНЫ** Но Ньютон был отчасти прав: свет не всегда ведет себя как волна. Лучи света несут энергию крошечными порциями — фотонами, которые не имеют массы и движутся со скоростью света. Альберт Эйнштейн понял это, наблюдая фотоэлектрический эффект: синий и ультрафиолетовый свет, направленные на металл, рожают электрический ток. При этом красный свет — даже очень яркий — тока не производит. Заряд приходит в движение, только если частота света превышает определенный порог, для разных металлов свой. Этот порог указывает, что прежде, чем заряд придет в движение, должно накопиться определенное количество энергии.

В 1905 году Эйнштейн предложил революционное объяснение. Именно эта работа, а не теория относительности принесла ему в 1921-м Нобелевскую премию. Он предположил, что не плотный поток света как таковой, а отдельные фотонные «пули» попадают в электроны металла, приводя их

## Волны материи

В 1924 году Луи-Виктор де Бройль предложил обратную идею: частицы материи могут вести себя и как волны. Он предположил, что у всех объектов есть свои длины волн, а это подразумевает, что корпускулярно-волновая дуальность распространяется на всё. Через три года представление о материи-волне подтвердилось: потоки электронов, как выяснилось, отклоняются и сталкиваются — совершенно как свет. По современным наблюдениям, и более

крупные частицы ведут себя как волны — нейтроны, протоны и даже молекулы, в том числе и микроскопические углеродные футбольные мячики фуллерены. У более крупных объектов — фунтиков и фуфак, например, — длины волн слишком короткие, чтобы их можно было увидеть, и поэтому мы не можем отследить их волновое поведение. Длина волны теннисного мячика, летящего через корт, —  $10^{-34}$  м, намного меньше диаметра протона ( $10^{-15}$  м).

«**Был этот мир глубокой тьмой окутан.  
Да будет свет!**» — и вот явился Ньютон\*»

**Александр Поуп, на смерть Ньютона (1727)**

в движение, и именно так возникает фотоэлектрический эффект. Поскольку каждый фотон несет определенный заряд энергии, пропорциональный его частоте, энергия электрона, получившего удар, тоже пропорциональна частоте света.

\* Пер.  
С. Я. Маршак.

Фотон красного света (низкой частоты) не может перенести достаточно энергии, чтобы сдвинуть с места электрон, а вот синему фотону (свету более высокой частоты) энергии на это хватает. Ультрафиолетовый фотон располагает еще большей энергией, а значит, может с размаху врезаться в электрон и придать ему скорость еще выше. Увеличение яркости света ничего не меняет: даже если красных фотонов много, по отдельности они все равно не способны сдвинуть электрон. С тем же успехом можно стрелять шариками от пинг-понга по огромному внедорожнику. Эйнштейновская идея квантов света поначалу мало кому понравилась, но отношение изменилось, когда эксперименты показали: его дурацкая теория верна. Подтвердилось, что энергия освобожденных электронов пропорциональна частоте света.

**Корпускулярно-волновой дуализм** Соображения Эйнштейна породили неудобную гипотезу, что свет — и волна, и частица: корпускулярно-волновой дуализм. Физики до сих пор пытаются разрешить это противоречие. Недавние эксперименты показывают, что свет как будто знает, чем прикидываться в зависимости от обстоятельств. Если вы ставите опыт для измерения его волновых свойств — например, пропускаете его сквозь призму, — он ведет себя как волна. Если же вы пытаетесь измерить свойства его частиц, он станет потоком частиц. Он поистине и то и другое.

**В сухом остатке:  
За пределы радуги**

# 06 Телескоп

**Современная астрономия началась в XVII веке — с изобретением телескопа. Он открыл нам глаза на Солнечную систему, позволил увидеть кольца Сатурна и обнаружить внешние планеты. Именно наблюдения в телескоп помогли подтвердить, что Земля обращается вокруг Солнца. Постепенно мы получили доступ ко всей видимой Вселенной.**

Одним из первых астрономов, наблюдавших небо в телескоп, был Галилей. В 1609 году он открыл четыре спутника Юпитера, фазы Венеры и кратеры на Луне. Но Галилей всего лишь следовал моде.

Кто первым изобрел телескоп — неизвестно. Голландец Ханс Липперсгей в 1608 году одним из первых попытался запатентовать конструкцию телескопа, но ему это не удалось, поскольку идея была уже широко известна. Об увеличительной силе прозрачного материала с изогнутыми поверхностями знали давно, и чечевицеобразную линзу применяли в дуплах и очках аж с XIII века. По письменным свидетельствам, телескопы для наблюдения за Луной создавались с середины XVI века, но качественные инструменты получили широкое распространение лишь в XVII веке — с развитием стеклоделия. Хорошие линзы позволяли получить четкие изображения даже неярких небесных тел.

**Увеличительная сила** Как работает телескоп? В простейшей версии это две линзы, размещенные на концах трубки. Одна собирает внутрь лучи света со всей своей поверхности, многократно превосходящей зрачок глаза по площади. Другая — окуляр, она превращает собранный свет в узкий параллельный пучок. Глаз, фокусирующий эти лучи, воспринимает их как исходящие из более крупного источника.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1609**

Галилей применяет телескоп для астрономических наблюдений

**1668**

Ньютон проектирует зеркальный телескоп

Отклонение лучей называется преломлением, или рефракцией. Свет движется медленнее в более плотных материалах, например в стекле, — по сравнению с воздухом. Так возникает мираж лужи на горячей дороге. Холодный воздух плотнее горячего, поэтому свет меняет скорость и направление, оказавшись в слое горячего воздуха над раскаленным асфальтом. Лучи света, идущие под углом вниз, отражаются от горячего воздуха и перенаправляются под тем же углом вверх. Таким образом, мы видим на дороге отражение неба, которое кажется нам лужей.

Угол отклонения луча связан со скоростями движения света в двух материалах — строго говоря, из соотношения скоростей вытекает соотношение синусов соответствующих углов отклонения от вертикали. Поэтому луч, переходящий из воздуха в стекло и другие плотные вещества, отклоняется внутрь, т. е. его траектория делается круче.

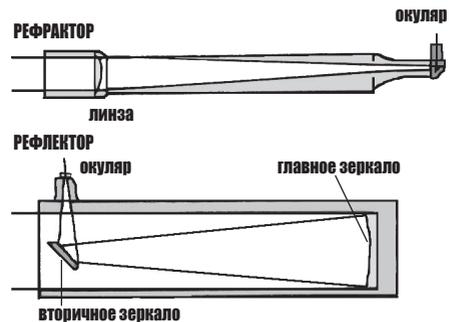
**Показатель преломления** Свет в пустоте несется со скоростью 300 тысяч километров в секунду. Отношение его скорости в вакууме к скорости в более плотном материале — например, в стекле — называется показателем преломления материала. У вакуума этот показатель по определению равен 1. Вещество с показателем преломления 2 замедлило бы свет до половины его скорости в пустоте. Высокий показатель преломления означает, что, проходя сквозь вещество, свет замедляется сильно.

Показатель преломления — свойство самого материала. Можно создавать материалы с определенным показателем преломления, что было бы полезно, например, для телескопов или линз для очков. Сила линз и призм определяется не только их формой, но и показателем преломления материала, из которого они изготовлены.

У телескопов-рефракторов с двумя линзами есть недостатки. Итоговая картинка выходит перевернутой, потому что лучи света пересекаются

**Мы видим прошлое в телескоп, а настоящее в микроскоп. Отсюда и кажущаяся громадность настоящего**

Виктор Гюго, «Послесловие к моей жизни» (1901)

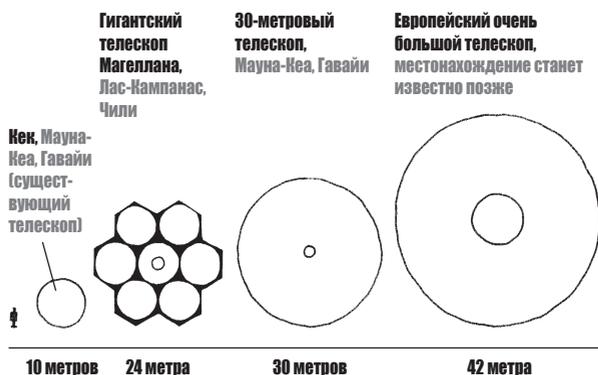


1937

Первый радиотелескоп

1990

Запуск космического телескопа «Хаббл»



прежде, чем достигают окуляра. Для астрономии это обычно не беда: звезда в любом положении выглядит одинаково. Это можно поправить, добавив третью линзу — чтобы перевернуть изображение еще раз, но это приводит к дополнительным искажениям картинка и к светопотерям на отражение и поглощение в стекле. Вторая — и главная — трудность: цветные изображения с рефрак-

торных телескопов получаются нечеткими. Разные длины волн преломляются по-разному — синие световые волны отклоняются больше красных, и потому цвета разделяются, а итоговая картинка теряет четкость. Линзы нового поколения могут свести этот эффект к минимуму, но они ограничены в размерах.

**Телескоп-рефлектор** Чтобы устранить эти недостатки, Ньютон разработал отражающий телескоп. Он использовал для преломления света изогнутое зеркало, а не линзу, и так, по сути, уменьшил телескоп вдвое, тем самым сделав его удобнее в обращении. В новой конструкции не происходило и размытия цветов: зеркальная поверхность отражает все цвета одинаково. Тем не менее технология серебрения зеркал во времена Ньютона была несовершенна, и потребовались сотни лет, чтобы довести конструкцию до совершенства.

Ныне в большинстве астрономических телескопов небесный свет собирает не линза, а громадное зеркало. Размер зеркала определяет, какое количество света можно собрать, и большая площадь позволяет видеть даже совсем не яркие объекты. Зеркала в современных оптических телескопах бывают размером с комнату; самые большие из ныне применяемых — в гигантских близнецах-телескопах Кек на Мауна-Кеа, Гавайи, около 10 метров диаметром. В ближайшие десятилетия планируется сооружение еще более крупных зеркал — до 100 метров в поперечнике.

Очень большие зеркала создать труднее. Телескоп при обзоре неба наклоняют, и в результате форма таких зеркал искажается — из-за их громадной массы. Чтобы максимально облегчить зеркала, приходится применять инженерные хитрости. Некоторые составлены из многих сегментов; применяют и метод вращательной отливки, он позволяет получать очень тонкие зеркала точной формы. Альтернативное решение — адаптивная оптика,

в этом методе форму зеркала постоянно подправляют при помощи системы крошечных поршней, приклеенных под поверхность. Если она прогибается, эти поршни выталкивают ее обратно.

**Мерцающие звезды** Помимо самих телескопов, на четкость астрономических изображений неблагоприятно влияют и завихрения нашей атмосферы. Даже в самые ясные

ночи звезды мигают. У горизонта — сильнее, чем над головой. Это происходит из-за потоков воздуха, движущихся между ними и наблюдателем. В астрономии размытие звезд из-за атмосферы называется «сиинг». Размер оптических компонентов телескопа тоже устанавливает абсолютный предел концентрации звездного света из-за другой его особенности излучения — дифракции: у краев линзы, объектива или зеркала лучи света отклоняются.

Чтобы получить максимально четкие изображения звезд и планет, астрономы выбирают для телескопов особые места. На поверхности Земли их чаще всего строят в высоких горах, где воздух разрежен. Лучше прочих Чилийские Анды и вулканические пики на Гавайях. Идеальное место для телескопа — космос, где вообще нет атмосферы. Лучшие изображения глубин Вселенной были сделаны орбитальным космическим телескопом «Хаббл».

Телескопы воспринимают не только видимый диапазон волн. Инфракрасный свет, или тепло, может распознаваться инструментами вроде очков ночного видения, установленных на телескопах, — при условии, что облучение как следует охлаждается. Волны рентгеновских лучей — очень короткие, поэтому их в космосе лучше всего улавливать при помощи спутников с рефлекторной оптикой. Некоторыми крупными тарелками удается засечь даже радиоволны — например, антенной в Аресибо, которую сняли в фильме про Джеймса Бонда, или системами антенн поменьше, вроде Большой антенной системы в Нью-Мексико, задействованной в фильме «Контакт». Возможно, самый крупный телескоп — это сама Земля: элементарные частицы проносятся сквозь нее каждый день, а физики расставляют ловушки и пытаются поймать их на лету.

**«Мы ждем, что там, где есть обсерватория и телескоп, любые глаза смогут сразу увидеть новые миры»**

**Генри Дэвид Торо, «Неделя на реках Конкорд и Мерримак» (1849)**

**В сухом остатке:  
Увеличение,  
преломляющее свет**

# 07 Фраунгоферовы линии

**Спектр света звезд содержит химические отпечатки пальцев. Темные или светлые линии соответствуют определенным длинам волн, которые поглощает или испускает раскаленный газ в атмосфере звезды. Такие атомные маркеры были впервые обнаружены в свете Солнца, и это полезнейшее для работы астрономических детективов средство. Благодаря ему нам открылся химический состав звезд и галактик, а также движение небесных тел и расширение Вселенной.**

Если пропустить солнечный свет сквозь призму, на получившейся радуге будут видны темные линии, похожие на штрихкод. Они отмечают длины волн, отсутствующие в спектре, потому что их поглощают газы в атмосфере Солнца. Каждая линия соответствует определенному химическому элементу в разных состояниях и с разной энергией — от нейтральных атомов до возбужденных ионов. Изучив рисунок этих линий, можно вычислить химический состав Солнца.

Первыми их заметил английский астроном Уильям Хайд Волластон в 1802 году, но подробно изучать линии поглощения в солнечном спектре взялся ведущий немецкий изготовитель линз Йозеф фон Фраунгофер в 1814 году, его именем они и названы. Он смог различить более 500 линий, а современное оборудование определяет тысячи.

**Уникальная химия** В 1850-х немецкие химики Густав Кирхгоф и Роберт Бунзен лабораторно установили, что всякое простое вещество дает уникальный рисунок линий поглощения. На Солнце водород — самый распространенный элемент, но в солнечном спектре видно поглощение и от атомов других элементов, включая гелий, углерод,

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

### 1802

Волластон замечает темные линии в солнечном спектре

### 1814

Фраунгофер регистрирует сотни линий

кислород, натрий, кальций и железо. У атомов каждого элемента свой штрихкод из линий поглощения.

Свет других звезд тоже содержит химические отпечатки. Изучение спектральной химии, именуемое спектроскопией, — чрезвычайно мощный астрономический метод: он позволяет определить материал, из которого состоят звезды, туманности, атмосферы планет и далекие галактики. Астрономам не под силу ни принести звезды и галактики к себе в лабораторию, ни слетать к ним, поэтому приходится прибегать к хитрым методикам и удаленным наблюдениям.

Иногда линии оказываются светлыми, а не темными — это линии эмиссии. У ярких источников — самых горячих звезд и квазаров, например, — очень много энергии, и газы в составе этих небесных тел пытаются охладиться, испуская фотоны на определенных длинах волн, а не поглощая их. В спектре флуоресцентных ламп тоже есть светлые линии, которые соответствуют длинам волн возбужденных атомов газа в трубке — например, неона.

**Дифракционные решетки** Чтобы разбить свет на составляющие его волны разной длины, часто применяют устройства, называемые дифракционными решетками. Стеклоплатформы призм громоздки и ограничены показателем преломления. Дифракционные решетки — приспособление с рядом параллельных узких щелей, которое помещают в поток света. Фраунгофер сделал первую решетку, намотав проволоку на каркас.

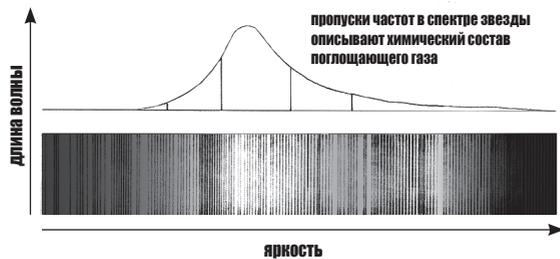
Действие дифракционных решеток связано с волновыми свойствами света. Свет, проходя сквозь щели решетки, рассеивается пропорционально длине волны света и обратно пропорционально ширине щели. Очень узкие щели рассеивают свет сильнее, а красный свет подвержен дифракции больше синего.

Когда щелей много, прошедшие через них лучи света взаимодействуют между собой — интерферируют: пики и минимумы световых волн усиливают или гасят друг друга, и в результате получается рисунок из светлых

**«Видно, звезды, Да, звезды в небе нами управляют»**

Уильям Шекспир, «Король Лир», акт IV, сцена 3 (1608)

\* Пер. Т. Л. Щепкиной-Куперник.



1842

Доплер объясняет смещение спектральных линий

1859

Кирхгоф и Бунзен открывают лабораторную методику спектроскопии

1912

Весто Слайфер открывает красное смещение галактик

и темных полос. Внутри любой из этих полос свет расщепляется на множество оттенков, потому что положение интерференционных максимумов тоже зависит от длины волны — и от расстояния между щелями. Регулируя количество щелей, расстояние между ними и их ширину, астрономы варьируют рассеивание света и точность регистрации линий поглощения и эмиссии. Таким образом, дифракционные решетки мощнее и адаптивнее призм.

Простую дифракционную решетку можно сделать из фотослайда с насечками на эмульсии — их иногда продают в магазинах при научных музеях. Если поместить такой слайд перед источником неоновых светов, удастся увидеть штрихкод длин волн горячего газа.

**Диагностика** Спектральные линии — не просто химические показатели. Каждая линия соответствует определенному состоянию атомов, их длины волн хорошо известны из лабораторных экспериментов. Характеристическая энергия любой линии обусловлена устройством атома.

Пусть атом гораздо сложнее и тоньше устроен, его моделью можно представить Солнечную систему. Ядро, состоящее из тяжелых протонов и нейтронов, — Солнце, а электроны — планеты. Линии поглощения и эмиссии возникают при переходе планет с одной орбиты на другую — когда энергия в виде фотона передается атому или отнимается у него.

Поглощение происходит, когда появляется фотон нужной энергии и выбивает электрон на более высокую орбиту, а эмиссия — когда электрон падает на орбиту ниже, отдавая при этом излишек энергии фотону. Количество энергии, необходимое для перемещения между орбитами, строго определено и зависит от типа и состояния атома. В очень горячих газах внешние электроны бывают оторваны от атома — такие газы называются ионизированными.

### Йозеф фон Фраунгофер (1787–1826)

Йозеф фон Фраунгофер родился в Баварии в 1787 году. Начиная скромно, однако смог стать стеклоделом-оптиком мирового уровня. Он осиротел в 11 лет и пошел в ученики к мастеру по стеклу. Когда мастерская, в которой он работал, в 1801 году закрылась, его спас баварский князь, который проследил, чтобы Фраунгофер смог учиться и дальше. Свою специальность он

осваивал в одном из лучших монастырей и стал всемирно признанным изготовителем оптических стекол и инструментов. Блистал он и в науке — стал директором Оптического института, дворянином и почетным гражданином Мюнхена. Но, как и многие другие стеклоделы тех времен, он умер молодым, всего в 39 лет, — отравился парами тяжелых металлов.

**«Зачем я пришел сюда — не ведаю, куда отправлюсь —  
вопрошать бессмысленно; посреди мириадов  
живущих и умерших миров, звезд, систем, бесконечности  
к чему тревожиться мне об атоме?»**

**Лорд Байрон, из письма Аннабелле Милбэнк от 3 марта 1814 года**

Спектральные линии — прямое следствие фундаментальных физических свойств материи и потому чувствительны ко многим аспектам физики газа. Температуру газа можно вычислить по их ширине: чем горячее газ, тем шире его спектральные линии. Соотношение интенсивности спектральных линий сообщает дополнительные сведения — например, степень ионизации газа.

Спектральные линии применимы и для измерения движения небесных тел. Длина волны той или иной линии точно известна, поэтому любые мельчайшие изменения в ней могут означать, что источник излучения сместился. Если звезда движется от нас, ее спектр из-за эффекта Доплера (см. с. 32–35) смещается в красный, а если она движется к нам — в голубой. Величину этого смещения можно измерить по спектральным линиям. А в крупном масштабе по этим красным смещениям мы узнали, что Вселенная расширяется.

**В сухом остатке:  
Штрихкоды звезд**

# 08 Эффект Доплера

**Частоты света и звука, исходящие от движущихся объектов, меняются из-за эффекта Доплера. Как звук сирены «скорой помощи» делается ниже, когда она удаляется, так и свет от далеких планет и звезд меняет длину волны — а значит, и цвет — из-за движения источника. Расширение Вселенной создает похожий эффект, именуемый красным смещением, и поэтому удаляющиеся галактики кажутся тем краснее, чем дальше они от нас.**

В 1842 году австрийский математик и астроном Кристиан Доплер, пытаясь разобраться, почему двойные звезды — разного цвета, предположил, что движение влияет на окраску света. Хотя его теория и не объясняла досконально все изменения оттенков, Доплер наткнулся на ценный инструмент, который теперь широко применяется в астрономии и физике для измерения скорости. Кроме того, открытие Доплера предварило множество последующих.

**Тонкая настройка** Эффект Доплера возникает, когда источник волн — световых или звуковых — движется по отношению к вам, наблюдателю. Если источник приближается, каждой следующей волне нужно пройти чуть меньшее расстояние до вас, поэтому пики волн достигают вас быстрее. Поскольку расстояние между любыми двумя пиками меньше, частота оказывается больше. Если же источник удаляется от вас, волны отстают. Интервалы между пиками делаются длиннее, а частота падает. Именно поэтому кажется, что звук сирены понижается, когда машина «скорой помощи» удаляется от вас. Во времена Доплера ученые демонстрировали это явление, сажая музыкантов в поезд. Трубоч у себя в вагоне, скажем, играл чистое «ля», но слушателям на платформе звук казался фальшивым.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1842**

Доплер обнаруживает статью  
о цветовых смещениях в свете звезд

## Планеты вне Солнечной системы

Открыто уже более двух сотен планет, вращающихся вокруг других звезд. Большинство из них — газовые гиганты вроде Юпитера, хотя вращаются они гораздо ближе к своим звездам, но известно и несколько, вероятно, каменных планет, похожих размерами на Землю. Примерно у каждой десятой звезды есть планеты, что породило спекуляции о возможности жизни на этих планетах. Большинство планет было обнаружено благодаря тяготению, которое они оказывают на свою звезду. По сравнению со своими звездами планеты крошечны, поэтому сияние звезды мешает их увидеть. Однако масса планеты слегка раскачивает

звезду, и это смещение можно видеть как эффект Доплера для характеристической линии в спектре этой звезды. Первые экзопланеты были открыты в 1992 году вокруг одного пульсара и в 1995 году — рядом с обычной звездой. Теперь их обнаружение — обычное дело, но астрономы все еще ищут похожие на нашу солнечные системы и пытаются вычислить, как складываются разные конфигурации планет. Ученые надеются, что новые космические обсерватории, подобные аппарату НАСА «Кеплер», запущенному в 2009 году, обнаружат множество планет, похожих на Землю.

Если можно измерить смещение частоты, значит, можно определить скорость источника волн. Представьте, что кто-то бросает вам мячики с движущегося поезда, по мячику в секунду согласно секундомеру своих наручных часов. С удалением поезда частота, с которой прилетают мячики, снизится. Измерьте это снижение по своим собственным часам — и вы сможете вычислить скорость поезда, на котором удаляется метатель мячей. Эффект Доплера имеет множество применений — при измерении скорости автомобилей, циркуляции крови в живых организмах и многого другого.

В астрономии эффект Доплера встречается всюду, где есть движение материи. Он особенно полезен при обнаружении планет вокруг других звезд — экзопланет — и для отслеживания орбит двойных

**Можно почти с полной уверенностью утверждать, что в недалеком будущем это даст астрономам удобный способ определять движения подобных звезд и расстояния до них**

**Кристиан Доплер, из статьи «О цветном свете двойных звезд и некоторых других звезд на небесах», 25 мая 1842 г.**

**1912**

Весто Слайфер измеряет красное смещение галактик

**1992**

Методом Доплера обнаружена первая экзопланета

### Кристиан Доплер (1803–1853)

Для ученого с таким талантом карьера Кристиана Допера была довольно скромной. Он родился в семье каменотесов в Зальцбурге, Австрия, но был слишком болезненным, чтобы продолжить семейное дело, и поступил в Венский университет изучать математику, философию и астрономию. До начала научной работы в Праге Доплер трудился книгохранителем и даже подумывал о переезде в Америку. Он стал профессором, но преподавательская нагрузка оказалась тяжелой, и его здоровье пошатнулось. Один из друзей, тревожась за него, писал: «Трудно поверить, какого гения породила Австрия в лице

этого человека. Я писал... многим, кто мог бы спасти Допера для науки и не дать ему погибнуть под ярмом. К сожалению, я опасаюсь самого худшего». Со временем Доплер оставил Прагу и вернулся в Вену. В 1842-м он опубликовал статью, описывавшую цветовое смещение в свете звезд, которое мы сегодня называем эффектом Допера. Ученое сообщество оценило богатство воображения автора, но в остальном отозвалось неоднозначно. Критики Допера сомневались в его математических способностях, а союзники о его научном творчестве отозвались очень лестно.

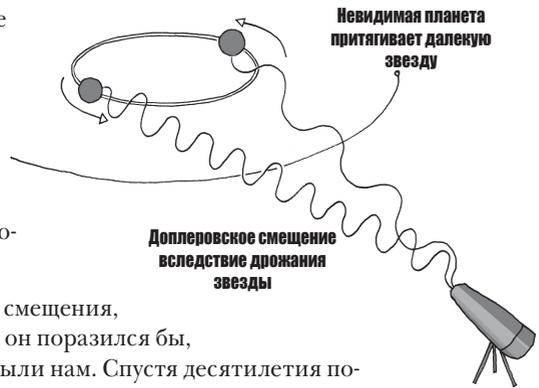
звезд. Маленькую тусклую планетку близ ослепительно яркой далекой звезды заметить трудно. Однако если планета достаточно массивна, ее тяготение влияет на звезду. Пара «звезда — обращающаяся вокруг нее планета» вращается вокруг их центра масс, точки, слегка смещенной относительно обеих, но ближе к центру массивной звезды. Таким образом, яркая звезда не остается на месте, а описывает вместе с вращением планеты по орбите небольшие окружности.

**Красное смещение** С Земли колебание звезды можно засечь по ее свету. Эффект Допера слегка меняет оттенок звезды: она кажется синее, если движется к нам, и краснее, если от нас. Заметив в спектре звезды эту особенность, известную как красное смещение или синее смещение, астрономы понимают, что где-то рядом с этой звездой есть влияющая на нее планета. Благодаря этой закономерности в свечении центральной звезды с 1990-х годов вокруг далеких звезд были открыты сотни планет.

Красное смещение может возникать и от расширения самой Вселенной — его называют космологическим красным смещением. Вселенная расширяется, пространство между нами и далекими галактиками постоянно увеличивается, и от этого кажется, что галактики удаляются от нас с некоторой скоростью, — подобно двум точкам на надуваемом воздушном шарике, которые тоже удаляются друг от друга. Свет галактик смещается к более низким частотам, поскольку световым волнам приходится добираться к нам все

дольше и дольше. Поэтому более далекие галактики выглядят краснее. Строго говоря, космологическое красное смещение — не вполне эффект Доплера, поскольку удаляющаяся галактика на самом деле не движется относительно других объектов вокруг. Галактика остается на месте, расширяется само пространство.

Хотя Доплер видел, что синее и красное смещения, возможно, принесут астрономам пользу, он поразился бы, если б узнал, какую Вселенную они открыли нам. Спустя десятилетия после того, как он ошибочно применил их к двойным звездам, астроном Весто Слайфер измерил красное смещение галактик и тем заложил основу модели Большого взрыва. В настоящее время эффект Доплера может помочь обнаружить миры вокруг далеких звезд, в которых, не исключено, есть жизнь.



## Определение красного смещения, $z$

Красное и синее смещения определяются через пропорцию изменения наблюдаемых и испускаемых длин волн (или частоты) объекта. Астрономы используют для этой меры отвлеченный коэффициент  $z$ , такой, что соотношение наблюдаемой длины волны к испускаемой равняется  $1 + z$ .

Красное смещение используется как условное обозначение дистанции до астрономического объекта. Для галактики

с  $z = 1$ , например, мы видим ее свет с длиной волны вдвое большей, чем она испускает. Такой объект отстоит от нас примерно на половину размера Вселенной. Самые далекие известные галактики имеют  $z = 7-9$ , находясь на расстоянии примерно 80% размера Вселенной. Реликтовое излучение, самое далекое, что мы можем увидеть, лежит в районе  $z$  приблизительно 1000.

**В сухом остатке:**  
«Резиновая» нота

# 09 Параллакс

**Как далеко до звезд? Метод параллакса основан на том, что при взгляде с движущейся Земли кажется, будто близкие объекты перемещаются быстрее удаленных. Легкое изменение положения наблюдателя говорит нам, что ближайšie звезды в миллионы раз дальше от Земли, чем Солнце. Большинство этих звезд размещается на диске, образующем нашу Галактику, который мы видим как полосу на небе и называем Млечным Путем.**

Когда стало понятно, что звезды — не дырочки в стеклянных сферах, а мириады далеких солнц, возник вопрос, насколько они далеки. Узоры, в которые складываются далекие звезды, называются созвездиями — охотник Орион, Большая Медведица, Южный Крест. Но чтобы понять, как они расположены в космосе, потребовались столетия.

Первая подсказка — в том, что небо усыпано звездами не равномерно: большая их часть лежит в светлой полосе, которую мы зовем Млечным Путем. Эта полоса ярче всего в Южном полушарии, особенно вблизи созвездия Стрельца, где извечная панорама отмечена черными облаками и яркими клочками туманностей. Сегодня мы знаем, что полоса Млечного Пути состоит из миллиардов тусклых звезд, которые сливаются для наших глаз в единое неяркое сияние. Если составить карту их расположения, станет видно, что звезды собраны в спиральные рукава. Солнце находится в одном из этих спиральных рукавов, в тихом галактическом пригороде. Но как это вычислили?

**Млечный Путь** *Via Lactea* по-латыни, Млечный Путь зачаровывал древних. Греческие философы, включая Аристотеля и Анаксагора, допускали, что это и впрямь море далеких горящих звезд. Но проверить это они не имели возможности. Лишь в 1610 году, когда Галилей

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1573

Диггс предложил метод параллакса

1674

Гук обнаружил смещение гаммы Дракона

наставил на небо свой телескоп, этот туман рассеялся и открылось множество отдельных звезд.

Над распределением звезд в трех измерениях космоса задумывался философ Иммануил Кант. В трактате 1755 года он рассуждал, что звезды Млечного Пути распределены по гигантскому диску, удерживаемые силой тяготения, — в точности как планеты в нашей Солнечной системе вращаются вокруг Солнца в единой плоскости. Звезды образуют полосу на небе, потому что мы смотрим на них со своего места в этом диске.

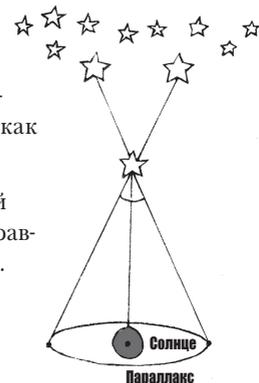
В 1785 году британский астроном Уильям Гершель изучил форму Млечного Пути, кропотливо наблюдая за сотнями звезд. Нанося на карту их местоположение, он понял, что в одной области неба их намного больше. Гершель предположил, что Солнце находится на диске Млечного Пути, а не в его центре, как представлялось ранее.

**Далеко-далеко** Хотя когда-то считалось, что все звезды размещаются на одинаковом расстоянии от Земли, астрономы постепенно пришли к пониманию, что это маловероятно. Звезды распределены явно неравномерно. Теория тяготения, выдвинутая Исааком Ньютоном, предполагала, что, если звезды достаточно массивны, они притянулись бы друг к другу, как планеты притягиваются к Солнцу. Но, поскольку звезды не скученны, видимо, это тяготение недостаточно сильно. Следовательно, звезды располагаются очень далеко друг от друга. Рассуждая таким образом, Ньютон стал одним из первых, кто понял, как далеки на самом деле звезды.

Астрономы искали способы определить расстояние до той или иной звезды. Один из методов основан на яркости: если яркость звезды сравнима с солнечной, она должна уменьшаться с квадратом расстояния. Исходя из этого допущения голландский физик Кристиан Гюйгенс (1629–1695) вычислил расстояние до самой яркой звезды в ночном небе — Сириуса. Он подобрал размер маленькой дырочки в экране

## Угловые секунды

Астрономы измеряют расстояния в небе, используя проекции углов. Размер Луны — примерно половина градуса. Градус делится на 60 угловых минут ( $'$ ), которые, в свою очередь, разбиваются на 60 угловых секунд ( $''$ ). Получается, угловая секунда — это  $1/3600$  градуса.



**1725**

Брэдли выдвигает теорию звездной aberrации

**1755**

Кант постулирует, что Млечный Путь — это диск

**1785**

Гершель оценивает размеры диска Млечного Пути

**1838**

Бессель измеряет параллакс

**1989**

Запущен спутник HIPPARCOS («Гиппарх»)

## Парсеки

Измерения звездного параллакса часто определяются как разница расположения звезды при наблюдении с Земли и с Солнца. Это угол, под которым был бы виден средний радиус земной орбиты из центра масс звезды. Парсек (3,26 световых года) определяется как расстояние, для которого этот параллакс составляет одну угловую секунду.

так, чтобы сквозь нее проходило количество солнечного света, равное количеству света от звезды. Рассчитав размер дырочки относительно размера Солнца, он сделал вывод, что Сириус должен быть в десятки тысяч раз дальше. Позднее Ньютон поместил Сириус на расстояние в миллион раз большее, чем Солнце, сопоставив его с яркостью Сатурна. Ньютон почти угадал: Сириус лежит примерно на половине этого расстояния. Так открылась необъятность межзвездного пространства.

**Параллакс** Но не все звезды обладают той же яркостью, что Солнце.

В 1573 году британский астроном Томас Диггс предложил применять к звездам географический метод параллакса. Параллакс — это смещение угла, под которым вы видите объект при движении относительно него. Когда вы путешествуете по пересеченной местности, направление на холм неподалеку меняется быстрее, чем на отдаленную гору. А если вы едете на машине, деревья вблизи пролетают мимо быстрее, чем те, что дальше. Видимое положение звезд, наблюдаемых с Земли, сдвигается из-за движения нашей планеты по эллиптической орбите вокруг Солнца, и размер смещения зависит от их расстояния до нас.

Астрономы кинулись изучать эти годовые смещения звезд — чтобы и измерить расстояние до них, и подтвердить гелиоцентрическую модель Солнечной системы. Но в процессе они наткнулись на кое-что другое. В 1674 году Роберт Гук опубликовал данные о смещении гаммы Дракона, яркой звезды, которая проходит через зенит на широте Лондона, что позволило Гуку произвести точные наблюдения через специально устроенную дырку в крыше собственного дома. В 1680-м Жан Пикар сообщил, что Полярная звезда смещается на 40 угловых секунд каждый год, а Джон Фламстид в 1689 году подтвердил эти сведения.

Желая разобраться, что означали эти изменения, Джеймс Брэдли повторил наблюдения и тоже зарегистрировал сезонное смещение гаммы Дракона — в 1725 и 1726 годах. Но эти смещения не были похожи на параллакс: размер смещения должен был бы зависеть от расстояния до звезды, но все наблюдаемые звезды смещались одинаково.

Брэдли это озадачило. Спустя пару лет он понял, в чем дело: как флюгер на мачте меняет направление при повороте корабля, показывая сумму направлений ветра и корабля, так и движения Земли меняют то, как мы видим звезды. По мере нашего движения вокруг Солнца все звезды слегка покачиваются.

**Роберт Гук (1635–1703)**

Роберт Гук родился на острове Уайт в Англии, в семье викария. Он учился в оксфордском колледже Крайст-Чёрч и работал ассистентом у физика и химика Роберта Бойля. В 1660-м Гук открыл закон упругости и вскоре после этого был принят на должность куратора экспериментов на встречах Королевского общества. Через пять лет он опубликовал работу *Micrographia*, в которой впервые использовал термин «клетка», сравнив вид клеток растений под микроскопом с монашескими кельями\*. В 1666 году Гук помогал заново отстраивать Лондон после Великого

пожара, работая вместе с Кристофером Реном над Королевской обсерваторией в Гринвиче, Монументом в память о пожаре и Вифлеемским королевским госпиталем (известным как Бедлам). Умер он в Лондоне в 1703 году и похоронен на лондонском кладбище Бишопсгейт, но в XIX веке его останки перенесли в Северный Лондон, и их нынешнее местонахождение неизвестно. В феврале 2006 года была найдена копия записей Гука со встреч Королевского общества, которые считались потерянными, теперь они хранятся в Королевском обществе в Лондоне.

\* *Cell* (англ.) — и клетка, и келья.

Это неожиданное открытие, названное звездной аберрацией, также подтверждает, что Земля обращается вокруг Солнца.

Параллакс не обнаружился, пока не были созданы достаточно точные инструменты. Первые успешные измерения сделал Фридрих Бессель в 1838 году — для звезды 61 в созвездии Лебедя.

Поскольку звезды очень далеко, их параллакс очень мал и его трудно измерить. Например, параллакс ближайшей к нам звезды, Проксимы Центавра, меньше угловой секунды, это в 50 раз меньше ее аберрации. Сегодня спутники вроде «Гиппарха»\*\* Европейского космического агентства измерили точное расположение 100 000 ближних звезд, а из этих данных вывели расстояния и до многих других. Тем не менее параллакс можно увидеть только на расстоянии примерно 1% от размеров нашей Галактики.

**«Если я и видел  
дальше других, то  
потому, что стоял  
на плечах у гигантов»**

**Исаак Ньютон,  
из письма Роберту Гуку (1676)**

\*\* HIPPARCOS — аббревиатура *High Precision Parallax Collecting Satellite* (спутник наблюдений за параллаксом высокой точности).

**В сухом остатке:  
Смещение звезд  
первого плана**

# 10 Великий спор

**Встреча двух умов в 1920-х годах заложила основу величайшего изменения человеческих представлений о Вселенной: наша Галактика — всего лишь одна из великого множества в космосе. Это была перемена тех же масштабов, что мысль о вращении Земли вокруг Солнца и что Солнце — одна из множества звезд. Великий спор поставил вопросы, ответы на которые показали, что за пределами Млечного Пути существуют и другие галактики.**

Каковы размеры Вселенной? В 1920 году этот вопрос свелся к постижению размеров Млечного Пути. За предыдущие столетия астрономы привыкли к мысли, что звезды — это далекие солнца, такие же, как наше, рассыпанные по небу в форме диска. Проекция плоскости диска на небо образует полосу Млечного Пути, так мы называем и нашу Галактику.

Но Млечный Путь — это больше чем звезды. В нем содержится множество клубящихся облаков, или туманностей, — например, клякса в поясе созвездия Ориона, именуемая туманностью Конская Голова из-за напоминающей лошадь формы темного облака внутри нее. Большинство туманностей — неправильной формы, но некоторые имеют форму эллипса с наложенными очертаниями спиралей. Известный пример — туманность Андромеды в одноименном созвездии.

Другие составляющие Млечного Пути — звездные скопления; пример — Плеяды, группа подернутых сумраком голубых звезд, видимых невооруженным глазом. Есть на небосводе и более плотные звездные скопления, в том числе и шаровые, то есть шары-сгустки из сотен тысяч звезд. В Млечном Пути известно около 150 шаровых скоплений.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1665**

Немецкий астроном-любитель Абрахам Иле открывает шаровые скопления

**1784**

Открыты переменные звезды — цефеиды

В начале XX века астрономы начали составлять карту небесной геометрии, опираясь на знания о расположении объектов в трехмерном пространстве. Особенно они старались определить форму Млечного Пути — тогда считалось, что он содержит все в известной нам Вселенной.

**Спор** 26 апреля 1920 года двое великих американских астрономов сошлись в споре о размерах Млечного Пути. Это произошло в Вашингтонском Смитсоновском музее естественной истории, после заседания Американской академии наук. Среди публики было множество известных ученых, включая, предположительно, и Альберта Эйнштейна. Считается, что этот спор спровоцировал перемену в нашем понимании масштабов Вселенной.

Первым выступал Харлоу Шепли, блестящий молодой астроном из обсерватории на горе Уилсон в Калифорнии. Ему противостояла фигура посолднее, Хебер Кёртис, директор обсерватории Аллегейни в Питтсбурге, Пенсильвания. Эти двое представили доводы к своим оценкам размеров Млечного Пути, основывавшиеся на разных астрономических мерах, в которых они знали толк.

Шепли измерил расстояние до шаровых скоплений. Он обнаружил, что они намного дальше ожидаемого, и это привело его к мысли, что наша Галактика в 10 раз больше прежних предположений — примерно 300 000 световых лет в диаметре. Также он увидел, что в одной части неба было больше шаровых скоплений, чем в другой, а значит, Солнце расположено далеко от центра галактики — по прикидкам Шепли, примерно в 60 000 световых годах от него, или примерно на полпути. Такая картина поражала воображение. Солнце оказалось обычной звездой, а вовсе не центром всего и вся.

Кёртис же сосредоточился на понимании другого вопроса — природы спиральных туманностей. Особенности этих структурированных облаков привели его и других ученых к мысли, что это особый класс объектов, расположенных за пределами Млечного Пути. Эта идея согласовывалась с тогдашними представлениями о небольшом радиусе Млечного Пути.

Галактика  
Андромеды



**1789**

Гершель каталогизирует и именует шаровые скопления

**1908**

Генриетта Суон Ливитт открывает свойства цефеид, полезные для вычисления расстояний в космосе

**1920**

Великий спор Шепли и Кёртиса

**1924**

«Хаббл» измеряет расстояние до туманности Андромеды, расположенной далеко за пределами Млечного Пути

**Развитие научного знания ничуть не делает нашу Вселенную и нашу внутреннюю жизнь в ней менее таинственными**

**Дж. Б. С. Холдейн, «Наука и философия: гиффордовские лекции, университет Глазго, 1927, 1929 гг.»**

Расхождение в результатах указывало на крупную неувязку, с которой астрономам требовалось разобраться. По новым расчетам Шепли, Млечный Путь получался до того громадным, что существование туманностей Кёртиса за пределами нашей Галактики оказывалось под сомнением. Полученные данные предстояло осмыслить тщательнее.

**Аргументы** Оба астронома представили доказательства своих идей. Шепли настаивал

на полученных им измерениях расстояний между шарообразными скоплениями и выводах, что Млечный Путь настолько огромен, что все, видимое нам в ночном небе, должно входить в него. Его методика измерения опиралась на переменные звезды, чей период мерцания однозначно связан с их яркостью, — такие звезды называются цефеидами в честь первой такой открытой звезды, Дельты Цефея. По сути, эти яркие пульсирующие звезды — как лампочки известной мощности, а зная мощность, можно вычислить расстояние до них.

Кёртис был осторожнее. Он возразил, что Млечный Путь не может быть таким огромным — вероятно, расстояние до цефеид рассчитано неверно — и свойства спиральных туманностей таковы, что они должны располагаться за пределами нашей Галактики. Спиральные туманности ведут себя как уменьшенные копии Млечного Пути. Как и в Млечном Пути, в них содержатся похожие количества взрывающихся звезд, они вращаются, как и наша Галактика, они примерно того же размера, и в некоторых есть темные полосы вдоль их большей оси, указывающие, что эти галактики имеют форму диска. Да и выглядят они как другие галактики, то есть наша — не единственная.

Кто оказался прав? Спор окончился вничью, без явного победителя. Оба были в чем-то правы, а в чем-то заблуждались. Оба не ошиблись — в пределах своей области знаний. Шепли вычислил расстояния близко к истине.

## Световой год

Световой год — расстояние, которое свет проходит за один земной год. Свет движется со скоростью 300 000 км в секунду. Следовательно, за год — около 10 триллионов километров. Млечный Путь примерно 150 000 световых лет в диаметре, до галактики Андромеды — 2,3 миллиона световых лет.

## Астрономические единицы

Для Солнечной системы астрономы иногда используют меру расстояния, называемую астрономической единицей (а. е.). Это среднее расстояние между Землей и Солнцем, которое составляет около 150 миллионов километров. Меркурий находится примерно в 1/3 а. е., а Плутон в среднем — в 40 а. е. от Солнца.

И Солнце действительно далеко от центра. Но, что важнее, Кёртис оказался по большому счету прав в том, что туманности лежат за пределами нашей Галактики — они «островные вселенные». Доказательство было получено в 1924 году, когда Эдвин Хаббл свел воедино оба набора доводов. Он измерил расстояние до туманности Андромеды, одной из ближайших соседних с нами галактик, с помощью методики Шепли — с переменными звездами-цефеидами, и обнаружил, что она намного дальше, чем шаровые скопления. Она действительно располагалась далеко за пределами Млечного Пути.

**Последствия** Хотя спор свелся в основном к изложению доводов и не стал боксерским спаррингом с явным победителем, он очертил круг вопросов, на которые астрономам предстояло искать ответы. И потому этот спор — критическая точка изменения наших взглядов на масштабы Вселенной.

Как Коперник отказал Земле в месте по центру Вселенной — в пользу Солнца, так Шепли вывел Солнце из центра Млечного Пути. Кёртис пошел еще дальше и показал, что Млечный Путь не единственный и не уникальный — он всего лишь одна из миллиардов галактик. Место человечества в космосе воистину шатко.

**В сухом остатке:  
Царство галактик**

# 11 Парадокс Ольберса

**Если Вселенная бесконечна, почему же ночное небо темно, а не сплошь покрыто звездами? Над этим несоответствием ломал голову в XIX веке немецкий астроном Генрих Ольберс. С современной точки зрения его ответы очень глубоки: Вселенная не продолжается беспредельно, и в ней конечное количество звезд. Подобные мысли подготовили почву для теории Большого взрыва и других принципов космологии.**

Каждую ночь мы делаем глубочайшее наблюдение за Вселенной: ночное небо — темно. Это кажется само собой разумеющимся: Вселенная — в основном пустота. Но если вдуматься, это вовсе не очевидно. Опушки посреди леса и не увидишь. По той же причине, будь Вселенная бесконечна, полог звезд застил бы небо. Должно бы быть светло как днем. Но это явно не так.

**Блестящая идея** Парадокс темного ночного неба, отмеченный в XVII веке Иоганном Кеплером, точнее сформулировал в 1823 году Генрих Ольберс. Он рассудил: простирайся Вселенная бесконечно во всех направлениях, мы, куда б ни посмотрели, уперлись бы взглядом в какую-нибудь звезду. А если все звезды подобны Солнцу, любая точка неба должна быть столь же яркой.

Пусть звезды — лишь крошки в море космической пустоты, но если они распределены равномерно и мы взглянем как можно дальше, то их должно хватить, чтобы покрыть все небо. Далекие звезды кажутся нам тусклее, их яркость быстро падает согласно ньютоновскому закону обратных квадратов. Но это не может объяснить недостаток света, потому что чем дальше мы смотрим, тем больше пространства открывается нашему взгляду. Хоть далекие звезды и не так ярки, их пропорционально больше, поэтому их свет должен суммироваться.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1610**

Кеплер отмечает  
темноту ночного неба

**На краю** Этот парадокс можно разрешить несколькими способами. Каждый из них открывает свои истины о Вселенной. Первое объяснение: у Вселенной есть край. Она не беспредельна, и число звезд в ней конечно. Не в любой части неба есть звезда, поэтому небо не будет ярким, как Солнце. Эта мысль согласуется с нашим пониманием, что у Вселенной было начало и она успела расшириться только до определенных размеров.



Есть и другие объяснения редкости звезд в космосе. Может быть, далеких звезд меньше, чем близких. Или так кажется — вероятно потому, что, глядя в космос, мы смотрим в прошлое. Как в археологическом прошлом было меньше людей — а когда-то людей не было вообще, — так и звездное население Вселенной могло меняться. Не исключено, что звезды — явление сравнительно недавнее, а значит, глядя в прошлое, мы видим их меньше, поскольку многие из них тогда еще не родились.

Вселенная подобна машине времени: свет движется с фиксированной скоростью в 300 тысяч километров в секунду, поэтому свет от далеких звезд приходит к нам позже, чем от близких. От Солнца свет доходит к нам за 8 минут, а от следующей ближайшей звезды, Альфы Центавра, — за четыре года. Звезды на другой стороне Млечного Пути отстоят от нас на 100 000 световых лет: мы видим их такими, какими они были сотни тысяч лет назад. Свет одной из ближайших галактик, Андромеды, достигает нас за два миллиона лет. Это самый далекий объект, видимый невооруженным глазом.

Получается, что, глядя в глубины Вселенной, мы смотрим в прошлое, и далекие звезды выглядят моложе, чем близкие, потому что их свет шел до нас очень долго. Это могло бы помочь разрешить парадокс Ольберса, если бы молодые звезды встречались реже. Одна из причин, почему звезд в далекой, молодой Вселенной может быть меньше: многие тогда еще не родились. Звезды, подобные Солнцу, живут около 10 миллиардов лет (крупные звезды меньше, маленькие — дольше). Словом, звезды существовали не всегда.

Другое объяснение таково: вероятно, мы видим меньше далеких звезд, потому что их свет выходит за пределы видимого спектра, из-за чего они кажутся тусклее. Красное смещение из-за расширения Вселенной имело бы

**1832**

Ольберс формулирует парадокс, названный в его честь

**1912**

Весто Слайфер измеряет красное смещение галактик

**1929**

Хаббл открывает расширение Вселенной

**1965**

Пензиас и Уилсон открывают реликтовое излучение

## Световое загрязнение

Темное небо найти все труднее. Из-за светового загрязнения над городами видно все меньше звезд. В центрах мегаполисов видны лишь десятки звезд, а десятилетия назад можно было разглядеть сотни. В большинстве городов дугу Млечного Пути и не заметишь. Астрономы обеспокоены, что люди могут потерять связь с красотой ночного неба, со зрелищем, которое поколениями вдохновляло и ученых, и обычных людей.

Многие организации стараются оповещать людей об этой исчезающей части культуры и ратуют за внедрение технических усовершенствований вроде энергосберегающего освещения, ориентированного вниз, к земле, а не в небо, или включаемого датчиками движения. Мы стремимся сохранить любимые земные пейзажи, с той же целью в наши дни организуют и государственные заповедники темного неба.

подобный эффект: далекие звезды казались бы краснее. Или же их было бы видно только в инфракрасном спектре, что также могло бы ограничить количество света, доходящего до нас из дальних уголков Вселенной.

Предлагались и более необычные идеи — например, что далекий свет заслонен копотью взвешенных цивилизаций, игольчатыми частицами железа или странной серой пылью. Но любой поглощенный свет перешел бы во вторичное излучение в виде тепла и проявился бы в другой части электромагнитного спектра. Астрономы проверили свет в ночном небе на всем спектре, от радиоволн до гамма-лучей, и не нашли никаких свидетельств, что видимому звездному свету что-то препятствует.

**Темные века** Получается, мы можем многое узнать о нашей Вселенной просто из черноты ночного неба. Космос ограничен по размерам и возрасту, и звезды существовали не всегда. Эти представления лежат в основе современной космологии. Самым старым видимым звездам около 13 миллиардов лет, из чего мы можем заключить, что Вселенная появилась раньше. Парадокс Ольберса предполагает, что она не может быть значительно старше этого возраста, иначе мы видели бы поколения звезд постарше, а мы их не наблюдаем.

Свет от старейших видимых галактик сильно смещен в красный, и они выглядят краснее других галактик и звезд по соседству. Такие далекие объекты трудно увидеть — не только из-за того, что они тусклее, но и потому, что небольшая часть их света сдвинута в инфракрасный спектр. Чтобы обнаружить их, астрономам требуются специальные телескопы и инструменты. Поэтому

**«Если вы, как я, смотрели на звезды и пытались разобраться, что́ видите, вы тоже стали раздумывать, почему Вселенная существует»**

**Стивен Хокинг, из программы американского телеканала Пи-би-эс (1997)**

нам известны лишь немногие звезды и галактики молодой Вселенной. Астрономы даже дали название временам, когда зажглись первые звезды, — космические «темные века», поскольку галактики, зародившиеся в ту пору, так сильно смещены в красный, что практически исчезают из виду. Цель астрономов — попытаться найти эти перворожденные объекты и понять, из чего они получились и как под действием тяготения из крошечных семян растут звезды и галактики.

Ольберс ничего этого не знал, но задавал те же вопросы, что занимают сегодняшних космологов. Накопленные сведения дополняют представления о Большом взрыве — теорию о том, что Вселенная возникла в результате колоссального взрыва примерно 14 миллиардов лет назад.

**В сухом остатке:  
У Вселенной  
есть предел**

# 12 Закон Хаббла

**Расширение нашей Вселенной открыл в 1920-х годах американский астроном Эдвин Хаббл. Он увидел закономерность в движениях галактик: самые далекие удалялись от нас быстрее всего. Соотношение скорости и расстояния известно как закон Хаббла. Эта знаменательная находка привела к теории Большого взрыва.**

История астрономии — череда рывков в понимании нашего места во Вселенной. Открытие вращения Земли вокруг Солнца, а не наоборот, в XVI веке тревожило умы, но открытие Хаббла в 1920-х, что Вселенная расширяется, оказалось настоящим потрясением даже для современной аудитории. Хаббл вывел этот важнейший факт из наблюдений в телескоп за галактиками — или туманностями, как их тогда называли из-за их облакоподобной природы — и соотнес их движения с расстоянием от нас. Измерив эти параметры для многих галактик, он увидел закономерность. Во-первых, все далекие галактики удаляются от нас и лишь немногие ближние приближаются. А во-вторых, скорость, с которой галактики удаляются, пропорциональна расстоянию, то есть самые дальние галактики улетают прочь быстрее всего.

**Космическое расширение** Соотношение скорости галактики к расстоянию — около 72 километров в секунду на мегапарсек (мегапарсек, или миллион парсеков, составляет 3 262 000 световых лет, или  $3 \times 10^{22}$  метров) — известно как постоянная Хаббла, она показывает скорость расширения Вселенной.

**История астрономии есть история раздвигающихся горизонтов**

Эдвин Пауэлл Хаббл, «Царство туманностей» (1936)

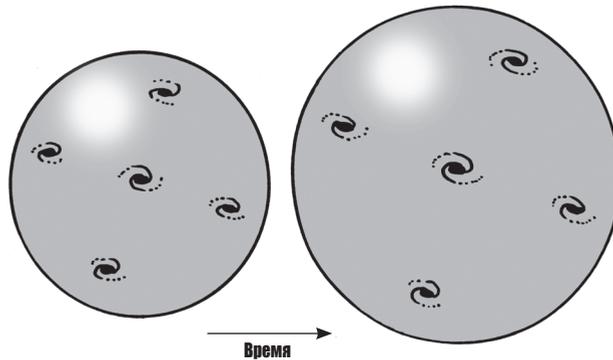
**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1918**

Весто Слайфер измеряет красное смещение туманностей

**1920**

Шепли и Кёртис спорят о размерах Млечного Пути



Вселенная расширяется, потому что пространство (на самом деле единое пространство-время) между галактиками растягивается. Тяготение все еще удерживает отдельные галактики вместе, но они с течением времени оказываются все дальше разбросаны, как изюминки в поднимающемся пироге.

Наблюдения Хаббла подоспели в критический момент, когда ученые пристально исследовали ночное небо. Изобретение в XIX веке фотографии помогло более систематическому изучению — на изображениях неба можно было искать разные необычные объекты. Развились и методы создания телескопов: приборы с достаточно большой апертурой — например, телескоп Гукера на горе Уилсон, с зеркалом в сто дюймов диаметром — позволили наблюдать даже очень неяркие объекты.

**Новые горизонты** Открытия происходили одно за другим.

К 1920 году астрономы уже знали, что Солнце — лишь одна из многих звезд, и классифицировали множество разных типов — от холодных красных звезд до горячих голубых. Но в ночном небе таилось еще много сюрпризов. На черном фоне виднелись бледные пятна, именуемые туманностями. Некоторые из них оказались газовыми облаками, в которых рождаются звезды, — или отслаивающимися оболочками умирающих звезд. Но некоторые другие выглядели иначе — со спиральными узорами. В знаменитом споре (см. с. 40) астрономы Харлоу Шепли и Хебер Кёртис представили доказательства в поддержку своих теорий о происхождении туманностей. Шепли считал, что они находятся внутри нашей Галактики, Кёртис — что за ее пределами. В том же десятилетии Хаббл доказал, что прав был Кёртис.

**1922**

Александр Фридман публикует модель Большого взрыва

**1929**

Хаббл и Милтон Хьюмсон открывают закон Хаббла

**1990**

Запущен космический телескоп «Хаббл»

**2001**

Космический телескоп «Хаббл» устанавливает точное значение постоянной Хаббла

## «Представление о расширяющейся Вселенной не исключает создателя, но налагает ограничения на возможную дату его трудов!»

Стивен Хокинг, «Краткая история времени. От Большого взрыва до черных дыр» (1988)

\* Пер. Н. Смородинской. Хаббл измерил расстояние до одной из самых ярких и заметных спиральных туманностей — в созвездии Андромеды. Применяв телескоп на горе Уилсон, он проследил за несколькими так называемыми переменными звездами, или цефеидами, чье мерцание позволяло определить расстояние до них. Он однозначно установил, что галактика Андромеды располагается далеко за пределами всего остального в Млечном Пути. Туманности — далекие галактики, такие же, как наша.

Успешно разобравшись с этим вопросом, Хаббл взялся вычислять расстояния до других галактик. Он сравнил полученные данные с красным смещением рассматриваемых галактик (см. с. 34), вычисленным на основе отклонений длин волн в их спектре, что, подобно эффекту Доплера, позволяет оценить скорость. Хаббл обнаружил, что все известные частоты света оказались краснее ожидаемого, то есть эти галактики летят прочь от нас, как «скорая помощь», когда звук сирены по мере ее удаления снижается.

Сегодняшние астрономы все еще уточняют значение постоянной Хаббла подобными же методиками. Вплоть до 1990-х ее значение было определено лишь с точностью до одного-двух порядков — две группы исследователей называли величины в 50 или 100 км в секунду на мегапарсек. Но дальнейшее исследование с помощью космического телескопа «Хаббл»

### Космический телескоп «Хаббл»

Космический телескоп «Хаббл», запущенный в 1990 году, сделал одни из самых поразительных и популярных снимков космоса. Размером примерно с двухэтажный автобус, 13 метров в длину и 4 метра в ширину, весом 11 тонн, «Хаббл» — телескоп с зеркалом 2,4 метра в диаметре. Набор фотокамер и различных детекторов позволяет ему снимать роскошные изображения

с кристальной четкостью, а также расщеплять свет звезд и галактик на спектральные составляющие. За два десятилетия он показал нам, как рождаются звезды в туманности Ориона и как выглядят далекие галактики. Но его устройство устаревает, и астронавты больше не будут его чинить, а потому его постепенное разрушение неизбежно.

**Мы находим [туманности] все мельче и бледнее, их все больше, и мы знаем, что забираемся все дальше в космос, пока не дотянемся до бледнейших, какие можно обнаружить лишь самыми мощными телескопами, и тогда окажемся на краю известной Вселенной**

**Эдвин Хаббл, «Царство туманностей» (1936)**

и дополнительные наблюдения за реликтовым излучением показали, что настоящее значение, 72 км в секунду, лежит практически точно посередине.

**Возраст Вселенной** Если сейчас Вселенная расширяется, значит, в прошлом она была плотнее. Вероятно, она даже была втиснута в одну точку — отсюда происходит теория Большого взрыва. Зная скорость расширения Вселенной, мы можем вычислить, как давно это случилось, и таким образом прикинуть возраст Вселенной: ей 13,7 миллиарда лет.

Будущее предсказать сложнее. Если расширение продолжится без изменений, Вселенная будет и дальше разбухать, пока галактики не разлетятся так, что видны останутся лишь немногие. Постепенно даже галактики и звезды может растащить в атомную дымку.

**В сухом остатке:  
Расширяющаяся  
Вселенная**

# 13 Шкала расстояний в астрономии

Измерения астрономических расстояний привели к сдвигам парадигм в этой науке. Расстояния до звезд заставили нас почувствовать себя ничтожными, определение размеров Млечного Пути и отдаленность ближайших туманностей открыли космос, полный галактик. В столь грандиозных масштабах нет единого метода, приложимого ко всей Вселенной. Шкала расстояний в астрономии — лоскутное одеяло из множества разных подходов.

Поскольку Вселенная столь велика, измерять расстояния в ней — дело непростое. Линейку, применимую внутри нашей Галактики, до окраин космоса не дотянуть. Так что была разработана уйма подходов, применимых к расстояниям разного масштаба. Там, где методики пересекаются, соседние шкалы можно привязать друг к другу, что дает нам набор делений, именуемый в астрономии шкалой расстояний. Эта шкала охватывает всю Вселенную, от ближайшего района Солнечной системы до ближайших звезд, весь Млечный Путь и дальше, до других галактик, их групп и до границ видимой Вселенной.

Первая ступень этой лестницы — самая крепкая. Расположение ближайших звезд можно точно вычислить при помощи тригонометрического метода параллакса. Как турист вычисляет местоположение далекого горного пика на своей карте, несколько раз на пути определяя азимут, так и астроном на движущейся Земле может понять, где находится звезда, измеряя ее смещение относительно более далеких фоновых звезд.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ****1784**

Открыты переменные звезды — цефеиды

**1918**

Разработана шкала расстояний по цефеидам

Величина этого смещения сообщает астроному, как далеко звезда: близкие звезды смещаются больше далеких. Но расстояние до звезд так велико — ближайшая звезда находится в четырех световых годах от нас, — что эти смещения очень малы и их трудно измерить. Параллакс применим лишь к малой части Млечного Пути. Чтобы продвинуться дальше, нужны другие методы.

**Цефеиды** Следующий шаг шкалы — уникальные звезды. Если точно знать яркость звезды — как будто это космический аналог пропорционально увеличенной стоваттной лампочки или стандартной свечи, — можно вычислить расстояние до нее, замерив ее сравнительную бледность. Яркость падает с квадратом расстояния: звезда вдвое дальше другой, в точности ей подобной, покажется в четыре раза более тусклой. Но фокус в том, чтобы знать собственную яркость исходной звезды. Звезды бывают самого разного размера, формы и цвета, от красных гигантов до белых карликов, и потому все не так-то просто. Но для редких типов звезд способ есть.

Переменные звезды — цефеиды — очень полезные стандартные свечи. Яркость звезды можно вывести из частоты ее мерцания. Достаточно соотнести эту частоту с тем, насколько тусклой кажется звезда в небе, — и можно вычислить расстояние до нее. Звезды типа цефеид достаточно ярки, чтобы их было видно через весь Млечный Путь и даже за его пределами, в других галактиках. Поэтому их можно применять, чтобы разметить район Вселенной вокруг нашей Галактики.

## Космическая пыль

Уязвимость метода стандартных свечей на больших расстояниях состоит в том, что их свет может гасить материя в космосе. В галактиках кавардак: газовые облака, обломки, углеродная копоть, и, если ваша звезда или сверхновая окажется за каким-нибудь источником смога, она покажется бледнее, чем на самом деле. Астрономы стараются обойти это препятствие, тщательно проверяя, нет ли

на отрезке между наблюдателем и звездой космической копоти. Очевидный ее показатель — она меняет цвет звезды, делая ее краснее, как роскошные закаты, которые можно было наблюдать в 1991-м после извержения вулкана Пинатубо и выброса пыли в атмосферу Земли. Астрономы, заметив признаки пыли, делают соответствующую поправку яркости звезды.

**1924**

Хаббл вычисляет расстояние до галактики Андромеды

**1929**

Хаббл вычисляет расширение Вселенной

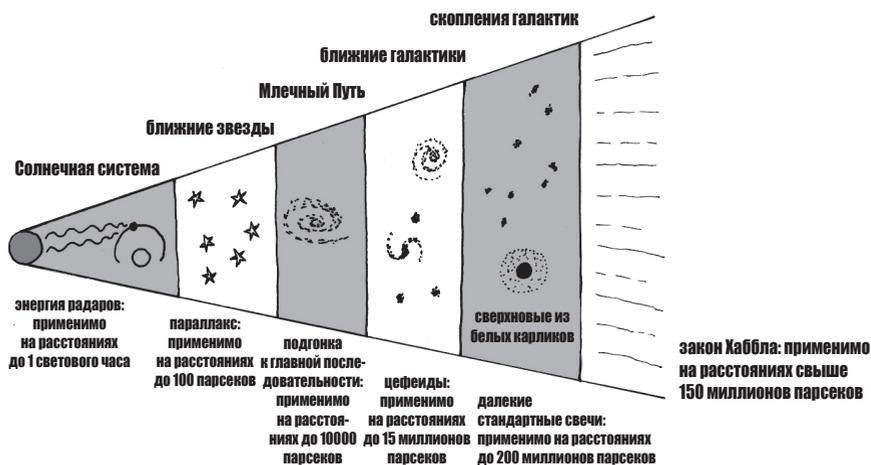
**1998**

Данные по сверхновым звездам указывают на существование темной энергии

**Сверхновые** Если двигаться дальше, нужны стандартные свечи еще ярче. Самые мощные маяки среди звезд — сверхновые, катастрофические взрывы умирающих солнц. Один класс сверхновых, именуемый типом **Ia**, особенно ценен: эти звезды различимы, даже если они расположены в самых дальних пределах Вселенной. Сверхновые типа **Ia** примечательны тем, что их яркость почти одинакова, — а те небольшие различия, что все-таки есть, можно учесть анализом скорости вспышки.

Сверхновые встречаются редко: в галактике размером с Млечный Путь за 50 лет взрывается, может, всего одна, и поэтому они полезнее всего на космических расстояниях, где множество галактик, что увеличивает вероятность увидеть хоть одну — за всю вашу карьеру астронома. Судя по сверхновым в далеких галактиках, на расширение Вселенной влияет таинственный компонент, называемый темной энергией, — своего рода антигравитационная переменная в уравнениях общей теории относительности (см. с. 92).

**Красное смещение** В космических масштабах красные смещения спектральных линий — самый часто применяемый показатель расстояния. По закону Хаббла, чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от нас из-за расширения Вселенной и тем более смещены в красную часть спектра оказываются линии химической эмиссии и поглощения. Но на красное смещение могут влиять локальные движения объектов, поскольку оно указывает лишь на скорость галактики в целом. Красные смещения хороши как примерный показатель, но менее полезны для точных измерений расстояния — и когда внутренние движения соотносимы в масштабах



**«Ступенька лестницы никогда не предназначалась для того, чтобы на ней стоять, но лишь для того, чтобы удержать ногу человека, пока он не поставит другую повыше»\***

Томас Гексли

с общей скоростью расширения. Сегодня мы видим галактики примерно в 80% Вселенной. Астрономы постоянно состязаются за улучшение этого результата.

**Статистические методы** Астрономы пробовали и многие другие методы. Некоторые из них – геометрические: приложение «линеек», длину которых можно определить, применив фундаментальные теории физики к масштабам измерений в небе. Среди этих методов – сравнение средних расстояний между скоплениями галактик и характерных размеров горячих и холодных полос реликтового излучения.

Годятся и статистические методы. Поскольку жизненные циклы звезд хорошо известны, можно считать некоторые фазы точками отсчета. Подобно тому, как по яркости и периоду мерцания отдельных цефеид можно судить о расстояниях, статистическое усреднение позволяет отметить ключевые изменения в яркости и цвете тысяч звезд. Другая методика, приложимая к галактикам, сродни тому, как определяют расстояние по степени размытости галактики: она состоит из миллиардов звезд и вблизи выглядит зернистой, а издали – смазывается.

Шкала расстояний в астрономии имеет устойчивое основание, но делается тем более шаткой, чем дальше в космос уходит. И пусть: необъятность пространства такова, что это не очень важно. От ближайших звезд в нескольких световых годах от нас до пределов Млечного Пути в 100 000 световых годах расстояния измерены хорошо. Расширение космоса приходится учитывать за пределами нашей группы галактик, то есть более чем в 10 миллионах световых лет от нас, и там оценивать расстояния уже сложнее. Тем не менее стандартные свечи показали нам не только то, что наша Вселенная расширяется, но и что существует темная энергия, и благодаря этим осознаниям мы связали все с фундаментальными физическими процессами молодой Вселенной. Может быть, все не так уж шатко.

\* Цит. по: *Leonard Huxley, «Life and Letters of Thomas Henry Huxley»* (1900).

**В сухом остатке:  
Лоскутная шкала**

# 14 Большой взрыв

**Существует немало подтверждений, что у Вселенной был миг творения. Грандиозный взрыв создал время, пространство и все, что в них есть. Электромагнитные силы, элементарные частицы и атомы — все это появилось, пока Вселенная разбухала и остывала. Звезды и галактики — и человечество — постепенно образовались из этого космического супа.**

Представление о Большом взрыве вытекает из того, что сейчас Вселенная расширяется, а значит, в прошлом она должна была быть меньше и даже, возможно, произошла из одной-единственной точки. Все — время, пространство, материя — сотворилось в момент вспышки. Из разбухания и остывания огненного шара с тех пор сложилось все, что мы видим вокруг, — от атомов и химических веществ до звезд и галактик.

Теория имела такой успех, что сейчас это основная версия истории нашей Вселенной. Ее ключевые предсказания оказались верны — в частности, количество атомов самых легких элементов (водорода, гелия и лития) и существование реликтового излучения. Есть, впрочем, и некоторые неоднозначности. Приблизительно равномерное распределение галактик по космическому пространству — они разбросаны повсюду, а не толпятся в каком-нибудь одном месте — предполагает, что молодая Вселенная могла пережить невероятно быстрый скачок роста, называемый стадией инфляции. Причина же, вызвавшая Большой взрыв, сама предмет интереса некоторых теоретиков, которые пытаются разобраться, с чего все вообще началось.

В названии «Большой взрыв» кроется идея, что наша упорядоченная Вселенная появилась из хаотического события. Считается, что хлесткое имя этому явлению придумал в 1949 году британский астроном

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1915**

Эйнштейн публикует общую теорию относительности

**1927**

Фридман и Леметр выдвигают теорию Большого взрыва

**1929**

Хаббл обнаруживает расширение Вселенной

Фред Хойл — так он подчеркнул несуразную природу этой теории, которую вывел из уравнений общей теории относительности Эйнштейна бельгийский математик Жорж Леметр. Хойл предпочитал считать, что Вселенная существовала и будет существовать всегда. Он верил в «устойчивую» Вселенную, где материя и пространство постоянно возникают и уничтожаются. Тем не менее к 1960-м представлениям Хойла пришлось отступить, поскольку накопились доказательства, что Вселенная не бесконечно стара.

**«Потребовалось меньше часа, чтобы создать атомы, несколько сотен миллионов лет — на звезды и планеты и пять миллиардов лет — на человека!»**

**Джордж Гамов,  
«Создание Вселенной» (1942)**

**Три столпа** Успех модели Большого взрыва зиждется на трех важнейших наблюдениях. Первое — расширение Вселенной, обнаруженное Эдвином Хабблом в 1920-х. Мы видим, как галактики разлетаются прочь от нашей согласно закону Хаббла — из-за растяжения пространства-времени. Если вообразить это расширение в обратном порядке, получится, что все во Вселенной должно было когда-то уместиться в малюсеньком пространстве. Подобное представление само собой подводит к тому, что существовала точка во времени, когда Вселенная родилась.

Второе опорное наблюдение — количество легких элементов во Вселенной. Модель Большого взрыва предполагает, что Вселенная в прошлом, тогда еще сжатая, должна была быть намного горячее. В первые мгновения температура достигала таких величин, что даже атомам не хватало стабильности. С ростом и охлаждением Вселенной возник суп из элементарных частиц — кварков, глюонов и других. Всего через минуту кварки слиплись и сформировали протоны и нейтроны. Так появились первые ядра водорода, состоящие из одного протона.

За первые три минуты получилась некая смесь атомов. Протоны и нейтроны соединялись в соответствии с их относительными количествами в легкие атомные ядра — гелия и лития. Но когда Вселенная охладилась настолько, что не могла больше поддерживать создание ядер тяжелее бериллия, космическая химия определилась: в основном водород и гелий, со следами дейтерия (тяжелого водорода), лития и бериллия. Все элементы тяжелее появились намного позже, в звездах, посредством других астрофизических процессов.

**1948**

Открыто реликтовое излучение; Альфер и Гамов предлагают количественную модель ядерного синтеза Большого взрыва

**1949**

Хойл придумывает название «Большой взрыв»

**1965**

Пензиас и Уилсон открывают реликтовое излучение

**1992**

Спутник *COBE* («Эксплорер 66») измеряет полосы реликтового излучения

Пропорции легких элементов, созданных при Большом взрыве, были предсказаны в 1940-х физиками Ральфом Альфером и Джорджем Гамовым. Основную картину подтвердили и самые недавние измерения медленно сгорающих звезд и первичных газовых облаков в нашей Галактике. Особенно показателен в этом отношении дейтерий: он не создается в недрах звезд и легко разрушается. Его присутствие доказывает, что Вселенная не бесконечно стара, и подкрепляет теорию Большого взрыва.

Третий столп теории — открытие в 1965 году слабого эха излучения самого Большого взрыва. Работая над радиосигналами в лабораториях «Белл» в Нью-Джерси, физики Арно Пензиас и Роберт Уилсон нашли слабый источник микроволн, приходящих со всего неба. Вначале они не понимали, что это такое, но скоро выяснилось, что они наткнулись на фоновое микроволновое излучение космоса — реликтовое излучение, море фотонов, оставшихся от очень молодой и горячей Вселенной.

Существование подобного микроволнового сигнала было предсказано в 1948 году Джорджем Гамовым, Ральфом Альфером и Робертом Херманом. Он возникает в определенной фазе после Большого взрыва, когда сформировались первые атомы. После создания легких элементов Вселенная была еще достаточно горяча и атомные ядра не могли соединиться с электронами. И лишь через 400 000 лет отрицательно заряженные частицы (электроны) стали постепенно соединяться с положительно заряженными ядрами и возникли нейтральные атомы. Заряженные частицы, которые рассеивали свет и блокировали его распространение, стали частью атомов, туман рассеялся, и Вселенная сделалась прозрачной. С тех пор свет может свободно проходить сквозь пространство. Слабые реликтовые микроволны — те старые фотоны, сильно смещенные в красный.

Эти три базовых положения остаются пока неприкосновенными, и большинство астрофизиков принимают теорию Большого взрыва. Некоторые все еще держатся теории устойчивой Вселенной, которая так нравилась Фреду Хойлу, но сумму наблюдений в рамках какой-либо другой модели объяснить трудно.

**История и будущее** Что было до Большого взрыва? Поскольку пространство-время появилось вместе с ним, этот вопрос не очень осмыслен — попробуйте ответить, где начинается Земля? Что находится севернее Северного полюса? Тем не менее физики-математики размышляют над причиной Большого взрыва в многомерном пространстве (часто в 11 измерениях) через математику теории струн и М-теории, рассматривающих физические и энергетические аспекты струн и мембран в многомерных пространствах; с помощью этих теорий ученые пытаются понять, что именно запустило Большой взрыв. Некоторые космологи обсуждают существование параллельных вселенных.

## График Большого взрыва

13,7 миллиарда лет (после Большого взрыва):  
сейчас (температура  $T = 2,726 \text{ K}$ )

200 миллионов лет: реионизация — первые  
звезды нагреваются и ионизируют водород  
( $T = 50 \text{ K}$ )

380 000 лет: рекомбинация — газообразный  
водород остывает, формируются молекулы  
( $T = 3000 \text{ K}$ )

10 000 лет: конец эры излучения ( $T = 12\,000 \text{ K}$ )

1000 секунд: распад одиночных нейтронов  
( $T = 500$  миллионов  $\text{K}$ )

180 секунд: нуклеосинтез — формирование  
гелия и других элементов из водорода  
( $T = 1$  миллиард  $\text{K}$ )

10 секунд: аннигиляция пар электрон-позитрон  
( $T = 5$  миллиардов  $\text{K}$ )

1 секунда: отрыв нейтрино  
( $T = 10$  миллиардов  $\text{K}$ )

100 микросекунд: аннигиляция пионов  
( $T = 1$  триллион  $\text{K}$ )

50 микросекунд: сильный фазовый переход —  
кварки соединяются в нейтроны и протоны  
( $T = 2$  триллиона  $\text{K}$ )

10 пикосекунд: электрослабый фазовый пере-  
ход — разделяются электромагнитное и сла-  
бое взаимодействия ( $T = 1\text{--}2$  квадриллиона  $\text{K}$ )

До этого температуры были так высоки, что  
нашего знания физики таких процессов  
недостаточно.

В модели Большого взрыва, в отличие от «устойчивой» модели, Вселенная развивается. Судьбы космоса определяются в основном равновесием между количеством материи, которую стягивает сила гравитации, и другими физическими силами, которые тянут ее в разные стороны, включая расширение Вселенной. Если гравитация победит, расширение может в один прекрасный день остановиться и Вселенная, вероятно, начнет сжиматься, вплоть до события, обратного Большому взрыву, — Большого сжатия. Не исключено, что у Вселенных свои циклы рождения и смерти.

Или же, если перевесит расширение и подобные ему силы отталкивания (вроде темной энергии), они постепенно растащат все звезды, галактики и планеты прочь друг от друга и наша Вселенная окончит свои дни темной пустыней частиц и черных дыр — «большим охлаждением». Еще есть версия о тонко настроенной Вселенной, где силы отталкивания и притяжения находятся в равновесии и Вселенная вечно расширяется, но чем дальше, тем медленнее. Это развитие событий современная космология считает наиболее вероятным.

# В сухом остатке: Миг творения

# 15 Реликтовое излучение

**Открытие реликтового излучения укрепило теорию Большого взрыва. Море слабого электромагнитного излучения, произошедшее из тепла молодой Вселенной, состоит из фотонов, которые высвободились 13 миллиардов лет назад, когда космос стал прозрачным, когда сформировались атомы водорода.**

В 1965 году Арно Пензиас и Роберт Уилсон открыли неожиданное теплое свечение в небе. В работе над микроволновой радиоантенной в Нью-Джерси физики из лабораторий «Белл» обнаружили постоянный слабый тепловой сигнал, приходящий отовсюду. Вначале они решили, что это помехи — возможно, их чувствительный радар засорился голубиным пометом.

Но, услышав доклад принстонского теоретика Роберта Дика, они осознали, что наткнулись на великое открытие. Наблюдаемый тепловой шквал оказался не земного, а космического происхождения. Они обнаружили предсказанные ранее отсветы Большого взрыва. Дик, построивший похожую радиоантенну для поисков реликтового излучения, ликовал меньше. «Ребята, нас обставили», — съязвил он.

**Теплое сияние** Благодаря микроволновому фону космос — океан тепла с температурой примерно три градуса Кельвина (аналог трех градусов Цельсия выше абсолютного нуля). Его характеристики точно предсказаны физикой Большого взрыва. В молодости Вселенная была очень горяча — температура достигала тысяч градусов по Кельвину. Но с расширением она охлаждалась. Ныне температура должна быть в точности 2,73 К, и именно это обнаружили Пензиас и Уилсон.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1901**

Макс Планк объясняет излучение черных тел через кванты

**1948**

Теория Ральфа Альфера и Роберта Хермана предсказывает космический фон в 5 К

Точность измерения температуры реликтового излучения не имеет аналогов. Небо испускает микроволны на частотах с пиком в районе 160,2 ГГц (длина волны 1,9 мм), и это идеальный пример «спектра абсолютно черного тела» — характеристического диапазона частот, выдаваемого чем-то, что идеально вбирает и испускает тепло, как матовая черная печь. В 1990 году спутник НАСА «Эксплорер 66» (COBE)\* показал, что реликтовое излучение — самый точный наблюдаемый пример спектра абсолютно черного тела, хоть оно и изрядно холоднее, чем раскаленная докрасна кочерга.

**Диполь** Если разбираться, небо не везде одинаковой температуры. Микроволны теплее в одном из полушарий на 2,5 милликельвина — или на одну тысячную долю единицы. Это распределение тепла, открытое вскоре после самого реликтового излучения, называется диполем — из-за двух полюсов: холодного и горячего. Разница температур возникает из-за эффекта Доплера, в силу движения Земли: Солнечная система относительно Вселенной движется со скоростью 600 км/с.

Если всмотреться еще внимательнее, на уровне примерно миллионной доли, небо усыпано горячими и холодными точками. Эта рябь очень интересует астрономов, потому что она возникла вскоре после Большого взрыва. Впервые эти точки заметил «Эксплорер 66» — благодаря ему нам известно множество пятен размером с полную Луну. В 2003 году спутник WMAP\*\* создал более подробную карту, на которой различима более мелкая сыпь. Еще точнее их измеряет другой спутник, «Планк».

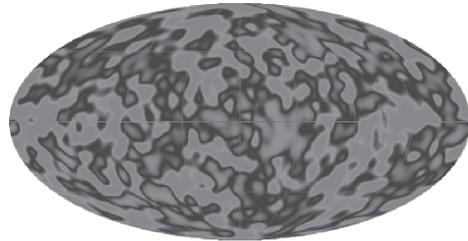
**Рябь** Эти колебания в микроволновом фоне космоса возникли, когда Вселенная была очень горяча. После Большого взрыва космос расширялся и остывал, формировались фотоны, субатомные частицы

## Изменения редко удобны

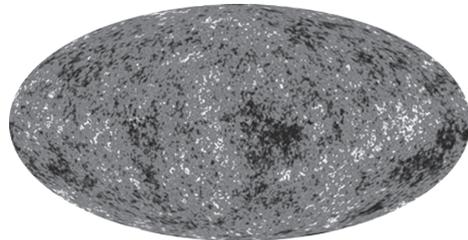
Арно Пензиас,  
Автобиография (1978)

\* COBE (Cosmic background explorer, англ.) — исследователь космического фона.

\*\* WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, англ.) — микроволновой анизотропный зонд Уилкинсона.



WMAP (зонд Уилкинсона для исследования анизотропии микроволн)



COBE (спутник исследования фонового излучения)

1965

Пензиас и Уилсон наблюдают реликтовое излучение

1990

Спутник «Эксплорер 66» (НАСА) точно измеряет температуру реликтового излучения

1992

«Эксплорер 66» открывает космическую рябь

2009

Запущен спутник «Планк» Европейского космического агентства

и, постепенно, — протоны и электроны. Ядра первых легких элементов — водород и немного гелия и лития — сформировались в первые три минуты. В тот момент Вселенная была супом из протонов и электронов, носившихся туда-сюда. Эти частицы были ионизированы, то есть имели электрический заряд: протоны — положительный, электроны — отрицательный, но фотоны рикошетили от заряженных частиц, и потому ранняя Вселенная была густым туманом.

Вселенная охлаждалась. Протоны и электроны стали двигаться медленнее, и примерно через 400 000 лет они смогли соединиться и формировать атомы водорода. Заряженные частицы сливались, и природа космического супа постепенно менялась от ионизированной к электрически нейтральной. Вселенная сделалась морем водорода.

Когда заряженных частиц не осталось, фотоны смогли летать свободно. Мгла рассеялась. Эти самые фотоны, остыв еще больше, теперь составляют микроволновый фон космоса. В то время, согласно красному смещению примерно в тысячу ( $z = 1000$ ), температура Вселенной была около 3000 К, теперь она примерно в тысячу раз холоднее — приблизительно 3 К.

## Излучение абсолютно черного тела

Угли для шашлыка и конфорки электроплит по мере нагрева до сотен градусов Цельсия краснеют, рыжеют и желтеют. Вольфрамовая нить лампы дневного света сияет белым, достигая более 3000 градусов Цельсия, как на поверхности звезды. С ростом температуры горячие тела сначала светятся красным, затем желтым, а при еще более сильном нагревании — и бело-голубым. Это распределение цветов — излучение абсолютно черного тела, потому что темные материалы лучше всего излучают и впитывают свет. Физики XIX века не могли объяснить, почему это так, независимо от задействованного

в эксперименте вещества. Вильгельм Вин, лорд Рэлей и Джеймс Джинс отчасти разрешили эту загадку. Но Рэлей и Джинс предсказывали высвобождение бесконечной энергии на ультрафиолетовых длинах волн и выше — «ультрафиолетовую катастрофу». В 1901 году Макс Планк разобрался с этой неувязкой — объединил физику тепла и света и поделил электромагнитную энергию между субатомными единицами электромагнитного поля, которые назвал квантами. Мысль Планка стала семенем, из которого выросла одна из важнейших областей современной физики — квантовая теория.

«Научные открытия и научное знание получают лишь те, кто гонится за ними без всякой практической цели»

Макс Планк

**Космический пейзаж** Холодные и горячие пятна, которыми усыпан океан фотонов, возникают из-за материи во Вселенной. В некоторых областях космоса материи больше, чем в других, поэтому фотоны, пролетая сквозь разные участки Вселенной, замедляются чуть по-разному, в зависимости от траектории. Точный узор микроволновых колебаний сообщает нам, до чего неравномерно материя распределялась задолго до того, как появились первые звезды и галактики.

Типичные размеры горячих точек тоже о многом говорят. Самые пространственные занимают около одного градуса в небе, что вдвое больше диаметра полной Луны. Ровно столько и предсказывали теоретики, глядя на распределение материи в современной Вселенной и строя проекцию прошлого, с учетом расширения Вселенной. Это совпадение предсказанного и наблюдаемого предполагает, что лучи света путешествуют сквозь Вселенную по прямой. Астрономы говорят, что Вселенная «плоская», потому что лучи не изгибаются и не отклоняются из-за искажений времени-пространства.

В целом история космического микроволнового фона — один из триумфов теоретиков. До сих пор им удавалось предсказывать его характеристики с поразительной точностью. Но может быть, наблюдатели найдут расхождения — нестыковки в данных о горячих точках со спутника «Планк» или в узорах поляризации, которые получают в экспериментах, проводимых сейчас на Южном полюсе, на воздушных шарах и с применением специальных радиотелескопов, — расхождения, из которых родится новая физика.

\* Цит. по:  
Max Plank,  
«The New Science:  
3 Complete  
Works: Where is  
Science Going?  
The Universe  
in the Light of  
Modern Physics;  
The Philosophy  
of Physics  
(Greenwich  
Editions)».

В сухом остатке:  
Теплый фотонный  
океан Вселенной

# 16 Ядерный синтез Большого взрыва

Самые легкие элементы сформировались в первые минуты горячей молодой Вселенной в соотношениях, подтверждающих предсказания теории Большого взрыва. Количества гелия, лития и дейтерия, видимые сегодня в первозданных областях неба, примерно соответствуют тому, что ожидалось согласно этой теории, это в то же время объясняет, почему эти элементы так часто встречаются в звездах. Но низкое содержание дейтерия означает, что Вселенная полна экзотических видов материи.

Главное наблюдение в поддержку теории Большого взрыва — обилие легких элементов во Вселенной. Ядерные реакции в горячем огненном шаре в начале Большого взрыва испекли первые атомные ядра в точных пропорциях. Элементы потяжелее сформировались позже из этих исходных ингредиентов при горении в ядрах звезд.

Водород — самый распространенный атом во Вселенной и главный побочный продукт Большого взрыва. Он же и самый простой: один электрон и один протон. Встречается он и в более тяжелой форме, которая называется дейтерием и состоит из обычного атома водорода с дополнительным нейтроном, что делает его вдвое тяжелее. Еще более редкая форма — тритий, с двумя нейтронами. Следующий элемент — гелий, состоящий из двух протонов, двух нейтронов и двух электронов; за ним следует литий с тремя протонами, обычно четырьмя нейтронами и тремя электронами. Все они были созданы в молодой Вселенной в процессе ядерного синтеза.

**Готовка на газе** Сразу после Большого взрыва Вселенная была очень горяча — кипящий суп из элементарных частиц. По мере

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1920**

Артур Эддингтон предполагает, что горение звезд обусловлено ядерным синтезом

## Статья Альфера—Бете—Гамова

Теория ядерного синтеза Большого взрыва была опубликована в статье 1948 года, у которой есть своя причуда. Основы были разработаны Ральфом Альфером и Джорджем Гамовым, но они пригласили Ханса Бете присоединиться к ним из-за сходства их фамилий с тремя первыми буквами греческого алфавита (альфа, бета, гамма). Эта статья до сих пор веселит физиков.

расширения и охлаждения проявлялись различные частицы — постепенно возникли знакомые протоны, нейтроны и электроны, из которых состоят предметы нашего мира. Когда Вселенной было три минуты, ее температура в миллиарды градусов годилась для формирования ядер самых легких элементов. Протоны и нейтроны сталкивались и соединялись, образуя дейтерий, а его ядра могли соединяться дальше, до гелия. Возможно, получилось и немного трития, а соединение трития с двумя ядрами дейтерия дало чуть-чуть лития.

Предположив, что для этой космической стряпни в горячей молодой Вселенной было доступно определенное количество протонов и нейтронов, на основе рецептов ядерных реакций можно предсказать соотношения легких элементов. Около четверти изначальной массы материи должно стать гелием, лишь 0,01% — дейтерием и еще меньше — литием. Остальное — водород. Сегодня примерно эти соотношения мы и видим, что подкрепляет модель Большого взрыва.

**Элементарные загадки** Теория ядерного синтеза, которую вывели физики Ральф Альфер, Ханс Бете и Джордж Гамов в 1940-х, не просто подтвердила Большой взрыв. Она устранила нестыковки, которые возникли при сравнении предсказаний с наблюдаемым изобилием легких элементов в звездах. Годами было известно, что гелий и в особенности дейтерий распространены шире, чем это могли объяснить тогдашние модели звезд. Тяжелые элементы постепенно накапливаются в звездах путем слияния ядер.

**«Я обычно приговариваю так: когда все станет слишком тяжело, просто зовите меня гелием, самым легким газом, известным человеку»**

**Джими Хендрикс, из последнего интервью Киту Алтэму, Лондон, 11 сентября 1970 г.**

**1948**

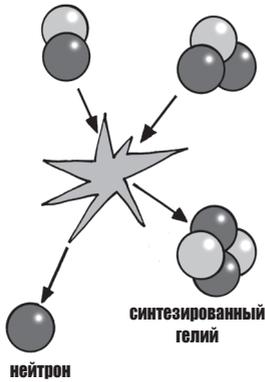
Статья Альфера, Бете и Гамова о первичном ядерном синтезе

**1946/54**

Фред Хойл объясняет формирование более тяжелых элементов

**1957**

Дж. Бёрбедж, Э. М. Бёрбедж, Фаулер и Хойл публикуют знаменитую статью о звездном ядерном синтезе



Водород при таких температурах превращается в гелий, а цепи других реакций формируют углерод, азот, кислород и многие другие элементы. Но гелий получается очень медленно: чтобы накопилось заметное количество, требуется почти вся жизнь звезды. Дейтерий в обычных процессах синтеза, протекающих в звездах, не получается, а, напротив, разрушается в атмосфере звезд. Но если учесть количества, возникшие при Большом взрыве, цифры сходятся.

Чтобы измерить первичные соотношения легких элементов, астрономы разыскивают первозданные области Вселенной и медленно сгорающие старые звезды, которых загрязнение возникшими позднее атомами тяжелых элементов затронуло незначительно. Для этих целей годятся и древние газовые облака, которые мало изменились с первых дней Вселенной. Такие облака располагаются в отдаленных областях межгалактического пространства, в стороне от галактических источников загрязнения, и их можно обнаружить благодаря тому, что они поглощают свет от далеких объектов — например, от ярких квазаров. По спектрам газовых облаков можно судить об их химическом составе.

**Измерения материи** Количество дейтерия, созданное в Большом взрыве, — особенно ценная величина. Поскольку дейтерий получался исключительно из необычных ядерных реакций, его обилие зависит от начального количества протонов и нейтронов в молодой Вселенной. Раз дейтерий так редок, значит, плотность этих первых нуклонов была низкой настолько, что все во Вселенной появиться из них не могло. Должны существовать и другие, более причудливые формы материи.

Современные наблюдения галактик, их скоплений и космического микроволнового фона указывают, что существуют виды материи, состоящей не из протонов и нейтронов. Эта необычная материя — «темная» и не светится; на нее приходится большая часть массы Вселенной. Вероятно, она складывается из диковинных частиц — например, нейтрино — или даже из черных дыр. Изобилие легких элементов показывает, что обычная материя составляет лишь несколько процентов от общей массы Вселенной.

**«Все так, как есть, потому что оно было так, как было»**

Фред Хойл, из радиолекции на Би-би-си-3, 28 марта 1949 г.

### **Ханс Бете (1906–2005)**

Ханс Бете родился в Страсбурге, Эльзас-Лотарингия, изучал и преподавал теоретическую физику в университетах Франкфурта, Мюнхена и Тюбингена. Когда в 1933 году нацистский режим пришел к власти, он потерял работу в университете и эмигрировал сначала в Англию, а затем, в 1935-м, перебрался в Корнеллский университет в США. Во время Второй мировой войны возглавил теоретическое отделение лаборатории Лос-Аламоса, где выполнял вычисления, критически важные для создания первых атомных бомб. Плодовитый ученый, Бете

работал над множеством физических задач. Он получил Нобелевскую премию за теорию звездного ядерного синтеза, а также разобрался и со многими другими вопросами ядерной физики и физики частиц. Позже он вместе с Альбертом Эйнштейном выступал против испытаний ядерного оружия; благодаря его влиянию на Белый дом в 1963-м подписали запрет на ядерные испытания в атмосфере, а в 1973-м заключили Договор об ограничении стратегических вооружений (SALT I / ОСВ I). Фримен Дайсон назвал Бете «величайшим разрешателем проблем XX века».

**В сухом остатке:  
Первые легкие  
элементы**

# 17 Антиматерия

**Частицы могут существовать в зеркально отраженном виде, с обратными значениями энергий и зарядов, — это называется антиматерией. Антиматерия была теоретически предсказана — и вскоре найдена. Но встречается она редко: большая часть Вселенной состоит из обычной материи. Это космическое неравновесие указывает на скрытые процессы физики частиц, из-за которых соотношение материи и антиматерии во время Большого взрыва перекосило.**

Почти все, что мы видим, — от нашего знакомого окружения на Земле до самой далекой галактики — состоит из материи. Карандаши, компьютеры, планеты и звезды — все сделано из одного и того же материала: протонов, нейтронов и электронов. Это может показаться ничем не примечательным, но только на первый взгляд. Потому что есть альтернатива — антиматерия.

Антиматерия — зеркальная форма материи, в которой заряды, энергии и другие физические свойства частиц имеют противоположный знак. Так, антиэлектрон, или позитрон, имеет такую же массу, как электрон, но положительный заряд. Есть противоположные близнецы в антиматерии и у протонов, и у прочих частиц.

**Противоположный знак** Возможность материи с отрицательной энергией впервые допустил британский физик Поль Дирак в 1928 году. Пытаясь вписать величины энергий электронов в уравнения, он понял, что отрицательные энергии так же математически возможны, как положительные. Положительную энергию связывали с обычным электроном, это было понятное явление. Но отрицательная

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ****1928**

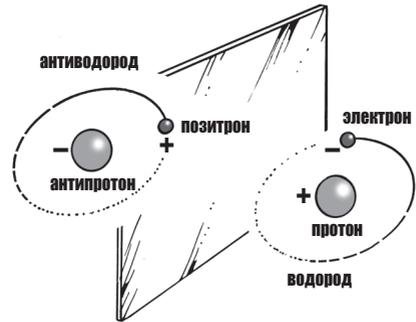
Дирак выводит существование антиматерии

**1932**

Андерсон обнаруживает позитроны

энергия не имела смысла. Вместо того чтобы опустить эту странную переменную, Дирак предположил, что античастицы могут существовать на самом деле, — и за ними началась охота.

В 1932 году Карл Андерсон подтвердил существование позитронов в потоке частиц, создаваемом космическими лучами (энергичные частицы, которые врезаются в земную атмосферу из космоса), заметив положительно заряженную частицу с массой как у электрона. Следующую античастицу — антипротон — обнаружили лишь через два десятилетия, в 1955 году. Для этого пришлось построить ускоритель частиц, в котором антипротон обнаружили в мощных потоках протонов, разогнанных до громадных скоростей. Вскоре после этого был обнаружен и антинейтрон.



На Земле физикам удастся создавать антиматерию в ускорителях частиц — например, в ЦЕРН\* в Швейцарии или в Лаборатории Ферми неподалеку от Чикаго. Когда потоки частиц и античастиц встречаются, они взаимно уничтожаются во вспышке чистой энергии. Масса переходит в энергию согласно уравнению Эйнштейна  $E = mc^2$ .

\* CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) — Европейский центр ядерных исследований.

Но, глядя вглубь Вселенную, мы не видим подобных вспышек. Если бы антиматерия была распределена по всей Вселенной, она бы поглощала любую материю, с какой соприкасается, и тем самым уничтожила бы все обычные частицы — со множеством мелких взрывов энергии. Мы этого не наблюдаем, значит, антиматерии вокруг не так много. На самом деле обычная материя — единственная распространенная форма частиц, которую мы видим. Есть подозрение, что некоторые частицы антиматерии существуют в особых местах — например, вблизи черных дыр. По оценкам

**«Я считаю, что открытие антиматерии было, возможно, величайшим рывком из всех великих рывков в физике нашего столетия»**

**Вернер Гейзенберг, «Представления физика о природе» (1958)**

**1955**

Обнаружены антипротоны

**1965**

Создано первое антиядро

**1996**

Созданы атомы антиводорода

### Поль Дирак (1902–1984)

Поль Дирак был талантливым, но застенчивым британским физиком. Шутили, что его лексикон состоял из «да», «нет» и «не знаю». Однажды он сказал: «В школе меня научили никогда не начинать фразы, если не знаешь, чем ее закончить». Неразговорчивость он восполнил своими математическими способностями. Его диссертация известна своей краткостью и убедительностью: он представил новое математическое описание квантовой механики. Он частично объединил теорию

квантовой механики и теорию относительности, но его также помнят за выдающуюся работу, посвященную магнитному монополю, и за предсказание антиматерии. Когда в 1933-м Дираку присудили Нобелевскую премию, он порывался от нее отказаться — чтобы избежать шумихи, но сдался, когда ему сказали, что из-за отказа шумихи будет еще больше. Ученый не пригласил на церемонию своего отца — возможно, из-за натянутых отношений после самоубийства брата Дирака.

астрономов, лишь крошечная доля — менее 0,01% — вещества во Вселенной состоит из антиматерии. Получается, в начале создания Вселенной существовало неравновесие, в результате которого обычной материи получилось больше, чем ее противоположности — антиматерии.

**Неравновесное сотворение** Вопрос, почему все вышло так, отсылает нас к Большому взрыву. Вселенная, за вычетом мелочей в виде материи и антиматерии, по большей части состоит из различных форм энергии, в том числе — из громадного множества фотонов. Возможно, то небольшое количество материи, которое мы видим сегодня, — лишь остатки после обширной аннигиляции. Не исключено, что при Большом взрыве было создано много материи и много антиматерии, но большая их часть быстро исчезла в столкновениях и осталась лишь верхушка айсберга.

Крохотного перекаса в сторону материи было бы достаточно, чтобы объяснить ее нынешнее преобладание. Согласно некоторым моделям, хватило бы всего одной из 10 000 000 000 ( $10^{10}$ ) уцелевшей в первые же доли секунды после Большого взрыва частицы материи. Оставшиеся частицы

**Немалая часть моей работы — просто играть с уравнениями и смотреть, что они дадут**

Поль А. М. Дирак, из интервью Томасу Куну, 7 мая 1963 г.

могли выжить благодаря небольшим странностям в их квантовых свойствах. Исследователи физики частиц предполагают, что материя и антиматерия могли произойти от общего предка, которого они называют X-бозоном. Эти частицы, которые еще предстоит обнаружить, распались неравномерно и так породили чуть больше материи.

## Симметрия

Как и все зеркальные отражения, частицы и их античастицы связаны разными видами симметрии. Один из них — время. Из-за отрицательной энергии античастицы аналогичны обычным частицам, движущимся назад во времени. Так, позитрон можно представить как электрон, движущийся из будущего в прошлое. Другая симметрия обусловлена зарядами и другими взаимобратными квантовыми свойствами. Третья симметрия касается движения в пространстве. При перемене координатных сеток движение в целом остается неизменным. Но на некоторые виды движения такие изменения все же влияют. Существуют исключительно «левые» нейтрино, они все крутятся в одном направлении, а «правых» нейтрино не бывает. Обратное верно для антинейтрино — они все «правые».

Теории предсказывают, что Х-бозоны могут также взаимодействовать с протонами и вызывать их распад. Это плохо, поскольку означает, что вся материя постепенно исчезнет — превратится в туман еще более мелких частиц. Но, к счастью, происходит это очень медленно. Никто еще не видел распада протона, а это значит, что они очень устойчивы и проживут еще по крайней мере  $10^{17}$ – $10^{35}$  лет, или миллиарды миллиардов миллиардов лет, то есть намного дольше, чем возраст Вселенной на данный момент. Но не исключено, что если Вселенная сильно состарится, то даже нормальная материя может однажды исчезнуть.

# В сухом остатке: Зеркальная материя

# 18 Темная материя

**Большая часть вещества во Вселенной не светится. Темная материя не взаимодействует со световыми волнами, ее можно обнаружить лишь благодаря ее гравитационному влиянию на остальную материю. Астрономы знают, что в галактиках ее много, но не знают, что она такое. Темная материя может существовать в форме незагоревшихся звезд и планет — или экзотических субатомных частиц.**

В 1930-х швейцарский астроном Фриц Цвики попытался взвесить скопление сотен галактик. Измеряя движения отдельных галактик внутри скопления, он вычислил количество массы, которое удерживало их вместе силой тяготения, — так же, зная законы Кеплера, можно вывести массу Солнца из планетарных орбит Солнечной системы. К своему удивлению, он обнаружил, что скопление в 400 раз массивнее, чем все светящиеся галактики и звезды внутри него. Отчего оно такое тяжелое? Цвики предположил, что скопление наполнено некой темной материей, которая проявляется исключительно через гравитацию.

Десятилетия спустя, в 1970-х годах, американский астроном Вера Рубин увидела похожую закономерность в спиральных галактиках. Газообразный водород во внешних областях галактик, которые она изучала, казалось, двигался быстрее ожидаемого. Высокая скорость предполагала, что галактика содержит в сотни раз больше массы, чем можно было приписать одним лишь звездам и газу. Скорость увеличивалась с удалением от центров галактик, из чего следовало, что эта темная материя простирается за пределы видимых звезд, наполняя шарообразное гало, или пузырь, вокруг каждой галактики.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

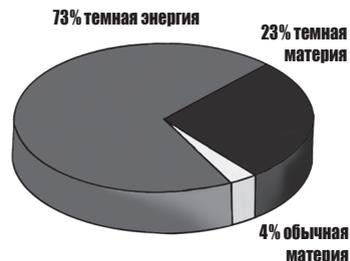
**1933**

Цвики измеряет темную материю в скоплении Кома

**1975**

Вера Рубин показывает, что темная материя влияет на вращение галактик

Ныне астрономы уже определили местонахождение темной материи не только в отдельных галактиках и скоплениях, но и в суперскоплениях — цепях скоплений галактик в широкой паутине, которая тянется через весь космос. Темная материя возникает везде, где действует гравитация, на всех уровнях. Если сложить вместе всю темную материю, получится, что ее в тысячи раз больше, чем светящейся. Вселенная наполнена чем-то, что мы по-прежнему не в силах постичь.



**Таинственная материя** Из чего может состоять темная материя? Мы знаем, что она не из рассеянных облаков газа, поскольку те выдали бы себя, поглощая или испуская электромагнитные волны, а мы этого не видим. Вероятно, это громадные множества бледных звезд или несветящихся планет, которые слишком малы, чтобы разглядеть их по отдельности. Они известны как *MACHO* (*Massive Compact Halo Objects*) — массивные объекты гало галактик. Или же темная материя может состоять из субатомных частиц новых разновидностей, названных *WIMP* (*Weakly Interacting Massive Particles*) — массивные частицы слабого взаимодействия. Они незримы, потому что практически никак не влияют на остальную материю или на свет.

Мы знаем, что *MACHO* существуют: они были замечены в центре нашей собственной Галактики. В сердце Млечного Пути астрономы увидели звезды, которые иногда делались ярче, — ровно так, как это бы произошло, если бы перед ними прошла планета вроде Юпитера. *MACHO* — своего рода линза, тяготение этих объектов искажает пространство-время и преломляет лучи окружающего звездного света. Это преломление фокусирует свет, когда *MACHO* находится прямо перед звездой, и звезда кажется намного ярче. Это явление называется гравитационным линзированием (см. с. 148). Но, хотя некоторые *MACHO* были замечены таким образом

**«Вселенная по большей части состоит из темной материи и темной энергии, и мы не знаем, что они такое»**

**Сол Перлмуттер, из статьи «Космический треугольник: открываем состояние Вселенной», журнал «Science», 28 мая 1999 г.**

1998

Вычислено, что у нейтрино маленькая масса

2000

*MACHO* замечены в Млечном Пути

## Космическая бухгалтерия

Если представить все во Вселенной как энергию, то есть перевести массу в энергию по уравнению Эйнштейна  $E = mc^2$ , получится общий баланс того, из чего она сделана. Сегодня мы знаем, что лишь около 4% Вселенной состоит из барионов (нормальной материи, включающей протоны и нейтроны). Еще 23% — некая таинственная темная материя. Мы практически не имеем понятия, что это такое, но знаем, что она — не из барионов. Вероятно, ее составляют необычные частицы вроде *WIMP*. Остальная Вселенная состоит из принципиально иного материала — темной энергии (см. с. 80).

в центре Млечного Пути, на окраинах нашей Галактики их практически не обнаружено. Словом, их слишком мало, чтобы объяснить всю темную материю в галактиках, — логично предположить, что их в сотни раз больше, чем звезд, а это не так.

Другие формы обычной материи (барионы), состоящие из протонов, нейтронов и электронов, тоже не могут объяснить преобладание темной материи. Зная физику Большого взрыва, астрономы в силах вычислить, сколько барионов должно быть во Вселенной, и результат существенно меньше массы темной материи. Самый жесткий предел обрисован количеством изотопа водорода — дейтерия. Дейтерий получился сразу после Большого взрыва, в ядерных реакциях, которые прямо зависели от количества протонов и нейтронов в молодой Вселенной. Поскольку дейтерий не формируется в звездах, хотя может гореть в них, его количество в первозданных газовых облаках показывает, сколько именно барионов было создано. Но это количество — лишь несколько процентов массы всей Вселенной. Получается, что остальная темная материя существует в принципиально иной форме — например, в виде частиц *WIMP*.

О частицах *WIMP* мы знаем еще меньше, чем о *MACHO*. Их основное свойство — слабое взаимодействие с обычной материей или светом. Их надеются обнаружить разными экспериментальными способами, но в силу природы *WIMP* это очень трудно, и на их место есть много претендентов. Один из

\* Цит. по: *Theo Kourelis. In Quest of the Universe* (2010).

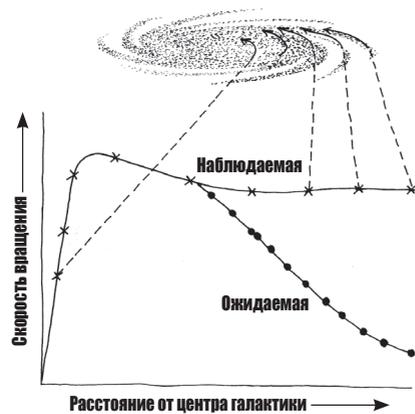
**«Наука развивается лучше всего, когда наблюдения заставляют нас пересмотреть устоявшиеся мнения»\***

Вера Рубин

них — нейтрино. Они встречаются в космосе, это обычный продукт ядерных реакций в звездах, — например, Солнце излучает нейтрино. Когда-то считалось, что они не имеют массы, но за последнее десятилетие физики установили, что крошечная масса у них есть. Если бы нейтрино были распространены широко, они, возможно, внесли бы заметный вклад в общую массу, но, похоже, их все-таки маловато, и всю темную материю ими не объяснишь. А потому все еще есть куда пристроить другие, более экзотические частицы, которые еще предстоит открыть, — например, аксионы и фотино.

Поскольку во Вселенной преобладает темная материя, она играет в судьбах космоса ключевую роль. Борьба между расширением и гравитационным стягиванием Вселенной определяет, что случится с космосом в будущем. Если победит гравитация, Вселенная рано или поздно схлопнется в Большом сжатии. Если в ней слишком мало массы, она будет расширяться вечно. Если же силы тяготения и расширения уравновешены — так нам пока и видится, — расширение может замедлиться, но Вселенная никогда не начнет сжиматься. Как бы то ни было, есть и другая составляющая, которая растягивает Вселенную, — темная энергия.

Внешние области спиральной галактики движутся быстрее из-за темной материи



## В сухом остатке: Темная сторона

# 19 Космическая инфляция

Раз похожие правила приложимы ко всей Вселенной, значит, когда в огненном шаре Большого взрыва сложились физические законы, все во Вселенной было взаимосвязано. Одно из объяснений состоит в том, что через долю секунды после Большого взрыва ранняя Вселенная внезапно расширилась на много порядков, а затем ее размеры менялись минимально.

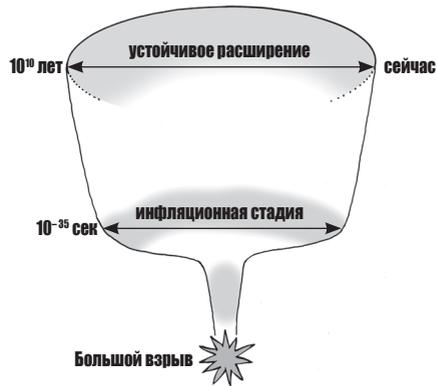
Вселенная обширна. Но глубокий космос выглядит примерно одинаково во всех направлениях. Астрономы смотрят на север и видят миллиарды пятен галактик, рассыпанных в черноте. Смотрят на юг — и видят примерно то же самое. Траектории отдельных галактик могут меняться, но их количества в разных частях неба сравнимы. Но это обязательно должно быть так.

Поскольку свет движется с определенной конечной скоростью, свет далекой галактики достигает нас через некоторое время. Для близких звезд эта задержка составляет годы, а для самых дальних известных объектов она может достигать миллиардов лет. Если вообразить расширение Вселенной в обратном порядке — с учетом закона Хаббла и приблизительного возраста старейших звезд, — можно прикинуть, что Вселенной примерно 14 миллиардов лет. А значит, если она действительно велика и расширяется, где-то далеко должны быть галактики, свет от которых еще не дошел до нас — если на это требуется 15 миллиардов лет или больше.

**Скрытые глубины** Область Вселенной, куда может добраться свет, называется причинно-связанной. Передача информации внутри нее возможна со скоростью света. Например, объекты, которые могли бы послать сигнал на Землю, должны в силу ограниченного возраста Вселенной

лежать внутри сферы радиусом 14 миллиардов световых лет. Но в только что родившейся Вселенной у света не было времени, чтобы пройти хоть сколько-нибудь значительное расстояние. Разные части космоса не могли знать друг о друге. И тем не менее теперь мы видим, что они очень похожи. Как одна часть Вселенной узнала, на что похожа другая?

Эта загадка известна как «проблема горизонта», где горизонт — самая далекая видимая нам часть Вселенной. Ее решение — модель инфляции: сразу после Большого взрыва Вселенная прошла фазу, где резко раздулась. До этого вся наблюдаемая Вселенная была достаточно мала, чтобы зародыши будущих галактик могли обмениваться энергией в космическом супе, — так содержимое космоса уравнилось. После инфляции расширение Вселенной стабилизировалось, но разные области оказались отрезаны друг от друга. Инфляционную модель развил в 1981 году американский физик Алан Гут. Эта модель не только разрешила проблему горизонта, но и дала ответы на другие загадки об однородности Вселенной.



**Гладкость** Одна из загадок — относительная гладкость Вселенной. Галактики разбросаны в космосе достаточно равномерно, а не скучены, как пятна на леопардовой шкуре. Иными словами, в распределении галактик много кротовых холмиков, а не горстка горных массивов. По сути, любая галактика, похоже, выросла там, где была слегка повышенная плотность космической материи, гравитационно стянув вещество. Теория инфляции предполагает, что статистические свойства этих зародышей были продиктованы вероятностями квантовой механики: в энергии горячей молодой Вселенной, пока она была мала, возникали небольшие колебания.

Другое свойство, которое не обязано быть таковым, но присуще всей Вселенной, — ее геометрия. Согласно общей теории относительности Альберта Эйнштейна, массивные объекты могут

**Говорят, что бесплатных обедов не бывает. Но сама Вселенная — грандиозный бесплатный обед ?**

**Алан Гут, из очерка «Рассуждения о происхождении материи, энергии и энтропии во Вселенной» (1983)**

**1992**

Спутник «Эксплорер 66» регистрирует холодные и горячие точки микроволнового фона

**2003**

Зонд Уилкинсона составляет карту космического микроволнового фона

## Пределы плоскости

Недавние наблюдения космического микроволнового фона — света, возникшего, когда рассеялся туман ранней Вселенной, примерно через 400 000 лет после Большого взрыва, теперь регистрируемого в виде слабого микроволнового излучения, — установили жесткие пределы кривизны

Вселенной. Размеры холодных и горячих пятен в микроволновом небе соответствуют предсказаниям теоретической физики, из чего следует, что этот свет дошел до нас по прямой. Так, лучи света остаются параллельными, даже если они путешествовали сквозь Вселенную миллиарды лет.

искажать пространство-время. Если представить пространство-время как резиновое полотно, каждая массивная галактика или звезда делает в нем вмятину, и лучи света изгибаются вокруг нее. В глобальном масштабе, если бы космос содержал достаточное количество массы, пространство-время могло бы изогнуться вокруг самого себя, формируя шар, внутри которого лучи света сошлись бы и циркулировали бесконечно. В другом крайнем случае, если бы расширение Вселенной взяло верх над тяготением, лучи света должны были расходиться.

Если бы траектории лучей света искажались из-за массивных объектов в космосе, на ночном небе был бы полный беспорядок. Может, мы даже видели бы повторяющиеся узоры — или, по крайней мере, искажения, как в кривом зеркале. Но мы в основном ясно видим далекие объекты, а значит, свет везде беспрепятственно проходит по прямой. Астрономы говорят, что геометрия Вселенной «плоская» — параллельные лучи остаются параллельными независимо от проходимого ими расстояния.

**Монополи** Другая загадка, которую теоретически разрешает инфляция, — отсутствие магнитных монополей во Вселенной. Магниты, включая знакомые нам железные, имеют северный и южный полюса, соединенные магнитным полем. Но некоторые теории ранней Вселенной предсказывают, что в том пекле могли сформироваться частицы, обладающие лишь одним полюсом. Их никто не видел, а значит, они, должно быть, очень редки — или уже исчезли. Похоже, их рассеял внезапный рост Вселенной.

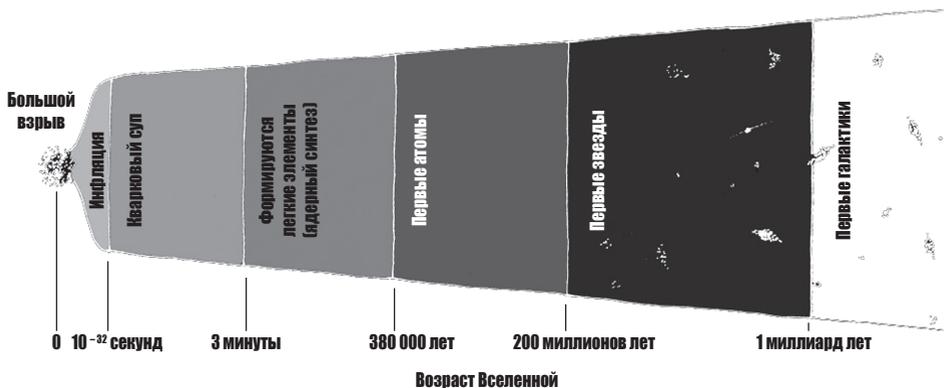
В целом космическая инфляция объясняет, почему Вселенная сохраняет свои свойства на больших расстояниях. Теория утверждает, что Вселенная — единая система, характеристики которой были заданы в первые мгновения Большого взрыва (всего через  $10^{-35}$  секунд после него), до того, как она стала чересчур громоздкой. От малых размеров и причинной связанности

**«Невероятно осознавать, что законы физики могут описать, как все появилось из ничего, в случайной квантовой флуктуации»**

**Алан Гут, из статьи в журнале «Discover» от 1 апреля 2002 г.**

Вселенная расширилась необычайно быстро, со скоростью больше скорости света, многократно умножаясь всего за доли секунды. Легкие изменения плотности сгладились, и установилось тонкое равновесие тяготения и расширения, которое мы наблюдаем до сих пор.

Теория инфляции имела успех, но отношение к ней остается противоречивым. Некоторым физикам, включая Роджера Пенроуза, не нравится, что Вселенная должна была быть в некоем особом состоянии, чтобы выдать этот уникальный рывок роста. Пенроуз работает над другими моделями, в которых Большой взрыв лишь один из прецедентов творения в целой серии вселенских рождений и смертей. Другие ищут необычные особенности в микроволновом фоне космоса и в распределении галактик, которые можно было бы противопоставить выводам инфляционной теории. Но на данный момент инфляция — это полезное и широко принятое объяснение.



**В сухом остатке:  
Экспоненциальный  
ранний рывок роста**

# 20 Темная энергия

**В последние десятилетия астрономам пришлось добавить к модели космоса еще один компонент. Фактор отрицательного давления в космическом вакууме, темная энергия — отталкивающая сила, противоположная тяготению. Мы плохо понимаем ее характеристики, но именно она определит судьбу Вселенной: рассыплется ли та в атомную дымку или схлопнется в черную дыру.**

В 1990-х две группы астрономов взялись оценить скорости расширения Вселенной, используя далекие сверхновые как зонды. Ученые сосредоточились на особом виде взрывающихся звезд типа *Ia*, чью яркость можно предсказать по частоте их мерцания. Исследователи регистрировали взрывы этих звезд в далеких галактиках, собрали данные о сверхновых и построили график яркости относительно расстояния. В 1998 году группа под руководством калифорнийского астронома Сола Перлмуттера объявила о результатах, а вскоре за этой группой последовала и вторая. Их слова потрясли мир.

Самые дальние сверхновые, говорили они, бледнее, чем ожидалось. И не из-за того, что они частично заслонены, — потускнение затрагивало все длины волн света. Если предположить, что далекие звезды устроены так же, как близкие, вот единственное объяснение этому: далекие сверхновые дальше, чем они должны быть. Получалось, что расширение Вселенной было не стабильным, а ускоряющимся.

**Скрытый параметр** Открытие оказалось поразительным, но у него были основания. Астрономы вернулись к старым учебникам и раскопали некоторые ранние уравнения Альберта Эйнштейна. Общая теория относительности, из которой выросли все современные модели Вселенной, содержала введенную Эйнштейном дополнительную величину, уравнивающую тяготение, — космологическую постоянную.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1915**

Эйнштейн публикует общую теорию относительности

**Однако следует подчеркнуть, что наши результаты дают положительное искривление пространства, даже если дополнительный показатель [космологической постоянной] не вводится. Этот показатель необходим лишь для того, чтобы допустить квазистатическое распределение материи**

**Альберт Эйнштейн, «Космологические соображения к общей теории относительности» (1917)**

Эйнштейн придумал этот параметр, просто чтобы сошлись уравнения. В начале XX века астрономы не знали о расширении Вселенной, поскольку Хаббл еще не опубликовал свою работу. Вот почему Эйнштейн ломал голову над тем, что же мешает всем объектам во Вселенной взаимно притягиваться гравитацией. Все не схлопывалось в точку или, может, в громадную черную дыру из-за какой-то неведомой силы. Эйнштейн добавил математический фактор, чтобы выразить отрицательную энергию, связанную с вакуумом космоса.

Но потом Эйнштейн задумался над своими выводами. Тяготение в одиночку стянуло бы Вселенную воедино, но и отталкивающая сила сама по себе растащила бы космос на части. Совместить их все равно что пропустить Вселенную через шредер. А Вселенная явно устойчива. И поэтому Эйнштейн отказался от космологической постоянной, назвав ее «величайшим промахом». Впоследствии физики тоже отказались от нее, оставив в своих уравнениях, но приравняв к нулю. Не один десяток лет Вселенная повиновалась. Пока в 1998 году не объявили результаты наблюдений за сверхновыми и космологическую постоянную пришлось воскресить.

**Новый компонент** Переименованная в «темную энергию», то была таинственная новая сила с малопонятным поведением. В отличие



**1929**

Хаббл показывает, что космос расширяется, и Эйнштейн отрекается от космологической постоянной

**1998**

Данные сверхновых указывают на необходимость космологической постоянной

**2020**

NASA планирует запуск инфракрасного зонда (*Wide Field Infrared Survey Telescope, WFIRST*) для изучения темной энергии

**«Семьдесят лет мы пытались оценить скорость замедления Вселенной. Нам это наконец удалось, и мы обнаружили, что Вселенная ускоряется»**

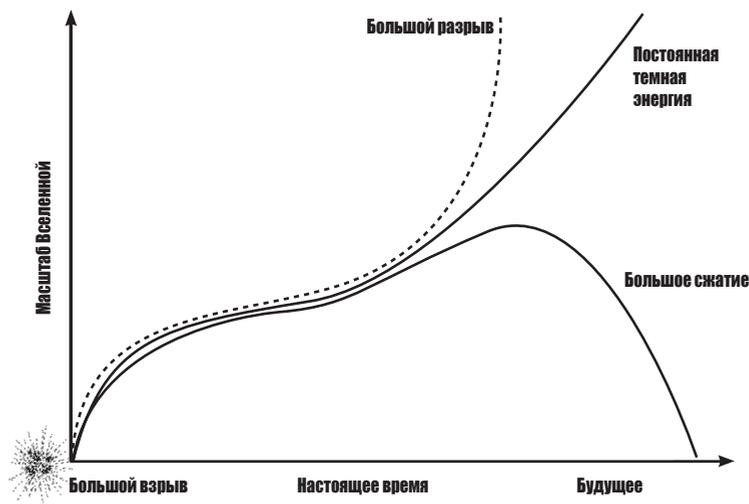
**Майкл С. Тернер, из интервью телеканалу Си-эн-эн, 2 апреля 2001 г.**

от тяготения, связанного с материей, темная энергия связана со свободным пространством и действует в грандиозных масштабах. Она оказывает отрицательное давление на области, в которых нет материи, растягивая их. Наблюдения за сверхновыми позволяют оценить силу этого давления — оно сравнимо с гравитацией. Но неизвестно, действительно ли это постоянная, значение которой одинаково во времени и пространстве (как тяготение и скорость света), или же она переменная. Астрономы приготовились к дальнейшим проверкам урав-

нений Эйнштейна на состоятельность — темную энергию иногда называют квинтэссенцией, как мифическую пятую стихию.

Это открытие имеет глубокие следствия. Темная энергия составляет чуть меньше трех четвертей энергетического запаса Вселенной, странная темная материя — чуть меньше четверти, а обычная материя — оставшиеся несколько процентов. Это удерживает Вселенную в состоянии тонкой настройки, где массы ровно столько, чтобы держать все вместе силой тяготения, но недостаточно, чтобы остановить расширение, которому помогает темная энергия.

**Сомнительная судьба** Темная энергия — важная составляющая, ее характеристики во многом определяют судьбу Вселенной. Нам еще предстоит точно измерить ее, и даже небольшое отличие в ее мощи может иметь



**6 [Темная энергия] кажется чем-то связанным с самим пространством и, в отличие от темной материи, которая притягивает, имеет в определенном смысле противоположный тяготению эффект — из-за нее Вселенную распирает изнутри 7**

**Брайан Шмидт, из интервью радиостанции Эй-би-си, 13 апреля 2006 г.**

колоссальные последствия. Если темной энергии по мере разбухания космоса становится больше, она преодолет силу тяготения, и тогда расширение Вселенной наберет скорость. В этом Большом разрыве распадутся галактические структуры, галактики раздуются, а звезды из них и их останки разлетятся по космосу. Постепенно звезды и планеты тоже распадутся. Отрицательное давление темной энергии может разорвать на части и сами атомы. Безликое море субатомных частиц — вот какая судьба может ожидать Вселенную. Если же победит тяготение, Вселенная схлопнется в Большом сжатии.

Недавнее открытие темной энергии показывает, что о Вселенной нам еще многое предстоит узнать. Астрономы с ироничным смирением заявляют: они практически уверены, что о 96 % вещества во Вселенной не имеют никакого понятия. Космические миссии — например, зонд НАСА *WFIRST*, запуск которого планируется в 2020 году, — организованы, чтобы помочь нам понять природу темной энергии в широкомасштабных исследованиях сверхновых.

**В сухом остатке:  
Пятая сила**

# 21 Принцип Маха

**Все во Вселенной притягивает и притягивается. Эрнст Мах задумался о том, почему далекие объекты влияют на вращения и движения более близких. Его принцип «масса там влияет на инерцию здесь» вырос из вопроса: как понять, движется что-то или нет?**

Современная космология говорит нам, что Вселенная повсюду выглядит примерно одинаково. Параллельные лучи света остаются параллельными на миллиардах световых лет. Но история астрономии говорит нам и другое: восприятие иногда зависит от точки наблюдения. С каждым веком новые открытия все точнее определяли наше место во Вселенной. Древние греки показали, что Земля — шар, в XVI веке Коперник установил, что Земля обращается вокруг Солнца, а не наоборот.

**В оборот** Но конкретные свидетельства того, что Земля вертится, появились лишь в конце XVIII — начале XIX века. Разные части вращающейся Земли движутся с разными скоростями, поэтому на объектах по разные стороны экватора влияют боковые силы, направленные в противоположные стороны. Эти силы Кориолиса — в честь французского ученого Гаспара-Гюстава Кориолиса, который писал о них в 1835 году, — отклоняют движущиеся объекты влево в районах, крутящихся по часовой стрелке, и вправо — в крутящихся против часовой. Эксперименты с падением предметов с высоты помогли измерить эти отклонения, и вращение Земли подтвердилось.

На то, чтобы увидеть эффект вращения Земли, потребовалось так много времени, потому что мы не наблюдаем его в повседневной жизни. Мы замечаем свое движение относительно других объектов, но не абсолютную скорость — мы не понимаем, наш поезд или соседний тронулся

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Около **335** до н. э.

Аристотель утверждает, что объекты движутся из-за воздействия сил

**1640**

Галилей формулирует принцип инерции

**«Абсолютное пространство по своей собственной природе, без отсылки к чему-либо внешнему, всегда остается однородным и неподвижным»**

**Исаак Ньютон, «Математические начала натуральной философии» (1687)**

со станции. Единственное ощущение, которое выдает движение, — переменная сила, или ускорение. В автомобиле заметно, когда мы резко тормозим или делаем крутой поворот, но мы не чувствуем скорости, когда едем равномерно.

В XVII веке Исаак Ньютон, обдумывая законы движения, которые предсказывают, как объекты движутся под влиянием сил и тяготения, размышлял и об относительной природе движения. Он осознал: чтобы в принципе иметь возможность измерить скорость, нужно иметь неподвижный фон. Ньютон предположил, что космос предоставляет окончательную систему координат. Звезды освещают линованный лист, относительно которого можно измерить все.

**Все относительно** В XIX веке австрийскому философу и физика Эрнсту Маху такое положение дел показалось спорным. Он считал, что Ньютон зашел слишком далеко, предложив такую сетку: следует принять, что движение мыслимо лишь относительно чего-нибудь. Мяч одинаково катится во Франции, в Австралии и на Луне, заявлял Мах. Нет никаких космических декораций, а только физика. Мах, под влиянием ранних идей соперника Ньютона, Готфрида Лейбница, предвосхитил Эйнштейна и исключительную относительность движения.

## Маятник Фуко

Знаменитую демонстрацию эффекта вращения Земли устроил в 1851 году в центре Парижа физик Леон Фуко: он подвесил гигантский маятник к куполу Пантеона. Ось

колебаний маятника смещалась в течение дня на 11 градусов в час под влиянием сил вращения Земли. Похожие маятники Фуко висят в музеях по всему миру.

**1687**

Ньютон предьявляет довод ведра

**1893**

Мах публикует «Науку механики»

**1905**

Эйнштейн обнародует специальную теорию относительности

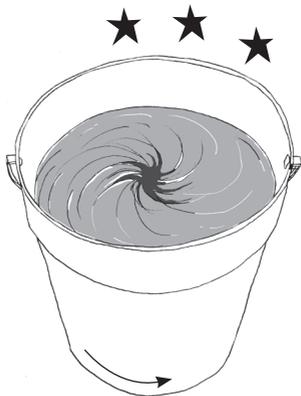
### Эрнст Мах (1838–1916)

Кроме принципа Маха, австрийский физик Эрнст Мах известен своими работами по оптике и акустике, физиологии сенсорного восприятия, философии науки и, в особенности, своими исследованиями сверхзвуковой скорости. В 1877-м он опубликовал влиятельную статью, которая описывала, как пуля, движущаяся

быстрее скорости звука, создает V-образную ударную волну. Звуковой удар сверхзвукового самолета — именно такая волна. Соотношение скорости пули или самолета к скорости звука теперь называется числом Маха. При  $M = 2$  скорость объекта вдвое больше скорости звука.

Мах взялся обдумывать движение вообще всего во Вселенной. Из-за тяготения все предметы притягиваются друг к другу, независимо от их размеров. Хотя сила тяготения с расстоянием уменьшается, во Вселенной так много объектов, что все равно есть немалый совокупный эффект. А значит, рассудил Мах, всякое тело подвержено влиянию, сила и направление которого зависят от расположения и природы всех остальных тел в пространстве. Движение зависит от распределения массы, а не от свойств пространства.

**Ведро Ньютона** Мах рассмотрел старый довод Ньютона. Пытаясь понять относительное движение, Ньютон исследовал, что происходит, если крутить ведро с водой. Когда начинается вращение сосуда, масса воды вначале остается неподвижной. Затем вращение передается от стенок к объему жидкости, и она тоже приходит в движение. Ее поверхность прогибается, потому что вода у краев ведра «ползет» вверх и стремится перелиться за края, но что-то удерживает ее в ведре. По мнению Ньютона, искажение поверхности воды под действием неких сил свидетельствует о ее вращении относительно абсолютной координатной сетки.



Но без координатной сетки Маху было сложнее объяснить, как мы заключаем, что вращается именно вода, а не ведро или комната. Или даже сама Вселенная. Если бы ведро было единственным предметом во Вселенной, рассуждал он, мы бы никогда не узнали, вращается оно или нет. Как и другие движения, вращение не имеет смысла без точки отсчета. Он вывел принцип «масса вдали влияет на инерцию вблизи», который означает, что присутствие удаленных предметов влияет на движения поблизости.

## Масса, вес и инерция

Массу можно представлять по-разному. Масса объекта соотносится с количеством материи, или атомов, содержащихся в нем. Она не меняется от измерения на Земле, на Луне или в пустоте. Масса отличается от веса — величины силы тяготения, влекущей массу вниз, которая зависит от гравитационного поля. Масса — еще и эквивалент

энергии, как показал Эйнштейн. Похожее понятие — инерция: названное в честь латинского слова «лень», оно говорит нам, насколько трудно сдвинуть предмет, приложив к нему силу. Объект с большой инерцией противостоит движению: чтобы сдвинуть его даже в глубоком космосе, потребуется большая сила.

Принцип Маха интересен с философской точки зрения, и он вдохновлял многих физиков. Но он упускает из виду эффекты дополнительных сил, вызванных вращением, например силы Кориолиса. Но именно Эйнштейн осознал, что, вращаясь Вселенная целиком, Земля колебалась бы особым образом, чего не наблюдается. Насколько мы знаем, Вселенная не вращается.

**В сухом остатке:**  
**Масса вдали влияет**  
**на движение вблизи**

# 22 Специальная теория относительности

Понятия движения и фиксированной скорости света сформулировал Альберт Эйнштейн в 1905 году. Его специальная теория относительности утверждает: ничто не может превысить скорость света и вследствие этого пространство, время и масса, приближаясь к пределу скорости света, искривляются.

Альберт Эйнштейн — икона науки. Его взлохмаченная седая шевелюра и задумчивый взгляд известны всему миру. Но начинал он скромно и всю свою славу заслужил сам. Эйнштейн предложил новый взгляд на Вселенную, столь же глубокий, как и работы Исаака Ньютона, на которые опирался Эйнштейн. Его специальная теория относительности — первый шаг к установлению равнозначности массы и энергии.

**Умелый любитель** Эйнштейн изучал физику в университете, затем поступил на службу в швейцарское патентное ведомство. Он начинал как ученый-любитель. Часы досуга он посвящал загадке постоянной скорости света. Еще в XVII веке было известно, что свет

«Космос — не множество точек, близких друг к другу, а множество связанных друг с другом расстояний»

Сэр Артур Стэнли Эддингтон,  
«Математическая теория относительности» (1923)

преодолеывает расстояния не мгновенно. После попыток Галилео Галилея и других предшественников измерить время вспышки света датский астроном Оле Рёмер в 1676 году вывел это из наблюдений: при затмении одной из лун Юпитера, Ио, удалось засечь некоторую задержку. Многие другие ученые, включая Ньютона, в конце концов вычислили примерное значение скорости света — 300 000 километров в секунду.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1676

Рёмер измеряет конечную скорость света

1864

Джеймс Клерк Максвелл описывает свет как электромагнитную волну

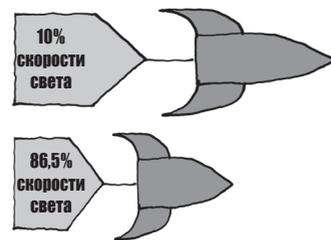
**Понятие света-эфира окажется избыточным, поскольку... не требуется вводить ни пространства в абсолютном покое, наделенного особенными свойствами, ни связывать вектор скорости с точкой в пустоте, где происходят электромагнитные процессы**

**Альберт Эйнштейн, статья «К электродинамике движущихся тел» (1905)**

В 1864 году шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл описал свет как электромагнитную волну – совокупность электрических и магнитных полей, колеблющихся перпендикулярно друг к другу и движущихся вперед, как волна в воде. Но такое представление требовало среды, в которой волна могла бы распространяться. Была предложена электромагнитная среда, заполняющая космос, которую называли эфиром.

**Нереальный эфир** В 1887 году хитроумный эксперимент доказал, что эфира не существует. Альберт Майкельсон и Эдвард Морли хотели измерить различия во времени движения двух лучей света, направленных друг на друга под определенными углами и отраженных обратно одинаковыми зеркалами. Поскольку Земля вращается вокруг Солнца, рассуждали они, с каждой стороны будет разная задержка, в зависимости от движения установки через фоновый эфир. Быстрее переплыть на лодке с одного берега на другой и обратно, чем грести то же расстояние сначала вниз по течению, а потом вверх. Так же и с лучом света, движущимся параллельно потоку: должна возникнуть легкая задержка. Но ученые не увидели разницы, вне зависимости от направления вращения Земли или расположения установки.

Эйнштейн вскоре осознал, что остроумный эксперимент Майкельсона и Морли доказал: эфира не существует. Это согласовывалось и с рассуждениями Эрнста Маха (см. принцип Маха, с. 84) о том, что не существует координатной сетки, относительно которой движутся все объекты. Движение воистину относительно. Но в отличие от волн звука или воды, свет, похоже, всегда движется с одной и той же скоростью. Все эти данные вместе составляют загадку: как может движение света не зависеть ни от чего вокруг? Что это значит?



**1887**

Майкельсон и Морли не могут подтвердить существование эфира

**1893**

Мах публикует «Науку механики»

**1905**

Эйнштейн обнаружит специальную теорию относительности

**1915**

Эйнштейн обнаружит общую теорию относительности

**1971**

Замедление времени подтверждено при помощи часовых механизмов в самолетах

## Парадокс близнецов

Представьте, что замедление времени было бы приложимо к человеку. А оно могло бы. Если бы вашего однояйцевого близнеца отправили в космос на ракете — достаточно быстрой и достаточно надолго, — он бы старел медленнее, чем вы на Земле. К его возвращению вы бы уже состарились, а ваш близнец остался в расцвете сил. Но точно так же мог бы рассуждать и он: с его точки зрения, неподвижной остается ракета, а летит Земля. На самом деле это не парадокс: чтобы вернуться, корабль должен использовать двигатель для разворота, то есть двигаться ускоренно — в отличие от Земли, что превращает его систему отсчета в однозначно движущуюся. Из-за этого искажения времени события, которые кажутся одновременными с одной точки зрения, могут не быть таковыми с другой. С замедлением времени размеры тоже сжимаются. Объект или человек, движущийся с этой скоростью, ничего не заметит, но стороннему наблюдателю изменения будут видны.

**Скорость света** Судя по нашему бытовому опыту, скорости суммируются. Если вы ведете машину со скоростью 50 км/ч и вас обгоняет другая со скоростью 60 км/ч, вам кажется, что вы стоите на месте, а другая машина едет со скоростью 10 км/ч. Но к свету это неприменимо. Если бы ваша машина неслась на скорости в сотни км/ч, свет относительно вас все равно двигался бы со скоростью 300 000 км/с. Фонарик светит с этой скоростью, включите ли вы его, сидя в кресле сверхзвукового самолета или прогуливаясь по улице.

Если скорость света не меняется, рассуждал Эйнштейн, для компенсации должно меняться что-то другое. Он представил, что можно ехать на поезде, движущемся со скоростью, близкой к скорости света, и, проезжая, светить фонариком людям на платформе. У каждого наблюдателя, по его представлению, была бы своя собственная система координат, в которой он измерял бы движение относительно себя. Системы координат наблюдателя, который не имел бы ускорения (как, например, человек на платформе или сам Эйнштейн в равномерно движущемся поезде), Эйнштейн назвал инерциальными. Несуществование эфира означало, что неподвижной инерциальной системы не существует.

**Искажения пространства-времени** Эйнштейн предположил, что превысить скорость света не может ничто. Следовательно, единственное условие, при котором можно соотнести разные точки наблюдения при постоянной скорости света, — искажение инерциальных систем отсчета.

Любой наблюдатель видел один метр как одно деление координат, но размер этого деления зависел от скорости. Основываясь на предыдущих работах

## Теория относительности придает абсолютный смысл величине, которая в классической теории значима лишь относительно: скорости света

Макс Планк, Научная автобиография (1948)

Эдварда Лоренца, Джорджа Фицджеральда и Анри Пуанкаре, Эйнштейн вычислял движения в четырехмерной Вселенной — три измерения пространства плюс время, вместе называемые пространством-время. Скорость — это расстояние, разделенное на время, поэтому, чтобы избежать превышения скорости света, расстояния должны сжиматься, а время замедляться — для компенсации. Таким образом, ракета, улетающая от вас на скорости, близкой к скорости света, кажется вам короче, а время в ней воспринимается медленнее, чем вами.

Для любого объекта, движущегося со скоростью, близкой к скорости света, Эйнштейн предсказал, что время будет замедляться, или растягиваться. Расширением времени объясняется, почему часы в разных инерциальных системах могут идти с разной скоростью. Это было доказано в 1971 году, когда четыре одинаковых атомных часовых механизма отправили дважды облететь вокруг света, два — на запад и два — на восток. При сравнении их показаний с такими же часами на поверхности Земли в Соединенных Штатах оказалось, что часы-путешественники отстали на доли секунды — в полном соответствии со специальной теорией относительности Эйнштейна.

С другой стороны, объекты могут оставаться в пределах скорости света, но при приближении к ней наращивать массу. Эйнштейн описал эту возможность в своем знаменитом уравнении  $E = mc^2$ : энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света. На скорости света масса объекта делается бесконечной, что не дает ему набрать еще больше скорости. Поэтому ничто, имеющее массу, никогда не сможет достичь скорости света, но только приблизиться к ней. С приближением к скорости света объект тяжелеет и ускорение дается ему все труднее. Свет состоит из лишенных массы фотонов, и на них это не влияет.

Эйнштейн произвел всю эту работу мысли за своим столом в патентном ведомстве и опубликовал в фундаментальной статье 1905 года. Хотя в науке он был никто, его работу прочел знаменитый немецкий физик Макс Планк — и был поражен. Без поддержки Планка Эйнштейн, возможно, не получил бы такую широкую известность.

## В сухом остатке: Ничто не обгонит свет

# 23 Общая теория относительности

**Общая теория относительности Альберта Эйнштейна, сформулированная в 1915 году, — шедевр, выдержавший столетнюю проверку временем. Добавив в специальную теорию относительности тяготение, Эйнштейн превзошел законы Ньютона и предложил новый взгляд на Вселенную. Его предсказания — например, отклонение лучей света массивными объектами — до сих пор соответствуют наблюдениям. Но нам еще предстоит соединить гравитацию с квантовой механикой и вывести теорию всего.**

В апреле 2007 года физик-теоретик Стивен Хокинг совершил особенный полет. Профессор, с 1960-х годов — со своих двадцати двух лет — парализованный из-за заболевания двигательных нейронов, летал без инвалидного кресла. Он осуществил свою мечту — почувствовать невесомость. Его самолет два часа устраивал своим пассажирам американские горки над Атлантикой. Воздушное судно, задрав нос, круто набирало высоту, и пассажиров вжимало в кресла, после чего самолет выходил на параболу — траекторию движения брошенного камня, и Хокинг с его помощниками освобождались от земного притяжения. На несколько минут они чувствовали, каково это — быть в космосе.

Астронавты тренируются в подобных полетах и называют самолет «тошнокометой»: некоторых в таких полетах укачивает. Но Хокингу было все нипочем — ему очень понравилось. «Потрясающе, — сказал он. — При нулевом тяготении было чудесно, да и повышенное не беда. Я б еще так полетал». Изменения веса, которые испытывал Хокинг, происходили из-за ускорения самолета.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1687

Ньютон выдвигает теорию тяготения

1905

Эйнштейн публикует специальную теорию относительности

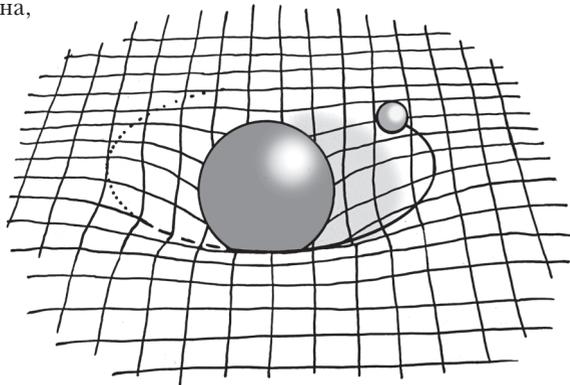
«Когда его спросили в 1919 году, правда ли, что на свете лишь трое понимают общую теорию относительности, он (Эддингтон), предположительно, ответил: «А кто третий?»»

Сэр Артур Стэнли Эддингтон, на заседании Королевского научного общества (1919)

**Ускоряющиеся координаты** Веком раньше Альберт Эйнштейн понял, что ускорение равноценно земному притяжению. Как специальная теория относительности описывает движение объектов в инерциальных системах, движущихся с постоянной скоростью, так тяготение было следствием ускоряющейся системы отсчета. Он назвал это счастливейшей мыслью в своей жизни.

Эйнштейн взялся за работу, желая свести все представления об относительном движении и тяготении в общую теорию. В 1915 году он опубликовал ее — и вскоре не раз переработал, пока все не выкристаллизовалось окончательно. Его общая теория относительности потрясла современников: она даже исключала в себя необычные предсказания — например, что свет подвержен искажению гравитационным полем, а ось эллиптической орбиты Меркурия будет медленно вращаться из-за притяжения Солнца.

В общей теории относительности три измерения пространства и одно времени соединены в четырехмерную координатную сетку пространства-времени. Скорость света определена, и ничто не может превысить ее. При движении и ускорении пространство-время искажается, а скорость света остается неизменной. Пространство-время можно изобразить как плоское резиновое полотно. Массивные объекты проминают его, искажая пространство-время вокруг себя. Это влияет на движущиеся неподалеку другие тела. Траектория маленького мячика



**1915**

Эйнштейн публикует общую теорию относительности

**1919**

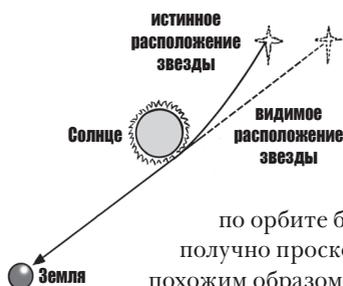
Наблюдения затмений подтверждают теорию Эйнштейна

**1960-е**

Наблюдаемые подтверждения черных дыр в космосе

**2004**

НАСА запускает аппарат Гравитационный зонд B (*Gravity Probe B*), чтобы проверить теорию Эйнштейна



искривляется, когда он катится мимо большого. Это тяготение имитирует гравитацию, притягивая меньшее тело к большему.

Скорость движущегося мяча влияет на его поведение. Если вмятина достаточно глубока, а мяч движется быстро, он может застрять во вмятине и двигаться

по орбите большего тела. Если же он движется еще быстрее, то благополучно проскочит мимо. Эйнштейн представлял, что планеты и звезды похожим образом искажают плоскость пространства-времени. Он мог объяснить поведение движущихся по этой плоскости объектов как мячиков, катящихся по полю для гольфа.

**Искривленное пространство-время** Лучи света тоже могут отклоняться вблизи массивных объектов из-за искривления пространства-времени. Так, свет от звезды, расположенной позади Солнца, загибается внутрь, проходя у его края. С Земли мы будем видеть эту звезду слегка смещенной относительно ее соседей. 29 мая 1919 года, когда во время полного солнечного затмения измерили отклонение лучей света, предсказание Эйнштейна подтвердилось. Затмение наблюдали ведущие астрономы мира, и это был один из величайших триумфов Эйнштейна.

Отклонение лучей света было зарегистрировано для объектов в самых удаленных областях Вселенной. Свет от далеких галактик изгибается, проходя мимо зоны большой массы, например огромного скопления галактик или отдельной крупной. Точка света размывается в дугу. Эффект очень похож на фокусирование линзой, поэтому его называли гравитационным линзированием. Космический телескоп «Хаббл» сделал много красивых фотографий этого эффекта.

**Разумеется** Общая теория относительности Эйнштейна с блеском продержалась почти век. До сих пор нет наблюдений, которые поколебали бы ее. Астрономы считают, что ее несовершенство может обнаружиться лишь применительно к случаям предельно сильной или предельно слабой гравитации. Черные дыры (см. с. 96) — очень глубокие колодцы в плоскости

**«Человек сидит час с красивой девушкой — этот час пролетает за минуту. А посади его на раскаленную печь — минута покажется дольше любого часа. Вот что такое относительность»**

**Альберт Эйнштейн, из интервью «Нью-Йорк таймс», март 1929 г.**

## Гравитационные волны

Другой аспект общей теории относительности состоит в том, что на плоскости пространства-времени могут образовываться волны — в особенности от черных дыр и плотных вращающихся сжатых звезд — пульсаров. Астрономы наблюдают, как вращение пульсаров замедляется, и считают, что энергия этого движения преобразовалась в гравитационные волны, хотя их пока не удалось обнаружить. Физики

строят гигантские детекторы на Земле и в космосе, принцип действия которых основан на колебании очень длинных лазерных лучей: если гравитационные волны существуют и пересекут эти лазерные лучи, их колебание можно будет зарегистрировать. Если окажется, что гравитационные волны существуют, у нас будет еще одно доказательство общей теории относительности Эйнштейна.

пространства-времени. Они так круто обрываются, что все оказавшееся достаточно близко падает в них — даже свет. Это дыры, или сингулярность, в пространстве-времени. Пространство-время также может искривляться и образовывать кротовые норы, или туннели, но их еще никто не видел.

Физики подозревают, что однажды смогут увидеть дискретность тяготения там, где оно предельно слабо. Как свет состоит из отдельных фотонов, по отдельности наделенных энергией, гравитация тоже может состоять из отдельных кирпичиков, или квантов. Сразу после того, как Эйнштейн опубликовал свою статью об общей теории относительности, другие физики для описания устройства атомного мира вывели теорию квантовой механики. Эйнштейн продолжил работу, стараясь объединить свою теорию тяготения с квантовой механикой. Как ни странно, ему это не удалось. С тех пор за эту задачу брались многие физики, включая Хокинга. Но единая теория до сих пор ускользает от них.

## В сухом остатке: Искривленное пространство-время

# 24 Черные дыры

**Черные дыры разбросаны по космосу. Это остатки мертвых звезд и ядра гигантских галактик, включая нашу собственную. Они — колодцы в пространстве-времени, такие глубокие, что даже свет не может избежать этих ловушек, и представляют смертельную опасность для любого космического путешественника. Упасть в черную дыру будет не очень приятно, огромное тяготение разорвет ваше тело на части. Погружаясь по спирали в черную дыру, вы летите навстречу своей судьбе — стать спагетти из человечины.**

Черная дыра — пропасть в пространстве-времени, такая глубокая и обрывистая, что любой объект, оказавшийся поблизости, исчезает в ней безвозвратно. Это дыра в ткани пространства-времени вроде баскетбольной корзины, из которой вам никогда не достать мяч.

Свет исчезает в черных дырах, потому что из-за огромного тяготения скорость убегания из них превышает скорость света. Расстояние, на котором это происходит, называется горизонтом событий. Подброшенный вверх мяч достигает определенной высоты, а затем падает, притянутый массой Земли. Чем больше скорости ему придали в броске, тем выше он взлетит. Если метнуть его с достаточной силой, он вырвется из поля земного тяготения и улетит в космос. Скорость преодоления земного тяготения — 11 км/с. Этот предел ниже для меньшей по размерам Луны (2,4 км/с), но выше для большей планеты. Если планета достаточно тяжела, эта скорость может достигнуть или превысить скорость света (300 000 км/с), и получится, что даже свет не сможет избежать ее тяготения. Это и есть черная дыра.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1784**

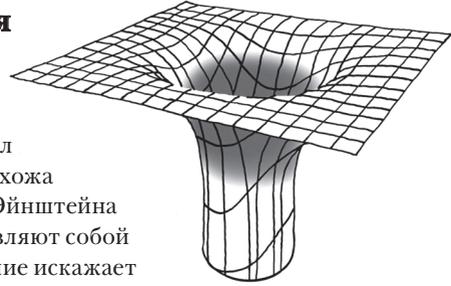
Мичелл выводит возможность существования темных звезд

**1915**

Эйнштейн публикует общую теорию относительности

## Искривленное пространство-время

Понятие черных дыр предложили в XVIII веке геолог Джон Мичелл и математик Пьер-Симон Лаплас. Позднее, после того как Альберт Эйнштейн разработал теории относительности, Карл Шварцшильд разобрался, на что должна быть похожа черная дыра. В общей теории относительности Эйнштейна пространство и время связаны и вместе представляют собой подобие огромного резинового полотна. Тяготение искажает это полотно соответственно массе объекта. Тяжелый объект вроде планеты лежит во впадине пространства-времени, и его притяжение равноценно силе, которую вы бы почувствовали, закатываясь в такую впадину. Эта сила может искривить вашу траекторию или даже затянуть вас на орбиту. Так происходит и вблизи черной дыры.



**Порвать на части** Черные дыры смертоносны не столько из-за сокрушительной силы самого тяготения, но из-за того, что их стены отвесны и создают сильный градиент вдоль вашего тела. Так, на голову и ноги будет действовать сила разной величины, и тело растянет, как на дыбе. Кроме того, движение внутри дыры — вращательное, и потому тело разорвет на части, как кусок жевательной резинки, за секунду; падение в черную дыру часто называют «спагеттификацией».

Вблизи черной дыры можно выжить, если противодействовать сильным эффектам тяготения. Физики заключили, что при падении в черную дыру

## Кротовые норы

Если представить черные дыры как длинные трубки, свисающие из плоскости пространства-времени, можно предположить, что две такие трубки соединены. Между двумя черными дырами может возникнуть единый туннель, или кротовая нора. Путешественники из научной фантастики, снаряженные

«спасательными кругами», смогли бы прыгнуть в одну черную дыру и выскочить из другой, путешествуя при этом не только в пространстве, но и во времени. Кротовая нора может даже проходить через совершенно другую Вселенную. Возможности иного устройства Вселенной при таком подходе безграничны.

**1930-е**

Предсказано существование застывших звезд

**1965**

Открыты квазары

**1967**

Уилер называет застывшие звезды черными дырами

**1970-е**

Хокинг предполагает, что черные дыры испаряются

**2010**

Начинает работу Большой адронный коллайдер

## Черные мини-дыры

Некоторые предполагали, что черные дыры могут появиться на Земле. Возможно, однажды крошечные черные дыры будут созданы в крупнейших ускорителях частиц, например в Большом адронном коллайдере в Женевском ЦЕРНе, поскольку они работают с очень большими энергиями. Никто

не знает, что тогда произойдет: испарятся ли черные дыры, останутся существовать или поглотят всю Землю? Большинство ученых считают, что риска практически нет. Но чем больше мы узнаем о черных дырах — и из теории, и глядя в космос, — тем надежнее будет наше положение.

вас может спасти пояс из очень тяжелого и плотного материала. Вертикальное растяжение скомпенсируется тяготением пояса. Недостаток этого способа в том, что пояс должен быть широким, — по мнению астрономов Ричарда Готта и Деборы Фридман, согнется пояс размером с кольца Сатурна и с массой астероида. Он сожмется вместе с вами, пока вы падаете, но даже это выиграет вам лишь долю секунды, прежде чем силы черной дыры одержат победу.

**Обнаруживая их** Черные дыры темны, но их можно обнаружить в космосе двумя способами. Во-первых, они притягивают объекты к себе. Так была обнаружена черная дыра в центре нашей Галактики. Звезды, проходившие близко к ней, выбрасывало на вытянутые орбиты. Черная дыра в Млечном Пути имеет массу миллиона Солнц, сжатую в зоне радиусом всего примерно 10 миллионов километров (30 световых секунд). Черные дыры внутри галактик называются сверхмассивными черными дырами. Мы не знаем, как они образовались, но они влияют на рост галактик. Значит, они могли возникнуть в самом начале или вырасти из миллиона звезд, схлопнувшихся в одну точку.

Второй способ обнаружить черную дыру — зарегистрировать свет, исходящий от горячего газа, который вспыхивает, падая внутрь. Квазары, самые ярко светящиеся элементы Вселенной, сияют благодаря газу, который засасывает в сверхмассивные черные дыры в центрах далеких галактик. Черные дыры поменьше, имеющие массу лишь нескольких Солнц, также можно обнаружить по рентгеновскому излучению, которое исходит от падающего в такие дыры газа.

**Застывшие во времени** Другая черта черных дыр — они как будто застыли во времени. Неудачливый космический путешественник, попавший в горизонт событий, в момент падения кажется далеким наблюдателям неподвижно парящим. Это свойство — источник самого названия «черная дыра», которое дал им в 1967 году Джон Уилер. Оно показалось ему интереснее, чем «застывшая звезда».

**6 Черные дыры природы — самые совершенные  
макроскопические объекты во Вселенной:  
единственные их составляющие —  
наши понятия о пространстве и времени**

**Субраманьян Чандрасекар, «Математическая теория черных дыр» (1992)**

Застывшие звезды в 1930-х предсказал физик Карл Шварцшильд, а также Эйнштейн в общей теории относительности. Оба считали, что светящаяся материя вблизи горизонта событий будет в падении казаться замедляющейся, потому что волнам света потребуется все больше времени, чтобы дойти до нас. Когда материя пересекает горизонт событий, внешнему наблюдателю видится, что время полностью остановилось. Материя выглядит застывшей в моменте пересечения горизонта. Так были предсказаны звезды, застывшие во времени в момент падения за горизонт событий.

Астрофизик Субраманьян Чандрасекар предположил, что звезды массой в 1,4 раза больше Солнца в конце концов сожмутся в черные дыры. Однако теперь мы знаем, что за фазой белого карлика, силе тяготения в которой противостоит квантовое давление электронов, у материи есть еще один рубеж сопротивления — фаза нейтронной звезды. В ней гравитации противостоит нейтронное квантовое давление, а значит, для формирования черных дыр нужна более чем трехкратная масса Солнца. Примеры таких застывших звезд — или черных дыр — не были обнаружены до 1960-х годов.

**Как умирают черные дыры** Как ни странно, черные дыры, хоть им и нравится расти, не вечны. Они постепенно испаряются. В 1970-х Стивен Хокинг предположил, что черные дыры черны не полностью, но испускают частицы — из-за квантовых эффектов. Таким образом, масса постепенно теряется, и черная дыра сжимается, пока не исчезнет. Энергия черной дыры постоянно создает пары частиц и соответствующих им античастиц. Если это происходит вблизи горизонта событий, одной из частиц иногда удается вырваться, даже если другая падает внутрь. Для внешнего наблюдателя черная дыра словно испускает частицы, названные излучением Хокинга. Теряя энергию, дыра уменьшается. Это пока лишь теория, и никто не знает, что в действительности происходит с черными дырами. Но их достаточно широкая распространенность показывает, что исчезать они не торопятся.

**В сухом остатке:  
Ловушки для света**

# 25 Астрофизика частиц

**Космос полон частиц, ускоренных космическими магнитными полями до невероятных энергий, и земные физики стараются воспроизвести это в скромных рукотворных машинах. Обнаружение космических лучей, нейтрино и других необычных частиц из космоса поможет нам объяснить, из чего состоит Вселенная.**

Со времен древних греков мы считали, что атомы — простейшие кирпичики Вселенной. Но теперь нас не проведешь. Атомы делимы, они состоят из легких отрицательно заряженных частиц — электронов, вращающихся вокруг положительно заряженного ядра, состоящего из протонов и нейтронов. Впрочем, делимы и эти частицы, и современная физика открыла целый зоопарк элементарных частиц, которые появились во Вселенной во время Большого взрыва.

**Лучшим атомы** Впервые электроны лабораторно высвободили из атомов в 1887 году: Джозеф Джон Томсон пропустил электрический разряд через стеклянную трубку, наполненную газом. Вскоре после этого, в 1909 году, Эрнест Резерфорд открыл ядро, получившее название от латинского *nucleus* — «ядро ореха». Направив поток альфа-частиц (вид радиоактивного излучения; альфа-частицы состоят из двух протонов и двух нейтронов) на тонкий лист золотой фольги, он с удивлением обнаружил, что небольшая их часть рикошетила, столкнувшись с чем-то плотным и твердым в центре атома золота.

Выделив ядра водорода, в 1918 году Резерфорд открыл протоны. Однако соотнести заряды нуклонов и массу атомов других элементов оказалось сложнее.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**400** до н.э.

Демокрит предлагает понятие атома

**1887**

Томсон открывает электрон

**1909**

Резерфорд проводит эксперимент с золотой фольгой

**«Это было почти так же невероятно, как если бы вы выстрелили пятнадцатидюймовой гранатой по бумажной салфетке, а граната отлетела бы к вам обратно»**

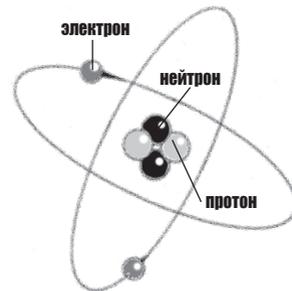
**Эрнест Резерфорд, по воспоминаниям Э. Н. да К. Андраде (1964)**

В начале 1930-х годов Джеймс Чедвик нашел недостающий ингредиент — нейтрон, незаряженную частицу примерно той же массы, что и протон. Теперь можно было объяснить разную массу атомов химических элементов, включая неожиданную у тех, что называются изотопами. Атом углерода-12, к примеру, содержит в ядре 6 протонов и 6 нейтронов (масса 12 атомных единиц) и 6 электронов на орбите, а углерод-14 тяжелее, потому что у него два дополнительных нейтрона.

Ядро крошечно. Его диаметр всего несколько фемтометров ( $10^{-15}$  метров, или одна миллионная одной миллиардной доли метра). Если бы атомы были размером с Землю, ядро в их центре было бы всего около 100 метров в диаметре.

**Стандартная модель** По мере того как радиоактивное излучение помогает нам разобраться, как ядра распадаются (делением) и сливаются (синтезом), все больше явлений требует объяснения. Горение водорода и превращение его в гелий на Солнце путем ядерного синтеза подразумевает наличие еще одной частицы, нейтрино, которая превращает протоны в нейтроны. Существование нейтрино предположили еще в 1930-х, чтобы объяснить распад нейтрона на протон и электрон — бета-радиоактивный распад. Сами нейтрино, практически не имеющие массы, не были открыты вплоть до 1956 года.

В 1960-е физики осознали, что протоны и нейтроны — не мельчайшие кирпичики: они содержали еще более мелкие частицы, названные кварками. У них три «цвета», красный, синий и зеленый, и три «аромата» — соответственно трем парам увеличивающихся масс. Самые легкие — «верхний» и «нижний» кварки, за ними следуют «странный» и «очарованный» и, наконец, «прелестный» и «истинный» кварки — самая тяжелая пара. Физики



**1918**

Резерфорд выделяет протон

**1932**

Чедвик открывает нейтрон

**1956**

Обнаружены нейтрино

**1960**

Введено понятие кварков

**1995**

Обнаружен истинный кварк

кварки	$u$ верхний	$c$ очарованный	$t$ истинный
	$d$ нижний	$s$ странный	$b$ прелестный
лептоны	$e$ электрон	$\mu$ мюон	$\tau$ тау
	$\nu_e$ электронное нейтрино	$\nu_\mu$ мюонное нейтрино	$\nu_\tau$ тау- нейтрино

выбрали эти странные названия, чтобы выразить беспрецедентные свойства кварков. Кварки не могут долго существовать самостоятельно и всегда должны быть замкнуты в комбинации, дающие общий нейтральный цвет (не имеющие цветового заряда). Возможные варианты – тройки, называемые барионами (от греческого βαρυς – «тяжелый»), включающие нормальные протоны и нейтроны, или пары кварк–антикварк, называемые мезонами. Нужны три кварка, чтобы создать протон (два верхних и нижний) или нейтрон (два нижних и верхний).

переносчики взаимодействия	$\gamma$ фотон
	$W$ W-бозон
	$Z$ Z-бозон
	$g$ глюон
	бозон Хиггса $H$

Следующий базовый класс частиц – лептоны, они связаны с электронами и включают эти частицы в себя. Здесь тоже три поколения возрастающей массы: электроны, мюоны и тау-частицы. Мюоны в 200 раз тяжелее электронов, а тау – в 3700. Все лептоны имеют одинарный отрицательный заряд. С ними также может быть связана частица нейтрино (электронное, мюонное и тау-нейтрино), у которой нет заряда. Нейтрино практически не имеют массы и почти ни с чем не взаимодействуют. Их сложно обнаружить: они могут незамеченными пролетать сквозь Землю.

Фундаментальные силы действуют через обмен частицами. Электромагнитную волну можно представить как поток фотонов, слабое ядерное взаимодействие осуществляется частицами под названием W-и Z-бозоны, а сильное ядерное взаимодействие передается через глюоны. Гравитация еще не включена в описанные здесь стандартные модели физики частиц, но исследователи работают над этим.

**Крушим частицы** Подход физики частиц можно описать так: берем замысловатые швейцарские часы, разбиваем их вдребезги молотком, а потом смотрим на осколки и пытаемся понять, как часы работают. В ускорителях частиц на Земле при помощи огромных магнитов частицам сообщают колоссальные скорости и затем бьют их потоком по мишени или сталкивают с другим, противоположным потоком. На умеренных скоростях частицы разрушаются не полностью, и рождаются поколения самых легких частиц. Поскольку масса есть энергия, чтобы высвободить более тяжелые частицы, нужен поток частиц с высокой энергией.

Один из методов определения частиц – по фотографиям их траекторий. Когда частицы проходят сквозь магнитное поле, положительно заряженные заносит в одну сторону, а отрицательно заряженные – в другую. Масса

частицы также определяет, как быстро частица пронесется сквозь детектор и как сильно ее траекторию искажает магнитное поле. Так, легкие частицы отклоняются лишь слегка, а более тяжелые могут даже уйти в штопор. Отслеживая их характеристики в детекторе и сравнивая с теоретическими ожиданиями, физики могут определить любую частицу.

**Космические лучи** В космосе частицы возникают примерно так же, как в ускорителях на Земле. Там, где есть сильные магнитные поля, — например, в центре нашей Галактики, при взрыве сверхновой или в выбросах из черных дыр — частицы могут обретать невероятную энергию и перемещаться с околосветовыми скоростями. Могут появляться и античастицы, и тогда увеличивается вероятность наблюдения их аннигиляции при контакте с обычной материей.

Космические лучи — частицы, рожденные в космосе, которые врезаются в нашу атмосферу. Сталкиваясь с молекулами воздуха, они разлетаются и создают каскад еще более мелких частиц, и некоторые из них добираются до Земли. Эти потоки частиц дают о себе знать вспышками на детекторах, расположенных на земной поверхности. Оценки характеристических энергий космических лучей и понимание, откуда они прибыли, могут помочь астрономам разобраться в происхождении этих лучей.

Поиски нейтрино тоже обещают многое, поскольку не исключено, что именно они составляют основную часть темной материи во Вселенной. Поскольку нейтрино почти ни с чем не взаимодействуют, обнаружить их непросто. Ради этого физики мыслят глобально — применяют как детектор всю Землю целиком. Ничто другое не способно пролететь ее насквозь, поэтому частицы, прилетающие от центра Земли, — точно нейтрино, и их поджидает целая батарея детекторов, включая новейшие — во льдах Антарктики и в Средиземном море. В других подземных экспериментах, проводимых в глубоких шахтах, есть надежда изловить частицы других типов. Но потребуются не один десяток лет применения подобных изобретательных средств, чтобы астрономы разобрались, из чего состоит наша Вселенная.

**«Не существует ничего, кроме атомов и пустого пространства, все остальное — лишь мнения»**

**Демокрит**

\* Цит. по: Диоген Лаэртский, IX, 44.

## В сухом остатке: Космический ускоритель

# 26 Бозон Хиггса

**Откуда берется масса? Одно из объяснений состоит в том, что взаимодействие с особой частицей, бозоном Хиггса, замедляет предметы и делает их тяжелыми. Есть надежда, что масштабный эксперимент в Швейцарских Альпах позволит проверить, существует ли эта частица.**

В 2010 году физики, вооружившись Большим адронным коллайдером (БАК), взялись искать неведомую субатомную частицу — бозон Хиггса. Огромная машина начала работу в ЦЕРН — огромной лаборатории физики частиц неподалеку от Женевы, где размещаются кольцевые туннели, самый длинный — длиной 27 километров, на глубине 100 метров под землей. БАК — новейший проект ЦЕРН, цель его — найти неуловимый бозон Хиггса, тяжелую частицу, существование которой вытекает из теорий происхождения массы\*.

\* В 2012 году результаты, полученные с помощью БАКа, позволили с большой вероятностью предполагать, что бозон Хиггса действительно существует. В конце 2015 года в БАКе, судя по всему, была обнаружена еще одна новая частица, с зарядом в 1500 гигаэлектронвольт: исследователи наблюдали избыток пар фотонов по 750 ГэВ — возможно, таковы продукты распада этой частицы.

В БАКе протоны разгоняют до высоких скоростей при помощи огромных магнитов. Возникает протонный луч, который загибается вокруг широкого подземного пути. Протонам в их круговом полете постоянно придают ускорения, и они движутся все быстрее. Когда максимально возможная скорость достигнута, два противоположных луча направляют друг на друга так, чтобы отдельные протоны врезались прямо друг в друга. Поскольку они движутся на предельных скоростях, протоны распадаются и при столкновении высвобождают огромное количество энергии.

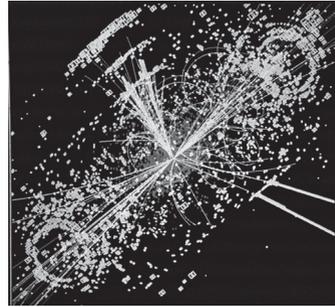
**Ливень из частиц** Из этой вспышки энергии конденсируется поток других частиц, случайного состава. Как показал Эйнштейн в теории относительности, масса и энергия эквивалентны. Следовательно, чем выше энергия столкновения, тем более массивные частицы могут возникнуть. По приблизительным подсчетам физиков, масса бозона

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1687**

В «Началах» Ньютона заданы уравнения массы

Хиггса более чем в сто раз превышает массу протона, поэтому на бозон Хиггса нужно много энергии — и много везения, чтобы его увидеть.

Как уже было сказано, эксперименты со столкновением частиц можно уподобить попытке разобраться в работе швейцарских часов посредством молотка. Во вспышке энергии могут возникнуть частицы самых разных видов. Физики фильтруют эту смесь, пропуская ее через магнитное поле и наблюдая, как меняются траектории составляющих. Частицы с противоположными электрическими зарядами в магнитном поле отклоняются в противоположные стороны. Их траектории закручиваются в спирали — тем более тугие, чем больше масса. Таким образом, зная траекторию частицы, физики вычисляют ее массу и заряд.



Модель траекторий частиц после распада бозона Хиггса

**Идея Хиггса** Существование бозона Хиггса, открытие которого — Святой Грааль БАКа, критически значимо: считается, что именно он, взаимодействуя с материей, сообщает ей свойство массы. Эту идею предложил в 1964 году шотландский физик Питер Хиггс. Бозон, названный его именем, — массивная частица, которая притягивает к себе другие частицы и замедляет их — сообщает им тяжесть. Хиггс, скромный ученый, заявляет, что его «единственная стоящая мысль» посетила его во время прогулки в шотландских горах.

Гипотеза Хиггса разрешает загадку, почему у разных частиц разная масса. Например, атомы состоят из тяжелых протонов и нейтронов, окруженных легкими электронами. Различные силы также действуют через частицы. Но хотя любые переносчики взаимодействия выполняют похожую работу, сами они на удивление различны. Фотоны передают информацию в электромагнитных взаимодействиях, глюоны связывают кварки сильным ядерным взаимодействием, а так называемые  $W$ - и  $Z$ -бозоны реализуют слабые ядерные взаимодействия. Однако у фотонов нет массы, а  $W$ - и  $Z$ -бозоны очень массивны, в сотни раз больше протонов.

Понимание, откуда берется эта разница в массах, оказалось затруднено в особенности потому, что в Стандартной модели физики частиц эти силы должны быть объединены. Электромагнитные и слабые силы, например, объединены в электрослабые взаимодействия. Но такая разница между переносчиками силы в рамках одной теории представлялась абсурдной. Почему переносчики силы  $W$ - и  $Z$ -бозоны имеют массу, а фотоны — нет?

**1964**

Хиггса осеняет идея о том, что придает массу частицам

**2009**

БАК начинает работу

**2010**

Первое столкновение в БАКе

**Помедленнее** Хиггс представлял, что на эти агенты силы, проходя сквозь некое фоновое поле, действует нечто замедляющее их. Как стеклянный шарик в стакане патоки, частицы безуспешно пытаются набрать скорость, словно у них высокая инерция. Это поле, теперь известное как поле Хиггса, подобно вязкой жидкости, оно замедляет  $W$ - и  $Z$ -бозоны, по сути придавая им массу. Оно действует сильнее на  $W$ - и  $Z$ -бозоны, чем на фотоны, и потому кажется, что бозоны тяжелее.

Частица-агент силы Хиггса теперь носит его имя. Иногда проводится такая аналогия: массивная частица — как кинозвезда, попавшая на вечеринку бозонов Хиггса. Звезде трудно перемещаться — ее задерживает светское общение. Конечно, остается вопрос: что придает массу самому бозону Хиггса? Физические теории предсказывают, что должна существовать некая дополнительная частица, но не сообщают, какую именно массу она должна иметь. Поэтому до сих пор непонятно, найдется ли такая в БАКе.

Физикам придется искать намеки на частицу Хиггса, скрытый среди миллиардов следов других частиц. Ученые знают, что они ищут, но отыскать все равно будет непросто. Если энергии достаточно высоки, бозон Хиггса может появиться лишь на долю секунды, а затем сразу исчезнуть в каскаде других частиц. Вот почему физикам придется искать явные улики и, восстановив целое по частям, судить о существовании бозона Хиггса, а не рассчитывать увидеть саму частицу.

**Четыре силы** Бозон Хиггса, если предположить, что он так или иначе существует, играл важную роль в юной Вселенной. В доли секунды после Большого взрыва Вселенная была так горяча, что атомов не существовало, и четыре фундаментальные силы — тяготение, электромагнетизм, сильное и слабое ядерные взаимодействия — были совмещены в «суперсилу».

## Нарушения и изъяны симметрии

В первую сотую долю секунды после Большого взрыва Вселенная прошла четыре фазы порождения фундаментальных сил: электромагнетизма, слабого и сильного ядерных взаимодействий и тяготения. Как вода, которая конденсируется из пара в жидкость и далее в лед, структура Вселенной по мере охлаждения делалась все более асимметричной. На каждой стадии могли возникать изъяны — подобно тому как в кристаллах льда заметно неравномерное расположение молекул воды. Теоретики предполагают, что среди этих топологических дефектов пространства-времени могут быть линейные космические струны, односторонние магнитные монополи и закрученные формы, называемые текстурами.

С охлаждением Вселенной единство сил по мере нарушения симметрии расщеплялось. Это происходит во всех случаях нарушения симметрии. Например, круглый обеденный стол с салфетками и приборами симметричен, и поэтому неважно, где вы сядете — стол со всех сторон выглядит одинаково. Но если кто-нибудь заберет со стола салфетку, симметрия потеряна: вы можете сказать, где находитесь относительно него. Вмешательство разрушило симметрию. Более того, оно влияет и на дальнейшее: все остальные гости за столом могут взять салфетку слева от себя, в точности как это сделал первый гость. Если же первую салфетку взяли с другой стороны, может случиться противоположное. Порядок дальнейших событий задается случайным изначальным событием. Так же и со Вселенной: пока она охлаждалась, события сложились так, что силы поочередно отпали от изначального единства. Поле Хиггса тогда должно было действовать на каждую из них по отдельности и придать частицам — переносчикам взаимодействия — массу.

Если в БАКе найдется бозон Хиггса, физики будут праздновать победу. Даже предвкушение этого открытия породило споры, действительно ли идея принадлежит Хиггсу. Сам Хиггс признает, что, описывая эту частицу в уравнениях, он опирался на работу других, и называет бозон «частицей, именуемой некоторыми в его честь», а не «своей частицей». Нобелевский лауреат по физике Леон Ледерман зашел еще дальше и назвал бозон Хиггса «частицей Бога».

Найдут ученые бозон Хиггса в БАКе или нет, результат будет очень важен в любом случае. Частицы сильно разнятся по массе — на 14 порядков величины, от нейтрино до верхнего кварка. Такой разброс — хитрый ребус для любой теории. Если бозон Хиггса не обнаружится, придется создавать новую физику.

**«Было очевидно, что нужно попробовать это на простейшей калибровочной теории — электродинамике: разрушить ее симметрию и посмотреть, что получится»**

**Питер Хиггс, «Нарушенная симметрия и массы калибровочных бозонов», для журнала «Письма в физическое обозрение» (1964)**

**В сухом остатке:  
Источник массы**

# 27 Теория струн

**Теория струн предлагает модель атома как совокупности колебаний в 11 измерениях, а не как жесткую сферу. Изначально теорию струн предложили как способ объединить теорию тяготения и квантовую механику, ее развивают и поныне, но теперь это математическое представление Вселенной до Большого взрыва.**

Заветная мечта физики – теория всего. Крупнейшее препятствие на пути к ней – объединение описаний большого и малого, а именно гравитационных и квантовых сил. Причины и следствия легко объяснить теорией тяготения – она позволяет точно предсказать траектории планет. Но в квантовой механике такой точности нет: расположение электронов в атомах можно описать лишь как вероятность.

Многие, в том числе и Альберт Эйнштейн в 1940-х, пытались и не смогли объединить гравитационную и квантовую теории. Знаменита фраза Эйнштейна, которой он высмеял неопределенное квантовое состояние всего: «Бог не играет в кости». Стивен Хокинг, Роджер Пенроуз и другие великие мыслители пока не отчаиваются. Их попытки объяснить Вселенную уперлись в математические основы. Один из первых шагов – теория струн.

**Вибрирующие кольца** Теория струн появилась в 1920-х годах, когда Теодор Калуца применил математику волн к атомам, и стремительно развилась в 1970–1980-х. В теории струн элементарные частицы – кварки, электроны и протоны – представлены не комочками материи или энергии, а колебаниями. Различные массы, заряды и энергии частиц возникают из гармонических колебаний «струны» – линии,

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

### 1921

Теорию Калуцы—Клейна предлагают как объединяющую электромагнетизм и гравитацию

### 1970

Ёитиро Намбу описывает сильное ядерное взаимодействие в понятиях квантово-механических струн

**«Эти дополнительные измерения, открывающие диапазоны возможных вибраций струны в разных направлениях, оказываются ключом для описания всех видимых частиц»**

**Эдвард Виттен, из интервью телеканалу Пи-би-эс, программа «Изящная Вселенная» (2003)**

которая может простирается во многих измерениях. Как струна гитары при изменении длины меняет высоту звука, так и струна с одной разновидностью похожа на кварк, а с другой — на электрон.

Но струны в теории струн отличаются от гитарных. Струна гитары вибрирует в четырех измерениях — трех пространственных и одном временном. Все, что мы воспринимаем, ограничено этими четырьмя измерениями пространства-времени. Субатомные же струны могут заполнить звучанием до 11 измерений. Дополнительные семь осей скрыты от наших глаз. Частицы появляются в нашем мире только с одним или нулем измерений, остальные свернуты так, что мы не замечаем их.

Струны могут быть разомкнуты или свернуты в кольца. Они, по сути, описываются одной и той же математикой, а их разница возникает лишь из различия конфигураций и гармоний. Таким образом, теория струн в каком-то смысле современное продолжение мысли Иоганна Кеплера: в конце XVI века он считал, что космос устроен в согласии с музыкальными тонами и гармониями и подчиняется рядам и пропорциям отвлеченных чисел.

**Любить или ненавидеть** Теория струн — целиком математическая идея, которую еще предстоит дорабатывать. Никто никогда струн в природе не наблюдал — и никто не представляет, как узнать наверняка, существуют ли они вообще. Как подтвердить или опровергнуть эту теорию экспериментально, пока не придумали, хотя некоторые ее предсказания может поддержать эксперимент в Большом адронном коллайдере. Сложности с подтверждением теории струн придали ей противоречивости.

Многие ученые придерживаются взглядов Карла Поппера о том, что наука движется вперед преимущественно благодаря опровержениям. Вам приходит в голову идея, вы формулируете строгую гипотезу и смотрите, выдержит ли эта гипотеза экспериментальную проверку.

### Середина 1970-х

Развита квантовая теория тяготения

### 1984–1986

Быстрое развитие теории струн объясняет все частицы

### 1990-е

Уиттен и другие развивают М-теорию в 11 измерениях

### 2009

Запущен Большой адронный коллайдер

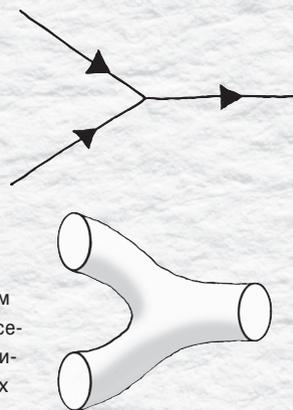
Если гипотеза выдерживает проверку, вы хлопаете себя по плечу и беретесь продвигать свою идею шире; если она проваливается, вы возвращаетесь к своей доске с формулами. Поппер указал, что лишь в последнем случае вы узнали что-то новое. Но теория струн развита не полностью, и никаких проверяемых гипотез она пока не предложила. Говорят, что теорий струн столько же, сколько теоретиков-«струнников».

**М-теория** В 1990-х годах американский физик Эд Виттен попытался свести все варианты теории струн в единую большую систему. Он назвал ее М-теорией. Разные ученые трактуют букву «М» по-разному, в зависимости от точки зрения она может означать мембрану, мистику или мешанину. В широком смысле М-теория старается разложить характеристики видимого мира в многомерном пространстве. Затем математические схемы позволяют различить отдельные частицы, силы и т. п.

Один из полезных аспектов М-теории: при помощи дополнительных измерений события вроде Большого взрыва можно исследовать математически и так попытаться понять, что к ним привело. Современная космология считает Большой взрыв сингулярностью в четырехмерном пространстве-времени, тут буксуют любые уравнения, и о том, что происходило до этого

## М-теория

Струны — это, в сущности, одномерные линии. Но в многомерном пространстве они — простейший случай форм, которые могут включать в себя двумерные поверхности и другие многомерные структуры. Эта обобщенная теория называется М-теорией. Под «М» не скрывается какое-то конкретное слово, но это могла бы быть «мембрана» или «мистика». Частица, двигаясь сквозь пространство, прочерчивает за собой след. Если бы можно было макнуть частицу в чернила, она бы прочертила линию своей траектории, которую мы назовем мировой линией этой частицы. Струна, замкнутая в кольцо, нарисовала бы цилиндр. В этом случае след называется мировым слоем. Где эти слои пересекаются, а струны рвутся и переконфигурируются, там возникают взаимодействия. М-теория — исследование форм этих слоев в 11-мерном пространстве.



**Мне не нравится, что они ничего не вычисляют. Мне не нравится, что они не проверяют свои идеи. Мне не нравится, что для всего, что не согласуется с экспериментом, они выдумывают объяснение — отговорку: «Ну, это все еще может оказаться верным»**

**Ричард Фейнман, из интервью 1987 г.**

**для книги «Суперструны: теория всего?» П. К. У. Дэвиса и Дж. Р. Брауна**

события, ничего сказать нельзя. Работая с М-теорией, математики могут заглянуть во времени за Большой взрыв. Некоторые, к примеру, предполагали, что наша Вселенная возникла, когда многомерные слои (мембраны) энергии врезались друг в друга.

Как бы то ни было, не все любят теорию струн. Физик-математик Роджер Пенроуз назвал ее всего лишь «поветрием» и сомневается в существовании — или необходимости — стольких дополнительных измерений. Он нашел другой способ вычислить, что было до Большого взрыва: в своей недавней книге «Циклы времени» он утверждает, что наша Вселенная — одна из ряда последовательных космических рождений и смертей. Конец нашей Вселенной может быть началом другой.

Ни одна из этих теорий, скорее всего, не описывает всю Вселенную в единой математической схеме, но все они добавляют представлений о возможном возникновении Вселенной. Теоретики струн надеются на гармонию, другие, как Пенроуз, считают, что в конечном итоге квантовую механику придется чем-то заменить. Но пройдет, пожалуй, немало времени, прежде чем мы выясним истину.

**В сухом остатке:  
Вселенские гармонии**

# 28 Антропный принцип

**Вселенная устроена так, как устроена, потому что, если бы это было иначе, нас бы здесь не было и мы бы не видели ее. Так утверждает антропный принцип. Любимый философами, теперь он вызывает новые вопросы в космологии и физике о том, почему наша Вселенная так тонко подстроена под нас.**

Вселенная, в которой мы живем, кажется невероятно пригодной для нашего существования. Физические силы имеют ровно ту величину, чтобы формировались атомы, развивалась химия — и возникала жизнь. Мы очень везучи. Будь Вселенная устроена хоть чуть-чуть иначе, все могло бы быть по-другому. Но то, что мы — здесь и наблюдаем Вселенную, может быть не столь удивительно: антропный принцип говорит нам, что мы существуем лишь потому, что Вселенная устроена так, как устроена. В противном случае нас бы просто не возникло.

**Лотерея** Наше присутствие держится на некоторых ключевых аспектах физики. Критически важно сильное ядерное взаимодействие: оно ровно той величины, чтобы склеивать протоны и нейтроны, чтобы складывались ядра и атомы. Если бы оно было чуть сильнее или слабее, атомы не могли бы существовать, не формировался бы углерод и биология и человек не развились бы. Крошечные изменения в величинах физических постоянных, в размерах сил или массах частиц могли бы иметь катастрофические последствия для жизни.

Другой фактор — ткань и геометрия Вселенной. Если бы скорость расширения Вселенной была другой или темная энергия была сильнее, галактики и звезды могли бы не образоваться — или их могло бы уже разорвать на части. Особенно тонко откалибрована сила темной энергии: согласно общей теории относительности, она могла быть

невообразимо больше или меньше противодействующих ей сил тяготения. Но обе силы сравнимы, и потому галактические структуры миллиарды лет сохраняют устойчивость.

Чтобы получилось человечество, нужно время и множество ингредиентов. Вселенная должна быть достаточно старой, чтобы в ранних поколениях звезд получился углерод, а сильное и слабое ядерные взаимодействия должны быть ровно такими, чтобы сложились ядерная физика и химия. Звезды должны быть долговечными, иначе не сформируются планеты, и достаточно большими, чтобы мы могли оказаться на милой пригородной планете с умеренным климатом, водой, азотом, кислородом и всеми остальными молекулами, которые нужны для зарождения жизни.

**Степени необходимости** По мере того как астрономы узнавали больше о Вселенной, необходимые для жизни условия лишь множились. В конце 1950-х Роберт Дик и Брэндон Картер привнесли антропный принцип из философии в физику и космологию. По их простейшим выкладкам, нас бы здесь не было, если бы физические параметры были иными, но мы есть, а значит, вероятность существования обитаемых Вселенных ограничена. Более сильная версия подчеркивает, что жизнь — это необходимый результат возникновения Вселенной. Например, нужны наблюдатели, чтобы конкретизировать квантовую Вселенную — иначе у нее есть лишь вероятность существования. В другой версии Джон Барроу и Фрэнк Типлер предположили, что обработка информации — фундаментальная цель Вселенной, и поэтому она должна производить существ, способных этим заниматься.

Легко признать антропный принцип, когда дело доходит до нашей планеты: вокруг миллиарды звезд, и мы живем неподалеку от самой обычной, и находится она в середине своего жизненного цикла. Живи мы на другой планете, все бы отличалось не так сильно. Возможно, существуют и другие планеты, на которых мы могли бы жить так же счастливо или на которых

**Благодаря внутренним признакам его творения  
Великий Архитектор Вселенной предстает теперь  
как чистый математик**

**Сэр Джеймс Джинс, «Загадочная Вселенная» (1930)**

**1957**

Роберт Дик пишет, что Вселенная ограничена биологическими факторами

**1973**

Брэндон Картер размышляет над антропным принципом

## Антропные пузыри

Антропной дилеммы можно избежать, если множество Вселенных-пузырей существует параллельно с той, в которой мы живем. В каждом пузыре — слегка измененные физические параметры. Они управляют особым развитием этих Вселенных и возможностью появления в них жизни. Насколько мы знаем, жизнь капризна и выберет лишь некоторые. Но, поскольку пузырей много, это возможно, и потому наше существование не столь невероятно.



есть свои формы жизни. Может быть, наша планета, хоть она и удобна для нас, не такая уж и особенная. Но труднее представить, на что была бы похожа Вселенная с иными законами физики.

**Параллельные Вселенные** Физики готовы описывать на бумаге Вселенные, свойства которых отличаются от нашей. Обычно они мыслятся в математических понятиях — в величинах вероятности некоторых свойств, а не как реально существующие явления. Такие теории параллельных Вселенных, или мультиверсов, набирают популярность. Некоторые физики считают, что это, возможно, «реальные» аспекты космоса, существующие в скрытых измерениях. Однажды, надеются они, мы сможем разработать эксперименты, чтобы раскрыть их присутствие.

**Так, как есть** У антропного принципа имеются свои критики. Некоторые считают, что он не говорит ничего нового, что это трюизм: все так, как есть, потому что оно так, как есть. Других беспокоит, что экспериментальный доступ у нас лишь к одной Вселенной, поэтому проверить, существуют ли другие пригодные для жизни мироздания, нам не удастся.

**«Наблюдаемые значения всех физических и космологических переменных не равновероятны, но принимают значения, ограниченные требованием, чтобы существовали места, в которых может образоваться жизнь на основе углерода, и (...) чтобы Вселенная была достаточно старой, чтобы это уже случилось»**

**Джон Барроу и Фрэнк Типлер, «Антропный космологический принцип» (1986)**

M-теория и теория струн предлагают способы математически исследовать эти возможности. Поскольку обе теории можно распространить на время до Большого взрыва, авторы этих теорий в силах искать варианты, наиболее подходящие по физическим параметрам. Вселенная, вполне вероятно, сама собой перебирает комбинации свойств, следуя простым правилам вроде минимизации энергозатрат, независимо от нашего существования.

Пусть космологи и не приходят к согласию о том, имеет ли смысл вопрос о вероятности нашего существования, нам действительно повезло, что Вселенная развилась именно так, как развилась. Понятно, что на формирование пригодной для жизни химической среды требуется много времени. Но мы живем здесь, в определенный момент истории Вселенной, когда темная энергия относительно безвредна и уравнивает силу тяготения, — это больше чем везение. Должны существовать какие-то скрытые правила, которые нам еще предстоит открыть.

**В сухом остатке:  
Вселенная такая,  
как есть**

# 29 Последовательность галактик Хаббла

**Галактики бывают двух видов: эллиптические и спиральные. Астрономы давно подозревали, что их сходства и различия вроде балджей (вздутий) в центре и наличия или отсутствия плоского диска звезд указывают на эволюцию галактик. Свидетельства того, что последовательность Хаббла порождена столкновением галактик, почерпнуты из фотографий глубочайшего космоса.**

Когда в 1920-х годах наука постановила, что некоторые размытые туманности, которыми усыпано небо, — это галактики за пределами нашей, астрономы взялись их классифицировать. Галактики бывают двух основных типов: гладкие, эллипсообразной формы, и с отчетливым спиральным рисунком. Они называются, соответственно, эллиптическими и спиральными.

Эдвин Хаббл, американский астроном, который первым установил, что туманности находятся за пределами Млечного Пути, на огромных расстояниях, предположил, что галактики образуют последовательность, и дал им соответствующие названия. Его классификация используется до сих пор. Эллиптические галактики обозначают буквой *E* и номером (от 0 до 7), который возрастает в зависимости от того, насколько галактика вытянута. *E0* — почти круглая галактика, *E7* больше напоминает сигару. В трех измерениях эллиптические галактики имеют форму мяча для регби.

Спиральные галактики, по схеме Хаббла, обозначают буквой *S* и дополнительной буквой (*a*, *b* или *c*) в зависимости от того, насколько туго закручены их спиральные рукава. Галактика *Sa* — тугая спираль, а *Sc* — свободная.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1920**

Великий спор ставит вопрос о том, лежат ли туманности за пределами Млечного Пути

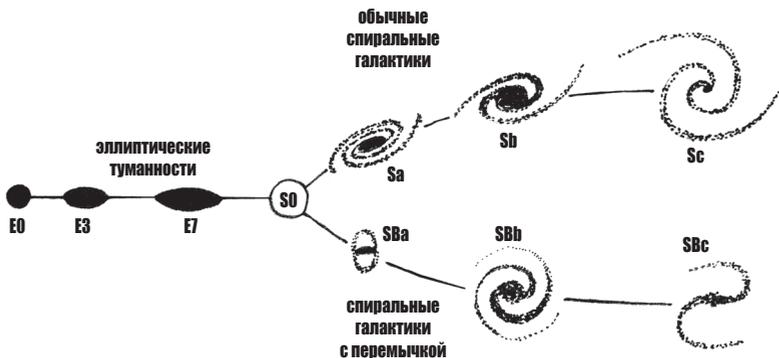
**1926**

Камертонная диаграмма Хаббла

В трех измерениях спиральные галактики сплющены, как летающая тарелка или линза. Картина усложняется тем, что в некоторых спиральных галактиках есть прямой элемент, или перемычка, проходящая через внутренние области галактики. Такие галактики — спирали с перемычкой — вписаны в ту же систему обозначений и называются *SB*. Галактики, выпадающие из этой классификации, называются неправильными; к той же категории причисляют галактики, имеющие форму между эллиптической и спиралевидной. Эти два вида причисляют к классу *S0*.

**Камертон Хаббла** При близком рассмотрении между двумя классами галактик обнаруживаются сходства. Спирали состоят из двух компонентов, как яичница: центральное вздутие (желток) — балдж, который выглядит очень похоже на эллиптическую галактику, и окружающий его плоский диск (белок). Размер балджа относительно диска — еще один критерий классификации галактик. Хаббл даже представлял, что галактики образуют последовательность — от тех, в которых преобладает балдж, в том числе и эллиптические галактики, до почти безупречно плоских дисков. Первые иногда называют галактиками раннего типа, вторые — позднего типа. Хаббл считал, что из этих сходств вытекает возможность эволюции галактик от одного типа к другому.

Хаббл расположил свою классификацию галактик на диаграмме в форме камертона. Слева направо, вдоль ручки вилки, размещены эллиптические галактики, от округлых к вытянутым. Справа, вдоль верхнего зубца, — последовательность спиралей от туго закрученных с крупными балджами и маленькими дисками — к дискам со свободными спиралями и едва заметными



\* *Hubble Deep Field* («Глубокое поле зрения Хаббла», англ.) — изображение полосы неба шириной в 2,5 угловых минут, полученное в результате обработки 342 кадров с широкоугольной планетарной камеры телескопа «Хаббл», сделанных в течение 10 дней. Суммарная выдержка превысила 140 часов. Был выбран участок неба без звезд на переднем плане, поэтому почти все 3000 объектов в кадре — далекие галактики.

1975

Вера Рубин обнаруживает темную материю в спиральных галактиках

1995

Сделан снимок *Hubble Deep Field*\*

балджами. Спиральные галактики с перемычкой расположены ниже, вдоль параллельного зубца. В этой знаменитой диаграмме, известной как камертон Хаббла (см. с. 117), американский астроном выразил мощную идею: эллиптические галактики могли бы отрастить диски и однажды стать спиральными. Впрочем, доказательств, что подобные преобразования происходят, у Хаббла не было. С тех пор многие исследователи всю свою жизнь в науке пытались понять, как галактики могли бы эволюционировать из одного типа в другой.

**Слияния** Один из способов радикального изменения свойств у галактик — столкновения. Составляя карту неба, астрономы нашли множество близко лежащих пар галактик, которые явно взаимодействовали между собой. В самых наглядных случаях из обеих галактик взаимным тяготением вытягиваются длинные, как у головастика, хвосты звезд, — как, например, в паре сталкивающихся галактик Антенны. Другие галактики прокладывают себе путь прямо сквозь центр своей напарницы, поднимая облака звезд и дымящиеся кольца газа. Получающиеся возмущения зачастую порождают чрезвычайно яркое свечение, поскольку в клубящихся облаках газа формируются новые звезды. Эти молодые голубые звезды могут быть окутаны космической сажой, и некоторые их области от этого светят красным, подобно тому, как пыль делает ярче закат солнца на Земле. Слияние галактик — потрясающее зрелище.

Тем не менее подробности строения галактик остаются неясными. Чтобы уничтожить огромный диск звезд и оставить голый эллиптический балдж, потребовалось бы катастрофическое столкновение, а чтобы галактика образовала достаточных размеров диск, не разрушаясь, требуется постепенное мягкое приращение. Астрономы видят лишь немногие галактики в промежуточных состояниях, и истинная картина того, как именно галактики меняются через слияние, скорее всего, очень сложна.

**Галактические ингредиенты** В галактиках может содержаться от миллионов до триллионов звезд. Эллиптические галактики и балджи спиральных состоят в основном из старых красных звезд. Они движутся по произвольно наклоненным орбитам, тем самым создавая раздутую эллипсоидную форму галактики или балджа. Диски же спиральных галактик в основном состоят из молодых голубых звезд. Они сосредоточены в спиральных рукавах; при прохождении рукава сквозь газовое облако диска в нем запускается формирование звезд. Диски спиралей содержат огромное количество газа, особенно водорода. В эллиптических галактиках содержится очень мало газа, и поэтому новых звезд в них рождается меньше.

В галактических же дисках была открыта темная материя (см. с. 72). Край спиралей движутся слишком быстро, чтобы объяснить это лишь их массой в звездах и газе, а значит, присутствует еще какая-то форма материи. Этот

«На последнем тусклом горизонте среди призрачных ошибок наблюдений мы ищем точки отсчета, которые едва ли осязаем. Поиск продолжится. Это стремление — старше истории. Оно не удовлетворено, и его не подавить»

Эдвин Хаббл, «Царство галактик» (1936)

дополнительный материал невидим — он не испускает и не поглощает свет и называется темной материей. Она может существовать в форме экзотических частиц, которые трудно обнаружить, поскольку они редко вступают во взаимодействие, или в виде сжатых массивных объектов вроде черных дыр, незагоревшихся звезд или газовых планет. Темная материя образует сферический кокон вокруг галактики, который называется «гало галактики».

**Hubble Deep Field** Одни и те же основные типы галактик существуют по всей Вселенной. Самая глубокая фотография неба, снятая на данный момент, — *Hubble Deep Field*. Чтобы понять, как выглядит средний срез далекой Вселенной, в 1995 году космический телескоп «Хаббл» следил за небольшой полоской неба (шириной в 2,5 угловые минуты) в течение 10 дней. Орбитальная обсерватория позволила астрономам наблюдать космос намного глубже, чем это возможно через телескопы с Земли, и вид далеких галактик открылся нашим глазам. Свету нужно время, чтобы дойти до нас через космические пространства, и потому мы видели эти галактики такими, какими они были миллиарды лет назад.

Поскольку было специально выбрано поле без звезд на переднем плане, почти все 3000 объектов в кадре — далекие галактики. Большинство из них можно классифицировать как эллиптические и спиральные, а значит, оба типа сформировались очень давно. Но неправильных и маленьких голубых галактик больше в далекой Вселенной, чем ближе к нам. Кроме того, 8–10 миллиардов лет назад звезды формировались в 10 раз быстрее, чем сейчас. Оба фактора заставляют предположить, что быстрый рост галактик в молодой Вселенной обусловлен более частыми их столкновениями.

В сухом остатке:  
Галактические  
трансформеры

# 30 Скопления галактик

**Галактики группируются вместе, образуя скопления — самые большие элементы Вселенной, скрепляемые воедино силой тяготения. Эти массивные нагромождения из тысяч галактик содержат резервуары очень горячего газа и темной материи, разбросанные между членами скопления.**

В XVIII веке астрономы осознали, что туманности распределены неравномерно. Как и звезды, они часто собираются в группы и скопления. Французский астроном Шарль Мессье одним из первых исследовал и описал самые яркие туманности — в том числе те, о которых мы теперь знаем, что это галактики, а также диффузные и планетарные туманности, звездные и шаровые скопления. Первая версия этого каталога, опубликованного в 1774 году в журнале Французской академии наук, включала лишь 45 ярчайших пятен, а более поздняя версия 1781 года — более сотни. Астрономы до сих пор называют объекты Мессье с префиксом в виде буквы М и каталожным номером — галактика Андромеды, например, известна как М31. Каталог Мессье включает некоторые из наиболее изученных объектов своего класса.

Намного более обширный каталог небесных объектов — Новый общий каталог — был составлен и опубликован в 1880-х. В нем Иоганн Дрейер описал почти 8000 объектов, примерно треть из них — результаты наблюдений Уильяма Гершеля. Разные типы объектов причислялись к разным классам, от ярких туманностей до рассеянных звездных скоплений. Когда с приходом фотографии стало возможно отыскать на снимках намного больше объектов, в 1905 году каталог расширили, добавив два Индекс-каталога — из более чем 5000 объектов. Эти астрономические объекты до сих пор называются *NGC (New General Catalogue,*

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1781**

Мессье замечает скопление Девы

**1924**

Хаббл вычисляет расстояние до галактики Андромеды

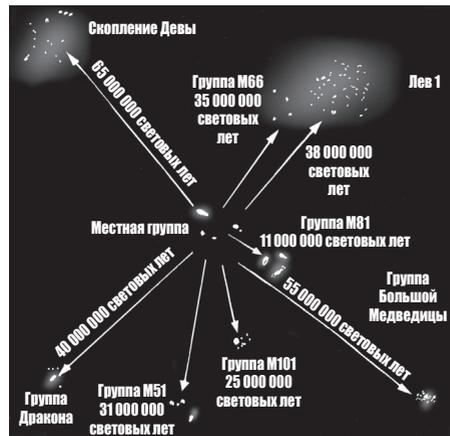
«Кто мы такие? Выясняется, что мы живем на незначительной планете у обычной звезды, затерянной в галактике, припрятанной в забытом уголке Вселенной, где галактик намного больше, чем людей»

Карл Саган, «Космос» (1980)

Новый общий каталог) или *IC* (*Index Catalogue*, Индекс-каталог) в зависимости от того, в какую подборку они входили. Галактика Андромеды, например, также известна как *NGC 224*.

**Местная группа галактик** В 1920-х астрономы обнаружили, что многие туманности — это другие галактики. Методами шкалы расстояний в астрономии, в том числе с помощью переменных звезд-цефеид и красного смещения, удалось приблизительно вычислить удаленность этих объектов от нас. Например, галактика Андромеды находится в 2 500 000 световых лет от Земли. Скоро стало ясно, что Андромеда и Млечный Путь — два крупнейших члена группы из около 30 галактик, получившей название Местной.

Андромеда и Млечный Путь похожи по размеру и характеристикам. Галактика Андромеды — тоже большая спираль, хотя мы видим ее сбоку, наклоненной примерно на 45 градусов. Другие галактики в группе намного меньше. Два наших ближайших соседа, примерно в 160 000 световых лет, — Большое и Малое Магеллановы Облака, которые видны как пятна размером с большой палец в южном небе, поблизости от полосы Млечного Пути. Они названы в честь мореплавателя XVI века Фердинанда Магеллана, который привез отчеты о них после своего кругосветного путешествия. Магеллановы Облака — неправильные карликовые галактики примерно в одну десятую размера Млечного Пути.



1933

Цвики оценивает количество темной материи в скоплении Волосы Вероники

1966

Обнаружено рентгеновское излучение из скопления Девы

**Скопление Девы** Местная группа — одно из многих скоплений галактик. Намного более богатое скопление Девы содержит тысячи галактик, шестнадцать из которых хватило яркости, чтобы попасть в каталог Мессье 1781 года как группа. Дева — ближайшее к нам крупное скопление галактик, примерно в 60 миллионах световых лет от нас. Другие примеры обширных скоплений — скопление Волосы Вероники и скопление Печи, каждое названо в честь созвездия, в котором находится. На самом деле скопление Девы и Местная группа — части еще более крупного скопления, Местного Сверхскопления галактик, или Сверхскопления Девы.

Скопления галактик удерживает вместе сила тяготения. Как звезды движутся по орбитам в галактиках, так и галактики движутся по траекториям вокруг центра масс скопления. Типичное большое скопление галактик имеет массу в  $10^{15}$  (миллион миллиардов) раз больше Солнца. Само пространство искривляется от такого количества материи в столь малом объеме. По аналогии с резиновым полотном скопления лежат во вмятине, образованной их собственным весом. Но в нее падают не только галактики — в яме пространства-времени накапливается и газ.

**Межкластерный носитель информации** Скопления галактик полны горячего газа. Из-за его высокой температуры — миллионы градусов Цельсия — это море газа светится достаточно ярко, чтобы испускать рентгеновские лучи, которые можно обнаружить со спутников. Горячий газ называют межкластерным носителем информации. Похожим образом в гравитационном колоде скоплений собирается темная материя. Поскольку астрономы надеются увидеть темную материю в новой среде, за пределами отдельных галактик, они высматривают в скоплениях необычные знаки, которые помогут им понять, из чего состоит темная материя. Например,

### Шарль Мессье (1730–1817)

Мессье родился в большой семье в Лотарингии, Франция. Он заинтересовался астрономией после того, как в 1744 году в небе появилась потрясающая шестихвостая комета, а вслед за ней, в 1748-м, произошло солнечное затмение, которое он мог наблюдать из родного городка. В 1751-м он нанялся во флот астрономом и тщательно записывал все

наблюдения — например, прохождение Меркурия через Солнце в 1753-м. Он получил широкое признание европейских научных институтов и в 1770-м был избран во Французскую академию наук. Мессье создал знаменитый каталог — отчасти чтобы помочь тогдашним охотникам за кометами. Он сам открыл 13 комет, в честь него названы кратер на Луне и астероид.

**Образ — это больше чем просто идея. Это вихрь или скопление сплавленных идей, и он наделен энергией**

**Эзра Паунд, «Вихрь» (1914)**

в одном исследовании утверждается, что обнаружена стремительная «пуля» темной материи, движущаяся не так, как горячий газ, окружающий ее в определенном скоплении. Но источник темной материи остается загадкой. Из-за своей массивности скопления также могут искривлять свет от галактик, находящихся позади них. Отклоняя свет, проходящий мимо, они действуют как огромные, но зернистые гравитационные линзы (см. с. 148) и размывают далекие галактики в дуги и пятна.

Скопления можно невольно представить как космические свалки: они так велики, что в них падает что попало. Потому они и интересны космическим археологам. Более того, как самые крупные объекты, какие удерживает вместе сила тяготения, они должны, по идее, содержать обычную и темную материи в тех же пропорциях, что и во всей Вселенной. Если бы можно было посчитать массу всех скоплений, получилась бы приблизительная величина общей массы Вселенной. А если бы можно было еще и отследить, как скопления растут со временем, — наблюдая, допустим, очень далекие скопления в процессе их формирования, — можно было бы понять, как развивалась структура Вселенной начиная с Большого взрыва.



**Скопление Волосы Вероники**

**В сухом остатке:  
Все собирается здесь**

# 31 Структура в крупном масштабе

**Распространение галактик по Вселенной подобно мыльной пене. Скопления располагаются на пересечениях волокон и плоскостей, обернутых вокруг пустых областей — войдов\*. Эта космическая паутина — результат миллиардов лет тяготения, стягивающего галактики друг к другу с их рождения.**

\* От англ. *void* — пустота. К 1980-м годам инструментарий астрономов развился настолько, что они смогли измерять красное смещение для многих галактик одновременно и регистрировать их световые характеристики как множественные спектры. Группа астрономов из Гарвардского центра астрофизики (*CfA*) взялась за систематический сбор величин красных смещений для сотен галактик, чтобы попытаться восстановить их расположение в трехмерном пространстве. Итоговый обзор — Обзор красных смещений *CfA* — явил нам новую панораму космоса.

Астрономы изучили окрестности Млечного Пути от его Местной группы до ближайших скоплений и сверхскопления, на краю которого мы располагаемся. По мере накопления данных охват расширялся. В 1985 году астрономы собрали более тысячи значений красных смещений с охватом расстояний в 700 миллионов световых лет от нас. К 1995 году обзор включал более 18 000 значений для относительно ярких галактик в широкой зоне северного неба.

**Космическая пена** Первая карта удивляла. Она показала, что даже в этих огромных масштабах Вселенная организована не как попало. Галактики не распределены равномерно, но словно крепятся к невидимым нитям и растягиваются в дуги на поверхностях пузырей

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1977**

Начинается Обзор красных смещений *CfA*

**1985**

Открыта Великая стена галактик

## «Создать учение о сотворении мира можно, лишь приняв в расчет возраст Вселенной и эволюционный характер истории космоса»

Джон Полкинхорн

вокруг пустых областей – войдов. Эта пенообразная структура называется космической паутиной. Скопления галактик образовывались там, где волокна накладывались друг на друга.

Крупнейшая структура в обзоре названа Великой стеной – это полоса галактик, собранных в широкой зоне размером примерно  $600 \times 250 \times 30$  миллионов световых лет. В этой полосе расположены многие скопления галактик, включая и знаменитое скопление Волосы Вероники, одно из самых массивных вблизи от нас.

Со времен первых обзоров развитие техники упростило сбор данных о красных смещениях, и усилиями последнего времени на карте возникли миллионы галактик, с охватом большей части неба. Самый крупный – Слоуновский цифровой обзор неба; данные его пополняются благодаря интенсивным многолетним наблюдениям через специальный телескоп 2,5 метра в диаметре в обсерватории Апах-Пойнт, Нью-Мексико. Этот обзор начали составлять в 2000 году, его цель – отобразить 100 миллионов объектов на более чем 25% неба и зарегистрировать величины красных смещений для миллиона из них. Этого можно добиться, если снимать по 640 спектров одновременно – с использованием световодов, прикрепленных к отверстиям в металлической пластине. Для отдельного фрагмента неба требуется специально изготовленная пластина, каждую ночь их применяется до девяти штук.

**Разделение галактик** Слоуновский обзор дал нам прекрасный вид на галактические структуры во Вселенной. Галактики устроены по одному и тому же принципу – подобно паутине, и это устройство прослеживается в любом масштабе наблюдения. Поскольку обзор собирает и спектры, и изображения, астрономам удастся распределять галактики по типам. Эллиптические галактики в основном относительно красные, и их спектры напоминают свет старых звезд. Спиральные галактики голубее и, судя по спектрам, содержат звезды помоложе, формирующиеся в богатых газом галактических дисках.

Слоуновский обзор показывает, что разные типы галактик собираются вместе по-разному. Эллиптические галактики тянутся к скоплениям и заполненным областям космоса. Спиральные разбросаны шире, они не любят быть в центре

\* Цит. по:  
Linda  
Edwards.  
*A Brief  
Guide to Be-  
liefs: Ideas,  
Theologies,  
Mysteries, and  
Movements*  
(2001).

2000

Начинается Слоуновский цифровой обзор неба

2015

Большой синоптический обзорный телескоп начинает трансляцию в интернете

густых скоплений галактик. Войды, хотя по определению они в основном пусты, могут содержать небольшое количество галактик, обычно спиральных. Это разделение указывает, что галактики знают о своем окружении.

**Линии поглощения квазаров** Сияющие галактики легко отследить, а вот о том, как темная материя и газ распределены в пространстве, известно намного меньше. Газовые облака можно заметить, когда они поглощают свет от объектов позади них. Квазары — чрезвычайно яркие объекты, обычно расположенные очень далеко, — хорошие маяки, относительно которых удобно вести поиски. Так же, как при поглощении солнечного света образуются спектральные линии Фраунгофера (см. с. 28), газообразный водород оставляет узнаваемые следы в спектре квазаров. Поэтому облака газообразного водорода можно отследить по их линиям поглощения. Следовые количества атомов других элементов в облаке тоже можно измерить, но их линии поглощения часто слабее, поэтому они менее заметны.

Самая яркая линия поглощения водорода видна в ультрафиолетовой области спектра (на длине волны 121,6 нанометра), при красном смещении она появляется на более длинных волнах. Она называется «линия Лайман-альфа». Газовые облака, которые создают эту линию поглощения, богаты водородом и, как правило, почти не загрязнены со времен Большого взрыва, и иногда они называются облаками Лайман-альфа. Если перед квазаром — источником света — находится много таких облаков, каждое вызовет разрыв в спектре на той длине волны, которая соответствует его красному смещению. Получившаяся серия черных линий в ультрафиолетовом свете квазара называется лесом Лайман-альфа.

Если исследовать линии прямой видимости к нескольким фоновым квазарам, можно приблизительно вычислить распределение облаков газообразного водорода перед ними. В целом астрономам понятно, что газ распределяется так же, как и галактики. О темной материи известно меньше, потому что она

## Будущие обзоры

В новых поколениях обзоров ученые надеются заснять, как кино, последовательности полноцветных картин целого неба. Большой синоптический обзорный телескоп, строящийся в Чили, 8,4 метра диаметром, будет оборудован цифровой камерой в три миллиарда пикселей. Он покрывает в 49 раз больше поверхности Луны за одну экспозицию и может снимать небо еженедельно. Такие телескопы исследуют тайны темной материи и темной энергии и способны обнаруживать объекты, которые меняются или движутся, — например, сверхновые и астероиды.

не взаимодействует со светом, а значит, ее нельзя заметить ни по сиянию, ни по поглощению света. Но астрономы подозревают, что она тоже предпочитает компанию галактик.

**Тяготение** Космическая паутина в конечном итоге сложилась благодаря тяготению, влияющему на галактики с самого их рождения. Из первоначального водорода, напитавшего молодую Вселенную, после Большого взрыва росли звезды и галактики. Со временем галактики притянуло друг к другу так, что сформировались волокна, скопления и «стены».

Астрономы приблизительно знают, как была распределена материя через 400 000 лет после Большого взрыва, потому что как раз тогда высвободилось реликтовое излучение. Горячие и холодные точки в нем говорят о том, как неравномерно было все во Вселенной. Обзоры красных смещений подсказывают, как неравномерно она устроена сегодня и в недавнем прошлом. Астрономы пытаются свести воедино два моментальных снимка — разбираются, как младенец превратился в старика, какие процессы привели Вселенную от ее детского состояния к зрелости.

Точное устройство космической пены чувствительно зависит от многих параметров космологических теорий. Подстраивая их, астрономы пробуют ограничить геометрию Вселенной, количество материи в ней и характеристики темной материи и энергии. Для этого разработаны обширные компьютерные симуляции, в которые загружают данные наблюдений за галактиками, газом и темной материей, и затем играют с настройками и прикидывают приблизительные параметры.

Но ответ так или иначе непрост. Природа темной материи имеет большое значение, а мы попросту не знаем, что это такое. Модели, которые берут в расчет «холодные» типы темной материи — медленно движущиеся экзотические частицы, — предсказывают скопления массивнее и крупнее, чем мы видим в реальности. Если предположить, что частицы темной материи движутся быстро, то есть они «горячие» или «теплые», получается, что они размазали бы структуру в малых масштабах сильнее наблюдаемого. Таким образом, данные о скоплениях галактик заставляют предположить, что темная материя — нечто среднее. А избыток темной энергии противодействует тяготению и замедляет скопление галактик. Вселенная, скорее всего, компромисс.

**«Литература словно паутина — пусть легче легкого, но привязана к жизни, ко всем ее четырем углам. Порой связь едва ощутима»**

**Вирджиния Вулф, «Своя комната» (1929)**

\* Пер.  
Н. Бушмановой.

## В сухом остатке: Космическая паутина

# 32 Радиоастрономия

**Радиоволны открывают новое окно на свирепую Вселенную. Испускаемые взрывающимися звездами и потоками из черных дыр, радиоволны определяют самые быстрые частицы в сильных магнитных полях. Предельный пример — радиогалактики, где двойные релятивистские струи (джеты) питают лепестки, похожие на пузыри, выхлестывающие далеко за пределы звезд галактики. Распределение радиогалактик — еще один аргумент в поддержку модели Большого взрыва.**

Реликтовое излучение — не единственное астрономическое открытие, сделанное в попытках найти источник помех в радиоприемниках (см. с. 60). В 1930-х годах инженер из лабораторий «Белл» по имени Карл Янский изучал шум, мешавший его коротковолновым голосовым передачам через Атлантику. Он нашел сигнал, возникавший примерно раз в сутки. Сначала он заподозрил, что это может быть Солнце, поскольку другие ученые, включая Николу Теслу и Макса Планка, предсказывали, что наша звезда должна испускать электромагнитные волны по всему спектру. Послушав подольше, он обнаружил, что сигнал приходит с другой стороны. Его временные периоды были чуть меньше суток, они соответствовали дневному обороту неба с точки зрения вращающейся Земли, из чего следовало, что сигнал небесного происхождения.

В 1933 году Янский вычислил, что помехи исходят из Млечного Пути, в основном из созвездия Стрельца, в котором расположен центр нашей Галактики. Раз они шли не от Солнца, значит, происходили не из звезд, а из межзвездного газа и пыли. Янский не остался в астрономии, но тем не менее прославился как основоположник радиоастрономии, и единица спектральной плотности потока излучения Янский (Jy) была названа в его честь.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

### 1933

Янский регистрирует радиоволны Млечного Пути

### 1937

Ребер собирает первый радиотелескоп

Другим пионером был Гроут Ребер, радиолюбитель из Чикаго, он собрал первый радиотелескоп у себя во дворе в 1937 году. Ребер построил параболическую отражающую тарелку более 30 футов в диаметре и установил радиодетектор в ее фокусе, на 20 футов выше. Радиоприемник усиливал космические радиоволны в миллионы раз. Эти электронные сигналы затем поступали на перьевой самописец и регистрировались в виде графиков.

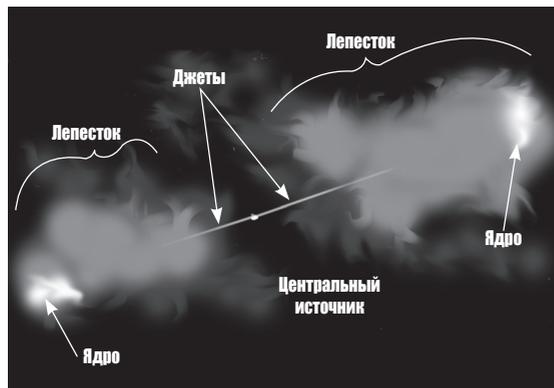
**Радиотелескопы** Хотя современные радиотелескопы могут работать в дневное время (солнечный свет им не помеха), Ребер делал наблюдения по ночам, чтобы избежать зашумления автомобильными двигателями. В течение 1940-х он исследовал небо на радиоволновых частотах. Строя контурные карты яркости, он набросал форму Млечного Пути, и самые яркие волны, как выяснилось, исходили из его центра. Ребер также обнаружил несколько других ярких источников радиоволн — например, в созвездиях Лебедя и Кассиопеи. А радиоволны, исходящие от Солнца, обнаружил лишь в 1942 году исследователь-военнослужащий британской армии Дж. С. Хей.

Хотя наука радиоастрономия пошла на взлет после Второй мировой войны, немалая часть технического обеспечения возникла, когда разные страны взялись наперегонки разрабатывать радарные системы. Радар — сокращение от *Radio Detection And Ranging*, радиообнаружение и масштабирование. Разработка таких систем привела к созданию многих используемых и ныне электронных устройств.

**Обзоры** К началу 1950-х физики в Великобритании и Австралии уже составляли обзоры радионеба, используя методику радиоинтерферометрии. В телескопе Ребера была всего одна тарелка и один детектор, как зеркало в оптическом рефлекторном телескопе, а в радиоинтерферометрах детекторов много, и они распределены на большем расстоянии. Такое распределение равномерно

**Новые радиоволны ведут к центру Млечного Пути... Никаких свидетельств межзвездных сигналов**

«Нью-Йорк таймс», 1933



**1953**

Обнаружено, что Лебедь А — двойной радиоисточник

**1959**

Опубликован радиообзор ЗС

## Космическое шипение

Некоторые считают, что шум Млечного Пути можно уловить при помощи небольшого радиоприемника. Настройте его так, чтобы не принимать никакие радиостанции и слышать только шум. Затем помашите антенной — и вы услышите, что шум делается то громче, то тише. Небольшое приращение шума — это, возможно, радиоволны, принятые от Млечного Пути.

применению большого зеркала, но, совмещая сигналы от многих детекторов, астрономам удастся отобразить области неба детальнее, чем с одной большой тарелкой. Такой подход к сбору данных идеален для обзоров. При помощи радиоинтерферометра в Кембридже британские астрономы Энтони Хьюиш и Мартин Райл начали серию обзоров самых ярких радиоисточников в северном небе на частоте 159 МГц. Вслед за двумя предыдущими публикациями их итоговый третий Кембриджский обзор,

или ЗС, — первый обзор удовлетворительного качества — был опубликован в 1959 году. Более ранние версии изобиловали недочетами калибровки, и их сомнительная достоверность привела к столкновениям с австралийскими астрономами, параллельно составлявшими обзоры южного неба. Между 1954 и 1957 годами Бернард Миллс, Эрик Хилл и Брюс Сли, применив крестообразный телескоп Миллса в Новом Южном Уэльсе, записали и опубликовали список более 2000 радиоисточников. К моменту публикации ЗС споры между учеными разрешились, и радионебо было открыто к исследованиям в обоих полушариях.

Следующий вопрос — природа радиоисточников: ученые искали оптические спектры. Но поскольку расположение источников радиоволн было известно лишь приблизительно, оказалось трудно понять, какая звезда или галактика соответствует какому сигналу. Но источники постепенно выдавали свои секреты. Помимо центра Млечного Пути, некоторые из ярчайших источников — необычные объекты в нашей Галактике. Например, Кассиопея А и Крабовидная туманность — остатки сверхновых, газовые оболочки, раскиданные катастрофическим взрывом умирающей звезды, последняя — с пульсаром в центре.

**Радиогалактики** Другие источники куда более экзотичны. Яркий источник в созвездии Лебедя — Лебедь А — это далекая галактика. Ее открыл Ребер в 1939 году. В 1953-м было показано, что это не один источник, а два. Такие двойные источники — черта многих галактик, испускающих радиоволны. У таких галактик с обеих сторон есть развернутые «лепестки» — обширные пузыри, надутые тонкими потоками высокоэнергетических частиц, исходящих из центра галактики. Симметрия лепестков — они обычно расположены на одинаковом расстоянии и имеют одинаковый размер

**«[Большой взрыв] — иррациональный процесс, который нельзя ни описать в научных понятиях... ни проверить, обратившись к наблюдениям»**

**Фред Хойл, «Природа Вселенной» (1960)**

и форму — предполагает, что их питает общий источник. Считается, что этот источник — черная дыра, скрытая в центре радиогалактики.

Когда материю засасывает в черную дыру, ее разрывает на составляющие частицы, которые распыляются джетами с околосветовой скоростью. Радиоволны возникают, поскольку частицы взаимодействуют с сильными магнитными полями и порождают так называемое синхротронное излучение. Большинство радиоволн в космосе возникает от взаимодействия частиц и магнитных полей в горячем разреженном газе, который наполняет нашу собственную Галактику и галактические скопления, в потоках или вблизи компактных объектов, где магнитные поля усиливаются, — например, рядом с черными дырами. В центре Млечного Пути тоже имеется черная дыра.

**Райл против Хойла** Количество радиоисточников во Вселенной критически важно для теории Большого взрыва. Райл, пламенный лидер группы радиоастрономии в Кембриджском университете, выступил против Фреда Хойла, астронома-харизматика, работавшего через дорогу, в Институте астрономии, и исследовавшего процессы ядерного синтеза, возникновения химических элементов в звездах и Большой взрыв. Во времена до открытия реликтового излучения модель Большого взрыва не принимали — сам Хойл придумал термин «Большой взрыв» в насмешку. Он держался точки зрения о стабильном состоянии Вселенной, считая, что у нее не было начала и она существовала всегда. Он предполагал, что галактики разбросаны по космосу случайным образом и разлетаются бесконечно.

Но Райл нашел доказательства того, что радиоисточники распределены неравномерно: он увидел больше относительно ярких радиоисточников, чем ожидалось бы от случайного распределения. Следовательно, утверждал он, Вселенная должна быть конечна, а модель Большого взрыва верна. Правда Райла была доказана открытием реликтового излучения, хотя двое великих астрономов продолжали спорить. И по сей день эти две исследовательские группы работают независимо друг от друга — из-за той давней вражды.

**В сухом остатке:  
Радиоландшафт**

# 33 Квazarы

**Квazarы — одни из самых удаленных светящихся объектов во Вселенной. Они столь потрясающе ярки из-за материи, падающей в центральную черную дыру галактики. Из-за своеобразной геометрии их вид очень отличается с разных сторон, и они могут казаться необычными активными галактиками с узкими эмиссионными линиями. Возможно, все галактики проходят через фазу квazarов, что, вероятно, играет важную роль в их возникновении.**

В 1960-х годах астрономов смущал один странный тип звезд. В их необычных спектрах обнаружили яркие линии эмиссии, но они не соответствовали длинам волн, которые можно было бы приписать атомам известных элементов. Что это были за объекты? В 1965-м голландский астроном Маартен Шмидт понял, что эти линии соответствуют привычным элементам, включая характерную последовательность водорода, но сильно смещены в красный.

Красные смещения указывали на то, что эти «звезды» лежат на больших расстояниях от нас, далеко за пределами Млечного Пути и области галактик. Но они не выглядели как размытые галактики — это были точечные источники света. Более того, для расстояний, на которые указывали их красные смещения, они были слишком яркими. Удивительное дело: нечто, выдающее спектры, как у звезд в нашей Галактике, на самом деле лежало далеко за пределами Местного сверхскопления. Что же могло питать такую штуку?

**Квazarы** Астрономы осознали, что единственный способ высвободить объем энергии, необходимый для столь мощного свечения этих внегалактических объектов, названных квазизвездными, или КЗО,

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1965

Шмидт определяет квazarы

1979

Наблюдение первого линзированного квazара

**«Если бы машина расходовала топливо столь же эффективно, как эти черные дыры, она могла бы проехать более миллиарда миль на галлоне бензина»**

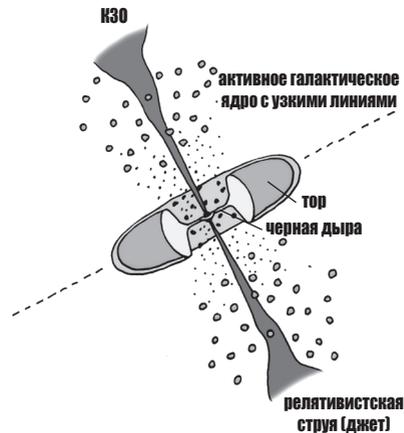
**Кристофер Рейнолдс, из статьи в «Ежемесячных заметках Королевского астрономического общества» (май, 2006)**

экстремальная гравитация, то есть черные дыры. Материя, падающая в черную дыру в центре галактики, возможно, нагревается от трения и излучает свет колоссальной яркости — такой, как у КЗО.

Свет из центральной точки затмевает остальную галактику, и издалека она выглядит как звезда. Некоторые КЗО, около 10%, испускают и радиоволны. Их называют квазизвездными радиоисточниками, или, для краткости, квазарами. Часто квазарами попросту называется весь этот тип.

Когда газ, пыль или даже звезды закручиваются по спирали к черной дыре, материя, подчиняясь законам Кеплера, собирается в так называемом аккреционном диске. Как и планеты в нашей Солнечной системе, материя во внутренних областях диска вращается быстрее, чем во внешних. Смежные газовые оболочки трутся друг о друга, нагреваются до миллионов градусов и рано или поздно начинают светиться. Астрономы предсказывают, что внутренние части аккреционного диска горячи и потому испускают рентгеновские лучи, а внешние части холоднее и испускают инфракрасное излучение. Видимый свет приходит от областей посередине.

Этот диапазон температур порождает излучение в широком диапазоне частот, каждая температура соответствует характерному спектру абсолютно черного тела со своим энергетическим пиком. Так, излучение квазаров состоит из всевозможных частот, от крайнего инфракрасного до рентгеновского, их диапазон шире, чем у любой звезды. Если есть сильные магнитные поля и потоки частиц, как в случае радиогалактик, квазар испускает и радиоволны. Присутствие столь яркого источника света с большой энергией создает другой характерный для квазаров



**1989**

Питер Бартел предлагает объединенные схемы

**2000**

Слоуновский цифровой обзор неба обнаруживает далекие квазары

## Окружение квазаров

Активные галактические ядра бывают и у эллиптических, и у спиральных галактик. Но некоторые классы АГЯ (активных галактических ядер) предпочитают определенное окружение. Сильные радиоисточники чаще встречаются у больших эллиптических галактик. Спиральные галактики с активными ядрами, как правило, слабые источники радиоволн. Активные галактики часто обнаруживаются в галактических группах и скоплениях. Это навело некоторых ученых на мысль, что, возможно, в активизации черных дыр играют роль столкновения галактик. Если одна из галактик при слиянии — спиральная, она принесет газообразное топливо, которое вольется в черную дыру, и та вспыхнет.

компонент — широкие линии эмиссии. Газовые облака, парящие прямо над диском, могут быть освещены, от чего в спектрах появляются линии, отражающие химический состав облаков. Из-за близости центральной черной дыры облака движутся очень быстро, поэтому эмиссионные линии расширяются в силу эффекта Доплера. Эмиссионные линии у квазаров намного шире, чем у галактик других типов, где они обыкновенно узкие.

**Активные галактики** Квазары — наиболее впечатляющий пример класса галактик с аккрецирующими (активно поглощающими материю) черными дырами, которые называют активными галактическими ядрами, или АГЯ. Присутствие черных дыр обнаруживается по характерным эмиссионным линиям, которые порождает лишь сильно ионизированный газ, накапливающийся из-за высоких температур вблизи черной дыры. Широкие линии можно разглядеть, только если области, ближайшие к черной дыре, видны нам напрямую. В других типах АГЯ внутренние области могут быть заслонены плотными облаками газа и пыли, распределенными в форме пончиковобразного тора, и широкие линии оказываются скрыты. Хотя регистрируются лишь узкие линии, высокие уровни ионизации в них выдают чудовище в сердцевине АГЯ.

Эти различные классы квазаров и других активных галактик могут возникать просто потому, что мы смотрим на них с разных направлений. У многих галактик больше заслоняющего материала вокруг их большей оси — например, там случаются полосы от поглощающей пылевой материи. Поэтому, если бы мы смотрели на такие галактики сбоку, этот дополнительный материал и центральный пылевой тор блокировали бы видимость какой угодно черной дыры в центре. Вдоль кратчайшей оси галактики можно более четко увидеть центр, и при снятии спектра АГЯ сбоку широких линий не возникает. К тому же материя легче рассеивается вдоль короткой оси — из-за исходящих потоков: они образуют воронки, и вид становится еще четче.

**Объединенная схема** Представление о том, что разные типы АГЯ могут возникать попросту из-за разных углов зрения, называют объединенной схемой. По сути, этот подход приложим к квазарам и другим активным галактикам, которые совпадают по своим крупномасштабным свойствам — радиоизлучению или галактической яркости. Тем не менее АГЯ бывают разных видов. Собственная яркость АГЯ, связанная с размерами черной дыры, скорее всего, влияет на то, насколько ясно виден центр. Центры слабых АГЯ могут быть погружены вглубь сильнее, чем у более мощных. А молодые АГЯ, чьи центральные черные дыры только недавно включились, могут быть заслонены сильнее тех, что постарше, у которых было время расчистить окрестности от материи. Наличие или отсутствие радиоизлучения — еще один фактор, пока не объясненный: некоторые астрономы считают, что радиопотоки возникают из вращающихся черных дыр или после определенных галактических столкновений — например, между двумя массивными эллиптическими галактиками.

**Обратная связь** Астрономы постепенно приходят к пониманию того, как присутствие аккрецирующей черной дыры в центре влияет на развитие галактики. В период активности центральная черная дыра может «выплывать» газ из галактики, оставляя меньше топлива для формирования новых звезд. Этим, вероятно, объясняется, например, почему эллиптические галактики содержат мало газа и мало молодых звезд. Напротив, если АГЯ включаются после столкновений, любое привнесение газа может вызвать всплеск формирования звезд, — так, галактика может пройти фазу, в которой она сильно замутнена и творит новые звезды. Когда АГЯ разгоняются, они расчищают беспорядок и выбрасывают лишний газ, что лишает черную дыру топлива, а значит, она отключается. Такие циклы могут играть ключевую роль в формировании галактик — на манер термостата. Ныне астрономы подозревают, что все галактики проходят через активную фазу, на которую, возможно, приходится десятая доля всего времени их жизни. Последствия таких фаз сильно влияют на последующие свойства галактики.

**Ты мерцай, квазар далекий,  
Нет таинственнее ока,  
Ярче тысяч солнц твой свет,  
На тебя похожих нет.  
Ты мерцай, квазар небесный,  
Кто ты, где ты — неизвестно\***

**Джордж Гамов**

\* Перевод выполнен на основе перевода О. Седаковой стихотворения «Ты мигай, звезда ночная» (*Twinkle, twinkle, little star*).

## В сухом остатке: Галактический термостат

# 34 РЕНТГЕНОВСКИЙ ФОН

**Рентгеновское излучение — вестник экстремальных физических процессов, а летающие рентгеновские телескопы предлагают виды на бурные области космоса, от окрестностей черных дыр до нагретого до миллионов градусов газа в галактических скоплениях. Такие объекты вместе создают бледное рентгеновское свечение в небе, которое называется рентгеновским фоном.**

Прогресс в астрономии часто связан с открытием новых диапазонов наблюдения. Галилей смотрел в телескоп, а радиоастрономы открыли новые явления, в том числе и черные дыры, при помощи радиоприемников, настроенных на космические сигналы. На другом конце электромагнитного спектра — рентгеновские лучи. Через десятилетия после рождения радиоастрономии появилась рентгеновская астрономия.

Рентгеновские лучи формируются в экстремальных областях космоса — чрезвычайно горячих или пронизанных магнитными полями. Они очень интересны астрономически — от скоплений галактик до нейтронных звезд. Тем не менее рентгеновские лучи уловить телескопом затруднительно, поскольку в их фотонах очень много энергии. Как мы знаем из их медицинского применения, рентгеновские лучи проходят сквозь почти любую толщу мягких тканей человеческого тела. Если направить их на зеркало, они не отражаются, а входят в него, как пуля в стену. Поэтому рефлекторные телескопы для фокусировки рентгеновских лучей бесполезны. Не сработают и стеклянные линзы. Управлять рентгеновскими лучами можно, лишь отражая их от зеркала под маленьким скользющим углом, тогда они отскакивают, как пинг-понговый шарик, и их удастся сфокусировать. Таким образом, рентгеновские лучи можно

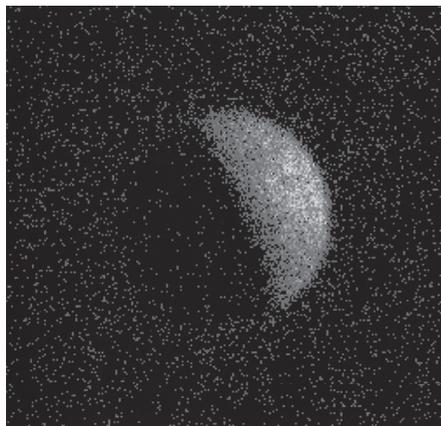
**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1895**

Рентген лабораторно открывает излучение, названное в его честь

согнуть воедино посредством нескольких специальных изогнутых отклоняющих зеркал, поверхность которых часто покрывают золотом, чтобы максимизировать отражательную способность.

### **Космическое рентгеновское излучение**

Рентгеновские лучи из космоса поглощает и наша атмосфера. Поэтому, чтобы увидеть Вселенную в рентгеновских лучах, астрономам пришлось ждать зры спутников. В 1962 году американский астроном итальянского происхождения Риккардо Джаккони с коллегами запустил в космос детектор и увидел первый источник рентгеновского излучения помимо Солнца — нейтронную звезду Скорпион X-1. Через год они запустили первый фокусирующий рентгеновский телескоп (по случайному совпадению примерно такого же размера, как телескоп Галилея 1610 года). Астрономы произвели приблизительные наблюдения солнечных пятен и сделали снимок Луны в рентгеновских лучах.



**Ночное небо в рентгеновских лучах ярче темной стороны Луны**

Изображение Луны оказалось неожиданным. Сама Луна была частично освещена, темная с одной стороны и светлая с другой, как и можно было ожидать от ее фазы и солнечного света, отраженного от ее поверхности. Но небо позади нее не было темным — оно тоже светило. Поймать рентгеновские лучи так непросто, что эти изображения строятся из отдельных фотонов, и фоновое небо показало больше фотонов, чем темная сторона Луны, заслоняющая его. Джаккони открыл рентгеновский фон.

**Рентгеновский фон** Хотя оба возникают на космических расстояниях, рентгеновский фон отличается от микроволнового. Первый происходит в основном от многих отдельных звезд и галактик и слит воедино — так же, как Млечный Путь состоит из многих звезд, но для невооруженного глаза выглядит как равномерная полоса. А микроволновый фон космоса — реликтовое излучение Большого взрыва, которое пронизывает космос и не связано с конкретными галактиками.

**1962**

Джаккони запускает детектор рентгеновских лучей в космос

**1999**

Запущена рентгеновская обсерватория «Чандра»

## Космическая обсерватория «Чандра»

Космическая рентгеновская обсерватория «Чандра» (НАСА) была запущена в космос в 1999 году. Рикошетирующие фотоны рентгеновских лучей телескоп улавливает зеркалами, которые больше похожи на бочки, чем на вогнутые зеркала оптических телескопов. Четыре пары зеркал отполированы

так гладко, что их поверхности выверены до нескольких атомов (такова была бы гладкость Земли, если бы самая высокая гора была высотой 2 метра). Затем рентгеновские лучи направляют на четыре инструмента, которые измеряют их количество, энергию, направление и время прибытия.

Выяснение, откуда идут эти рентгеновские лучи, потребовало десятилетней работы и несколько дальнейших миссий. Последние измерения происходят из космической обсерватории «Чандра» (НАСА), которой хватает остроты зрения на рентгеновский фон.

На сегодня астрономы раскрыли более 80% источников объединенного рентгеновского фона; есть подозрение, что остальные 20% имеют то же происхождение, но источники пока найти не удалось. Через сорок лет после Джаккони было обнаружено более 100 000 источников рентгеновского излучения, самый удаленный — в 13 миллиардах световых лет от Земли.

**Суровая физика** Рентгеновские лучи исходят от целого ряда астрономических объектов. Лучи формируются в газе, разогретом до миллионов градусов, что наблюдается в областях с сильными магнитными полями, экстремальной гравитацией или при взрывах. Среди крупнейших объектов — скопления галактик; горячий газ, заполняющий их, распространяется на миллионы световых лет и содержит, вероятно, достаточно материи, чтобы хватило на сотни триллионов звезд. Черные дыры испускают рентгеновские лучи: квазары и активные галактики — очень яркие источники, их видно через всю Вселенную. По сути, присутствие точечного источника рентгеновских лучей в центре галактики выдает там черную дыру.

Благодаря спутнику «Чандра» астрономы добавили рентгеновские изображения к обзорам галактик на разных длинах волн, включая *Hubble Deep Field* и части других небесных обзоров. Применяя распознавание по рентгеновскому излучению, ученые смогли определить множество черных дыр во Вселенной за миллиарды лет. Такие обзоры подсказывают, что активные галактики с аккрецирующими черными дырами были более распространены в прошлом и что со времен расцвета черных дыр их активность уменьшилась. Эта закономерность — как и вероятность, что в прошлом звезды формировались

быстрее, — может означать, что в молодой Вселенной столкновения галактик были обычным делом.

Звезды некоторых видов сияют и в рентгеновских лучах. Взрывающиеся звезды и сверхновые выдают энергетическую эмиссию; то же наблюдается и у схлопнувшихся звезд — раздавленных собственным тяготением: при горении их ядер они преобразуются в плотные тела — например, нейтронные звезды и белые карлики. В предельном случае звезда сжимается напрямую в черную дыру — рентгеновские лучи были обнаружены всего лишь в 90 километрах от горизонта событий звездной черной дыры.

Поскольку молодые звезды горячее, они сильнее излучают в рентгеновском диапазоне, чем наше Солнце. Но Солнце тоже испускает рентгеновские лучи — внешними слоями, особенно короной, очень горячей и пронизанной сильными магнитными полями. Рентгеновские изображения полезны в исследованиях турбулентности и вспышек звезд, а также перемен в поведении звезд по мере их старения. Одни из мощнейших рентгеновских источников в нашей Галактике — близкие бинарные системы, то есть пары звезд, где одна или обе — схлопнувшиеся звезды. Сжатая звезда часто всасывает газ от другой звезды, и пара делается очень активной системой.

**«Сначала это казалось новым типом незримого света. Это явно было что-то новое, что-то невиданное»**

**Вильгельм Конрад Рентген, из интервью для журнала «Макклур», 8 ноября 1895 г.**

### **Вильгельм Рентген (1845–1923)**

Вильгельм Рентген родился в области Нижний Рейн (в то время — территория Германии) и ребенком переехал в Нидерланды. Учился физике в Утрехте и Цюрихе и работал во многих университетах, а затем стал профессором в университете Вюрцбурга, позднее — Мюнхена. Рентген занимался физикой высоких температур и электромагнетизмом, но прославился открытием X-лучей в 1895 году. Пропуская электричество через разреженный газ, он

увидел, что покрытый солью бария экран светится в эксперименте, проводимом в полной темноте. Эти новые лучи проходили сквозь многие материалы, в том числе и руку жены ученого, помещенную перед фотографической пластинкой. Рентген назвал их икс-лучами, поскольку их источник был неизвестен. Позже было доказано, что это электромагнитные волны — такие же, как свет, только с большей частотой.

## **В сухом остатке: Окно в бурную Вселенную**

# 35 Сверхмассивные черные дыры

**В центре большинства галактик скрывается чудище — черная дыра. Сверхмассивные черные дыры в миллионы или миллиарды раз массивнее Солнца, но сжаты примерно до размеров Солнечной системы и влияют на рост галактик. Размер черной дыры соотносится с размером балджа галактики, а это значит, что черные дыры — фундаментальные компоненты, и если они активизируются при столкновении галактик, то могут вызвать в них гигантскую вспышку энергии.**

Еще с 1960-х годов, со времени открытия квазаров и активных галактических ядер, астрономы знали: в центрах галактик могут существовать гигантские черные дыры в миллионы или миллиарды массивнее одиночной звезды. В последнее десятилетие стало ясно, что черная дыра может таиться в любой галактике. В большинстве случаев черные дыры — спящие, в некоторых случаях они вспыхивают, когда в них вливается материя, пример тому — квазары.

Понять, есть ли черная дыра в центре галактики, можно несколькими способами. Первый — посмотреть на движения звезд вблизи ядра галактики. Звезды движутся по орбитам вокруг центра масс галактики, подобно планетам Солнечной системы и Солнцу. Их орбиты также следуют законам Кеплера: звезды ближе к центру галактики движутся по своим эллиптическим орбитам быстрее, чем те, что ближе к периферии. Средние скорости звезд показывают, сколько массы находится в центре. Чем ближе к центру удастся произвести измерения, тем точнее можно прикинуть количество и величину массы, находящейся в пределах орбит внутренних звезд.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1933**

Янский открывает центр Млечного Пути в радиодиапазоне

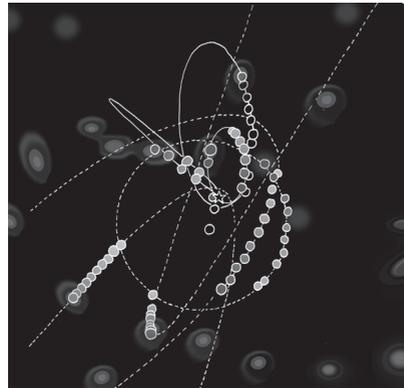
**1965**

Открыты квазары

Астрономы обнаружили, что звезды в центрах большинства галактик движутся слишком быстро, чтобы это объяснялось исключительно влиянием других звезд, газа и темной материи. Это очевидно при взгляде на доплеровские смещения спектральных линий от таких внутренних звезд. Быстрые движения звезд предполагают гигантские черные дыры в сердце галактики — в миллионы или миллиарды раз массивнее Солнца и сжатые до размеров Солнечной системы.

**Центр нашей Галактики**

У Млечного Пути в центре черная дыра. Центр Галактики лежит в созвездии Стрельца, вблизи радиоисточника Стрелец А. Астрономы проследили траектории десятков звезд вблизи него и из их движений извлекли явные свидетельства скрытой черной дыры. Больше десятилетия звезды движутся по своим орбитам, но, приближаясь к месту, где предположительно скрывается черная дыра, они резко проносятся вокруг этой точки, и их отбрасывает по вытянутым траекториям. Некоторые кометы в нашей Солнечной системе движутся по похожим крутым орбитам, проносясь мимо Солнца и замедляясь на ледяных окраинах Солнечной системы. Звезды центра Галактики показывают, что в сердцевине Млечного Пути есть нечто тяжелое, компактное и невидимое, с массой в четыре миллиона раз больше массы Солнца. Это нечто — сверхмассивная черная дыра.



Траектории звезд вблизи центра Млечного Пути выдают присутствие черной дыры

Похожим образом радиоастрономы измеряют скорости ярких источников, населяющих центральные области галактик, — например, водяных мазеров: они испускают сильные радиоволны из-за возбуждения молекул воды. В нескольких галактиках существование массивной, компактной черной дыры было выявлено по вычисленным скоростям мазеров, которые подчиняются законам Кеплера.

**Соотношение балджа и массы**

До 2000 года сверхмассивные черные дыры в галактиках считались явлением необычным. В активных галактиках они явно присутствовали, были они и в некоторых неактивных, но на них обращали мало внимания. Все изменилось, когда астрономы смогли лучше разглядеть центры галактик через новые мощные телескопы и возникли методики определения скоростей звезд вблизи галактических центров. Скоро стало ясно, что черные дыры есть в любой галактике.

**1993**

Водяные мазеры указывают наличие черной дыры в галактике NGC 4258

**2000**

Открыто соотношение массы балджа и черной дыры

Более того, масса черной дыры пропорциональна массе балджа галактики, в которой она расположена. Таков вывод из исследования сотен галактик, в котором астрономы измерили разброс скоростей звезд в центрах галактик, что указывает на массу в центре, и нанесли эти точки на график относительно массы балджа. Получилась корреляция практически один к одному.

Ученых эта явная тенденция изумила. Она не зависела от типа галактики, оставаясь верной и для эллиптических, и для спиральных. Это породило новые вопросы о соотношении разных классов галактик, упорядоченных в камертонную последовательность Хаббла. Балджи и эллиптические галактики не только были похожи по цвету и возрасту звезд в них — новая корреляция подсказывала, что эти структуры могли и сформироваться похожим образом. Казалось, диски и в самом деле были дополнительными элементами, которые можно заполучить или уничтожить, в зависимости от везения галактики при взаимодействии с другими.

Пропорции тоже удивительны: массы этих черных дыр все же составляют малую долю — менее 1% — общей массы галактики. Следовательно, черная дыра не влияет на более широкое гравитационное поле галактики как таковое, но заметна лишь в ее непосредственной окрестности. Она как черная жемчужина в сердце галактики.

**Зародыши или останки?** Как могли сформироваться сверхмассивные черные дыры? Мы знаем, что маленькие черные дыры могут появиться, когда в конце своего жизненного цикла схлопываются массивные звезды: когда звезда прекращает гореть, она не может больше противостоять собственному тяготению и сжимается в плотную оболочку. Но как это происходит в масштабах в миллионы раз больших? Вероятно, сверхмассивные дыры — это останки первых звезд. Самые ранние звезды, возможно, были очень крупными и жили недолго, а потому быстро выдыхались и схлопывались. Скопление таких звезд могло стянуться воедино и образовать гигантскую черную дыру. Другой вариант — черные дыры в центрах галактик могли предшествовать звездам и, возможно, существовали во время или вскоре после рождения Вселенной. Не исключено, что черные дыры — зародыши галактик. Астрономы не знают ответа.

**«[Черная дыра] учит нас, что космос можно смять, как листок бумаги, в крошечный комочек, что время может иссякнуть, как догоревший огонь, и что законы физики, которые мы почитаем как «священные», как неизменные, — совсем не таковы»**

**Джон Уилер, «Геоны, черные дыры и квантовая пена: жизнь в физике» (2000)**

Следующий вопрос — как черные дыры увеличиваются в размерах? Астрономы считают, что галактики растут через слияния, то есть поглощая меньшие и врезааясь в большие галактики. Но немного мы знаем галактик с явными двойными или множественными черными дырами внутри — даже в тех случаях, когда слияние произошло недавно. Это наводит на мысль, что центральные черные дыры быстро срастаются, но математические и компьютерные симуляции свидетельствуют об обратном. Поскольку черные дыры чрезвычайно плотны и сжаты, они ведут себя подобно бильярдным шарам, а не пластилину. И потому, если их столкнуть друг с другом, они скорее отскочат друг от друга, чем слинутся. Это различие между теорией черных дыр и фактическими наблюдениями до сих пор остается большой загадкой.

**Обратная связь** Предположим, можно вырастить черную дыру постепенно, чтобы ее масса увеличивалась пропорционально массе балджа, в котором она расположена. Как черные дыры могут повлиять на галактику? Мы знаем, что по крайней мере в 10% галактик центральные черные дыры активны, поскольку видим их как активные галактические ядра. Похоже, черные дыры проходят фазы активности и спячки. В среднем они должны проявлять активность, накопив газ, примерно 10% времени жизни галактики. На квазары явно влияют получающиеся в результате высокоэнергетические вспышки: вблизи черной дыры, пока в нее течет материя, генерируются мощные потоки ионизированного газа, излучения и иногда — радиоизлучающих частиц. Может, все галактики прошли подобные активные фазы?

Астрономы считают, что да. Они подозревают, что черные дыры следуют циклам активации вслед за столкновениями галактик. Слияния кормят черную дыру, привнося новые ресурсы газа из другой галактики. Затем просыпается чудовище черной дыры — яростно пылает рентгеновскими лучами, изрыгает жар и потоки частиц. Накопление газа также запускает формирование новых звезд, и галактика претерпевает заметные изменения. Постепенно запас газа иссякает, черная дыра истощается и выключается. Затем галактика возвращается в неактивное состояние — до следующего слияния. Сверхмассивные черные дыры могут быть, по сути, термостатами, регулирующими рост галактик.

## В сухом остатке: Черная жемчужина галактики

# 36 Эволюция галактик

**Эдвин Хаббл вкратце изложил концепцию перехода галактик от типа к типу, расположив спиральные и эллиптические галактики на одной диаграмме, но до сих пор неясно, как именно это происходит. Астрономы описали различные типы галактик и нанесли на карту миллионы их по всей Вселенной. В наши дни ученые запускают масштабные компьютерные симуляции, чтобы понять, как формируются галактики и как их характеристики зависят от базовых составляющих Вселенной.**

Стартовая точка для понимания эволюции галактик – реликтовое излучение, первый доступный нам снимок Вселенной-младенца. Усеивающие его горячие и холодные точки – карта колебаний плотности материи через 400 000 лет после Большого взрыва, возникших от крошечных аномалий развития Вселенной. Эти семена проросли благодаря гравитации. Скопления газообразного водорода стянулись друг к другу и образовали первые звезды и галактики.

Следующий доступный нам снимок Вселенной – в сильном красном смещении. Свету, чтобы дойти до нас, требуется много времени, поэтому галактики в красном смещении видны нам такими, какими они были миллиарды лет назад. Астрономы, находя все более удаленные объекты, могут буквально смотреть в прошлое. Самые далекие галактики и квазары, обнаруженные на данный момент, видны нам такими, какими они были около 13 миллиардов лет назад. Поэтому нам известно, что галактики уже существовали всего через миллиард лет после Большого взрыва (возраст Вселенной – 13,7 миллиарда лет). Это означает, что галактики формировались очень быстро – даже быстрее, чем жизненный цикл звезды вроде Солнца, составляющий миллиард лет.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1926

Диаграмма-камертон Хаббла

1965

Обнаружены квазары и космический микроволновый фон

« Небо и Земля — долговечны. Небо и Земля долговечны потому, что существуют не для себя. Вот почему они могут быть долговечными\* »

Лао Цзы

Когда речь заходит о формировании галактик, перед астрономами встает вопрос курицы и яйца: появились ли первыми звезды, которые затем сплелись в галактики? Или сначала образовались клубы газа размером с галактики, которые рассыпались в мириады звезд? Эти сценарии называются, соответственно, формированием галактик «снизу вверх» и «сверху вниз». Чтобы разобраться в них, нам нужно заглянуть еще дальше в прошлое и найти примеры еще формирующихся галактик. Эту эпоху Вселенной трудно увидеть, потому что она окутана туманом, — ее называют «темными веками».

\* Пер.  
Ян Хин Шуна.

**Реионизация** Когда высвободились фотоны реликтового излучения, Вселенная из электрически заряженной и мутной (электроны и протоны свободно летали и рассеивали фотоны) стала нейтральной и прозрачной. Атомы сформировались, когда Вселенная охладилась настолько, чтобы электроны и протоны могли наконец соединиться и породить море нейтрального водорода с небольшой примесью легких элементов. Но Вселенная, которую мы видим сегодня, почти полностью ионизирована. В межгалактическом пространстве полно заряженных частиц, а водород остался лишь в галактиках и редких облаках.

Что случилось с водородом? Он ионизировался и рассеялся, когда включились первые звезды — в период, называемый эпохой реионизации. Разобраться, существовали те звезды по отдельности или уже собрались в галактики, удалось бы, если наблюдать фазы этой ионизации. Но изучение темных веков Вселенной не так просто. Во-первых, мы знаем очень мало объектов с таким сильным красным смещением. Самые далекие галактики очень бледны и красны, искать их — как откапывать иголку в стог сена. Даже обнаружив очень красный объект, цвета которого указывают на то, что это сильное красное смещение, установить расстояние до него — задача не из легких. Характеристические яркие линии водорода смещаются в красный дальше видимого диапазона, в инфракрасную зону, и там их труднее обнаружить. Более того, ультрафиолетовый свет, который мы наблюдаем смещенным в видимый диапазон, поглощается практически полностью,

1977

Начинается обзор галактик *CSA*

1992

Спутник «Эксплорер 66» регистрирует рябь космического микроволнового фона

2000

Стартует Слоуновский обзор галактик

2020

Запланирован старт работы радиотелескопа «Квадратная километровая решетка» (*Square kilometre array*)

если перед источником много водорода. Несмотря на это, астрономы считают, что, возможно, видели несколько квазаров на грани эпохи реионизации, когда поглощение было неравномерным.

Астрономы надеются, что в текущем десятилетии им удастся найти больше объектов из темных веков. Газообразный водород также поглощает радиоволны на характерных длинах волн: ключевая длина волн для спектральной линии — 21 см, затем из-за красного смещения она делается длиннее, соответственно расстоянию до объекта. Ожидается сооружение нового радиотелескопа, которому, вероятно, удастся открыть новую панораму далекой Вселенной на низких частотах. Крупный международный проект «Квадратная километровая решетка» будет состоять из множества небольших радиоприемников на площади в один квадратный километр. Так можно добиться беспрецедентной чувствительности и достаточной мощности, чтобы разглядеть структуры из нейтрального газообразного водорода в далекой Вселенной и, следовательно, обнаружить первые галактики.

**Обзоры** Благодаря характерным красным цветам были обнаружены сотни далеких галактик. Некоторые их типы заметны больше других — эллиптические и богатые водородом галактики испускают относительно слабый голубой и ультрафиолетовый свет, что вызывает скачок яркости, если снимать их через серию фильтров близких цветов. Галактики с явно выраженными обрывами (в силу поглощения водородом) называются галактиками лаймановского обрыва. Огромные обзоры галактик, подобные Слоуновскому цифровому, описывают большую часть близлежащей Вселенной на более низких красных смещениях. Таким образом, имеется довольно неплохое представление о недавней половине Вселенной, более отрывочные знания периода высоких красных смещений, провал в знаниях о темных веках — и затем снимок молодой Вселенной в космическом микроволновом фоне.

## Распределение черных дыр

Роль сверхмассивных черных дыр в эволюции галактик — великая загадка. Астрономы считают, что большинство крупных галактик содержит черные дыры, масса которых соотносится с массой балджа галактики. Столкновения галактик влияют и на черные дыры: падающий в них газ

способен вызвать в сердцевине галактики интенсивное излучение и выбросы; столкновения могут выбивать черные дыры из галактик, а не замедлять их, делая возможным слияние. Источники и причины распределения черных дыр еще предстоит установить.

Исходя из этой информации астрономы пытаются восстановить историю формирования галактик и других структур подобного масштаба. Силами суперкомпьютеров строят обширные симуляции роста галактик из первых стягивающихся друг к другу зародышей. Исходные компоненты — газ и различные виды темной материи, ограничение — изначальные колебания плотности, обнаруженные в реликтовом излучении, и наблюдаемые скопления галактик поблизости.

## «Иерархия действенна в стабильной среде»

Мэри Дуглас

**Иерархические модели** Предпочитаемая на сегодняшний день модель предполагает, что первыми сформировались маленькие галактики, а затем они сталкивались и сливались, образуя большие. Это так называемая иерархическая модель. У каждой галактики есть генеалогическое древо из меньших галактик, которые в нее занесло. Столкновения галактик могут быть бурными, и они запросто способны разрушить галактику и изменить ее характеристики. Две спиральные галактики могут врезаться друг в друга, а из получившегося месива возникнет эллиптическая галактика. Позднее такая галактика может отобрать диск у богатого газом соседа. Галактики многих типов, вероятно, возникают в соответствии с простыми правилами. В среднем, однако, в этой модели размеры галактик увеличиваются.

Галактики состоят не только из звезд и газа — в них есть и темная материя, распределенная в сферическом гало. Природа темной материи влияет на то, как галактики сталкиваются и скапливаются. Судя по симуляциям, для возникновения наблюдаемых ныне галактик у темной материи не должно быть слишком много энергии: медленная «холодная» темная материя предпочтительнее быстрой «горячей», которая удерживала бы галактики от сближения. Еще один компонент, темная энергия, — сила, которая на больших масштабах противодействует тяготению. Лучшие результаты получаются в моделях, которые включают холодную темную материю и также ограниченное количество темной энергии.

**В сухом остатке:  
Из малых галактик  
растут удалые**

# 37 Гравитационное линзирование

**Гравитационное линзирование происходит, когда массивные объекты фокусируют свет от фоновых источников. Подобные объекты называют телескопами природы. Сквозь такие гравитационные линзы лежащие позади них квазары, галактики и звезды смотрятся ярче, и возникают множественные изображения, дуги или даже кольца. Линзирование — мощный инструмент астрономии: его можно использовать для поисков темной материи во Вселенной.**

Разработав общую теорию относительности, Альберт Эйнштейн понял, что массивные объекты искажают пространство-время. Из-за этого лучи света, проходящие вблизи них, движутся не по прямой, а по изогнутым траекториям. Это искривление лучей света подобно тому, какое возникает под действием линзы, и потому само явление назвали гравитационным линзированием.

Во время полного солнечного затмения в 1919 году физик Артур Эддингтон подтвердил предсказание Эйнштейна: лучи света искривляются вблизи больших масс. Наблюдая звезду вблизи края солнечного диска, Эддингтон заметил, что она слегка смещается, оказываясь близко к Солнцу, будто отталкиваясь от него. Если представить пространство-время как резиновое полотно, массивное Солнце образует в нем впадину, и лучи света от далекой звезды, проходя поблизости, изгибаются — так бильярдный шар кружится вокруг впадины на поверхности стола. Когда свет звезд доходит до наших глаз по траектории, искривленной Солнцем, кажется, что его источник находится слегка в другом месте.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ****1915**

Теория относительности Эйнштейна

**1919**

Эддингтон подтверждает теорию относительности наблюдениями солнечного затмения

**Любое тело остается в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения — до тех пор, пока не выйдет из него**

Артур Эддингтон, «Природа физического мира» (1928)

Эйнштейн представил теорию гравитационного линзирования в 1936 году. Через год астроном Фриц Цвики заявил, что гигантские скопления галактик могут действовать как линзы: их огромное тяготение искажает галактики и квазары позади них. Но сам эффект был открыт только в 1979 году, когда был замечен линзированный двойной квазар — два смежных квазара с одинаковыми спектрами.

**Размножение изображения** Если между нами и квазаром располагается массивная галактика, могут получиться множественные изображения одного фонового квазара. Масса этой галактики искажает проходящий сквозь нее свет квазара и направляет лучи по огибающим галактику траекториям. В целом подобная геометрия рождает нечетное количество изображений: в примере с двойным квазаром, например, также должно быть третье изображение, бледнее. Линзированные изображения квазаров усилены: искажение лучей перенаправляет свет со всех направлений — не только спереди, но и с боков квазара — вперед и фокусирует их в нашу сторону. Так что гравитационно линзированные изображения могут оказаться намного ярче исходных объектов.

Обычно линзы не выстраиваются в точности между нами и далеким квазаром и дают множественные изображения, как показано на диаграмме (с. 150). Но если фоновый объект



Тяготение скопления растягивает фоновые галактики в дуги

**1936/37**

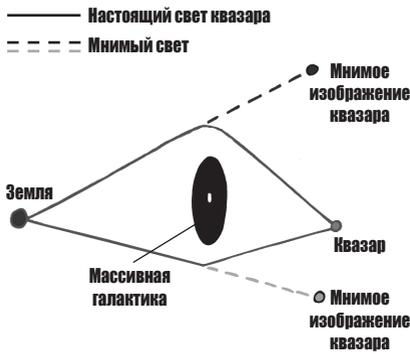
Эйнштейн и Цвики предсказывают гравитационное линзирование

**1979**

Подтвержден первый линзированный двойной квазар

**2001**

Проект микролинзирования обнаруживает массивные объекты гало галактик (MACSO) в районе Магеллановых Облаков



расположен в точности за линзой, то его свет равномерно размазывается в круг, называемый кольцом Эйнштейна. Если линза находится чуть в стороне, кольцо распадается на дуги и множественные пятна.

Еще одно свойство линзированных изображений в том, что их лучам требуется немного разное время, чтобы дойти до нас, поскольку они движутся по разным траекториям. Если фоновый квазар коротко, но ярко вспыхивает, изображение с самой длинной траекторией покажет вспышку с небольшой задержкой. Такие

задержки, если известна геометрия линзирующей системы, можно применять в расчетах постоянной Хаббла — скорости расширения Вселенной.

Если фоновый объект — протяженная галактика, а не точечный источник вроде квазара, линзируется каждая часть галактики. Галактика видится размазанной и с усиленной яркостью. Поскольку далекие галактики обычно очень бледны, гравитационное линзирование — мощный инструмент исследования молодой Вселенной. Особенно интересны галактики, усиленные массивными скоплениями. Линзирование такими скоплениями часто сопровождается яркими дугами, и каждая означает фоновую галактику, размазанную массой скопления. Геометрия этих дуг — подспорье в вычислении массы скопления, а кроме того, астрономам открываются различные характеристики далеких галактик, которые благодаря линзированию кажутся яркими и растянутыми в пространстве.

**Слабое линзирование** Множественные изображения, дуги и кольца получаются, когда масса линзы сосредоточена и высоко ее тяготение, то есть в режиме сильного линзирования. Но можно обнаружить и более слабые формы линзирования — от массы, более распределенной в пространстве. У краев скоплений, к примеру, галактики слегка растягиваются. Поскольку каждая отдельная галактика выглядит как эллипс, сложно сказать, искажена ли конкретная галактика или это ее естественный вид. Но в среднем кое-какие признаки выделить все-таки можно. Галактики слегка вытянуты из-за линзирования по касательной круга, или контура, заключающего в себе массу. Поэтому для кругового скопления, статистически, галактики вытянуты так, что они образуют вокруг него кольца.

Похожим образом фоновое поле галактик может быть вытянуто и искажено более широко распределенной материей, лежащей перед ним. Далекая Вселенная в таком случае предстает перед нами как будто сквозь старое

стекло неравномерной плотности, а не сквозь чистую линзу. Астрономы обнаружили такое слабое линзирование в изображениях неба, исследуя закономерности в ориентации эллиптических галактик. Предположив, что соотношения разных ориентаций обусловлены линзированием, можно вычислить распределение материи перед ними. Таким образом астрономы стараются уточнить распределение темной материи в пространстве.

**Микролинзирование** Еще одна разновидность того же явления – микролинзирование. Оно наблюдается, когда небольшие объекты проходят перед фоновым источником или когда масса линзы близка к массе фонового объекта и потому перехватывает свет лишь частично. Эту методику применяют при поиске возможных сгустков темной материи размером с Юпитер – массивных объектов гало галактик (*MACHO*). В 1990-х астрономы наблюдали миллионы звезд в районе Галактического центра и Большого и Малого Магеллановых Облаков – каждую ночь в течение нескольких лет регистрировали их яркость. Они искали звезды, которые внезапно становились ярче, а затем характерно бледнели из-за увеличения массы, находящейся перед ними. Группа исследователей из Австралии обнаружила десятки подобных случаев, приписанных незагоревшимся звездам или бродячим газовым планетам массой примерно с Юпитер. Большинство из них было замечено вблизи Галактического центра, а не Магеллановых Облаков – это означает, что больше таких объектов размером с планету расположено внутри нашей Галактики, а не на периферии Млечного Пути. Таким образом, вклад *MACHO* в общий фонд темной материи Млечного Пути оказался небольшим. Поиск других возможных составляющих темной материи продолжается.

«Нечто неведомое  
делает незнамо что»

Артур Эддингтон,  
«Природа физического мира» (1928)

В сухом остатке:  
Телескоп природы

# 38 Спектральные классы звезд

Цвета звезд говорят нам об их температуре и химическом составе, что в конечном итоге указывает на их массу. В начале XX века астрономы распределили звезды по классам соответственно их оттенкам и спектрам и выявили закономерности, по которым можно судить о физике звезд. Классификация звезд — достижение выдающейся группы женщин-астрономов, работавших в Гарварде в 1920-х годах.

Если взглянуть, станет видно, что звезды бывают самых разных цветов. Солнце — желтое, Бетельгейзе — красная, Арктур — тоже желтый, а Вега — бело-голубая. Астроном Джон Гершель назвал скопление звезд в Южном полушарии шкатулкой с драгоценностями: они сверкали, «как ларец с разноцветными драгоценными камнями», в его телескопе.

**Что говорят нам цвета?** Температура — основная причина окраски. Самые горячие звезды выглядят голубыми, температура их поверхности достигает 40 000 К. Самые холодные звезды сияют красным, их температура — лишь несколько тысяч градусов по шкале Кельвина. В этом промежутке температур — от горячего к холодному — цвета звезд варьируются от белого к желтому и оранжевому.

Эта последовательность цветов соответствует излучению черного тела, исходящему от тел, активно поглощающих и испускающих тепло. Основной цвет свечения нагретых тел — от расплавленной стали до углей костра — пиковая частота испускаемых электромагнитных волн, и она зависит от температуры. Звезды тоже излучают в диапазоне частот вокруг подобного пика, хотя их температуры могут намного превышать температуру углей.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1860**

Пикеринг нанимает гарвардских женщин  
следить за звездами

## Гарвардские вычислительницы

Гарвардские астрономы, привлеченные к этому заданию, были необычной для своего времени исследовательской группой. Глава обсерватории Эдвард Пикеринг нанял женщин для выполнения однообразной, но требующей квалификации работы: они должны были каталогизировать тысячи звезд и снять множество показателей — от скрупулезных измерений по фотографическим пластинкам до численных анализов. Пикеринг выбрал женщин, потому что

на них можно было положиться — и потому что им можно было платить меньше, чем мужчинам. Некоторые из тех «гарвардских вычислительниц» стали знаменитыми независимыми астрономами — например, Энни Джамп Кэннон, которая в 1901 году опубликовала классификацию *OBAFGKM*, или Сесилия Пейн-Гапошкина, в 1912 году установившая, что температура — фактор, лежащий в основе различия звезд по классам.

**Звездные спектры** В конце XIX века астрономы взглянули на звездный свет поближе, расщепив его на радужные компоненты. Как в спектре солнечного света на определенных длинах волн видны разрывы (фраунгоферовы линии), так и в спектрах звезд имеются темные полосы. Атомы в составе горячих газов, обволакивающих звезды, поглощают свет, поскольку более холодные внешние слои впитывают излучение более горячей внутренней части.

Водород — самый распространенный в звездах элемент, и поэтому в их спектрах лучше всего видны именно эти характеристические линии поглощения. Длины поглощенных волн соответствуют энергетическим уровням атома водорода. На этих частотах фотоны с нужным количеством энергии передают ее атому, и внешние электроны в нем перескакивают с одного уровня на другой. Поскольку энергетические уровни распределены, как лады на гитаре — ближе друг к другу на высоких частотах, то наблюдаемые линии поглощения, соответствующие разнице между ладами, формируют характерную последовательность.

Допустим, электрону на первом энергетическом уровне достается фотон, который позволяет электрону перескочить на второй уровень, или же электрон поглощает чуть больше энергии и добирается до третьего, или и того больше — достигает четвертого уровня и так далее.

**1901**

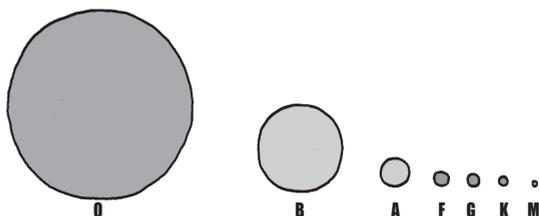
Опубликована классификация спектральных классов *OBAFGKM*

**1906**

Идентифицированы красные гиганты и красные карлики

**1912**

Выявлена связь температуры и цвета



Результат любого такого перехода — определенная частота поглощения и соответствующая линия в спектре. Похожие картины, смещенные в сторону чуть больших энергий, получаются от электронов, уже находящихся на втором или третьем уровне. Для атома водорода эти

последовательности линий названы в честь знаменитых физиков: самая высокая энергия, в ультрафиолетовой области, — у серии Лаймана, линии в ней известны как Лайман-альфа, Лайман-бета, Лайман-гамма и т. д. Следующая серия, уже в видимом спектре, — серия Балмера, основные линии которой более известны как *H*-альфа, *H*-бета и т. д.

Мощность любой линии водорода зависит от температуры поглощающего газа. Поэтому, измеряя относительные мощности линий, астрономы могут оценить его температуру. Атомы других химических элементов во внешних слоях звезды поглощают свет, и мощность их линий также указывает на температуру. У холодных звезд могут быть мощные линии поглощения атомов более тяжелых элементов — углерода, кальция, натрия или железа. Иногда можно уловить даже спектральное эхо молекул. Распространенный пример — оксид титана, тот самый, который используется в солнцезащитных кремах. Тяжелые элементы, которые астрономы называют общим термином «металлы», обычно делают звезды краснее.

**Классификация** Натуралисты выделили биологические виды как инструмент понимания эволюции, а астрономы подобным образом классифицировали звезды по характеристикам их света. Изначально звезды были разделены по мощностям различных линий поглощения, но в конце XIX — начале XX века в обсерватории Гарвардского колледжа в США был разработан более комплексный подход.

## Величины

В астрономии яркость звезды измеряется по логарифмической шкале, поскольку разброс очень велик. Яркая Вега имеет величину 0, у самой яркой звезды, Сириуса, она равна минус 1,5, у более бледных звезд — возрастающие величины:

1, 2 и т. д. Коэффициент умножения — порядка 2,5. При известных расстояниях можно вычислить «абсолютную величину» звезды, то есть ее яркость на определенном расстоянии, обычно в 10 парсеков (3,26 световых лет).

**Пытаться изучать эволюцию живых организмов, не обращаясь к цитологии, столь же бессмысленно, как разбираться в эволюции звезд без внимания к спектроскопии**

**Дж. Б. С. Холдейн, из предисловия к книге С. Д. Дарлингтона «Недавние достижения в цитологии» (1937)**

Гарвардская схема, применяемая до сих пор, классифицирует звезды по их температуре — от самых горячих, около 40 000 К, до холодных, в 2000 К. Звезды распределены по классам, названным буквами *OBAFGKM*. Звезды *O* — горячие и голубые, *M* — холодные и красные. Солнце — звезда типа *G* с температурой поверхности порядка 6000 К. Эта с виду случайная последовательность букв возникла по историческим причинам, в результате сведения воедино существовавших ранее спектральных классов, названных по типам звезд или по алфавиту. Астрономам часто помогают мнемонические приемы: самый известный — «Один Бритый Англичанин Финики Жевал Как Морковь», на английском — «*O, Be A Fine Girl, Kiss Me!*» («О, будь славной девочкой — поцелуй меня!»). С тех пор эта схема сделалась подробнее: в ней появились подклассы — цифры на шкале от 0 до 10. То есть звезда *B5* — на полпути между *B* и *A*. Солнце — звезда типа *G2*.

Большинство звезд попадает в категории *OBAFGKM*, но есть и исключения. В 1906 году датский астроном Эйнар Герцшпрунг заметил, что самые красные звезды и форму имеют особенную: красные гиганты вроде Бетельгейзе ярче и в сотни раз больше радиусом, чем Солнце; красные карлики — намного меньше и бледнее Солнца. Последовали другие типы звезд: горячие белые карлики, холодные литиевые звезды, углеродные звезды и коричневые карлики. Выделили и горячие голубые звезды с эмиссионными линиями, и звезды Вольфа-Райе — горячие звезды с сильными выбросами, которые проявляются расширенными линиями поглощения. Зоопарк звездных типов дает основание предположить, что существуют законы, способные объяснить звезды и их характеристики. Астрономам пришлось выяснять механизм их эволюции — как они, выгорая, преобразуются из одного вида в другой.

**В сухом остатке:  
Породы звезд**

# 39 Звездная ЭВОЛЮЦИЯ

**Звезды живут от миллионов до триллионов лет. Взаимосвязь между их цветом и яркостью подсказывает, что они следуют похожим эволюционным траекториям, продиктованным их массой. Характеристики звезд определяются реакциями ядерного синтеза в их сердцевинах. Атомы всех элементов вокруг нас, в том числе и те, из которых состоят наши тела, созданы звездами. Мы действительно сотворены из звездной пыли.**

Цвет звезды приблизительно указывает на ее температуру: голубые звезды горячи, а красные — холодны. Но типичная яркость звезд также меняется в зависимости от цвета. Горячие голубые звезды обычно ярче холодных красных. Датчанин Эйнар Герцшпрунг в 1905 году и американец Генри Норрис Рассел в 1913-м независимо друг от друга заметили постоянство таких соответствий. Оба астронома увековечены в названии диаграммы, которая отражает соответствие яркости звезд их цветам: диаграммы Герцшпрунга—Рассела (диаграмма ГР).

**Диаграмма ГР** На диаграмме ГР 90% звезд, включая Солнце, располагаются на диагональной полосе, проходящей от ярких горячих голубых звезд к более бледным холодным красным. Это так называемая главная последовательность, а звезды, лежащие в ней, — звезды главной последовательности. Помимо нее, на диаграмме ГР видны и другие группы звезд. Это, например, красные гиганты — красные звезды похожих цветов, но различной яркости, и белые карлики — звезды горячие, но бледные, а также переменные звезды — цефеиды, разных цветов, но со сходной яркостью. Такое распределение заставляет предположить, что звезды появлялись и развивались примерно одним и тем же путем. Но вплоть до 1930-х астрономы не понимали, почему звезды светят.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1905/1913**

Герцшпрунг и Рассел публикуют соответствия цветов и яркостей звезд

**«Я прошу вас смотреть в обе стороны. Потому что путь к знанию звезд лежит через атом, а важные знания об атоме были добыты при помощи звезд»**

**Сэр Артур Эддингтон, «Звезды и атомы. Лекция 1» (1928)**

**Синтез** Звезды, в том числе Солнце, горят из-за ядерного синтеза – слияния легких атомных ядер в более тяжелые, с выделением энергии. Если сжать ядра водорода как следует, они могут слиться в гелий, высвобождая большое количество энергии. Практически все элементы, которые мы видим вокруг, постепенно появляются в звездах с нуля путем последовательных реакций ядерного синтеза, при которых создаются все более тяжелые ядра.

Слияние даже легчайших ядер – например, водорода – требует огромных температур и давлений. Чтобы два ядра слились, нужно преодолеть силы, удерживающие каждое из них. Ядра состоят из протонов и нейтронов, удерживаемых вместе сильным ядерным взаимодействием. Эта сила, действующая только в малых масштабах ядра, – клей мощнее электрического отталкивания положительно заряженных частиц (протонов). Поскольку сильное ядерное взаимодействие работает только на близких расстояниях, маленькие ядра крепче крупных. Итого: энергия, нужная для удержания ядра, в расчете на нуклон, возрастает с атомным весом вплоть до элементов никеля и железа, которые очень устойчивы, а затем падает для более крупных ядер. Крупные ядра легко разрушить и небольшим ударом.

Барьер энергии слияния, который нужно преодолеть, ниже всего для изотопов водорода, содержащих всего один протон. Простейшая реакция слияния – соединение водорода (один протон) и дейтерия (один протон и один нейтрон), дающее тритий (один протон и два нейтрона) плюс одинокий нейтрон. Но, чтобы запустить даже эту реакцию, нужны температуры в 800 миллионов градусов по Кельвину.

**Звездная пыль** Немецкий физик Ганс Бете в 1939 году описал, как звезды светят, преобразуя ядра водорода (протоны) в ядра гелия (два протона и два нейтрона). Дополнительные частицы (позитроны и нейтрино) участвуют в трансформации, и два изначальных протона в процессе превращаются в нейтроны. Затем на кухне ядерного синтеза постепенно готовятся более тяжелые элементы; их рецепты описали в 1957-м Джеффри Бербедрж,

**1920**

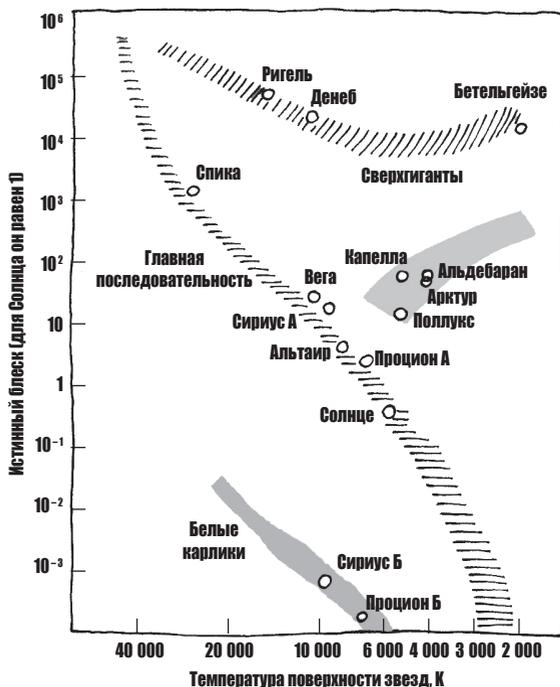
Артур Эддингтон предполагает, что звезды горят из-за ядерного синтеза

**1939**

Ганс Бете изучает физику ядерного синтеза водорода

**1952**

B2FH публикуют работу по звездному ядерному синтезу



Маргарет Бербедаж, Уильям Фаулер и Фред Хойл в знаменитой статье, обозначаемой аббревиатурой *B2FH* (по фамилиям авторов).

Более крупные ядра возникают при слиянии сначала водорода, затем гелия, а следом других элементов, которые легче железа, а в некоторых обстоятельствах — и элементов тяжелее железа. Звезды, подобные Солнцу, светят потому, что в основном синтезируют гелий из водорода, и этот процесс идет достаточно медленно, и потому тяжелые элементы получаются лишь в небольших количествах. В более крупных звездах этот процесс ускорен участием углерода, азота и кислорода в дальнейших реакциях, и потому более тяжелые элементы формируются быстрее. При наличии гелия из него может получиться

углерод (три атома гелия-4 сливаются через неустойчивый бериллий-8). А если есть углерод, он сам может соединиться с гелием и образовывать кислород, неон и магний. Эти медленные трансформации происходят в течение большей части жизни звезды.

Характеристики звезды определяются и ее устройством. В звездах необходимо равновесие трех сил: разрушительного (из-за их собственного тяготения) веса, внутреннего давления газа и излучения, раздувающих звезду, и прохождения тепла через их газовые слои. Первые два фактора влияют на структуру звезды — ряд слоев, как у луковицы, плотность которых падает с удалением от центра. Реакции ядерного синтеза происходят глубоко

**«Мы — кусочки звездной материи, которая случайно остыла, кусочки звезд, у которых что-то пошло не так»**

**Сэр Артур Эддингтон, «Нью-Йорк таймс» от 9 октября 1932 г.**

## Без паники

Даже если ядерные реакции в центре Солнца выключатся прямо сегодня, потребуется миллион лет, чтобы уже созданные фотоны достигли поверхности нашего светила, и поэтому мы еще долго ничего не заметим. Впрочем, существует множество исторических подтверждений того, что мощность Солнца остается постоянной.

внутри звезды, где давление выше всего. Затем полученному теплу необходимо покинуть поверхность звезды, а для этого до нее надо добраться. Тепло перемещается двумя путями: через излучение, как солнечный свет, — или через конвекционные движения в жидкости, как в кипящей воде.

**Время жизни** Время жизни звезды главной последовательности определяется ее массой и скоростями реакций ядерного синтеза в ней. Скорости реакций крайне чувствительны к температуре и плотностям в сердце звезды — обычно им нужны температуры свыше 10 миллионов градусов и плотности более 10 000 граммов на кубический сантиметр. У массивных звезд ядра горячее и плотнее, и они истощаются быстрее, чем у звезд с меньшей массой. Звезда наподобие Солнца живет в главной последовательности порядка 10 миллиардов лет, звезда в 10 раз массивнее будет в тысячи раз ярче, но проживет лишь 20 миллионов лет, звезда в одну десятую массы Солнца может быть в тысячи раз бледнее, но проживет около 1000 миллиардов лет. Поскольку это больше возраста Вселенной на данный момент (13,7 миллиарда лет), смерть самых малых звезд нам еще только предстоит увидеть.

В сухом остатке:  
Звездная мощь

# 40 Звездные рождения

**Звезды рождаются, когда сгустки газа под действием тяготения собираются в тугой шарик. Затем он сжимается, давление и температура газа растут, пока не достигнут значений, необходимых для того, чтобы звезда прекратила сжиматься. Если масса газового шара достаточно велика, в его центре накопится давление, при котором запустятся реакции ядерного синтеза, — и тогда включается звезда.**

Большинство звезд формируется в гигантских молекулярных облаках — резервуарах плотного газа внутри галактик. В Млечном Пути есть около 6000 молекулярных облаков, составляющих около половины общей массы газа в Галактике. Близкие к нам примеры — туманность Ориона в 1300 световых годах ( $1,2 \times 10^{16}$  км) от нас и молекулярное облако Ро Змееносца в 400 световых годах от нас. Такие области могут достигать сотен световых лет в поперечнике, и газа в них достаточно, чтобы создать миллионы солнц. В них содержится газ плотностью в 100 раз больше, чем обычно в межзвездном пространстве, где норма — один атом на кубический сантиметр или меньше.

Газовый состав межзвездного пространства — 70% водорода, остальное — гелий с вкраплениями более тяжелых элементов. Плотные облака могут быть достаточно холодны, и тогда, кроме атомов, в них содержатся и молекулы газа водорода ( $H_2$ ). Молекулярные облака — одни из самых холодных мест во Вселенной, зачастую всего лишь на несколько градусов выше абсолютного нуля. Температура туманности Бумеранг, к примеру, — один градус Кельвина выше нуля, ниже температуры космического микроволнового фона в 3 К.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1780**

Уильям Гершель наблюдает двойные звезды

**1902**

Джеймс Джинс публикует теорию самотяготеющей сферы

«Свет, слепящий нас, представляется нам тьмой.  
Восходит лишь та заря, к которой пробудились  
мы сами. Настоящий день еще впереди.  
Наше солнце — всего лишь утренняя звезда\*»

Генри Дэвид Торо, «Уолден, или Жизнь в лесу» (1854)

**Протозвезды** Звезды зарождаются в газовых облаках там, где плотность газа превышает среднюю. Впрочем, неясно, почему это происходит, — возможно, просто в силу турбулентности или из-за возмущения облака вспышкой сверхновой неподалеку. Магнитные поля тоже могут играть свою роль в зарождении газовых сгустков.

\* Пер.  
З. Александровой.

Когда сформировался сгусток достаточных размеров, в действие вступает тяготение и сжимает его еще больше. С концентрацией газового шара растет давление, и он нагревается. Затем высвобождается гравитационная энергия — как при ускорении мячика, катящегося с горы. Обе силы — тепло и давление — противодействуют тяготению и стараются удержать сжатие сферы, раздувая ее. Критическая масса, определяющая баланс между двумя этими наборами сил, называется массой Джинса, в честь физика Джеймса Джинса. Если сгусток превысит ее, он сможет продолжать свое развитие, в противном случае — нет.

## Двойные звезды

Двойные звезды можно определить разными способами: зрительно, с помощью телескопа, с применением спектроскопии, где видны доплеровские смещения в линиях, указывающие на то, что две звезды обращаются вокруг друг друга, при затмениях, когда одна звезда заслоняет другую,

проходя перед ней, и, наконец, астрометрически, то есть выявляя легкие колебания звезды, указывающие на присутствие пары. Уильям Гершель в 1780-х годах был одним из первых, кто наблюдал двойные звезды. Он опубликовал каталог сотен таких пар.

**1994**

В телескоп «Хаббл» обнаружены диски вокруг формирующихся звезд в туманности Ориона

**2009**

Запущена космическая обсерватория «Гершель»

**«Надо иметь в себе хаос,  
чтобы родить танцующую звезду»  
Фридрих Ницше, «Так говорил Заратустра» (1883–1885)**

\* Пер. В. Рынкевича. Область тяготения может притянуть еще больше материи из окрестностей, та добавится к сгустку и позволит ему сжаться еще сильнее. По мере сжатия сгусток нагревается и начинает светиться. Когда его температура достигает порядка 2000 К, молекулам водорода хватает энергии на расщепление и ионизацию атомов своего облака. Получив новый путь высвобождения тепловой энергии, звезда может сжиматься еще больше, что и происходит, пока звезда не достигнет состояния, в котором ее распирает изнутри внутренним давлением. Так возникает протозвезда.

Протозвезды продолжают увеличиваться, наращивая материю. У них формируется плоский диск из газа или пыли, который притягивает материю эффективнее. Протозвезда, поглотив весь материал в своей окрестности, перестает расти и снова сжимается. Когда сжатие достигает некоторой критической точки, в ее плотном ядре запускается ядерный синтез водорода — так протозвезда становится звездой. Для звезды массой с Солнце этот процесс занимает 100 000 лет. Когда начинается ядерный синтез, у звезды есть температура и цвет, дающие ей место в главной последовательности, где она и размещается, развиваясь согласно физическим закономерностям.

Формирующиеся звезды трудно наблюдать, потому что они бледны и спрятаны глубоко в молекулярных облаках. Астрономам приходится смотреть в инфракрасный и еще более длинноволновый спектр и там искать скрытый пылью свет протозвезд. С помощью космического телескопа «Хаббл»

## Космическая обсерватория «Гершель»

Космическая обсерватория «Гершель» Европейского космического агентства была запущена в 2009 году. Она наблюдает формирующиеся звезды и далекие галактики на инфракрасных длинах волн. На ней установлено одно большое зеркало для космического телескопа (3,5 метра в диаметре), с его помощью исследуют скрытые

пылью и холодные объекты, невидимые для других телескопов. «Гершель» нацелен на поиски первых галактик, облаков газа и пыли, где рождаются новые звезды, дисков, из которых могут появиться планеты, и комет. Обсерватория названа в честь Уильяма Гершеля, который в 1800 году обнаружил инфракрасное излучение.

были обнаружены диски вокруг массивных формирующихся звезд в туманности Ориона; другие наблюдения в телескоп 10-метрового класса похожим образом обнаружили диски вокруг отдельных молодых звезд и тем подтвердили, что такие диски — распространенное явление. Тем не менее остается открытым вопрос, рождаются ли далее из этих дисков планеты — как в нашей Солнечной системе.

**Двойные звезды** Также трудно объяснить формирование звезд-близнецов в парах, где обе вращаются вокруг общего центра масс. Около трети звезд Млечного Пути — парные, это слишком большая доля, чтобы списать ее на счет случайного захвата блуждающих звезд, а значит, видимо, должны существовать механизмы формирования двойных звезд. Скопления звезд, возможно, образуются вместе, если они сгущаются из единого облака, и даже одновременно, если облако подвергается шоковому воздействию или другому влиянию, вызывающему массовое зарождение звезд. Возмущения в самом облаке, быть может, — самое подходящее объяснение для отдельных пар или множественных звезд, сформировавшихся вместе; вероятно, другие системы распадаются, если конфигурация неустойчива — или же при столкновениях.

Еще одна загадка — процесс возникновения массивных звезд. Они должны бы гореть намного ярче, чем протозвезды небольшой массы, а потому стоило бы ожидать, что они быстро прекращают сжиматься и не зажигаются. Но, с другой стороны, они должны легко формироваться: нам их видно очень много, особенно в местах, где кипит формирование звезд, — например, в галактиках после столкновения. Возможно, они эффективно стягивают материю своим диском и спускают энергию через выбросы и потоки.

Молекулярное облако способно создавать звезды разных масс. Поскольку каждая звезда развивается по-своему и в соответствии со своей массой, такая популяция звезд со временем будет выглядеть очень разнообразно. Астрономы пытаются разобраться, как формируются и развиваются галактики, и понимают, что статистика формирования звезд влияет на устройство галактики.



## В сухом остатке: Тумблер звезды

# 41 Звездные смерти

Истощив свое ядерное топливо, звезды выгорают. Нарушается баланс тяготения и давления, поддерживавший их миллионы или миллиарды лет. Когда двигатель ядерного синтеза дает сбой, звезды разбухают и сбрасывают внешние слои, ядро съеживается в маленькую скорлупку и оставляет по себе нейтронную звезду, белого карлика или черную дыру. В некоторых ситуациях равновесие звезды нарушается настолько, что она взрывается сверхновой.

Большинство звезд светит почти всю свою жизнь, синтезируя ядра гелия из водорода. Пока это происходит, звезды имеют характерные цвет и яркость, зависящие от их массы. Звезда наподобие Солнца светит желтым и находится в середине главной последовательности соотношения яркостей и оттенков, которому соответствует большая часть звезд. Звезды остаются в таком состоянии миллионы лет, с возрастом лишь чуть-чуть разбухая и прибавляя в яркости.

Но постепенно запас водорода в ядре иссякает. Как ни странно, быстрее всего это происходит для самых массивных звезд. Поскольку в их ядрах температура и давление намного выше, они горят так ярко, что поддерживающие их ядерные реакции идут с большей скоростью и звезды изводят весь водород за несколько миллионов лет. А вот звезды меньшей массы горят медленнее, и у них на сжигание основного топлива уходят миллиарды лет.

**Последние стадии** Когда ядерный синтез в центре останавливается, ядро звезды, богатое гелием, сжимается и звезда нагревается, высвобождая энергию тяготения. Затем начинается ядерный синтез

## Сверхновая Тихо Браге

В начале ноября 1572 года в созвездии Кассиопеи в северном небе появилась новая звезда. За ней следил, среди многих других, придворный датский астроном Тихо Браге. Это было одно из самых важных наблюдений в истории астрономии — оно показало, что небо со временем меняется.

Благодаря этому наблюдению увеличилась точность измерений расположения астрономических объектов. Остаточная оболочка сверхновой была обнаружена лишь в 1952-м, а оптический двойник — в 1960-м. В 2004-м была открыта звезда-близнец той, что взорвалась.

водорода в слоях непосредственно вокруг ядра, а синтезированный в них гелий сбрасывается обратно в ядро. Постепенно ядро становится таким плотным и горячим — до 100 миллионов градусов, — что начинает сжигать свой гелий, при этом возникает яркая гелиевая вспышка. Ядра гелия сливаются, и получается углерод-12 в одной цепи реакций и кислород-16 — в другой: это источник немалой части углерода и кислорода вокруг нас. Звезды, подобные Солнцу, продолжают сжигать гелий в течение примерно 100 миллионов лет.

Когда истощается гелий, может случиться еще одно похожее переключение скоростей: звезда начинает сжигать в ядре следующий элемент — углерод, а гелий и водород синтезируются в верхних оболочках. Но сжигание углерода требует еще более высоких температур и давлений. Поэтому лишь самые крупные звезды — превышающие 8 солнечных масс — способны дойти до этой стадии, где они становятся очень яркими и распухшими. Самые массивные звезды переходят к сжиганию кислорода, кремния, серы и постепенно доходят до железа.

Для более легких звезд (менее 8 солнечных масс) последовательность прерывается, когда выгорает гелий. Ядро постепенно сжимается, случаются отдельные эпизоды горения водорода и гелия в верхних слоях, временно добавляющие топлива внутренностям звезды. Звезда проходит серию ярких вспышек — включения и выключения синтеза. Пока в центр вбрасывается гелий, внешние слои расширяются и слетают. Газ в них расширяется, охлаждается и не может больше вступать в реакцию синтеза. Звезду окутывают разреженные газовые коконы. Эти пузыри называют планетарными

### 1952

Открыты останки сверхновой Тихо Браге

### 1987

Замечена яркая сверхновая в Магеллановых Облаках

### 1998/99

Сверхновые применяют для определения расстояний и, предположительно, темной энергии



Земля



Белый карлик



Нейтронная звезда

Черная дыра

туманностями, потому что с большого расстояния эти сферические покровы казались планетами. Планетарные туманности живут недолго — они рассеиваются примерно за 20 000 лет.

В нашей Галактике их известно около 1500.

**Смятое ядро** Когда сброшены внешние слои, остается ядро звезды. В основном оно состоит из углерода и кислорода, все остальное или сожжено, или сметено с поверхности. Горячее плотное ядро быстро меркнет до белого карлика. Поскольку излучение больше изнутри не давит, материя внутри сжимается в очень компактную плотную сферу, как если бы масса Солнца сжалась до размеров 1,5 радиуса Земли. Плотность такого материала в миллион раз больше плотности воды. Белые карлики удерживает от превращения в черные дыры лишь то, что их атомы невозможно раздавить, то есть квантовое электронное давление. Они очень горячи — температура их поверхности достигает 10 000 К. Тепло улетучивается из них медленно, потому что площадь их поверхности очень мала, и потому белые карлики живут миллиарды лет.

Более массивные звезды могут сжиматься и дальше. Если оболочка, оставшаяся после рассеивания внешних слоев, превышает 1,4 массы Солнца, давления электронов недостаточно, чтобы преодолеть ее тяготение, и звезда сжимается в нейтронную. Предел в 1,4 солнечной массы называется пределом Чандрасекара, в честь индийского астрофизика Субраманьяна Чандрасекара (1910–1995). Нейтронные звезды ограничиваются радиусом примерно в 10 километров, и в них масса целого Солнца — или даже нескольких Солнц — втиснута в размеры Манхэттена. Они настолько плотны, что кусочек такой материи размером с кубик сахара весил бы больше ста миллионов тонн. В случае, если тяготение превышает и эти пределы — для самых крупных звезд, — дальнейшее сжатие создает черную дыру.

**Сверхновые** Некоторые очень массивные звезды — в десятки раз больше Солнца, — умирая, взрываются сверхновыми. После сгорания водорода и гелия массивные звезды проходят несколько стадий горения, в результате которого образуются атомы все более тяжелых элементов — вплоть до железа. Ядро железа особенное — среди атомов элементов периодической системы Менделеева оно самое устойчивое. Поэтому, когда достигнута эта стадия, ядерный синтез не может продолжаться и высвобождать энергию через создание все более тяжелых элементов. При подобных попытках энергия поглощается, а не выделяется, и ядро звезды схлопывается — оно проходит стадию белого карлика (и электронного давления изнутри) и превращается в нейтронную звезду. Но когда внешние слои падают на это плотное ядро, их сбрасывает мощным всплеском частиц (нейтрино) и света.

**«Невидимые нам из-за облаков пыли взрывы сверхновых могут происходить в нашей Галактике каждые 10 лет, и всплески нейтрино могут дать нам возможность изучить сверхновые»**

**Джон Н. Бэколл, из интервью «Нью-Йорк таймс», 3 апреля 1987 г.**

За секунды сверхновая выдает во много раз больше энергии, чем Солнце за всю свою жизнь. Сверхновая так ярка, что ненадолго затмевает остальные звезды в своей галактике, но видно ее всего несколько дней или недель, после чего она пропадает из виду.

Сверхновые бывают двух разновидностей, которые называют Тип I и Тип II. Массивные звезды становятся сверхновыми Типа II. Их обычно наблюдают в рукавах спиральных галактик в среднем один раз в 25–50 лет, у них сильные эмиссионные линии водорода из-за рассеивания внешних газовых слоев. Последняя яркая сверхновая, взорвавшаяся в нашей Галактике, была замечена Кеплером в 1604 году. У сверхновых Типа I нет эмиссионных линий водорода, они видны как в эллиптических, так и в спиральных галактиках. Считается, что они возникают другим путем — через термоядерные взрывы в двойных системах, происходящие, когда белые карлики, наращивая материал от своего двойника, преодолевают предел Чандрасекара (1,4 солнечной массы).

Существует важный подкласс сверхновых Типа I — Тип Ia, яркость звезд которого можно предсказать, наблюдая за их взрывами. Отслеживая, как они становятся ярче и бледнее, можно вычислить их подлинную яркость, что делает их полезными для расчета расстояний (см. с. 54). Поскольку они затмевают остальные звезды галактики, за ними можно следить сквозь Вселенную, вплоть до областей высокого красного смещения. С помощью сверхновых пытались определять наличие темной энергии.

При смерти массивных звезд ядра железа разрывает на части и возникает множество нейтронов. Они могут расходоваться на создание элементов тяжелее железа — свинца, золота и урана. Поэтому атомы всех этих элементов на Земле — родом из сверхновых. За исключением созданных человеком, атомы всех элементов периодической таблицы рождены в звездах.

**В сухом остатке:  
Помирать — так с музыкой**

# 42 Пульсары

**Пульсары — вращающиеся нейтронные звезды, которые шлют в пространство пучки радиоволн. Это компактные и плотные остатки массивных звезд, они очень быстро крутятся, совершая полный оборот за несколько секунд. Их регулярные сигналы сначала принимали за морзянку от инопланетян. Пульсары — точные часы, и потому с их помощью можно проверять общую теорию относительности и обнаруживать гравитационные волны.**

В 1967 году двое британских астрономов поймали необъяснимый космический сигнал. Радиотелескоп у них был довольно примитивный, и тем не менее им удалось сделать новый шаг в науке. Их телескоп состоял примерно из 120 миль проволоки и 2000 детекторов, развешенных между 1000 деревянных столбов, как гигантская бельевая сушиллка, растянутая на четыре акра поля в Кембриджшире. Когда в июле 1967-го этот телескоп был направлен на небо, его самописец выдавал по 30 метров графиков в день. Аспирантка Джослин Белл под руководством физика Тони Хьюиша прочесывала эти графики в поисках квазаров, мерцающих из-за возмущений в нашей атмосфере. Но нашла она кое-что другое.

Через два месяца наблюдений Белл заметила рваную полосу на графиках. Она была не похожа на остальные данные и исходила из одной точки в небе. Приглядевшись, Белл увидела, что полоса распадалась на повторяющиеся серии коротких радиоимпульсов через каждые 1,3 секунды. Белл и Хьюиш попытались вычислить, откуда приходит загадочный сигнал. Хотя из-за его точности можно было бы заподозрить, что источник — искусственный, ученые не смогли найти никакого излучателя. Принятые сигналы не походили ни на какие известные звезды или квазары.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1967**

Зарегистрирован  
первый сигнал пульсара

**Маленькие зеленые человечки?** Ученые, пусть и ненадолго, задумались о маловероятном: а что, если это сообщения внеземной цивилизации? В конце концов решили, что сигналы не похожи на инопланетную морзянку, но Белл вспоминает, как злилась, что исследования идут не гладко. «Я пыталась защитить диссертацию на материале новой методики, а каким-то дурацким зеленым человечкам понадобилось выбрать именно мою антенну и мою частоту, чтобы выйти на связь». Астрономы не стали обнародовать данные, но продолжили наблюдения.

Вскоре Белл обнаружила второй пульсирующий источник — названный пульсаром — с периодом в 1,2 секунды. А к январю 1968-го они с Хьюишем нашли четыре таких источника. «Маловероятно, чтобы две разные компании зеленых человечков выбрали для отправки сигналов на Землю одну и ту же странную частоту в одно и то же время», — заметила Белл. С большей уверенностью в том, что они обнаружили новое астрономическое явление, Белл и Хьюиш опубликовали свое открытие в журнале *Nature*.

**Нейтронные звезды** Астрономы кинулись искать объяснения находке Белл и Хьюиша. Их коллега по Кембриджу астроном Фред Хойл предположил, что эти импульсы может испускать нейтронная звезда, оставшаяся после взрыва сверхновой. Через несколько месяцев Томас Голд из Корнелльского университета предложил более развернутое объяснение: поток радиоволн от вращающейся нейтронной звезды пролетает мимо наблюдающего телескопа с каждым оборотом — так видно вспышку маяка с каждым поворотом лампы.

## Нобелевские противоречия

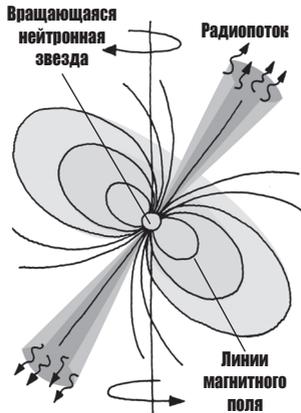
За открытия пульсаров была вручена не одна Нобелевская премия. Тони Хьюиш получил ее в 1974 году, вместе с коллегой-радиоастрономом Мартином Райлом. Джослин Белл, как ни странно, не учли, хотя именно в ее диссертационном исследовании был открыт первый пульсар. В 1993-м Джо Тейлор и Рассел Халс получили еще одну Нобелевскую премию за открытие первой двойной системы пульсаров.

**1974**

Открыт двойной пульсар

**1982**

Открыт миллисекундный пульсар



Тем не менее это впечатляет — нейтронная звезда может совершать полный оборот за секунду. Голд уверил, что это возможно, поскольку нейтронные звезды очень малы — лишь десятки километров в поперечнике. Сразу после взрыва сверхновой быстрое сжатие заставит их вращаться с высокой скоростью — как фигурист вращается быстрее, если прижмет руки к телу. У нейтронных звезд к тому же очень сильные магнитные поля. Именно они создают двойные радиопотоки, исходящие из полюсов звезды. Звезда вращается, и радиопотоки описывают в небе круги, которые выглядят как вспышки, если они направлены на Землю. Голд также предсказал, что пульсары будут постепенно замедляться от потери энергии, — и действительно: скорости вращения пульсаров уменьшаются на одну миллионную секунды в год.

**Гравитационные волны** Обнаружение еще сотен пульсаров привело к дальнейшим замечательным открытиям. В 1974 году американские астрономы Джо Тейлор и Рассел Халс открыли двойной пульсар — быстро крутящийся пульсар, совершавший оборот вокруг другой нейтронной звезды каждые 8 часов. Эта система — серьезная проверка теории относительности Эйнштейна: поскольку две нейтронные звезды чрезвычайно плотны, компактны и близки друг к другу, вокруг них образуется экстремально сильное гравитационное поле, так что они дают нам возможность взглянуть на действительно искаженное пространство-время. Теоретики предсказывали, что с вращением двух нейтронных звезд по спирали по направлению друг к другу система будет терять энергию, испуская гравитационные волны. Наблюдая за изменениями частоты и орбиты пульсара, Халс и Тейлор подтвердили это предсказание.

Гравитационные волны — это искажения в ткани пространства-времени, распространяющиеся, как рябь на поверхности пруда. С помощью детекторов на Земле физики рассчитывают обнаружить смятия пространства-времени — фирменный

## Карта для инопланетян

Хотя сигналы пульсаров и не были посланы инопланетянами, пульсары фигурируют на двух пластинках, закрепленных на космическом аппарате «Пионер», а также на Золотой пластинке «Вояджера». Это свидетельства наличия разумной жизни на Земле, предназначенные для галактических цивилизаций, которые могут однажды их обнаружить; на пластинках расположение Земли указано относительно 14 пульсаров.

## Звездотрясения

Когда кора плотной нейтронной звезды внезапно трескается, это вызывает «звездотрясение», аналогичное землетрясениям на нашей планете. Растрескивание звездной коры случается из-за того, что со временем нейтронная звезда сжимается и замедляется, и ее поверхность меняет форму.

Кора твердая и потому вибрирует. Такие «трясения» наблюдались как случайные пропуски или перебои в скорости вращения пульсаров. Крупные звездотрясения могут вызывать выброс из пульсаров гамма-лучей, которые можно уловить спутниками — например, обсерваторией Ферми (НАСА).

знак проходящих гравитационных волн, но эти наблюдения невероятно сложны. Любые колебания на Земле, от сейсмической дрожи до вибраций от океанических волн, могут помешать чувствительному сенсору. В будущих миссиях собираются применять сразу несколько соединенных лазерами космических аппаратов на больших расстояниях друг от друга и с их помощью улавливать гравитационные волны, проходящие через нашу Солнечную систему.

**Миллисекундные пульсары** В 1982 году был обнаружен новый вид пульсаров — с периодом обращения в миллисекунды (тысячные доли секунды). Его открыл американский радиоастроном Дон Бэкер. Удивительный пульсар вращался со скоростью 641 оборот в секунду. Астрономы считают, что такие пульсары возникают в двойных системах, где нейтронная звезда раскручивается волчком, втягивая материю от своей напарницы. Миллисекундные пульсары — очень точные часы, и астрономы пытаются, задействуя их, напрямую обнаруживать гравитационные волны, проходящие перед ними. Пульсары — несомненно полезные инструменты в арсенале астрономов.

Пульсары будут одной из основных целей радиотелескопа нового поколения, SKA (Квадратной километровой решетки) — огромной решетки связанных между собой антенн, которые начнут наблюдения в следующем десятилетии. Открытие десятков тысяч пульсаров, в том числе — большей части расположенных в нашей Галактике, даст радиоастрономам возможность проверить общую теорию относительности и изучить гравитационные волны.

# В сухом остатке: Космический маяк

# 43 Гамма-всплески

**Гамма-всплески — короткие вспышки фотонов высоких энергий, каждый день происходящие в небе. Впервые они были обнаружены военными спутниками. Большая часть этих вспышек знаменует собой последние вздохи умирающих массивных звезд в далеких галактиках. Они ярче обычных звезд, хоть и находятся в миллиардах световых лет от нас. Гамма-всплески — одно из самых энергетически мощных явлений во Вселенной.**

Пульсары и квазары — не единственные необычные объекты, открытые в 1960-х годах. Неопознанные вспышки гамма-лучей — самого высокоэнергетичного электромагнитного излучения — были замечены патрульными военными спутниками США в 1967 году. Чтобы контролировать, соблюдает ли СССР договор о запрете ядерных испытаний, спутники «Вела» имели на борту детекторы гамма-лучей, испускаемых при ядерных взрывах. Но вспышки, которые они увидели, не были похожи на атомные испытания. Данные об этих энергетических вспышках были рассекречены в 1973 году и опубликованы в статье о гамма-лучах космического происхождения.

Колоссальные вспышки гамма-лучей, уловленные спутниками, появлялись во всех углах неба. Они случались каждый день и длились от долей секунды до нескольких минут. Эти вспышки гамма-лучей были в сотни раз ярче сверхновой и в миллиарды раз ярче Солнца. Что вызывало эти мощнейшие вспышки?

Десятилетия ушли на то, чтобы понять, откуда они берутся. Дело сдвинулось с мертвой точки в 1991 году, с запуском спутниковой гамма-обсерватории «Комптон», благодаря которой удалось обнаружить и приблизительно вычислить координаты тысяч вспышек.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

### 1967

Первый гамма-всплеск обнаружен спутником «Вела»

### 1991

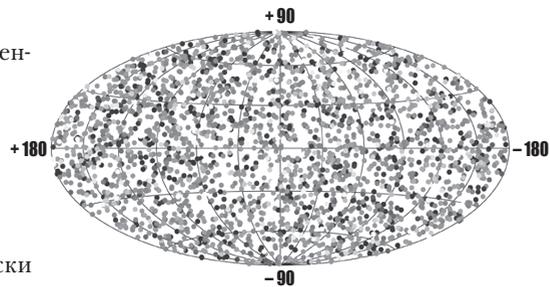
Запущена гамма-обсерватория «Комптон»

График их расположения на небе показал, что они распределены равномерно (изотропно). Они не были сконцентрированы в центре или в диске Млечного Пути и не совпадали с известными внегалактическими объектами. Это распределение по всему небу позволяет предположить, что гамма-лучи рождаются либо очень близко к нам, либо очень далеко. Они происходят не от взрывающихся звезд в нашей Галактике, иначе они бы в основном были видны в диске. Они, возможно, возникают поблизости, но скорее всего их источник — за пределами Млечного Пути. Тем не менее, раз они не собираются вокруг областей с высокой галактической плотностью, значит, приходят издалека. А если так, эти вспышки — самые высокоэнергетичные явления во Вселенной. Загадка лишь усложнилась.

Гамма-всплески бывают двух типов: короткие и длинные. Длинные всплески обычно длятся десятки секунд, короткие — доли секунды. Наличие двух разных классов предполагает, что они возникают в результате двух разных процессов. Астрономы и в наши дни лишь начинают разбираться, что тут к чему.

**Оптическое остаточное свечение** В 1996-м был запущен еще один спутник, «Беппо-САКС», что позволило более точно вычислять расположение всплесков. Помимо регистратора гамма-лучей, спутник был оснащен рентгеновской камерой, и астрономам во время гамма-всплесков удавалось регистрировать свечение на других длинах волн. На Земле была установлена сигнальная система: в момент гамма-всплеска телескопы по всему земному шару быстро поворачивались в его направлении — отслеживать сопутствующие ему явления, которые видно дольше. В 1997 году было выявлено оптическое остаточное свечение, а его источником с большой вероятностью была очень бледная галактика. Вскоре обнаружили и другие случаи остаточного свечения.

С запуском новых спутников, а особенно «Свифта» и «Ферми», астрономы собрали данные о множестве сопутствующих гамма-всплескам явлений. Были задействованы и автоматические телескопы, которые немедленно реагировали на сигнал о вспышке. Эти гамма-всплески



1996

Запущен «Беппо-САКС»

1997

Зарегистрировано первое  
остаточное свечение

2005

Зарегистрировано первое  
остаточное свечение  
после короткой вспышки

## Астрономия гамма-лучей

Изучение гамма-лучей в основном ведется из космоса. Но самые высокоэнергичные фотоны гамма-лучей можно обнаружить и в экспериментах на Земле. Фотоны, сталкиваясь с молекулами воздуха, испускают поток частиц и вспышки голубого света, и то и другое можно зарегистрировать. Свет — так называемое излучение

Черенкова — эффективнее всего собирать телескопами. Этим методом были обнаружены гамма-лучи из Крабовидной туманности, в которой есть пульсар, и несколько активных галактических ядер вокруг. Астрономия гамма-лучей сложна, но разрабатываются телескопы большего размера, которые смогут дотянуться до самых бурных окраин космоса.

явно происходят из очень бледных далеких галактик в миллиардах световых лет от нас. Связь одного из всплесков со вспышкой сверхновой означает, что длинные гамма-всплески — вестники предсмертной агонии массивных звезд.

**Ударные волны** Астрономы считают, что гамма-лучи рождаются от ударных волн, возникающих, когда ядро звезды схлопывается в черную дыру. Получающийся взрыв посылает волну со скоростью, близкой к скорости света, которая проходит сквозь газ, оставшийся вокруг звезды, и генерирует гамма-лучи, чуть-чуть обгоняющие ударный фронт. В ударной волне возникает электромагнитное излучение и других видов, отчего рождается остаточное свечение, которое может держаться днями и неделями.

Обнаружить короткие всплески оказалось труднее, поскольку остаточное свечение, если оно и было, могло исчезнуть прежде, чем телескоп успеет повернуться в нужном направлении. Однако с 2005 года было замечено несколько явлений, связанных с короткими всплесками, хотя они были

**Гений и наука вырвались за пределы пространства, и несколько наблюдений, объяснение которым дал лишь разум, раскрыли механизм Вселенной. Не будет ли грандиозно, если человек сможет также вырваться за пределы времени и несколькими наблюдениями установить историю этого мира и события, предшествовавшие появлению человечества?**

**Жорж Кювьё, «Очерк о теории Земли» (1818)**

обнаружены в областях, где не происходило активного формирования звезд, в том числе в эллиптических галактиках. То есть короткие всплески, скорее всего, имеют другую физическую природу и не связаны со смертями массивных звезд. И пусть их природа все еще неясна, считается, что они могли возникнуть от слияния нейтронных звезд или в других высокоэнергетических системах. Гамма-всплески — обычно единичные катастрофические явления, и повторные удалось зарегистрировать лишь несколько раз.

**Поток частиц** При гамма-всплесках выделяется больше энергии, чем при любом другом известном астрофизическом процессе. Они ненадолго вспыхивают, как яркая звезда, хотя находятся в миллиардах световых лет от нас. Астрономы затрудняются объяснить, как может выделиться столько энергии с такой скоростью. Вероятно, в некоторых случаях энергия выделяется в разных направлениях не равномерно, а, как у пульсаров, электромагнитные волны исходят узким потоком. Гамма-лучи тоже могут быть усилены релятивистскими эффектами, если они возникают от частиц, несущихся по спирали в магнитном поле, — возможно, это уменьшенная версия потоков частиц, исходящих из радиогалактик. Как именно генерируются гамма-лучи — все еще предмет исследования.

Нам повезло, что гамма-всплески так редки: они возникают в миллиардах световых лет от нас, но на вид так же ярки, как ближайшие звезды. Если бы такое случилось в нашей Галактике, Земля бы поджарилась.

**«Во многих случаях будет достаточно лишь одного тщательно сделанного наблюдения — как одного тщательно продуманного эксперимента часто хватает, чтобы установить закон»**

**Эмиль Дюркгейм, «Законы социологического метода» (1895)**

## В сухом остатке: Гигантские вспышки

# 44 Переменность

**Астрономы открывают новые виды на Вселенную, наблюдая за тем, как объекты изменяются со временем. Большинство звезд светит постоянно. Но есть другие — переменные звезды, которые преобразуются физически, и от этого колеблется их яркость. Метаморфозы их света могут многое рассказать о звезде. Космос — место изменений.**

Хотя небесные гости — кометы и сверхновые — веками удивляли людей, ночное небо в целом считалось неизменным. Представление о постоянстве пошатнулось в 1638 году, когда Иоганн Хольварда открыл пульсации звезды Мира, которая делалась то ярче, то бледнее с периодом в 11 месяцев. К концу XVIII века было известно несколько переменных звезд, включая Алголь. Их число стало стремительно увеличиваться во второй половине XIX века, когда фотография упростила наблюдения за большими количествами звезд. На сегодня известно более 50 000 переменных звезд, большинство из них в нашей Галактике, но многие лежат и за ее пределами.

**Пульсации** Переменные звезды предстают перед нами в разнообразных обликах. Наблюдение за светом звезды показывает, как увеличивается и уменьшается ее яркость, — ее световую кривую. Цикл может быть регулярным, неравномерным или где-то посередине. Спектр звезды также говорит нам о ее типе, температуре и массе — и о том, есть ли у нее двойник. Изменения спектра могут сопровождать колебания в свете звезды. Спектральные линии могут показывать доплеровские смещения, которые намекают на расширение или сжатие газовых оболочек — или присутствие магнитных полей. По совокупности собранных данных можно судить о причинах колебаний звезды.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1638**

Замечена первая переменная звезда

**1784**

Открыты переменные звезды-цефеиды

## «Развитие науки частично зависит от процесса не постепенного, революционного изменения»

Томас С. Кун, «Ключевое напряжение: избранные исследования научной традиции и изменчивости» (1977)

Около двух третей переменных звезд пульсируют — разбухают и сжимаются согласно регулярным циклам. Эти колебания обусловлены внутренней неустойчивостью звезды, вызванной разными взаимосвязанными причинами.

Артур Эддингтон в 1930-х описал один из вариантов механизма: изменения в степени ионизации внешних слоев звезды из-за колебаний их температуры. Когда внешние слои раздуваются, они охлаждаются и становятся прозрачнее. Тогда звезде становится проще излучать больше энергии, и она сжимается. Газ в результате снова нагревается, отчего звезда опять начинает раздуваться. Так повторяется по кругу.

**Цефеиды** Эта схема объясняет пульсацию цефеид — важного типа переменных звезд, используемых как индикатор расстояния. Циклы цефеид вызваны изменениями в ионизации гелия. Двукратно ионизированный гелий менее прозрачен, чем однократно ионизированный. Вот почему мы видим колебания в прозрачности и в температуре. Период этих циклов тесно связан с яркостью звезды.

### Переменные квазары

Переменность — характеристика не только звезд. Переменны и многие квазары.

Их переменность, вместе с их неизменной яркостью по всему электромагнитному спектру, помогает отыскивать эти небесные тела. Квазары могут быть переменными из-за колебаний количества материи, втягиваемой сверхмассивной черной дырой в их центре, — или из-за горячей точки

переменной яркости в их аккреционном диске. По самым быстрым изменениям в квазаре можно судить о размерах области, излучающей свет. Если яркость квазара изменяется за несколько дней, его максимальным размером можно считать один световой день, иначе свет от разных его точек не достигал бы нас более-менее одновременно.

**1908**

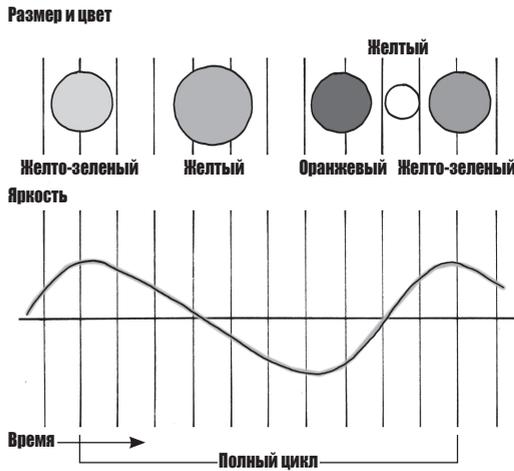
Изучено соотношение цикла и яркости цефеид

**1924**

С помощью цефеид рассчитано расстояние до туманности Андромеды

**2014**

Открывается Большой синоптический обзорный телескоп



Цефеиды – очень яркие массивные звезды. Обычно они в 5–20 раз массивнее Солнца и почти в 30 000 раз ярче. Их изменения видны в масштабах от дней до месяцев, а радиусы за это время сокращаются или расширяются почти на треть. Благодаря яркости и предсказуемым изменениям их можно видеть на расстояниях в 100 миллионов световых лет, то есть их можно отслеживать в соседних галактиках и определять яркость, что делает цефеиды хорошими индикаторами расстояния.

Переменные цефеиды были открыты в 1784 году и названы в честь звезды-

прототипа – Дельты Цефея. Более известный пример – Полярная звезда. Соотношение ее периода и яркости открыла, опираясь на наблюдения за цефеидами в Магеллановых Облаках, гарвардский астроном Генриетта Суон Ливитт в 1908 году. Открытие цефеид стало последней недостающей деталью головоломки – установления размеров Млечного Пути и расстояний до других галактик. В 1924 году Эдвин Хаббл с их помощью вычислил расстояние до галактики Андромеды и доказал, что она лежит за пределами Млечного Пути. Цефеиды также сыграли ключевую роль в определении, с какой скоростью, согласно закону Хаббла, расширяется Вселенная.

Цефеиды – один из видов звезд, переменных по природе. Такие звезды физически деформируются, что создает переменность. В случае цефеид переменность – это пульсация, тогда как другие звезды могут выглядеть переменными из-за выбросов или вспышек на их поверхности. Переменность может быть и следствием разрушительных процессов, приводящих к взрывам, – как в случае взрывных переменных звезд, новых и сверхновых. Другой вариант – звезды, переменные по внешним причинам, например из-за затмений двойниками или из-за особых свойств поверхности – огромных

**«В прошлом [XIX] веке произошло больше изменений, чем за предыдущую тысячу лет. Новый [XX] век увидит перемены, которые затмят достижения прошлого века»**

**Г. Дж. Уэллс, из лекции «Открытие будущего» (1902)**

## Небесное кино

В будущем астрономия изменений во времени станет обычным делом. Небо будут разглядывать как кино, а не как серию фотографий. Новое поколение телескопов — и оптических, и радио — разрабатывается так, чтобы обеспечивать постоянное наблюдение неба, и нацелено на поиск новых видов переменных объектов, а значит, можно рассчитывать на множество новых открытий. Один из таких телескопов — Большой синоптический обзорный, который заработает в Чили в 2022 году.

Его зеркало — 8,4 метра в диаметре, у него широкий угол обзора, график исследования всего неба — дважды в неделю, по 800 снимков еженочно. Предполагается, что каждый участок неба будет обследован за 10 лет 1000 раз. Мы получим изображение нескольких миллиардов звезд и миллиардов галактик. Переменные звезды и квазары, а также сверхновые попадут в поле зрения нового телескопа, кроме того, появятся новые возможности поиска темной энергии.

солнечных пятен, которые вызывают переменность, когда звезда вращается. Большинство классов переменных звезд названы в честь своих прототипов, как, например, RR Лиры — звезды, похожие на цефеиды, но бледнее, или переменные типа Миры Кита, которые пульсируют из-за изменений ионизации водорода, а не гелия.

**В сухом остатке:  
Кино во все небо**

# 45 Солнце

**Ближайшая к нам звезда до сих пор таит загадки. Хотя благодаря ей мы многое узнали о ядерном синтезе и устройстве звезд, ее магнитная погода иногда непредсказуема. Цикл активности Солнца — 11 лет, на нем бывают случайные вспышки и порывы солнечного ветра. На Земле эти явления рисуют живописные полярные сияния, мешают электронному сообщению и влияют на климат.**

Древние греки знали, что Солнце — гигантский огненный шар вдалеке от Земли. Но только в XVI–XVII веках было доказано, что это Земля обращается вокруг Солнца, а не наоборот. Появление в XVII веке телескопов открыло солнечные пятна — движущиеся темные кляксы. Их наблюдал еще Галилео Галилей — и понял, что это бури на поверхности Солнца, а не заслоняющие его облака. В XIX веке путем анализа темных линий поглощения в солнечном спектре — фраунгоферовых линий — был установлен химический состав Солнца. Но знание о механизме производства солнечного топлива — ядерном синтезе — было добыто лишь в XX веке, с развитием атомной физики.

Солнце — большая часть массы Солнечной системы (99,9%), заключенная в шаре диаметром в 100 раз больше Земли. Наше светило расположено примерно в 150 миллионах километров от нас, и свет от него доходит до Земли за 8 минут. Около трех четвертей массы Солнца составляет водород, остальное — гелий с вкраплениями более тяжелых элементов — кислорода, углерода, неона и железа. Оно горит, потому что в ядре идет синтез гелия из водорода. Температура на его поверхности 5800 К. Солнце — желтая звезда класса G2, средней яркости для звезды главной последовательности; оно находится примерно в середине своего жизненного цикла в 10 миллиардов лет.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1610

Галилей публикует наблюдения, сделанные в телескоп

1890

Джозеф Локьер открывает гелий в солнечном спектре

1920

Артур Эддингтон предполагает, что солнечное топливо — ядерный синтез

**Земля в своем стремительном движении вокруг Солнца обладает такой живой силой, что если перевести ее в тепловой эквивалент, то температура Земли стала бы по меньшей мере в тысячу раз больше температуры раскаленного докрасна железа, а шар, по которому мы ходим, со всей вероятностью сделался бы таким же ярким, как Солнце**

**Джеймс Прескотт Джоуль, из статьи «О материи, живой силе и тепле» (1847)**

**Солнечная структура** Солнце по структуре напоминает луковицу. В его сердцевине, во внутренней четверти его радиуса, находится горячее плотное ядро, где происходит ядерный синтез: за счет конвертации вещества в излучение Солнце теряет 4 миллиона тонн в секунду. Температура в ядре достигает убийственных 14 миллионов градусов по Кельвину. Следующий слой – лучистая зона, от 0,25 до 0,7 солнечного радиуса. Энергия ядра проходит через эту зону в виде электромагнитного излучения – фотонов. По мере удаления от центра звезды температура падает с 7 до 2 миллионов градусов.

Над лучистой зоной лежит зона конвекции, занимающая внешние 30% радиуса Солнца. Тепло, приходящее изнутри, заставляет газ пузыриться на поверхности и циркулировать, как кипящая вода в кастрюле. Тепло в этой зоне быстро рассеивается, и потому температура поверхности падает до 5800 К. Внешняя оболочка – фотосфера – покрывает Солнце тонким слоем всего в несколько сотен километров.

Разреженный газ над поверхностью формирует солнечную атмосферу, которую можно видеть во время полного затмения Солнца Лунной. Она состоит из пяти зон: холодный слой толщиной 500 км, известный как зона температурного минимума; 200-километровая плотная переходная зона; хромосфера – горячая ионизированная зона; обширная корона, которая простирается далеко от Солнца и генерирует солнечный ветер, она раскалена до миллионов градусов, и, наконец, гелиосфера – пузырь, наполненный солнечным ветром, охватывающий всю Солнечную систему. В 2004 году космический аппарат «Вояджер» прошел сквозь границу этого пузыря – через ударный фронт, называемый гелиопаузой.

**1957**

Бёрбедж с соавторами разрабатывают теорию звездного ядерного синтеза

**1959–1968**

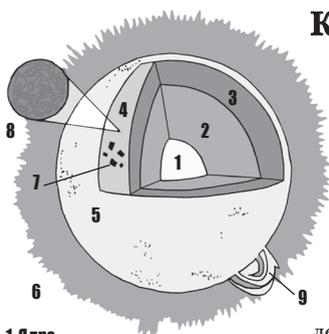
Зонды НАСА «Пионер» изучают солнечный ветер и магнитное поле

**1973**

Запущена станция «Скайлэб», исследующая солнечную корону

**2004**

Космический аппарат «Дженезис» собирает образцы частиц солнечного ветра



1. Ядро
2. Зона лучистого переноса
3. Зона конвекции
4. Фотосфера
5. Хромосфера
6. Корона
7. Солнечные пятна
8. Гранулы
9. Протуберанец

**Космическая погода** Солнце обладает мощным магнитным полем. Оно меняет направление на противоположное каждые 11 лет, отмечая солнечные циклы, но изменения в нем происходят непрерывно. Солнечные пятна, вспышки и порывы солнечного ветра случаются чаще, когда магнитное поле Солнца особенно активно. Такие выбросы могут посылать в Солнечную систему облака стремительных частиц. Достигнув Земли, за счет ее магнитного поля они стекаются к полюсам, в зоны высоких широт, где мы наблюдаем их в виде изящного полярного сияния. Мощные выбросы частиц могут быть разрушительными — они мешают телекоммуникациям и работе электросетей, как это случилось в Квебеке (Канада) в 1989 году.

Солнечные пятна — вихри мощного магнитного поля, образующиеся на поверхности Солнца. Достигая тысяч километров в поперечнике, они выглядят темными, поскольку они холоднее окружающего кипящего газа. Количество солнечных пятен возрастает в моменты пиковой магнитной активности, с колебаниями порядка 11 лет. Необычные солнечные циклы могут влиять на земной климат: Малый ледниковый период, заморозивший Европу в XVII веке, совпал с остановкой солнечного цикла на несколько десятилетий — в этот период наблюдалось очень мало солнечных пятен. В последние годы, вплоть до 2010-го, Солнце находилось в фазе покоя — его яркость слегка уменьшилась, а магнитное поле, количество солнечных пятен и сила солнечного ветра сделались ниже среднего.

**Загадки** Солнце — хорошая лаборатория для изучения звездной физики. Хотя мы немало знаем о том, как оно устроено, остается и множество загадок. Одна из них — тайна исчезающих солнечных нейтрино — была недавно

### «Дженезис»

Поскольку лишь внешние слои Солнца поглощают свет, о его внутренней химии нам известно немного. Космический аппарат «Дженезис» (от англ. «творение») собрал частицы солнечного ветра для дальнейшего изучения их состава. В 2004-м он рухнул обратно на Землю. Хотя его парашют не раскрылся и он разбился в пустыне Невада, астрономы смогли собрать обломки его детекторов и проанализировать солнечные частицы.

разгадана. Ядерный синтез гелия из водорода в качестве побочного продукта производит частицы — нейтрино. Солнце должно бы испускать их в изобилии, но физики

видели меньше половины ожидаемого количества. Где остальные? Нейтрино обнаружить трудно, поскольку они почти не взаимодействуют с материей. В 2001 году нейтринная обсерватория Садбери (Канада) дала ответ: причина недостачи в том, что нейтрино за время путешествия с Солнца превращаются в другие виды нейтрино. Физики обнаружили эти другие виды (тау- и мюонные нейтрино) и показали, что нейтрино «колеблются» между видами и у частиц есть хоть и крошечная, но измеримая масса (раньше считалось, что они массы не имеют). Ответ на загадку дефицита солнечных нейтрино был найден.

Другая солнечная загадка — как солнечная корона разогревается до миллионов градусов — пока остается без ответа. Температура фотосферы — всего 5800 К, а значит, корона накаляется не излучением с поверхности Солнца. Наиболее вероятное предположение таково: плазму короны подпитывает магнитная энергия. Она высвобождается во вспышках и проходящих сквозь газ магнитных волнах, когда линии магнитного поля резко перезамыкаются.

**Судьба Солнца** Солнцу около 4,5 гигаlet, оно примерно в середине своего жизненного цикла. Еще через 5 миллиардов лет водородное топливо в ядре истощится и Солнце раздуется в красного гиганта. Его распухшие внешние слои протянутся дальше земной орбиты, в 250 раз дальше нынешнего радиуса Солнца. Хотя планеты, возможно, отлетят на более далекие орбиты, Земле, скорее всего, не выжить. Вся земная вода выкипит, атмосфера рассеется. Уже сейчас яркость Солнца растет на 10% каждый миллиард лет, и примерно через миллиард лет жизнь на Земле может прекратиться. Солнце окончит свои дни белым карликом, сбросив внешние оболочки и образовав планетарную туманность. Останется только ядро.

**Ты научил меня, как называть  
И яркое, и бледное светила,  
Которые нам светят днем и ночью...\***

Уильям Шекспир, «Буря», акт I, сцена 2 (1623)

\* Пер.  
М. Донского.

**В сухом остатке:  
Ближайшая звезда**

# 46 Экзопланеты

**Известны сотни планет, вращающихся вокруг других звезд, кроме Солнца. Большинство из обнаруженных на данный момент замечены благодаря спектроскопическим колебаниям, которые они вызывают у своей звезды. Это газовые гиганты вроде Юпитера. Но космические аппараты ищут каменные планеты поменьше, которые могли бы оказаться пригодными для жизни аналогами Земли.**

Открытие экзопланет — планет вокруг других звезд — заветная мечта астрономов. В Млечном Пути так много звезд — вряд ли наша Солнечная система единственная в своем роде. Но бледные тела, вращающиеся вокруг ярких далеких звезд, различить оказалось непросто, и экзопланеты были обнаружены только в 1990-х, когда технические характеристики телескопов позволили разглядеть их. Последовала волна открытий, и на сегодняшний день известно около 400 экзопланет.

За исключением горстки планет вблизи пульсаров, обнаруженных методами радиоастрономии, почти все экзопланеты были замечены благодаря характерным признакам в спектрах звезд. В 1995 году Мишель Мэйор и Дидье Келоз из университета Женевы сделали первое такое открытие, усовершенствовав метод поиска небольших смещений в длинах волн звездного света из-за тяготения, оказываемого планетой на звезду.

**Поиски планет** Поскольку два массивных тела вращаются вокруг общего центра масс — точки, лежащей ближе к более массивному телу, а не посередине между ними или на одном из них, — планета, обращаясь вокруг звезды, вынуждает ее саму описывать небольшие круги. Эти колебания проявляются в виде доплеровского смещения в свете звезды: когда звезда отдаляется от нас, ее свет делается краснее,

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1609**

Кеплер публикует теорию эллиптических орбит

**1687**

Ньютон объясняет законы Кеплера тяготением

**1781**

Уильям Гершель открывает Уран

## «Придет время, когда люди направят взгляд вдаль. Они увидят планеты, подобные нашей Земле»

Сэр Кристофер Рен, из речи по случаю назначения профессором астрономии (1657)

а приближаясь к нам, она кажется чуть голубее. Пусть мы не силах увидеть саму планету, зато можем определить ее присутствие: ее масса заставляет звезду пританцовывать взад-вперед (см. с. 32, эффект Доплера).

Большинство экзопланет, известных на данный момент, были обнаружены доплеровским методом. В теории, мы могли бы увидеть колебания звезды напрямую — как небольшие изменения ее расположения. Но такие тонкие измерения сложны, поскольку звезды очень далеко. Другой метод — наблюдать за регулярным потускнением звезды из-за прохождения планеты перед ней. Планета вроде Земли закрывала бы малую часть (около 100 миллионных) света звезды на несколько часов. Для уверенного обнаружения такое уменьшение яркости должно повторяться регулярно, с циклом в несколько дней, месяцев или лет. Когда таким образом измерен период обращения, можно вычислить массу планеты, используя третий закон Кеплера. Несколько планет были найдены таким способом.

Разными методами поиска обнаруживаются разные типы планет. Метод Доплера чувствительнее к очень крупным планетам, похожим на Юпитер, которые вращаются близко к своей звезде, где оказывают наибольшее тяготение.

### Миссия «Кеплер»

В 2009 году был запущен космический аппарат НАСА «Кеплер», чья миссия — искать планеты, подобные Земле. Его телескоп диаметром 0,9 м постоянно наблюдает за обширной полосой неба (105 квадратных градусов), включающей 100 000 звезд. Если планета размером

с Землю пройдет перед любой из звезд, это будет зарегистрировано как падение яркости светила. Ожидалось, что за время миссии обнаружатся сотни подобных планет — или нам удастся ограничить представления об их численности\*.

\* Ожидания оправдались: «Кеплер» произвел множество значимых открытий, хотя 12 мая 2013 года он вышел из строя, и точная ориентация аппарата в пространстве более невозможна.

**1843–1846**

Нептун предсказан и найден Адамсом и Леверье

**1930**

Клайд Томбо открывает Плутон

**1992**

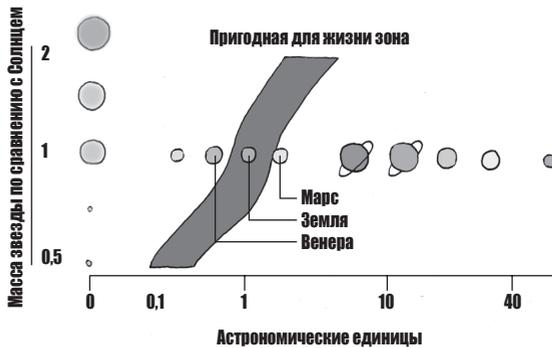
Первая планета за пределами Солнечной системы открыта вблизи пульсара

**1995**

Первая экзопланета найдена доплеровским методом

**2009**

Запуск космического аппарата «Кеплер»



Метод прохождений может отследить планеты меньших размеров и на больших расстояниях, включая и похожие на Землю, но он требует очень чувствительных измерений света звезды на длительных периодах. Лучше всего это удастся сделать из космоса, за пределами беспокойной атмосферы Земли. Метод проходов используется несколькими космическими миссиями, включая «Кеплер», запущенный в 2009 году.

**Горячие Юпитеры** Из сотен планет, обнаруженных на сегодняшний день, большинство — газовые гиганты, расположенные очень близко к своей звезде. Их массы сравнимы с массой Юпитера — и почти все они во много раз тяжелее Земли, — но движутся по тесным орбитам намного ближе к своей звезде, чем Меркурий к нашему Солнцу. Эти «горячие Юпитеры» обычно завершают оборот вокруг своих звезд всего за несколько дней, а их атмосферы раскаляются из-за близости к звезде. У одной из планет есть более горячая дневная сторона, обращенная к звезде, она разогревается до 1200 К, и более холодная ночная, остывающая примерно до 970 К. В спектрах атмосфер экзопланет астрономы нашли воду, натрий, метан и углекислый газ.

Экзопланеты определяются как вращающиеся тела слишком малой массы, чтобы запустить ядерный синтез на дейтерии: они недостаточно велики, чтобы зажечься и стать звездами. Максимальный их размер — в 13 раз больше Юпитера. Неактивные газовые шары крупнее этого предела ядерного синтеза называются коричневыми карликами. Нижний предел массы не ограничен ничем, кроме представлений о масштабах планет в Солнечной системе. Экзопланеты могут быть газовыми гигантами, как Юпитер и Сатурн, или каменными, как Земля или Марс.

Экзопланеты — распространенное явление: они были обнаружены вокруг примерно одного процента звезд главной последовательности, изученных на сегодняшний день. Даже если статистика недооценивает их возможное количество, — а это вполне вероятно, учитывая, что мы в основном наблюдаем «горячие Юпитеры», — предположительно, в Млечном Пути, содержащем 100 миллиардов звезд, имеются миллиарды планет.

Для некоторых звезд наличие планет вероятнее. Скорее всего, планеты есть у звезд, похожих на наше Солнце (спектральные классы *F*, *G* или *K*), а для карликов (класс *M*) и ярких голубых звезд (класс *O*) такая вероятность меньше. Предположительно, планеты, причем массивные, есть у звезд, чьи спектры указывают на содержание относительно большего количества тяжелых элементов — например, железа.

У многих обнаруженных на сегодняшний день экзопланет необычные орбиты. Самые стремительные, обращающиеся вокруг своей звезды меньше чем за 20 дней, следуют приблизительно по круговым траекториям, похожим на наблюдаемые в Солнечной системе. Те, чей оборот продолжительнее, следуют по эллиптическим, иногда сильно вытянутым орбитам. Пока неясно, почему вытянутые орбиты сохраняют форму, а не переходят в круговые. В любом случае примечательно, что эти далекие планеты подчиняются тем же законам физики, что и наша Солнечная система.

**Зона жизни** Чтобы составить карту планетных систем других звезд, астрономы отыскивают планеты меньшей массы, лежащие дальше от своих звезд, чем горячие Юпитеры. Особенно ценны планеты, подобные Земле, — каменные экзопланеты похожих масс, расположенные относительно своей звезды примерно как Земля — относительно Солнца. Вокруг каждой звезды есть зона, пригодная для жизни, где на планете была бы температура, при которой возможно наличие жидкой воды, а следовательно, и жизни. Если бы планета была расположена ближе к звезде, вода на ее поверхности выкипала бы, а если дальше — замерзала. Это ключевое расстояние зависит от яркости звезды: пригодные для жизни планеты лежат дальше от ярких звезд и ближе — к более тусклым.

За последние двадцать лет астрономы узнали о планетах много нового. Эльдорадо — найти у далекой звезды планету, похожую на Землю, — все еще впереди. Но с развитием технологий и точности наблюдений это лишь вопрос времени — когда будет составлена карта целых экзопланетных систем.

## «Единственная по-настоящему непознанная планета — Земля»

Дж. Г. Баллард, из очерка «Как пройти во внутреннее пространство?» (1962)

## В сухом остатке: Другие миры

# 47 Формирование Солнечной системы

**Солнце образовалось из огромного облака газа 4,5 миллиарда лет назад. Так же, как другие звезды, сгущающиеся из молекулярных облаков, Солнце гравитационно выросло из океана водорода, гелия и вкраплений других элементов. Планеты сформировались из остатков вещества. Наращивание и столкновения определили их размеры и расположение в партии космического бильярда.**

Когда в XVIII веке завоевала признание гелиоцентрическая модель, возникли вопросы о зарождении Солнечной системы. Небулярная гипотеза – что Солнце и планеты сформировались из гигантского облака газа – была предложена в 1734 году Эмануэлем Сведенборгом и разработана позднее, в том же столетии, Иммануилом Кантом и Пьером-Симоном Лапласом. Хотя в целом она верна, с тех пор она получила мощное развитие. Как другие звезды формируются из молекулярных облаков – к примеру, туманность Ориона, – так и Солнце, должно быть, сгустилось из облака, богатого водородом, гелием и вкраплениями других элементов.

Облако-предок Солнца, по-видимому, было размером в много световых лет и содержало достаточно газа, чтобы создать тысячи Солнц. Наше светило, возможно, было не единственным в этом облаке: судя по метеоритам, содержащим тяжелый изотоп железа ( $Fe-60$ ), туманность была загрязнена выбросами от соседней сверхновой. Таким образом, Солнце могло вырасти среди других массивных звезд, жизнь которых была короче, и они взорвались до рождения Солнечной системы.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1704**

Впервые введено понятие  
«Солнечная система»

## Крушение кометы

16–22 июля 1994 года комета Шумейкеров-Леви 9 врезалась в атмосферу Юпитера. Это было первое наблюдавшееся столкновение двух тел в Солнечной системе, и за ним следили из большинства обсерваторий на Земле и в космосе. К моменту приближения к Юпитеру ядро кометы разорвалось по меньшей мере на 21 кусок размерами до двух километров. Астрономы смотрели, как эти куски врезаются в атмосферу один за другим, вызывая вспышки и выбросы вещества.

Солнце постепенно росло из особенно плотной зоны облака благодаря действию сил тяготения. За 100 000 лет оно стало протозвездой — горячим плотным газовым шаром, в котором еще не шел ядерный синтез. Оно было окружено диском газа и пыли в сотни раз больше радиуса орбиты сегодняшней Земли. Примерно через 50 миллионов лет включился ядерный двигатель Солнца, и оно стало звездой главной последовательности.

**Растущие планеты** Планеты сформировались из обломков, собравшихся в диске. Крупинки срастались и собирались в объекты размерами в километры, а те, в свою очередь, тоже сталкивались и слипались. Эмбрионы планет росли и росли. В то же время там, где формировались планеты, диск очищался от вещества.

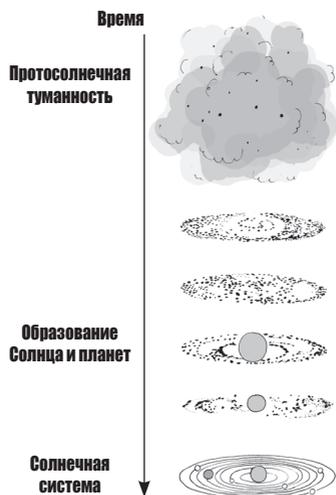
Внутренние области формирующейся Солнечной системы были очень горячи, поэтому летучим компонентам — таким как вода — осесть не удавалось. Каменные, богатые металлами планеты формировались на основе атомов элементов с высокими температурами плавления: железа, никеля, сплавов алюминия, силикатов — ныне это основы вулканических пород, наблюдаемых на Земле. Планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс — постепенно росли от слияния меньших объектов. Считается, что внутренние планеты сформировались дальше от Солнца, чем их сегодняшнее расположение, поскольку их орбиты сжимались по мере того, как планеты замедлялись при движении сквозь газ, который все еще оставался в постепенно рассеивающемся диске.

**1734**

Сведенборг предлагает  
небулярную гипотезу

**1994**

Комета врезается в Юпитер



Гигантские газовые планеты — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун — формировались дальше, за «снеговой линией», где летучие компоненты остаются замерзшими. Эти планеты были достаточно велики, и потому им удалось всосать атмосферы из водорода и гелия. Эта четверка составляет 99% массы, вращающейся вокруг Солнца. Через 10 миллионов лет молодое Солнце размело весь оставшийся в диске газ, планеты заняли свои места и перестали расти.

Изначально считалось, что планеты в основном формировались там, где мы видим их сегодня. Но в XX веке астрономы поняли, что все было иначе. Они разработали новые теории и предположили, что планеты в действительности активно перемещались из-за столкновений — космического бильярда.

**Гигантские удары** Когда внутренние планеты почти сформировались, в их зоне все еще было много эмбрионов планет размером с Луну. Они мощно сталкивались с готовыми планетами. Мы знаем, что это происходило: Земля приобрела Луну в одном из таких столкновений, Меркурий потерял большую часть своей внешней оболочки в другом. Наиболее вероятная причина этих столкновений в том, что орбиты планет тогда были более вытянутыми и потому часто пересекали траектории меньших объектов. С тех пор орбиты поменяли форму и сделались почти круговыми — возможно, путем последовательных столкновений или тяготения обломков.

Каменные осколки в поясе астероидов между Марсом и Юпитером могут быть остатками планеты, разбитой множеством столкновений. Эта зона была особенно подвержена катаклизмам из-за гравитационного влияния Юпитера, самой крупной планеты Солнечной системы. Смещение орбиты Юпитера вызвало обильные разрушения. Гравитационный «резонанс» взбаламутил зону, прилегающую к его орбите. Последовавшие столкновения разнесли находившуюся там планету, от которой осталась лишь россыпь астероидов. Некоторые ледяные астероиды из этого пояса могли занести на орбиту Земли, из-за чего на молодой планете появилась вода. Могли доставить воду и кометы.

Юпитер и другие внешние планеты на поздних стадиях формирования активно перемещались. На радиусах самых внешних планет диск был бы слишком холодным и рассеянным, чтобы получались по-настоящему крупные объекты. И потому Уран, Нептун и объекты пояса Койпера, включая Плутон и кометы, скорее всего, зародились ближе к Солнцу и были отброшены

## Метеориты

Метеориты — это космические обломки, в том числе вещества, оставшиеся от ранней Солнечной системы, и осколки планет. Есть три основных типа метеоритов: те, что богаты железом и происходят из ядер разбитых астероидов, каменные, в основном — из силикатов, и каменно-железные — смесь первых двух. Минералы

в этих темных камнях содержат изотопы, по пропорциям которых, как по космическим часам, можно судить, когда метеорит возник, — отслеживая радиоактивный распад. Сведя воедино полученные данные, можно установить последовательность, в которой возникали и складывались кирпичики Солнечной системы.

вдаль гравитационными взаимодействиями. Нептун, возможно, получился прямо внутри орбиты Урана, а затем выбрался за ее пределы. Вероятная причина — орбитальный танец, начавшийся между Юпитером и Сатурном через 500 миллионов лет после рождения Солнечной системы. Какое-то время период обращения у Юпитера был вдвое короче, чем у Сатурна, что вызвало резонансные колебания, которые отдавались во всей Солнечной системе. Нептун выпихнуло наружу, а мелкие ледяные тела разбросало в пояс Койпера.

**Поздняя бомбардировка** В период, когда внешние планеты меняли расположение, к внутренним планетам летело множество астероидов. Орбиты планет земной группы к тому времени в основном установились, основные столкновения остались в прошлом. В результате случился период «поздней тяжелой бомбардировки», во время которого на Луне появилось множество кратеров от ударов, повредило поверхности и других планет. Первые признаки жизни на Земле появились после «бомбардировки», 3,7 миллиарда лет назад.

**«Понадобилось меньше часа, чтобы создать атомы, несколько сотен миллионов лет, чтобы создать звезды и планеты, но пять миллиардов лет, чтобы создать человека!»**

**Джордж Гамов, «Сотворение Вселенной» (1952)**

**В сухом остатке:  
Космический бильярд**

# 48 Луны

**У всех планет Солнечной системы, кроме Меркурия и Венеры, есть одна или несколько лун. Многие поэты воспевали красоту нашей Луны, но представьте себе драматический накал, если бы в наших небесах было более пятидесяти спутников, как у Сатурна или Юпитера. Луны формируются одним из трех способов: на месте, вырастая из газового диска и каменных обломков вокруг планеты, захватом проходящего астероида или в результате откола от планеты в сильном столкновении с другим телом. Такое столкновение могло стать причиной появления нашей Луны.**

Гигантские внешние планеты столь обширны, что удерживают каменные обломки на своей орбите. У Юпитера, Урана и Нептуна тоже есть кольца, но у Сатурна они самые крупные. Над их природой ломали голову с XVII века, когда Галилей впервые увидел их в телескоп. Сатурн окружает тысячи колец, они простираются примерно на 300 000 км от поверхности планеты. Все они лежат в плоскости всего в километр толщиной и состоят из миллиардов маленьких кусочков льда, размером от кубика сахара до дома.

У Сатурна более 50 спутников, и каждый уникален. Титан, самый крупный из них, был открыт в 1655 году датским астрономом Кристианом Гюйгенсом. У Титана плотная атмосфера оранжевого оттенка, состоящая в основном из азота. Япет белый с одной стороны и темный — с другой, потому что, проходя сквозь кольца, он зарастает льдом в передней части. У Мимаса есть огромный кратер на боку от давнего столкновения, а Энцелад активен под корой — выбрасывает фонтаны

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

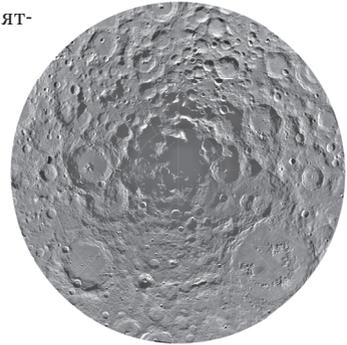
**1655**

Гюйгенс открывает Титан

**1969**Программа «Аполлон»  
высаживает людей на Луну

водяного пара из ледяного вулкана. Были обнаружены и десятки меньших лун, многие из них пробили дырки в системе колец и обросли ледяными осколками.

Планеты земной группы слишком малы и луны из колец обломков отрастить себе не могут — они себе спутники захватили. Луны Марса Деймос и Фобос считаются приобретенными астероидами. Луна у Земли появилась в более суровых обстоятельствах. Предполагают, что в юной Солнечной системе, когда многие крупные тела сталкивались друг с другом, пока формировались эмбрионы планет, проходящий астероид врезался в Землю. Луна — результат этого столкновения.



**Модель ударного формирования Луны** Хотя вопрос о рождении Луны вызывал интерес издавна, он получил новую волну внимания в 1970-х благодаря программе «Аполлон». Астронавты привезли с Луны камни и геологическую информацию, а также установили на ее поверхности детекторы, чтобы собирать сейсмические сигналы и отражать лазерный свет для определения точного расстояния от Земли до Луны. Они обнаружили, что Луна отдалается от Земли на 38 миллиметров в год и что у нее относительно небольшое, частично расплавленное ядро. Состав лунной коры схож с вулканическими породами Земли.

Долгое время ученые считали, что Луна сформировалась одновременно с Землей — из улетевшей капли расплавленной магмы. Но малые размеры ядра Луны — 20% радиуса спутника, по сравнению с 50% у Земли — указывают, что придется искать другое объяснение. Если бы Луна появилась одновременно с Землей, ее ядро было бы намного крупнее. В 1975 году Уильям Хартман и Доналд Дэвис разработали альтернативную гипотезу, которая предполагала, что Луна возникла от катастрофического столкновения с другим телом.

Тейя — тело размером примерно с Марс — предположительно столкнулась с Землей приблизительно через 50 миллионов лет после формирования Солнечной системы, около 4,5 миллиарда лет назад. Столкновение оказалось

**«Здесь люди с планеты Земля впервые ступили на Луну. Июль 1969 года новой эры. Мы пришли с миром от имени всего Человечества»**

**Табличка, оставленная на Луне (1969)**

**1975**

Разработана ударная модель формирования Луны

**1996**

Космический аппарат «Клементайн» обнаруживает воду на Луне

**2009**

Космические аппараты «Эл-СикРОСС» и «Чандраян» подтверждают наличие воды

## Приливный захват и синхронное вращение

Каждую ночь Луна обращена к нам одной и той же стороной, потому что период ее обращения вокруг Земли совпадает с периодом обращения нашего спутника вокруг своей оси (около 29 дней). Эта синхрония возникает из-за приливных эффектов. Тяготение Луны искажает жидкую поверхность Земли, вытягивая в океанах бугры в сторону спутника, даже на противоположной стороне планеты. Эти вздутия создают приливы, которые меняются с перемещением Луны вокруг Земли. Но они также удерживают на месте Луну: если планета и Луна начнут крутиться с разной скоростью, гравитационный эффект вздутий вернет Луне прежний ритм.

таким мощным, что чуть не разбило зарождающуюся Землю, а высвободившееся тепло расплавilo верхние слои обоих тел. Тяжелое железное ядро Тейи выпало и соединилось с ядром Земли, а более легкая мантия и кора Земли расплескались в космос. Это вещество затем срослось вместе и образовало Луну.

Ударная модель объясняет, почему Луна так велика относительно Земли и тем не менее обладает крошечным железным ядром. На Луне мало тяжелого железа, поэтому ее средняя плотность ( $3,3 \text{ г/см}^3$ ) меньше, чем у Земли ( $5,5 \text{ г/см}^3$ ). В каменных породах Луны точно такое же содержание различных изотопов кислорода (более тяжелые, радиоактивные версии кислорода), как на Земле, а значит, они формировались в одних и тех же условиях. Марсианские камни и метеориты формировались в других частях Солнечной системы, и у них совсем другой состав. Компьютерные симуляции механики гигантского столкновения подтверждают, что наиболее вероятный сценарий именно таков.

Другие свидетельства указывают на то, что поверхность Луны когда-то была расплавленной — океаном магмы. Легкие минералы всплывали на поверхность Луны, что и предполагаемо, если они кристаллизуются в жидкой фазе. Поверхность медленно остывала, и, возможно, ей понадобилось 100 миллионов лет, чтобы затвердеть; об этом говорят количества радиоактивных изотопов, по периодам распада которых можно судить о возрасте минералов. Есть, впрочем, и некоторые несоответствия — на Луне другие пропорции летучих элементов и сравнительно меньше, чем на Земле, железа. Также нет следов самой Тейи, от которой могли бы остаться необычные изотопы или чужеродные каменные осколки. Прямых улик, словом, не обнаружено.

**Дифференциация** Пока Луна остывала, минералы из океана магмы кристаллизовались и оседали в глубинах в соответствии со своим весом. Тело дифференцировалось на легкую кору, срединную мантию и тяжелое ядро.

**Откинувшись на ложе, глядя вдаль,  
 На свет луны иль благосклонных звезд,  
 Я видел вход в капеллу, где стояла  
 Ньютона статуя, в молчаньи глядя в призму,  
 Знак мраморный ума, что вечно странствует  
 Один, в морях далеких Мысли ?**

**Уильям Вордсворт, «Прелюдия», строфа 50 (1798–1850)**

Кора, всего 50 км толщиной, богата легкими минералами, в том числе плагиоклазом — полевым шпатом, встречающимся в граните. Он состоит примерно на 45% из кислорода и на 20% — из кремния, остальное — металлы, включая железо, алюминий, магний и кальций. Ядро невелико, не более 350 км в диаметре. Скорее всего, оно частично расплавлено и богато железом и другими металлами. Посередине — мантия, подверженная лунотрясениям из-за приливных сил. Хотя считается, что сейчас она твердая, когда-то в жизни Луны она была жидкой и еще миллиард лет назад генерировала вулканические процессы. Поверхность Луны испещрена кратерами от столкновений, от которых по всей поверхности разлетались камни и пыль; их слой называется «реголит».

**Вода** Поверхность Луны суха, но случайные столкновения с кометами или ледяными телами могли принести на нее воду. Есть ли на Луне вода — знание, важное и для исследования Луны, и для изучения переноса материи в Солнечной системе. Вода быстро испарилась бы под прямым солнечным светом, но некоторые части Луны постоянно находятся в тени, особенно на стенках кратеров вблизи полюсов. Физики подозревают, что в этих темных углах водяной лед мог сохраниться.

Многочисленные спутники с переменным успехом прочесывали поверхность Луны с орбиты. Спутники «Клементин» и «Лунар проспектор» (букв. «Лунный изыскатель») в конце 1990-х сигнализировали об обнаружении водяного льда на полюсах, хотя радионаблюдения с Земли не смогли подтвердить эту находку. Недавние миссии, в том числе аппарат НАСА «Эл-СиКРОСС» (*Lunar Crater Observation and Sensing Satellite* — спутник наблюдения и зондирования лунных кратеров), который выстрелил снарядом в поверхность Луны, и инструменты на борту анализировали свет получившегося выброса, а также индийская миссия «Чандраян», заявляют, что вода была обнаружена в тени кратеров. Значит, будущие астронавты, вероятно, смогут утолить жажду и на иссушенной поверхности Луны.

**В сухом остатке:  
 Один маленький шаг**

# 49 Астробиология

**Жизнь процветает на Земле. Исторически мы долгое время верили, что жизнь существует за пределами нашей планеты: марсианские каналы, сообщения о летающих существах на Луне и т. п. Но чем больше мы исследуем Солнечную систему, тем более пустынным кажется наше окружение. Хоть жизнь и живуча, для зарождения ей нужны определенные условия. Астробиология пытается ответить на вопрос, как и где зарождается жизнь в космосе.**

Жизнь появилась на Земле вскоре после того, как планета сформировалась — 4,5 миллиарда лет назад. Ископаемые строматолиты — куполообразные органические маты — показывают, что цианобактерии существовали 3,5 миллиарда лет назад. Происходил и фотосинтез — химический процесс, в котором вещества преобразуются в энергию под воздействием солнечного света. Самым старым камням, обнаруженным в Гренландии, 3,85 миллиарда лет. Так удалось определить довольно узкое окно, в котором зародилась жизнь.

Теории об источнике жизни так же стары и разнообразны, как биологические виды. Микроорганизмы вроде бактерий и простейших были впервые обнаружены в XVIII веке, после изобретения микроскопа. Видимая простота бактерий привела ученых к предположению, что эти комочки жизни стихийно выросли из неодушевленной материи. Но затем выяснилось, что они размножаются, то есть жизнь самопорождается. В 1861 году Луи Пастер безуспешно пытался создать бактерии из стерильного бульона, богатого питательными веществами. Сотворение первичного организма осталось загадкой.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1861

Луи Пастеру не удается создать жизнь из питательного бульона

1871

Чарлз Дарвин размышляет о «теплом прудике»

**«Что наука до сих пор не проливает свет на величайшую загадку сущности или зарождения человеческой жизни — негодное возражение. Можно ли объяснить гравитацию?»**

**Однако никто не возражает против изучения последствий этого неведомого элемента притяжения...»**

**Чарлз Дарвин, «Происхождение видов путем естественного отбора, или Сохранение благоприятных рас в борьбе за жизнь» (1859)**

Чарлз Дарвин обратился к вопросу зарождения жизни в письме к ботанику Джозефу Гукеру в 1871 году: все могло начаться в «теплом прудике, со всевозможными солями аммония и фосфора, светом, теплом, электричеством и т. п., чтобы белковое соединение химически сложилось готовым к еще более сложным переменам».

**Первичный бульон** Объяснение Дарвина близко к тому, во что ныне верят ученые, — с одним важным дополнением. На молодой Земле не было растений и биологических источников кислорода, поэтому и в атмосфере, в отличие от нынешних времен, кислорода не было. Она содержала метан, аммиак, воду и другие газы, способствовавшие определенным типам химических реакций. В 1924 году Александр Опарин предположил, что в таких условиях мог сформироваться «первичный бульон из молекул». Те же самые процессы не смогли бы произойти сегодня, в богатой кислородом атмосфере.

Условия на молодой Земле были адские, это отражено и в геологическом названии той эры — Гадей. Океаны, появившиеся через 200 миллионов лет после формирования Земли, вначале кипели и имели высокую кислотность. Позднее разразилась тяжелая бомбардировка: на поверхность планеты часто падали астероиды. Из-за бушевавшей непогоды — с электрическими бурями и проливными дождями — это место оставалось негостеприимным. Но именно эти условия могли привести к возникновению жизни. Мириады организмов, живущих вокруг глубоководных жерл на дне океана, показывают, что темнота и кипящая вода — не помеха жизни, если там достаточно питательных веществ. Но тем не менее из сложных молекул должны были как-то развиваться живые организмы.

Враждебные условия ранней Земли могли сгодиться для возникновения органических молекул. Лабораторные эксперименты Стэнли Л. Миллера и Гарольда К. Юри в 1953 году показали, что небольшие молекулы, нужные

**1950**

Фред Хойл продвигает панспермию

**1953**

Эксперимент Миллера-Юри

**2005**

Зонд «Гюйгенс» приземляется на Титан

**2020**

Запуск миссии «Европа»

## Зонд «Гюйгенс»

Космический зонд «Гюйгенс» приземлился на поверхность Титана 14 января 2005 года после семилетнего путешествия. Защищенный внешней оболочкой в несколько метров толщиной, он был оборудован измерительными приборами для ветров, атмосферного давления, температуры

и состава поверхности и задействовал их, снижаясь сквозь атмосферу к ледяной равнине. Титан — странный мир, чья атмосфера и поверхность пропитана жидким метаном. «Гюйгенс» — первый космический зонд, севший на небесное тело периферии Солнечной системы.

для жизни, — аминокислоты, например, — могут получиться из смеси газов метана, аммиака и водорода под воздействием электрического разряда. С тех пор ученые продвинулись недалеко.

Архитектурный шаг построения первых клеток из молекул остается загадкой: линзообразные структуры, которые могли сформироваться из жиров, — вероятный исходный материал. Мы до сих пор далеки от понимания процессов деления клеток и создания химического двигателя — метаболизма. Убедительную протоклетку с нуля создать пока никому не удалось.

**Панспермия** Альтернативное предположение: сложные молекулы и, возможно, простые биологические организмы возникли из космоса. Примерно во времена эксперимента Миллера–Юри астроном Фред Хойл проталкивал идею панспермии — он предполагал, что жизнь на Землю принесли метеориты и кометы. Хотя это может показаться притянутым за уши, но в космосе полно молекул, в том числе и сложных. Аминокислота глицин в 2009 году была обнаружена в веществе с кометы 81P/Вильда, пробу которого привез на Землю зонд НАСА «Старбёрст».

Чтобы узнать больше об условиях, в которых, возможно, существовали первые формы жизни, и о том, как могли распространиться молекулы, астробиологи исследуют ключевые точки Солнечной системы. Марс — главная цель. Хотя его поверхность на сегодняшний день суха, считается, что в прошлом она могла быть влажной. Замерзшая вода скрывается на его полюсах, а изображения с марсоходов свидетельствуют, что жидкая вода текла по его поверхности, возможно небольшими потоками — вероятно, из-за колебаний горизонта грунтовых вод. В атмосфере красной планеты был обнаружен метан — геологического или, возможно, биологического происхождения.

**Огромный возраст Земли покажется человеку еще огромнее, когда он поймет, как возникли живые организмы и в чем причины постепенного развития и улучшения их устройства**

**Жан-Батист Ламарк, «Гидрогеология» (1802)**

**Астробиологический туризм** Крупнейшая луна Сатурна, Титан — еще одно место возможного зарождения жизни, он в чем-то похож на молодую Землю. Хотя и расположен в ледяной внешней Солнечной системе, Титан окутан плотной азотной атмосферой, содержащей множество органических молекул, в том числе и метан. В 2005 году его посетил зонд, сброшенный с космического аппарата НАСА «Кассини», который исследует Сатурн. Капсула, носящая имя Гюйгенса — датского физика XVII века, открывшего эту луну, — спустилась сквозь облака атмосферы Титана на его поверхность, состоящую из замерзшего метана. На Титане есть континенты, песчаные дюны, озера и, возможно, реки из твердого и жидкого метана и этана вместо воды. Некоторые считают, что там могут существовать примитивные формы жизни — бактерии, питающиеся метаном.

Другая луна Сатурна, Энцелад — популярный объект изучения в астробиологии. «Кассини», пролетая мимо этой покрытой льдом луны, заметил обширный фонтан водяного пара из трещин вокруг южного полюса. Теплое пятно внизу выпускает струи через жерла, открывающиеся, когда луна деформируется под действием приливных сил со стороны Сатурна. Возможно, жизнь могла бы существовать под поверхностью — там, где есть жидкая вода.

Самое вероятное направление для следующей астробиологической миссии — луна Юпитера Европа, под замерзшей поверхностью которой скрывается океан жидкой воды. Как и у Энцелада, ее поверхность гладка, а значит, еще недавно она была расплавленной. Европу покрывают тонкие трещины, указывающие, что она тоже набирает тепло от приливных изменений. Жизнь может укрываться в этом океане, напоминая условия в глубоких морях и погребенных в толще Земли ледяных озерах в Антарктике. Астробиологи планируют отправить космическую миссию на Европу в 2020 году, пробурить там лед и искать признаки жизни.

**В сухом остатке:  
Следуй за водой**

# 50 Парадокс Ферми

**Обнаружение жизни где-то еще во Вселенной стало бы величайшим открытием в истории. Профессор физики Энрико Ферми задумался о том, почему во Вселенной таких огромных размеров и возраста, с миллиардами звезд и планет, которые существовали миллиарды лет, с нами до сих пор не связалась никакая инопланетная цивилизация. В этом заключается его парадокс.**

Болтая с коллегами за обедом в 1950 году, Ферми, говорят, спросил: «Где они?» В нашей Галактике миллиарды звезд, а во Вселенной — миллиарды галактик, итого — триллионы звезд. Если хотя бы у малой доли из них есть планеты, то это очень много планет. А если хотя бы на малой доле этих планет есть жизнь, то должны существовать миллионы цивилизаций. Тогда почему мы их не видели? Почему они с нами не связались?

**Уравнение Дрейка** В 1961 году Фрэнк Дрейк записал уравнение вероятности существования цивилизации на другой планете Млечного Пути, с которой мы могли бы связаться. Это уравнение носит имя Дрейка. Оно говорит нам о вероятности того, что одновременно с нами существует и другая цивилизация, но эта вероятность неопределенна. Карл Саган однажды предположил, что целый миллион внеземных цивилизаций может населять Млечный Путь, но в дальнейшем пересмотрел эти расчеты, а другие оценили эту цифру как 1, то есть человеческая цивилизация — и всё.

Прошло более полувека после того, как Ферми задал свой вопрос, а мы до сих пор не получили никаких сообщений. Несмотря на совершенства наших коммуникационных устройств, никто не позвонил. Чем больше мы исследуем окрестности, тем более пустынными они

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

### 1950

Ферми задается вопросом об отсутствии контакта с инопланетянами

### 1961

Дрейк выводит уравнение, названное в его честь

выглядят. Никаких признаков жизни, даже простейших бактерий, не было обнаружено ни на Луне, ни на Марсе, ни на астероидах или планетах и лунах внешней Солнечной системы. Нет признаков помех в свете звезд, которые могли бы указывать на гигантские орбитальные машины, собирающие со звезд энергию. И это не из-за того, что мы плохо смотрели. Ставки высоки, и поиску внеземного разума уделяется огромное внимание.

**Поиск жизни** Как бы вы организовали поиски признаков жизни? Для начала можно поискать микробы в Солнечной системе. Ученые досконально изучили камни с Луны, но это неодушевленный базальт. Предполагалось, что метеориты с Марса могут содержать следы бактерий, но до сих пор не доказано, что яйцеобразные пузыри в этих камнях содержали внеземную жизнь, а не были загрязнены после падения на Землю — или не результат естественных геологических процессов. Космические аппараты и зонды, снабженные приборами для съемки, облазили поверхность Марса, астероидов, а теперь и луны во внешней Солнечной системе — Титана, вращающегося вокруг Сатурна. Но поверхность Марса суха, а поверхность Титана пропитана жидким метаном, по сегодняшним данным — лишенным жизни. Луна Юпитера Европа может скрывать моря жидкой воды под замерзшей поверхностью. Возможно, жидкая вода — не такая уж роскошь во внешней части Солнечной системы, и это подкрепляет ожидания, что когда-нибудь жизнь будет обнаружена.

Но микробы не выходят на связь. Как насчет более сложных животных или растений? Сегодня, когда отдельные планеты обнаруживаются вокруг далеких звезд, астрономы планируют искать в их спектрах следы химических соединений, которые могли бы поддерживать жизнь или указывать на ее наличие. Может, удастся обнаружить спектральные следы озона или хлорофилла, но потребуются точные наблюдения, которые станут возможными

**«Разумные существа других систем, изучая Солнечную систему с полной беспристрастностью, сделали бы, по всей вероятности, такую запись о Солнце: «Звезда X, спектральный класс G2, четыре планеты плюс обломки» \* »**

**Айзек Азимов, из сборника «Вид с высоты», очерк «Клянись Юпитером!» (1963)**

\* Пер.  
Д. Жукова.

**1996**

Антарктические метеориты намекают  
на существование примитивной жизни на Марсе

с новым поколением космических миссий, например *Terrestrial Planet Finder* («Искатель земных планет») НАСА. Может быть, когда-нибудь отыщут сестру Земли, но даже если так — будет ли она населена людьми, рыбами или динозаврами или на ней окажутся лишь пустые, безжизненные континенты и моря?

**Контакт** Жизнь на других планетах, даже похожих на Землю, возможно, развивалась иначе, чем на Земле. Не факт, что инопланетяне смогли бы связаться с нами. С тех пор как работают радио и телевидение, их сигналы распространялись с Земли, улетающая прочь со скоростью света. А значит, какой-нибудь поклонник телевидения с Альфы Центавра (четыре световых года от нас) смотрел бы земные каналы четырехлетней давности и, может быть, наслаждался повторением фильма «Контакт». Черно-белые фильмы дошли бы до Арктура, а слава Чарли Чаплина гремела на Альдебаране.

Земля испускает множество сигналов, дело лишь за антенной, чтобы их принять. Разве не стали бы другие продвинутые цивилизации стремиться к тому же? Радиоастрономы обшаривают ближайшие звезды в поисках признаков неестественных сигналов. Радиоспектр обширен, и потому приходится сосредоточивать внимание на частотах, близких к ключевым частотам естественных энергетических переходов — например, водорода, — универсальных для всей Вселенной. Ученые пытаются отыскать устойчивые, структурированные передачи, исходящие не от известных астрономических объектов.

## Уравнение Дрейка

$$N = N^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times f_L$$

где:

$N$  — количество цивилизаций в галактике Млечный Путь с уловимыми электромагнитными сигналами;  
 $N^*$  — количество звезд в галактике;  
 $f_p$  — доля звезд с планетными системами;  
 $n_e$  — количество планет из расчета на Солнечную систему, где среда пригодна для жизни;

$f_l$  — доля пригодных для жизни планет, на которых действительно возникает жизнь;  
 $f_i$  — доля планет с возникшей жизнью, где эта жизнь разумна;  
 $f_c$  — доля цивилизаций, у которых есть технологические возможности отправлять уловимые сигналы существования;  
 $f_L$  — доля времени жизни планеты, в которую эти цивилизации будут издавать уловимые сигналы в пространство (для Земли эта доля пока что очень мала).

**«Наше Солнце — одна из 100 миллиардов звезд в нашей Галактике. Наша Галактика — одна из миллиардов галактик, населяющих Вселенную. Было бы верхом самонадеянности считать, что мы единственные живые существа в этой бесконечности»**

**Вернер фон Браун, из обращения к собранию издательской группы «Нью-Йорк таймс», 29 апреля 1960 г.**

В 1967 году английская аспирантка Кембриджа Джослин Белл перепугалась, обнаружив регулярные пульсации радиоволн, исходящие от звезды. Некоторые решили, что это радиограмма от инопланетян, но оказалось, что нашелся новый вид крутящихся нейтронных звезд, которые назвали пульсарами. Поскольку процесс изучения тысяч звезд все еще дело небыстрое, в США была запущена специальная программа СЕТИ — *Search for Extra-Terrestrial Intelligence* («Поиск внеземного разума», *SETI*). Несмотря на годы анализа данных, программа до сих пор не обнаружила никаких странных сигналов. Другие радиотелескопы периодически берутся за поиски, но и они до сих пор ничего с необычным происхождением не обнаружили.

**Закрыто на обед** Мы в силах придумать множество способов коммуникации и поиска признаков жизни — так почему же другие цивилизации не отвечают на наш зов или не посылают свой? Почему парадокс Ферми до сих пор не разрешен? Ответов есть немало. Например: жизнь в развитом состоянии, когда возможна коммуникация, существует лишь кратковременно. Почему? Да потому что разумная жизнь всегда быстро самоуничтожается. Быть может, она недолговечна, и тогда вероятность коммуникации и соседства с кем-то еще действительно невелика. Есть и более параноидальные сценарии. А вдруг инопланетяне просто не хотят связываться с нами и мы в намеренной изоляции? Или они настолько заняты, что у них до нас руки не доходят?

**В сухом остатке:  
Есть там кто-нибудь?**

## Словарь терминов

**Абсолютный ноль** Температура  $-273^{\circ}\text{C}$ , самая низкая достижимая температура.

**Активная галактика** Галактика, в центре которой происходят высокоэнергетические процессы, вызванные сверхмассивной черной дырой.

**Атом** Мельчайшая составная часть материи, способная существовать независимо.

**Барионы** Частицы, состоящие из электронов, протонов и нейтронов.

**Вакуум** Пустое пространство, не содержащее атомов. Космос не полностью пуст.

**Возраст Вселенной** Около 14 миллиардов лет, рассчитан через скорость расширения.

**Вселенная** Совокупность всего пространства и времени, включающая в себя все.

**Газ** Облако не связанных друг с другом атомов или молекул.

**Галактика** Выделяющаяся группировка миллионов звезд — например, наш Млечный Путь.

**Гравитационное линзирование** Преломление лучей света, проходящих мимо массивного объекта.

**Давление** Сила на единицу площади.

**Деление** Расщепление тяжелых ядер на более легкие.

**Дифракция** Отклонение волн, проходящих острую грань или щель.

**Длина волны** Расстояние между пиками волны.

**Звезда** Газовый шар, в ядре которого происходит ядерный синтез.

**Излучение черного тела** Световое излучение, испускаемое черным объектом при определенной температуре.

**Изотоп** Разновидность атомов элемента с дополнительными нейтронами, увеличивающими его ядерную массу.

**Изотропия** Равномерное распределение чего-либо.

**Импульс** Произведение массы и скорости, выражающее, насколько трудно будет остановить что-либо, когда оно в движении.

**Инерция** См. Масса.

**Интерференция** Совмещение волн разных фаз, которые могут усилить или нейтрализовать друг друга.

**Инфляция** Быстрое расширение Вселенной в первые доли секунды.

**Квантовая механика** Законы субатомного мира, многие из которых кажутся парадоксальными, но подчиняются математическим правилам.

**Квантовое давление** Фундаментальный предел, установленный правилами квантовой механики, который не дает некоторым типам частиц существовать вблизи в одинаковых состояниях.

**Кварк** Элементарная частица; соединением трех кварков получают протоны и нейтроны.

**Корпускулярно-волновой дуализм** Тип поведения, характерный для света; он иногда волна, а иногда частица.

**Красное смещение** Падение частоты удаляющегося объекта в силу расширения Вселенной.

**Легкие элементы** Первые несколько элементов, сформировавшихся в большом взрыве, — водород, гелий, литий.

**Линия поглощения** Разрыв спектра на определенной частоте света.

**Масса** Приписывается количеству атомов или энергетическому эквиваленту чего-либо.

**Микроволновой фон космоса** Бледное микроволновое сияние, исходящее отовсюду в небе со времен Большого взрыва.

**Молекула** Группа атомов, соединенных химическими связями.

**Мультиверс (мультиверселенная)** Система нескольких параллельных, но отдельных вселенных.

**Нейтронная звезда** Сжавшаяся шелуха выгоревшей звезды, поддерживаемая квантовым давлением.

**Орбита** Кольцеобразная, часто — эллиптическая траектория тела.

**Планета** Самотяготеющее тело, вращающееся по орбите, слишком малых размеров, чтобы в нем начался ядерный синтез.

**Поле** Магнитное, электрическое, тяготения — способ передачи силы на расстоянии.

**Постоянная Хаббла** Скорость расширения Вселенной.

**Преломление** Отклонение волн в связи с замедлением в более плотной среде.

**Пространство-время**

Геометрическое пространство в соединении со временем как единое понятие в общей теории относительности.

**Пульсар** Вращающаяся намагниченная нейтронная звезда, посылающая радиопульсы.

**Пыль в космосе** Копоть и частицы, поглощающие свет и делающие его краснее.

**Сверхмассивная черная дыра** Черная дыра с массой, эквивалентной миллионам звезд.

**Сверхновая** Взрыв умирающей звезды после остановки ядерного синтеза.

**Сила** Подъем, толчок или притяжение, влияющее на движение чего-либо.

**Созвездие** Искусственно выделяемая комбинация звезд на небе.

**Спектр** Последовательность электромагнитных волн, от радиоволн до гамма-лучей.

**Стандартная модель** Принятая теория семейств элементарных частиц.

**Темная материя** Невидимый материал, проявляющий себя только тяготением.

**Темная энергия** Форма энергии в пустом пространстве, которая заставляет пространство-время расширяться.

**Температура в Кельвинах** Измеряется относительно абсолютного нуля ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

**Туманность** Размытое облако газа или звезд, раннее название галактик.

**Тяготение** Фундаментальная сила притяжения объектов друг к другу.

**Ускорение** Изменение скорости за определенное время.

**Фаза** Относительное смещение между пиками двух волн.

**Фотон** Свет, проявляющийся как частица или порция энергии.

**Цефеиды** Переменные звезды, чей период однозначно связан с их яркостью.

**Частота** Период, с которым пики волн проходят некую точку.

**Черная дыра** Зона экстремального тяготения, откуда не может вырваться даже свет.

**Экзопланета** Планета, вращающаяся вокруг звезды, отличной от Солнца.

**Электромагнитная волна** Переносит энергию сквозь электрические и магнитные поля.

**Эмиссионная линия** Увеличение яркости определенной частоты света в спектре.

**Энергия** Мера потенциала изменения путем обмена.

**Ядерный синтез** Слияние легких ядер атомов в более тяжелые.

**Ядро** Твердая сердцевина атома, состоящая из протонов и нейтронов.

# Предметный указатель

- C**  
*COBE* («Эксплорер 66») см. Исследователь космического фона
- H**  
*Hubble Deep Field* 119
- M**  
*MACHO*, см. массивные объекты гало галактик
- W**  
 W-бозоны 102, 104
- X**  
 X-бозоны 71
- Z**  
 Z-бозоны 102, 105
- A**  
 А.Е. см. астрономические единицы  
 абсолютный ноль 160  
 адаптивная оптика 27  
 аккреционный диск 133  
 активные галактические ядра (АГЯ) 134  
 Альфа Центавра 45  
 альфа-частицы 100  
 Альфер, Ральф 57, 65  
 Андерсон, Карл 68  
 Андромеды туманность 40, 49, 121  
 антиматерия 68–71  
 антипротон 69  
 античастицы 68–69, 103  
 антропный принцип 112–115  
 Аристарх Самосский 8  
 астробиология 196–199  
 астрономические единицы (А. Е.) 43  
 астрономия гамма-лучей 174  
 астрономия изменений во времени 179  
 астрофизика частиц 100–103  
 атомы 100
- B**  
 БАК см. Большой адронный коллайдер  
 Балмера серия 154  
 барионы 74, 102  
 Барроу, Джон 113  
 Белл, Джослин 168, 203  
 белые карлики 166  
 Бете, Ханс 67, 158  
 Бетельгейзе 155  
 бозоны 71, 102, 104  
 большое охлаждение 59  
 большое сжатие 59, 83  
 Большой адронный коллайдер (БАК) 104  
 Большой взрыв 47, 56–59, 64–67  
 Браге, Тихо 13, 165  
 де Бройль, Луи-Виктор 22  
 Бэкер, Дон 171
- B**  
 Великая стена (галактик) 125  
 величины 154  
 Венера 189
- вес 85  
 видимый свет 20–21  
 ВНИИП, см. массивные частицы слабого взаимодействия  
 внеземная коммуникация 168  
 вода 190, 195  
 водород 64, 66  
 линии поглощения 28–29, 153  
 Большой взрыв 62  
 ядерный синтез 157  
 эволюция галактик 144, 145, 146  
 квазары 126  
 реионизация 145  
 звездная классификация 153  
 войды 124  
 волны тяготения 95  
 Вольфа–Райсе звезды 155  
 Вселенная  
 ускорение 80–82  
 расширение 51, 57, 78–79  
 плоскость 78  
 геометрия 78  
 рывок роста 78–79  
 однородность 77  
 гладкость 78  
 температура 58, 60, 61, 63, 65
- G**  
 газовые планеты 190  
 галактики 41, 55, 116–120, 125–126  
 Галактический центр 141  
 Галилео Галилей 10, 11, 85  
 гамма-всплески 172–175  
 Гамов, Джордж 57, 65  
 гарвардские вычислительницы 153  
 гармоники 110  
 гелиевые вспышки 164  
 гелий 64, 165  
 гелиопауза 182  
 гелиоцентризм 8–11  
 Герцшпрунга–Рассела диаграмма 156  
 Гершель, Уильям 4, 6, 37, 120  
 «Гершель», космическая обсерватория 162  
 глюоны 102  
 голубые смещения 35  
 горизонт событий 96  
 горячие точки 63  
 горячие Юпитеры 186  
 гравитационное линзирование 94, 123, 148–151  
 гравитационные волны 170  
 гравитация (тяготение) 16, 17–18, 73, 84, 85–86, 161  
 Гук, Роберт 17, 38, 39  
 Гут, Алан 77  
 «Гюйгенс», зонд 138  
 Гюйгенс, Кристиан 38, 192
- D**  
 Дарвин, Чарлз 196  
 движение 87, 90
- двойные звезды 161, 163  
 Девы скопление 122  
 дейтерий 57, 66  
 деление 101  
 Джаккони, Риккардо 137  
 Диггс, Томас 38  
 Дике, Роберт 113  
 диоксид титана 154  
 диполь 61  
 Дирак, Поль 68, 70  
 дифракционные решетки 29, 30  
 дифракция 27  
 длина волны 21  
 Доплер, Кристиан 34  
 Доплера эффект 31, 32–35, 49, 184  
 Дракона гамма 38  
 Дрейер, Югганн 120  
 Дрейка уравнение 200–201, 202  
 Дэвис, Дональд 193
- E**  
 Европа 199
- З**  
 застывшие звезды 97–98  
 звездная абберация 39  
 звездная классификация 152–155  
 звездная пыль 158  
 звездотрясения 171  
 звезды 7, 118  
 звуковые волны 32  
 Земля 189
- I**  
 иерархическая модель 147  
 излучение 159  
 изотопы 101  
 инерционные системы 91  
 инерция 87  
 интерференция 30  
 инфляция 78–79  
 инфракрасный 22  
 ионизация 31  
 Исследователь космического фона (*COBE*) 61
- K**  
 Калупа, Теодор 108  
 Кант, Иммануил 37  
 карликовые планеты 7  
 Картер, Брэндон 113  
 Квадратная километровая решетка (*SKA*) 146, 171  
 квазары 98, 126, 132–135, 149, 177  
 квазизвездные объекты (*K3O*) см. квазары  
 квантовая теория 62, 95  
 кванты 23, 62  
 кварки 101–102  
 квинтэссенция 82  
 Кеплер, Югганн 11, 12–15, 18, 44  
 Кёртис, Хебер 41, 42, 49  
*K3O* см. квазизвездные объекты  
 кометы 189  
 конвекция 159
- Коперник, Николай 9, 10  
 копыт 46, 53  
 корона 181, 183  
 корпускулы 21  
 корпускулярно-волновой дуализм 23  
 космическая инфляция 76–79  
 космическая паутина 124  
 космическая погода 182  
 космическая пыль 53  
 космические лучи 103  
 космические струны 106  
 космический микроволновой фон 57–58, 60–63, 82  
 космический шум 130  
 космическое рентгеновское излучение 137  
 космологическая постоянная 80–83  
 космологическое красное смещение 34  
 красные смещения 35, 121  
 линии поглощения 31  
 эффект Доплера 34  
 расширяющаяся Вселенная 46, 50, 54, 57  
 эволюция галактик 144  
 закон Хаббла 49  
 кротовые норы 97
- L**  
 Лаймана серия 154  
 Лайман-альфа облака 126  
 Лаплас, Пьер-Симон 96  
 Лебедь А 130  
 легкие элементы 62, 66  
 лептоны 102  
 линзы 24  
 линии поглощения 28–29, 31  
 Липперсет, Ханс 24  
 литий 64  
 луны 137, 190, 192–195
- M**  
 Магеллановы Облака 121  
 Майкельсон, Альберт 89  
 Марс 13, 189  
 масса 16, 69, 72, 85, 104  
 массивные объекты гало галактик (*MACHO*) 74, 75, 151  
 массивные частицы слабого взаимодействия (ВНИИП) 43  
 Мах, Эрнст 86  
 Маха принцип 84–87  
 межзвездный переносчик 122  
 мезоны 102  
 Меркурий 189  
 мерцание 27  
 Местная группа 121  
 Мессье, Шарль 120, 122  
 метеориты 191  
 Микроволновой аннотропный зонд Уилкинсона (*WMAP*) 61  
 микроволны 22, 57–58, 60–63, 78  
 микролинзирование 151  
 Миллер, Стэнли 197

- миллисекундные пульсары 171  
 Мичелл, Джон 96  
 Млечный Путь 36, 40–43, 49, 121  
 многомерное пространство 58  
 монополи 106  
 Морли, Эдвард 89  
 М-теория 58, 110, 115  
 мультивселенные (мультивселенные) 114  
 муоны 102
- Н**  
 нарушение симметрии 107  
 научный метод 14, 109  
 небулярная гипотеза 188  
 нейтрино 71, 75, 101, 103, 183  
 нейтронная звезда 166  
 нейтроны 101  
 неон 29  
 Нептун 19, 190  
 Нобелевская премия 169  
 Ньютон, Исаак 16–19, 20–23, 37, 85–86
- О**  
 Обзор красных смещений 124  
 обитаемая зона 187  
 обработка информации 113  
 обратных квадратов закон 17–18  
 обобщенная теория относительности 77, 92–95  
 объединенная схема 135  
 Ольберс, Генрих 45  
 Ольберса парадокс 44–47  
 оптическое остаточное свечение 173  
 орбиты 14  
 островные вселенные 43  
 относительность см. обобщенная теория относительности, специальная теория относительности 19, 170  
 отрицательная энергия 68
- П**  
 панспермия 198  
 парадокс близнецов 90  
 параллакс 36–39, 52  
 параллельные вселенные 114  
 парсек 38, 48  
 Пензиас, Арно 58, 60  
 первичный бульон 197  
 переменные звезды 176–177  
 планета X 4  
 планетарная туманность 165  
 планеты 4–7, 33  
 планеты вне Солнечной системы 33  
 Планк, Макс 91  
 Плеяды 40  
 плотность потока 128  
 Плутон 5  
 поздняя бомбардировка 191  
 позитроны 68  
 Поиск внеземного разума 203  
 показатель преломления 25  
 полигоны 12  
 Полярная звезда 38, 178
- Поплер, Карл 109  
 пояс астероидов 190  
 преломление 25  
 призмы 20  
 приливы 194  
 проблема горизонта 77  
 Проксима Центавра 39  
 пространство-время 58, 73, 77, 90, 93–94  
 протозвезды 160–162  
 протоны 71, 100  
 Птолемей 8  
 пузыри-вселенные 114  
 пульсары 168–171
- Р**  
 радиоастрономия 128–131  
 радиоволны 22  
 радиогалактики 130–131  
 радиоинтерферометрия 129  
 радиотелескопы 129  
 разрыв Лаймана галактики 146  
 Райл, Мартин 130, 131  
 расширение времени 91  
 Ребер, Гротте 129  
 Резерфорд, Эрнест 100  
 реионизация 145  
 Рентген, Уильям 139  
 рентгеновские лучи 122, 136–139  
 ретроградное движение 9, 13  
 рефлекторные телескопы 26–27  
 рождение звезд 160–163  
 рысь 62
- С**  
 Сатурн 190  
 Сведенборг, Эмануэль 188  
 сверхмассивные черные дыры 140–143  
 сверхновые 54, 80–82, 166–167  
 свет 21–22, 91  
 световые волны 20  
 световые годы 42  
 СЕТИ (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) см. Поиск внеземного разума  
 силы 16, 109  
 Сириус 38  
 скопления галактик 120–123  
 скорость 90  
 скорость света 88–89  
 скорость убегания 96  
 Слайфер, Весто 35  
 слияние 101, 157, 181  
 слияние ядер 66  
 Слоуновский цифровой обзор неба 125  
 смерти звезд 164–167  
 созвездия 36  
 солнечные пятна 182  
 солнечный спектр 29  
 солнечный цикл 182  
 Солнце 28–29, 41, 180–183  
 спектр 21  
 спектр черного тела 61, 62, 152  
 спектральные линии 31
- спектроскопия 29  
 специальная теория относительности 88–91  
 спиральная туманность 42  
 спиральные галактики 116–117  
 стандартные свечи 53  
 статистические методы 55  
 Стрелец 128
- Т**  
 тау-частицы 102  
 Тейлор, Джо 170  
 Тейя 193  
 текстуры 106  
 телескопы 24–27  
 темная материя 72–75, 119  
 темная энергия 55, 59, 80–83, 168  
 темные века 145  
 темные небеса 46  
 температура 58, 60, 61, 63, 65, 133, 152, 156  
 теория струн 58, 108–111  
 тепло 159  
 Тиллер, Фрэнк 113  
 Титан 192, 198–199  
 Томбо, Клайд 5  
 тонко настроенная Вселенная 59, 83  
 тошнотомета 92  
 тритий 64  
 туманности 40, 49  
 тяжелые элементы 154
- У**  
 угловые секунды 37  
 ударная модель формирования Луны 193  
 Уиллер, Джон 98  
 Уилсон, Роберт 58, 60  
 ультрафиолетовый свет 121, 145–146  
 универсальный закон 18  
 Уран 4, 190  
 ускорение 16, 19, 91, 92  
 ускорители частиц 69, 102  
 условия нулевого тяготения 92  
 устойчивая Вселенная 57, 80, 131
- Ф**  
 фальсификация 109  
 Ферми парадокс 200–203  
 формирование Солнечной системы 188–191  
 фотоны 22, 23, 104  
 фотоэлектрический эффект 23  
 Фраунгофер, Йозеф фон 28, 30  
 Фраунгоферовы линии 28–31, 126, 153
- Х**  
 «Хаббл», космический телескоп 27, 50, 94, 119  
 Хаббл, Эдвин 43, 48, 57, 116  
 Хаббла закон 48–51, 54, 57, 76, 178
- Хаббла камертон 117, 118  
 Хаббла последовательность галактик 116–119  
 Хаббла постоянная 50, 150  
 Халс, Рассел 170  
 Хартман, Уильям 193  
 Хиггс, Питер 104  
 Хиггса бозон 104–107  
 Хиггса поле 105  
 Хойл, Фред 56, 131, 169  
 Хоккинг, Стивен 92  
 Хокинга излучение 98  
 Хольварда, Йоганн 176  
 хромосфера 181  
 Хьюиш, Тони 168
- Ц**  
 Цвики, Фриц 72, 148  
 Церера 6  
 Цефеиды, переменные звезды 42, 43, 49, 53, 121, 177–179
- Ч**  
 «Чандра», космическая обсерватория 138  
 Чандрасекар, Субраманьян 99  
 Чандрасекара предел 166–167  
 частица Бога 104–106  
 Чедвик, Джеймс 101  
 черные дыры 80, 95, 96–99, 141–143, 146, 166, см. также сверхмассивные черные дыры
- Ш**  
 шаровые скопления 40  
 Шварцшильд, Карл 96  
 Шепли, Харлоу 41, 49  
 шкала расстояний в астрономии 52–55, 121  
 Шмидт, Маартен 132
- Э**  
 эволюция галактик 144–147  
 эволюция звезд 156–159  
 Эддингтон, Артур 148  
 Эйнштейн, Альберт 21, 23, 80, 89, 90, 148  
 Эйнштейна кольцо 150  
 экзопланеты 184–187  
 электромагнитный спектр 21, 128  
 электроны 100, 102  
 элементы 28, 57, 62, 158  
 эллиптические галактики 116  
 эмиссионные линии 29, 133  
 Энцилад 199  
 эпизоды 9  
 Эрида 5  
 эфир 88
- Ю**  
 Юпитер 190  
 Юри, Гарольд 197
- Я**  
 ядерный синтез 64–67  
 ядро 100  
 Янский, Карл 128

УДК 524  
ББК 84.4  
Б35

Joanne Baker  
50 Ideas You Really Need to Know. Universe  
Copyright © Joanne Baker 2010

Джоанн Бейкер изучала физику в Кембридже, защитила диссертацию в Сиднее. Много лет работает научным редактором в самом авторитетном научно-популярном журнале мира *Science*, где ведет разделами о космосе и Земле. Помимо тома «Вселенная», для серии «50 идей, о которых нужно знать» она написала тома «Физика» и «Квантовая физика».

### Бейкер, Джоанн

Б35 Вселенная. 50 идей, о которых нужно знать. — Пер. с англ. А. Петровой. — М.: Фантом Пресс, 2016. — 208 с.

Астрономия — одна из самых древних наук. Благодаря знаниям, накопленным человечеством с тех пор, как наши предки начали следить за движением Солнца и звезд, представление о месте человека во Вселенной изменилось радикально. Каждый прорыв в науке отзывался и в общественной жизни: в XVII веке за спорное учение о том, что Земля вращается вокруг Солнца, арестовали Галилея. Сходное недоверие вызвали и доказательства того, что Солнечная система размещается не в центре Млечного Пути. А Эдвин Хаббл в 1920-х заставил спорщиков умолкнуть, обнаружив, что Млечный Путь — одна из миллиардов галактик, разбросанных по расширяющейся Вселенной, которой 14 миллиардов лет. В XX веке открытый было сделано еще больше. Мы стали лучше понимать устройство звезд и их двигатели — ядерного синтеза, а одновременно обрели и знания о ядерной энергии и радиации. Позже появилась радиоастрономия, были обнаружены пульсары, квазары и черные дыры. Распахнулись новые окна во Вселенную — от реликтового излучения до небесных рентгеновских и гамма-лучей.

Эта книга — увлекательный экскурс в астрофизику с точки зрения современной науки.

Джоанн Бейкер  
**ВСЕЛЕННАЯ**  
**50 идей,**  
**о которых нужно знать**

Перевод  
*А. Петрова*  
Редактор  
*Ш. Мартынова*  
Научный редактор  
*к. ф.-м. н. А. Дракон*  
Корректоры  
*Ольга Андрияшина, Ирина Белякова*  
Директор издательства  
*Алла Штейнман*

Подписано в печать 18.07.2016.  
Формат 70×90/16. Печать офсетная.  
Заказ №

Тираж 3500 экз.

Гарнитура «NewBaskervilleС».

Издательство «Фантом Пресс»:  
Лицензия на издательскую  
деятельность  
код 221 серия ИД № 00378  
от 01.11.99 г.

127015 Москва,

ул. Новодмитровская, д. 5А, 1700

Тел.: (495) 787-34-63

Электронная почта:

phantom@phantom-press.ru

Сайт: www.phantom-press.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика  
в АО «Первая Образцовая типография»,  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»  
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

По вопросам реализации обращайтесь:

ЗАО «Книжный клуб 36.6»

Офис: Москва, Бакунинская ул.,

дом 71, строение 10

Почтовый адрес:

107078, Москва, а/я 245

Многоканальный телефон:

+7 (495) 926-45-44

e-mail: club366@club366.ru

www.club366.ru

ISBN 978-5-86471-740-0 © А. Петрова, перевод, 2016  
© «Фантом Пресс», оформление, издание, 2016



Планеты  
Гелиоцентризм  
Законы Кеплера  
Ньютоновский закон всемирного тяготения  
Ньютоновская теория оптики  
Телескоп  
Фраунгоферовы линии  
Эффект Доплера  
Параллакс  
Великий спор  
Парадокс Ольберса  
Закон Хаббла  
Шкала расстояний в астрономии  
Большой взрыв  
Реликтовое излучение  
Ядерный синтез Большого взрыва  
Антиматерия  
Темная материя  
Космическая инфляция  
Космологическая постоянная  
Принцип Маха  
Специальная теория относительности  
Общая теория относительности  
Черные дыры  
Астрофизика частиц

Бозон Хиггса  
Теория струн  
Антропный принцип  
Последовательность галактик Хаббла  
Скопления галактик  
Структура в крупном масштабе  
Радиоастрономия  
Квазары  
Рентгеновский фон  
Сверхмассивные черные дыры  
Эволюция галактик  
Гравитационное линзирование  
Спектральные классы звезд  
Звездная эволюция  
Звездные рождения  
Звездные смерти  
Пульсары  
Гамма-всплески  
Переменность  
Солнце  
Экзопланеты  
Формирование Солнечной системы  
Луны  
Астробиология  
Парадокс Ферми

		
 e-book	ISBN 978-5-86471-740-0	12+
	 9 785864 717400 > www.phantom-press.ru	