

Оглавление

Предисловие	9
Кванты и космос	13

ЧАСТЬ 1 КВАНТ КОСМОСА: ПРОШЛОЕ

Как появилась Вселенная?	33
Почему Вселенная так однородна?	51
Откуда во Вселенной вещество?	70
Откуда взялись химические элементы?	88

ЧАСТЬ 2 КВАНТ КОСМОСА: НАСТОЯЩЕЕ

Как мы разгадали химию небес?	105
Откуда взялись вещества, из которых мы состоим?	120
Почему, умирая, звёзды взрываются?	136
Вся Вселенная — квантовый объект?	151

**ЧАСТЬ 3
КВАНТ КОСМОСА:
БУДУЩЕЕ**

Почему все мёртвые звёзды не становятся чёрными дырами?	167
Вечна ли материя?	180
Вечны ли чёрные дыры?	192
Конец Вселенной — и вправду конец?	203

**ЧАСТЬ 4
БУДУЩЕЕ КВАНТОВОГО
КОСМОСА**

Где мы побывали?	217
Как выглядит «теория всего»?	221
Куда нас приведёт «теория всего»?	228
Что ещё мешает нам двигаться вперёд?	232
Благодарности	238
Об авторах	239

вить новую часть воды, заморозим её. Теперь появилась кое-какая разница: каждый раз, когда мы замораживаем воду, получившийся лёд выглядит чуть иначе.

Если у вас дома есть форма для ледяных кубиков, вытащите несколько штук и осмотрите их внимательно. У каждого кубика разные трещинки, замороженные пузырьки воздуха, другие дефекты и особенности. Если мы заменим часть кубика на такой же кусочек другого кубика, у нас получится явно другой ледяной кубик. Мы говорим: лёд не так симметричен, как вода, которую мы заморозили, чтобы его получить. Нагревая воду вместо того, чтобы замораживать, мы получим противоположный эффект. Водяной пар ещё однороднее, чем жидкая вода (чем горячее в принципе материал, тем он более однороден). Причина этого связана с тем, насколько плотно упакована энергия.

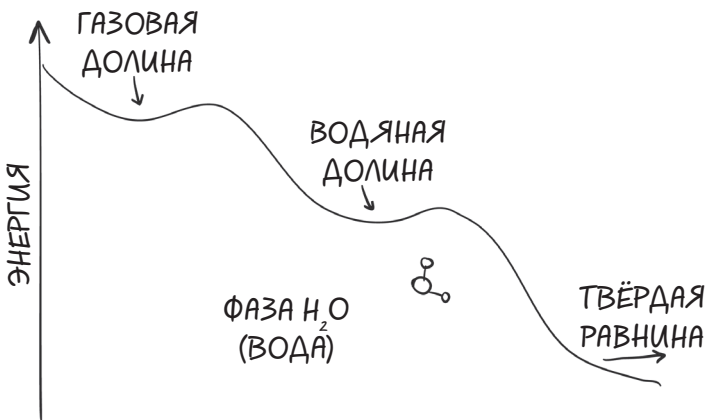
Вспомните, что в школе вы уже слышали что-то очень похожее об *агрегатных состояниях или фазах* вещества. Каждое химическое соединение, например, H_2O , может существовать в твёрдом, жидком или газообразном состоянии (для воды — лёд, вода и водяной пар). Это *классические* фазы вещества. Привлекая квантовую физику, мы получаем ещё десятки состояний, удачно названных *экзотическими фазами*.²¹ Квантовые состояния и их фазы не так просто визуализировать, но когда происходит переход из одной фазы в другую, результат этого перехода может проявиться так же быстро, как вылет молекул

²¹ *Экзотические фазы вещества*: кроме жидкой, газообразной и твёрдой есть ещё фаза плазмы и много экзотических фаз, с которыми исследователям ещё предстоит освоиться. См. Natalie Wolchover, “Physicists Aim to Classify All Possible Phases of Matter,” *Quanta Magazine*, January 3, 2018, <https://www.quantamagazine.org/physicists-aim-to-classify-all-possible-phases-of-matter-20180103/>.

воды из жидкости в воздух или их остановка и образование ими твёрдого ледяного кристалла.

Возвратимся к нашим знакомым энергетическим горкам. Уровень моря — всё равно что очень холодный лёд: это самая низкая энергия, которую может приобрести классическая твёрдая фаза H_2O . В жидкой воде энергии побольше — теперь мы в высокогорной долине. Поднимемся ещё выше, на вершину горы: это аналог водяного пара. Нагревая лёд, мы переносим его через вершину пика и опускаем в долину с жидкостью. Добавим ещё тепла — и мы перенесём вещество через следующий пик и поместим в газовую долину.

Двигаться в другую сторону не так просто и очевидно. Начнём, скажем, с жидкой воды. Удерживая её при фиксированной температуре выше $0^\circ C$ ($32^\circ F$), мы позволим ей спокойно плескаться в долине. Теперь начнём понижать окружающую температуру. Энергия теряется, но это значит одно: уровень воды в долине и высота волн будут понижаться. Как же воде перевалить через пик и перелиться на твёрдую ледяную равнину — уровень моря?



лые флуктуации, обусловленные квантовой неопределённостью. Затем произошла инфляция, и полная энергия Вселенной оказалась размазанной по всем направлениям: её малый клочок распространился на всю нынешнюю наблюдаемую Вселенной и гораздо дальше. Результатом и оказалось то, что в нашей Вселенной плотность энергии повсюду одинакова.

Теория инфляции — очень убедительная и захватывающая. В любом современном учебнике космологии непременно обсуждаются особенности этого процесса. Как гениальный сыщик в повести Агаты Кристи, инфляция связывает между собой оборванные сюжетные линии, находит неожиданные объяснения и отвечает на кажущиеся неразрешимыми вопросы о Вселенной вокруг нас. Не правда ли, это одно из великих достижений современной космологической мысли?

Тёмная и таинственная материя

Хотя теория инфляции красиво объясняет наблюдаемую Вселенную, она всё же не может считаться полностью завершённой. Остаётся несколько неувязок, с которыми надо разобраться, чтобы всё встало на места. Прежде всего, это вопрос о природе инфлатона. Откуда он взялся и куда делся? Играет ли инфлатон какую-либо роль в сегодняшней Вселенной? Некоторые учёные считают, что инфлатон преобразовался в другую космологическую силу — *тёмную энергию*, сущность, о которой мы поговорим ниже. Пока, однако, эта теория остаётся довольно умозрительной.²³

²³ По поводу *тёмной материи*: самое понятное объяснение феномена тёмной материи связано с её малоубедительным отношением



Одна из трудностей подтверждения теории инфляции — отсутствие прямых наблюдений, доказывающих реальность ее периода. Возможно, вы сейчас чешете в затылке: «Как же так? Ведь мы начали весь рассказ с вопроса о том, почему Вселенная везде выглядит одинаковой. Разве это не прямое доказательство инфляции?».

Да, это так, но это не решающее доказательство, ведь Вселенная могла попросту родиться вполне гладкой, однородной и повсеместно одинаковой. То же самое можно сказать и о других гипотезах, основанных на идее инфляции, от *проблемы отсутствия монополя* до *проблемы плоской Вселенной*. Сейчас у нас нет време-

к вымиранию динозавров! См. Lisa Randall, *Dark Matter and the Dinosaurs: The Astounding Interconnectedness of the Universe* (New York: Harper Collins, 2015). [Русский перевод: Лиза Рэндалл. Тёмная материя и динозавры. Удивительная взаимосвязь событий во Вселенной. Альпина нон-фикшн, 2017 — Прим. пер.]

Уравнения Дирака содержат первое научное предсказание чего-то, что в природе раньше никогда не наблюдалось. Хотя, выводя свои уравнения, Дирак не имел в виду какой-то конкретной симметрии, уравнения симметричны относительно *заряда*. Электрический заряд — основное свойство материи, благодаря которому на неё оказывают влияние электрическая и магнитная силы. Количество заряда принято измерять в квантованных дискретных единицах e . Каждый электрон имеет заряд $-e$, а каждый протон — заряд $+e$. Выходит, если силой воображения мы изменим заряд электрона с $-e$ на $+e$, получится протон? Ни в коем случае! Между электронами и протонами, кроме заряда, ещё множество различий: например, протон почти в 2000 раз тяжелее.

Анти-...

Изменить заряд электрона с отрицательного на положительный — всё равно, что перевернуть другой стороной кружок, о котором мы говорили выше. На этот раз, правда, дело обстоит немного иначе — в итоге мы увидим не совсем тот же кружок. Насколько можно видеть из уравнения Дирака, одним из его решений будет частица, идентичная электрону во всех отношениях, но с положительным зарядом $+e$. Другими словами, уравнение Дирака предугадывало новый вид материи — антивещество. Учёный предсказал существование антиэлектрона, теперь называемого позитроном, в 1928 году. Спустя всего четыре года Карл Андерсон получил решающее доказательство этому в эксперименте, в ходе которого он изучал столкновения частиц из дальнего космоса — космических лучей.

Ясно, что антивещество существует и подчиняется тем же законам физики, что и вещество. Некоторые учёные

даже предположили, что из антивещества могут состоять целые галактики! Но здесь есть одна проблема. Когда вещество и антивещество соединяются, они взаимно уничтожают друг друга, аннигилируют, производя гигантские количества энергии в виде гамма-излучения. Антивещество — идеальное горючее из научно-фантастических романов; при аннигиляции оно полностью исчезает, переходя в энергию и приводя в движение космические корабли будущего. Но его очень трудно хранить: как только оно соприкоснётся со стенками ёмкости, в которую вы хотите его поместить, произойдёт аннигиляция и колоссальный выброс энергии. Получается, что, если большие участки Вселенной состоят из антивещества, то в тех местах, где оно будет соприкасаться с обычным веществом, будут замечены яркие вспышки гамма-лучей. У нас нет никаких наблюдательных доказательств того, что это происходит, а значит, во Вселенной, вероятно, нет достаточно протяжённых областей, наполненных антивеществом.

Исходя из принципов симметрии, можно утверждать, что законы физики действовали бы точно так же, изменись заряд всех частиц на противоположный. На бумаге физика не делает различия между веществом и антивеществом, так почему это должна делать природа? Антивещество было порождено квантовой симметрией, но, чтобы объяснить, почему сегодня во Вселенной больше вещества, чем антивещества, нужно кое-что ещё. Необходимо разрушить симметрию, которая создала антивещество, то есть либо найти некоторую асимметрию в существующих физических законах, либо создать новую физику, которая допускает асимметрию вещества и антивещества.

Но почему вообще мы создаём симметрии только для того, чтобы потом их разрушать? Почему сразу не начать

Почти за 200 лет до того, как он взялся за перо, великий учёный Исаак Ньютон сделал первые шаги к разгадке природы небес. В 1660-х в своей квартире в Колледже Св. Троицы в Кембридже он направил узких пучок солнечных лучей на стеклянную призму. К его изумлению, белый свет Солнца превратился в разноцветную радугу! Если присмотреться, такие маленькие радуги можно увидеть повсюду, где солнечный свет проходит через стекло, которое действует как призма.

В начале 1800-х баварец Иозеф фон Фраунгофер усовершенствовал искусство изготовления высококачественных призм и объединил их с телескопами. Расщепляя на составляющие свет ярких звёзд, он получил такие же радужные картины, какие давало Солнце. Может быть, Солнце и звёзды не так уж отличаются друг от друга?



По сравнению с сегодняшними правила техники безопасности в XIX веке были не слишком строгими, и, вероятно, именно работа с ядовитыми парами металлов способствовала ранней смерти Фраунгофера в возрасте 39 лет. Но за свою короткую жизнь, благодаря построенным им точным оптическим приборам он обеспечил гигантский прорыв в понимании строения звёзд. Исследуя полученные расщеплением солнечного света радуги —

спектры, Фраунгофер обнаружил в них на разноцветном фоне множество тёмных линий и полосок. Хотя эти полосы в солнечном спектре 10 годами раньше уже отмечал Уильям Хайд Волластон, Фраунгофер начал составлять их систематическую карту, идентифицировав почти 600 индивидуальных линий.

Источник линий оставался тайной до 1850-х, когда появились работы Густава Кирхгофа и Роберта Бунзена. Они пропускали световые лучи через образцы различных газов, каждый раз расщепляя свет, прошедший сквозь газ, при помощи призмы. Прохождение света через газовую среду приводило к появлению в спектре тёмных линий, причём каждому газу строго соответствовал свой набор полос.

Стало ясно: тёмные линии в спектре Солнца возникали из-за присутствия в его атмосфере различных элементов, тех самых, что исследовались в лабораториях на Земле. К 1860-м пионеры звёздной спектроскопии, такие, например, как Уильям и Маргарет Хаггинс, выяснили, что более далёкие звёзды тоже сделаны из «земных» веществ.

Однако были и исключения. Некоторые астрономы вели наблюдения не только внешних слоёв Солнца, но и его протяжённой внешней атмосферы. Это было возможно, только когда ослепительно сияющее Солнце во время полного затмения загоразживалось лунным диском. Тогда на месте тёмных полос вспыхивали яркие линии — Кирхгофф и Бунзен объясняли их эмиссией, то есть излучением света атомами тех же элементов. К удивлению учёных, в излучении солнечной атмосферы оказалась яркая жёлтая линия, которой никогда не наблюдали в лаборатории. Выходит, небесные тела, по крайней мере отчасти, всё-таки состоят из неземных веществ!

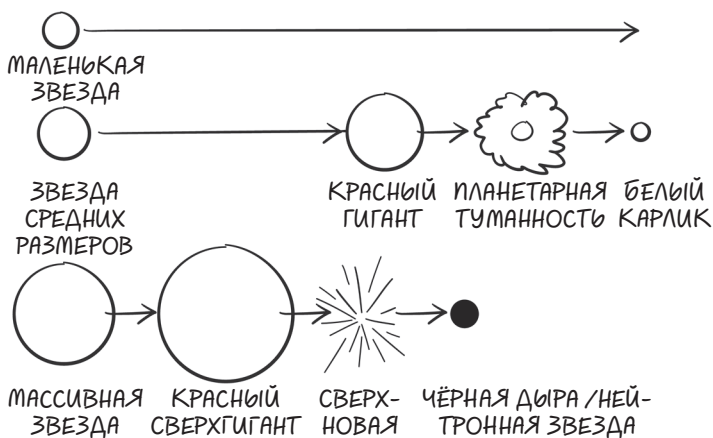
пульсировать. Наконец, внешние слои звезды окажутся сброшены в окружающее пространство. Результат этого «последнего вдоха» может быть прекрасным: мы видим в телескопы великолепные *планетарные туманности*. По сути, они отмечают на небе места смерти звёзд.

Жизнь звезды, в несколько раз более массивной, чем Солнце, может быть гораздо более яркой и привлекающей внимание. Мощная гравитация этих гигантов создаёт в их недрах условия, когда для ядерного горения нет никаких барьеров. Водород очень быстро преобразуется в гелий, тот сгорает, образуя углерод и кислород — и так далее, ко всё более и более тяжёлым элементам. Очень массивные звёзды могут сжечь весь запас своего ядерного горючего за несколько десятков миллионов лет, постоянно перестраивая внутреннюю структуру по мере того, как материал, образованный в одном цикле ядерных реакций, сам становится горючим для следующего цикла.

Звезда с массой около десяти солнечных сожжёт весь водород в своём ядре примерно за 10 миллионов лет; ещё приблизительно миллион лет уйдёт на сжигание гелия. Горение углерода займёт всего несколько сотен лет, кислорода — не менее нескольких сотен дней. В финальной стадии горения кремния счёт пойдёт на часы. После этого ядерное горение прекратится.

В результате горения кремния образуется железо, а у него особое атомное ядро. Протоны и нейтроны в ядре железа очень тесно связаны. Если вы хотите преобразовать этот металл в другие элементы, понадобится значительная энергия, чтобы разорвать эту тесную связь. Значит, в отличие от других ядерных реакций, в которых энергия высвобождается, позволяя звезде сиять, ядерные реакции с железом её поглощают. И как только у звезды появляется железное «сердце», ядерный пожар полностью затухает.

С исчезновением давления излучения, которое отталкивает вещество звезды от её ядра, гравитацию уже ничего не уравнивает и не останавливает. Внешние слои звезды обрушиваются внутрь неё в свободном падении, сокрушая мёртвое железное ядро. Когда это происходит, огромные разрушающие нагрузки ведут к повышению температуры и плотности до крайних значений, и энергии уже становится вполне достаточно для преобразования железа в более тяжёлые элементы. Ядро звезды разрушается. У самых массивных звёзд это разрушение переводит вещество в состояние чёрной дыры, а внешние слои выбрасываются в пространство могучим взрывом. Для звёзд поменьше всё заканчивается образованием невероятно плотного мёртвого звёздного остатка — *нейтронной звезды*.



В ходе мощнейшего сжатия звёздного ядра, вызванного коллапсом внешних слоёв, начинают происходить странные вещи. Плотность смеси протонов и нейтронов становится настолько огромной, что сильное взаимодей-

СИЛЫ В ПРИРОДЕ В ПОРЯДКЕ УБЫВАНИЯ

		ДИАПАЗОН ДЕЙСТВИЯ	ОТНОСИТЕЛЬ- НАЯ ВЕЛИЧИНА
ГРАВИТАЦИЯ		∞	10^{-36}
СЛАБОЕ ВЗАИМО- ДЕЙСТВИЕ		10^{-18} м	10^{-7}
ЭЛЕКТРО- МАГНЕТИЗМ		∞	1
СИЛЬНОЕ ВЗАИМО- ДЕЙСТВИЕ		10^{-15} м	10^2

Гравитация — самая слабая из всех четырёх фундаментальных сил, а масса нейтрино, насколько нам известно, невероятно мала. Таким образом, нейтрино наименее подвержены влиянию гравитации: её воздействием мы здесь вполне можем пренебречь. Слабое ядерное взаимодействие, как и сильное взаимодействие между протонами и нейтронами, действует на очень малых масштабах. Сопоставляя всё это, мы можем заключить, что нейтрино обычно проходит огромные расстояния, прежде чем по счастливому стечению обстоятельств угодит в другую частицу. Поэтому физики между собой часто называют её *частицей-призраком*.

Казалось бы, для учёного, который пытается зарегистрировать нейтрино, всё это должно звучать приговором, но есть и обнадеживающее обстоятельство: каждую секунду сквозь тело человека проходит около 100 триллионов этих крохотных частиц. За ту же самую секунду сквозь него пролетает и около 100 высокоэнергетических тяжелых частиц из космоса, известных как космические лучи. Они могут быть потенциальной причиной рака, так как наносят за-

метный ущерб молекулам ДНК. К счастью, нейтрино, с их микроскопически малой вероятностью взаимодействия, проходят сквозь нас, не причиняя никакого вреда.

Нейтринная кухня

Откуда же берутся все эти нейтрино? Они могут образовываться везде, где синтезируются или распадаются частицы. Некоторые из них, возможно, существуют с начала Вселенной, со времён, когда начали происходить первые субатомные реакции. Миллиарды нейтрино приходят от Солнца, в глубине которого водород при термоядерном синтезе преобразуется в гелий. Благодаря участию сил слабого взаимодействия одним из важных побочных продуктов этого процесса является нейтрино. Кроме них и более знакомых нам фотонов Солнце посылает в нашу сторону и высокоэнергетические протоны. Космические лучи из разных источников врезаются в молекулы атмосферы; в результате происходят реакции такого же вида, как те, ради которых инженеры строят гигантские ускорители частиц. В каскадах этих реакций рождаются ливни нейтрино ещё более высоких энергий. Мы, будто в сцене из научно-фантастического кино, постоянно купаемся в потоках бесчисленных призрачных частиц, которые проходят сквозь нас незамеченными.

На фоне этого постоянного нейтринного ливня, непрерывно омывающего Землю и проникающего сквозь неё, наблюдаются кратковременные всплески — рост числа регистрируемых частиц. Это вестники звёздных взрывов. Выражение можно понимать буквально: связанные с этими процессами нейтрино могут достигать нас гораздо раньше, чем мы сможем увидеть — иногда даже невооружённым глазом — сами фотоны оптической вспышки.

чески это звучит, конденсированные массивные бозоны сейчас регулярно создаются в физических лабораториях путём охлаждения газов, состоящих из этих частиц, до температур, близких к абсолютному нулю. Из этого могут следовать самые разные феномены — такие, например, как сверхпроводимость (электрический ток, не встречающий сопротивления) и сверхтекучесть (движение без вязкости). Но мы не хотим сейчас говорить о бозонах, ведь большая часть вещества состоит из фермионов. Вследствие принципа запрета фермионы не конденсируются и не могут описываться одной волновой функцией. Паули выдвинул свою идею в качестве механизма, который объяснял, почему энергии электронов распределяются таким странным образом — проще всего проиллюстрировать это распределение на примере семейств периодической таблицы элементов. Идея быстро поднялась до уровня *принципа*, из которого можно вывести распределение электронов в атомах по орбиталям, если ещё добавить понятие спина.

В то время было понятно, что высокоэнергетические электроны существуют вдалеке от атомных ядер. В некотором смысле атом, имеющий высокую энергию или много электронов, занимает большой объём. Тот факт, что высокоэнергетические электроны его занимают, был к тому времени уже подтверждён экспериментами. Вскоре после того, как Паули выдвинул свою идею, Пауль Эренфест указал на интересные следствия движения в противоположную сторону. Если мы попытаемся сконденсировать атомы, электроны будут стараться занять меньший объём и приблизиться к ядрам. Но принцип исключения Паули подобное запрещает: эти электроны не могут разделять одну волновую функцию. Так применение этого принципа демонстрирует, почему масса вообще занимает определённый объём.