

# Содержание

Предисловие .....	7
Благодарности .....	11
<b>I. Жизнь звезды .....</b>	<b>13</b>
Звездный свет .....	15
Рождение и смерть звезд .....	17
Звезды и элементы .....	21
Будущее звездной Вселенной .....	28
<b>II. Многообразие нейтронных звезд .....</b>	<b>31</b>
Все хорошо в меру .....	33
Предсказание и открытие нейтронных звезд .....	35
Радиопульсары и рентгеновские пульсары — старый зоопарк .....	38
Магнитары, Великолепная семерка и все-все-все — новый зоопарк нейтронных звезд .....	41
Источники энергии нейтронных звезд .....	44
Отпечатки «пальцев» сверхновых на нейтронных звездах .....	48
<b>III. Эволюция нейтронных звезд .....</b>	<b>51</b>
Вращение .....	53
Изменение магнитного поля .....	57
Тепловая эволюция .....	62

<b>IV. Недра нейтронных звезд</b> .....	67
Экстремальное состояние вещества.....	69
Из чего сделаны нейтронные звезды.....	70
Вращение и состав.....	73
Измерение температуры как способ изучения недр.....	75
Глитчи.....	78
Вопросы о массе и масса вопросов.....	81
Как сейчас отвечают на главный вопрос?.....	83
<b>V. Свойства двойных звезд</b> .....	89
Главный параметр.....	91
Про тройняшек.....	92
Эволюция двойных.....	94
Новые и сверхновые.....	96
Посмертные красоты двойных систем.....	100
Размеры двойных.....	101
Гиперскоростные звезды.....	106
Планеты двойных звезд.....	109
<b>VI. Релятивистские двойные звезды</b> .....	111
Массивные двойные.....	113
Измерение масс и радиусов в двойных системах.....	117
Двойные с черными дырами.....	121
Ультрамощные рентгеновские источники.....	123
Вращение звезд и магнитары.....	127
Двойные радиопульсары.....	129
<b>VII. Гравитационные волны</b> .....	137
Теория гравитации и геометрия.....	139
Волны пространства-времени.....	145
Слияния нейтронных звезд.....	148
Как ловят гравитационные волны.....	150

<b>VIII. Скорости компактных объектов</b> .....	155
Стремительные звезды.....	157
Взаимодействие и разгон.....	158
Измерения скоростей пульсаров.....	160
Взрыв сверхновой и скорость.....	163
Гравитационная ракета.....	166
<b>IX. Одиночные компактные объекты</b> .....	169
Миллиард нейтронных звезд.....	171
Аккреция на одиночные компактные объекты.....	172
Гравитационное линзирование.....	177
<b>X. Магнитары</b> .....	183
Изобретение магнитаров.....	185
Открытие магнитаров.....	187
Аномальные рентгеновские пульсары.....	190
Сильные поля.....	192
Картина запутывается.....	195
<b>XI. Великое объединение нейтронных звезд</b> .....	199
Про зайчиков и белочек.....	201
Такие разные нейтронные звезды.....	203
Связующий элемент.....	205
Секретные поля.....	209
<b>XII. Компактные объекты и фундаментальная физика</b> .....	213
Астрофизические лаборатории для бедных.....	215
Неземная гравитация.....	220
Сверхтекучие звезды.....	222
Сверхплотное вещество.....	225
Неземная электродинамика.....	226
Атмосферы нейтронных звезд.....	228
Нейтрино из ада.....	229
Грядущие открытия.....	230
Послесловие.....	235

*Посвящается моей семье*

# Предисловие

Рано или поздно наша цивилизация погибнет в результате катаклизма. Грядущие поколения заново пройдут путь развития, который у нас уже за плечами. Но новый цикл жизни на Земле не будет простым повторением. Наши далекие потомки будут находить артефакты наших времен, но не смогут полностью понять их смысл. На основе интерпретаций наших знаний будет возникать новая мифология. Будут мифы и о самых совершенных небесных объектах.

Такой миф может выглядеть так: «Когда Творец Вселенной — Летающий Макаронный Монстр — создавал весь мир, то, сделав небо и Землю и населив Землю первыми существами, он захотел создать настоящий шедевр и поместить его в небо, которое было еще пустым и темным. Тогда он взял комок первовещества и начал его сжимать. Чем больше он мял его — тем больше он ему нравился. Он мял и мял его, делая все плотнее и плотнее. Но вдруг комок в его руках сжался очень сильно. Вещество исчезло, и появилась дыра. И стал Летающий Макаронный Монстр печален. Подумав, он взял другой комок. Смял его не очень сильно и бросил в небо. Появилось Солнце. Оно ярко светило и вначале радовало Творца. Он сделал много таких шариков, раскидав их вокруг — появились звезды. Но потом Летающий Макаронный Монстр опять стал печален. Светящиеся шарики недолго радовали его. Тогда он взял одну из звезд и начал ее мять и уминать. Но, помня о своем первом опыте, он был очень аккуратным. Творец лепил и лепил, мял и мял. Однако все время следил, чтобы шарик

не превратился в дыру. Наконец Летающий Макаронный Монстр остановился. То, что получилось, очень понравилось ему. Это был настоящий шедевр, достойный того, чтобы украсить Вселенную. Так появились нейтронные звезды».

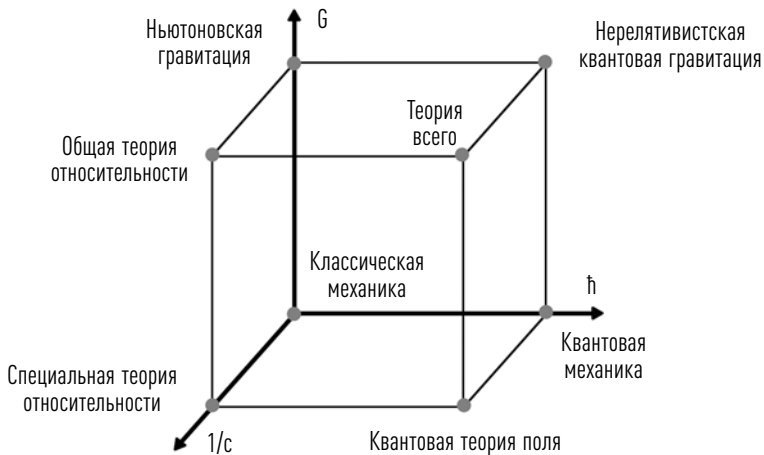
Действительно, я полагаю, что нейтронные звезды — это самые интересные макроскопические объекты неживой природы. Мы сейчас описываем мир, пользуясь тремя фундаментальными теориями: Специальной теорией относительности, Общей теорией относительности и квантовой механикой. Есть известный рисунок — cGh-карта или «куб теорий», придуманный очень талантливым физиком Матвеем Бронштейном<sup>1</sup>. На нем есть три координатные оси, одна из которых соответствует росту важности квантовых эффектов, другая — приближению к скорости света, а третья — увеличению гравитационного поля. Начало координат соответствует классической механике. Двигаясь вдоль оси, соответствующей увеличению скорости, мы попадем в область, где надо использовать Специальную теорию относительности. Если мы теперь начнем добавлять гравитацию, то окажемся там, где необходима Общая теория относительности. В том случае, если мы выйдем из начала координат вдоль оси, обозначенной значком постоянной Планка, то станут важны квантовые эффекты. Теперь, если добавить гравитацию, то это приведет нас в Terra Incognita квантовой гравитации. Наконец, переместившись в самую дальнюю от начала координат вершину куба, — столкнемся с процессами, требующими для своего описания так называемой «Теории всего», которая объединит все известные взаимодействия.

Если представить на этом рисунке место нейтронных звезд, то среди всех непосредственно наблюдаемых макроскопических объектов они окажутся самыми удаленными от начала координат. Для адекватного описания нейтронных звезд необходимы все три фундаментальные теории. Конечно, недра черных дыр должны быть еще экзотичнее, но их мы не можем наблюдать. Поэтому среди

---

<sup>1</sup> К сожалению, Бронштейн не дожил до открытия нейтронных звезд. Он стал жертвой сталинских репрессий, его расстреляли в 1938 году. Ему было чуть больше 30 лет. Примерно через 30 лет были открыты радиопульсары. — *Здесь и далее примечания автора.*

астрономических объектов, которые мы можем изучать, наиболее любопытная комбинация сложных физических процессов встречается у нейтронных звезд. Они и будут основными героями нашей книги. Разумеется, не забудем мы и про их «младших братьев» — белых карликов и про «старших сестер» — черные дыры.



Куб теорий, придуманный Матвеем Бронштейном. Чем дальше мы отходим от начала координат, двигаясь сразу по трем координатам, — тем более разнообразной становится физика.

Как астрофизика меня в первую очередь интересует то, что уже наблюдается или что можно наблюдать. Но за всеми этими данными стоит физика — наше понимание того, как устроена природа. По мере сил я попробую рассказать, что скрывается за скупыми словами «астрономы увидели», поэтому книга не везде будет легким чтением. Путь к звездам, а к нейтронным особенно, лежит через тернии. Тем не менее никаких специальных знаний, выходящих за рамки школьного курса или обычной эрудиции современного человека, читателю не потребуется. Для тех, у кого возникнет желание углубить и расширить свои знания о нейтронных звездах и связанных с ними феноменах, по ходу изложения будут приводиться ссылки на другие книги или интернет-ресурсы. Также о некоторых онлайн-ресурсах и книгах будет сказано в послесловии.





# Благодарности

Книга основана на цикле коротких видеолекций, записанных «ПостНаукой». Без участия этого замечательного проекта она не появилась бы.

Я признателен Антону Бирюкову, Сергею Блинникову, Дмитрию Вибе, Андрею Игошеву, Владиславу Кобычеву, Игорю Огневу, Максиму Пширкову и Валерию Сулейманову, которые прочли разные варианты рукописи и сделали полезные замечания, которые я постарался учесть. Огромное спасибо Валентину Пальшину и Дмитрию Фредериксу, предоставивших некоторые из иллюстраций, связанных с экспериментом «Конус».

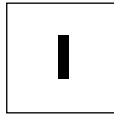
Множество важных уточнений сделал научный редактор книги Константин Постнов. Все оставшиеся в книге неточности — на моей совести.

Благодарю слушателей моих лекций за хорошие вопросы, стимулирующие рассказывать больше и лучше. А также коллег, в первую очередь — соавторов моих научных работ, много способствовавших моему просветлению в вопросе изучения нейтронных звезд.

Особая благодарность фонду «Династия», который не только на протяжении нескольких лет поддерживал мою научную работу и многократно приглашал меня для участия в научно-популярных мероприятиях, но и в целом воссоздал в России атмосферу интереса к научно-популярной литературе.

Наконец, я хотел бы выразить бесконечную признательность моей жене Сусанне за все, что она для меня делает.





# **Жизнь звезды**



## **Звездный свет**

Многие считают, что самые важные астрономические объекты — это звезды, и для этого есть основания. Если задуматься, все, что мы видим, мы видим так или иначе благодаря свету звезд. И, вообще говоря, мы видим именно все так, как мы видим, благодаря свету самой близкой к нам звезды — Солнца. Ведь наше зрение формировалось в течение длительной эволюции именно в условиях естественного солнечного освещения и адаптировалось именно к нему. На самом деле даже электрический свет имеет отношение к звездам и Солнцу. Как правило, искусственное освещение связано либо с углеводородами биогенного происхождения, которых, конечно, не было бы без солнечного света (как и каменного угля, который, если бы он мог говорить, рассказал бы нам о том, как светило Солнце сотни миллионов лет назад), либо — непосредственно с солнечной энергией, если у вас стоят солнечные панели, либо с гидроэнергетикой, а ведь вода у нас течет, потому что Солнце греет Землю. Пожалуй, только атомная энергетика в некотором смысле находится в стороне — однако на поверку (это мы покажем ниже) и она, как ни странно, имеет отношение к звездам.

Если мы посмотрим на ночное небо, то опять-таки все, что мы видим, — это или звезды, или объекты, которые светят отраженным светом звезд: Луна, планеты, кометы — все это отраженный свет Солнца. И если мы видим экзопланеты — планеты, вращающиеся вокруг других звезд, — то в основном они или отражают свет других звезд, или прогреты излучением звезд и поэтому излучают вроде бы сами, но часто без звезды этого мощного инфракрасного, к примеру, излучения экзопланеты

не существовало бы. Поэтому первое важное утверждение этой главы состоит в том, что мы видим только потому, что во Вселенной есть звезды.



Изображение системы 2M1207, состоящей из экзопланеты (ее обозначают 2M1207b, она слева внизу) и бурого карлика. Это первый в истории прямой снимок объекта планетной массы (несколько масс Юпитера) вне Солнечной системы. Данная экзопланета видна благодаря собственному излучению. За счет продолжающегося гравитационного сжатия недра объекта разогреваются, и мы видим его инфракрасное излучение. То же верно и для некоторых других достаточно молодых планет. Поскольку соседом 2M1207b является бурый карлик — т.е. «недозвезда», в которой не начались реакции превращения водорода в гелий, то иногда ее классифицируют не как экзопланету, а как «объект планетной массы, вращающийся вокруг бурого карлика». Наблюдения проводились на телескопах VLT Европейской южной обсерватории (ESO).

Звезды в виде ярких неподвижных огоньков в небе были известны людям всегда, но, что это такое, по-настоящему поняли только в XIX веке, когда сумели надежно и достоверно измерить расстояния до звезд. Конечно, и раньше многие предполагали,

что звезды — это далекие солнца, но тогда это были всего лишь догадки. Известно, например, что Тихо Браге был противником этой идеи, как раз потому, что он не смог измерить паралактическое смещение звезд и тем самым определить расстояния до них, а смириться с тем, что это настолько далекие солнцеподобные объекты, ему не позволяли его философские убеждения.

В 30-е годы XIX века сразу три астронома в разных странах (и даже полушариях) смогли измерить расстояния до звезд. Томас Хендерсон проводил свои наблюдения в Южной Африке (а обрабатывал уже в Британии). Он правильно выбрал звезду — Альфа Центавра. Это действительно ближайшая звезда на нашем небе. И Хендерсон верно измерил расстояние — получилось около одного парсека (т. е. три световых года с четвертью). Хотя наблюдения проводились в 1832–1833 годах, результаты были опубликованы только в 1839-м, поэтому пальму первенства он упустил. К чему, видимо, отнесся со свойственным английским джентльменам спокойствием.

Формально гонку выиграл Фридрих Бессель. Он выбрал слабую звезду 61 Лебедя, положившись на ее большое собственное движение на небе. И не прогадал. В 1838 году он опубликовал точные надежные измерения: расстояние порядка 10 световых лет (три парсека с лишним).

Другой Фридрих (которого мы знаем как Василия) — Струве — выбрал одну из двух самых ярких звезд северного неба — Вега. И в серии работ (первая раньше работы Бесселя, вторая — позже) показал, что расстояние до Веги составляет 4–8 парсек (сейчас мы знаем, что оно составляет чуть менее 8 парсек).

Но знать расстояния — это еще не все.

## **Рождение и смерть звезд**

Звезды рождаются и умирают, в том числе и прямо сейчас. Этот неоспоримый факт веками не был общепринятым и очевидным. Звезды воспринимались людьми как нечто практически вечное. Считалось, что эти далекие объекты, пусть и похожие на Солнце, светят всегда или почти всегда и в наше время уже не формируются и еще не прекращают свое существование. Это казалось

логичным, само собой разумеющимся (возможно, Иммануил Кант был одним из первых, кто в Новое время серьезно заговорил о том, что звезды рождаются и умирают, и представил модель для формирования звезд и планетных систем, обычно же обсуждение ограничивалось Солнечной системой, хотя стоит отметить и Эммануила Сведенборга, рассуждавшего, правда, в рамках декартовской модели, где гравитация не играет определяющую роль). Но теперь мы понимаем, что звезды, конечно же, образуются, изменяются на протяжении своей жизни, и затем их жизненный цикл заканчивается — они во что-то превращаются. И это второй важный факт: звезды рождаются, живут и умирают. И это происходит на наших глазах.

Жизнь звезды — это в основном смена источников горения, смена источников энергии. Энергия вырабатывается в результате термоядерных реакций. Все эти термоядерные реакции начинаются с того, что водород превращается в гелий. Сейчас именно этот процесс происходит в Солнце и, вообще говоря, в большинстве звезд. Это самая длинная стадия звездной эволюции, она занимает примерно 90% жизни звезды, некоторые из самых первых звезд нашей Галактики еще находятся на ней. Поэтому если мы наугад выберем какую-то звезду на небе, то с вероятностью более 90% окажется, что в ее недрах водород пережигается в гелий. Затем водород заканчивается, звезда претерпевает первое изменение — она раздувается, превращается в красного гиганта. На диаграмме Герцшпрунга–Рэссела этот процесс соответствует движению вправо и вверх, в область низкой температуры поверхности, но большой полной светимости. Дальше все зависит от самого главного параметра звезды — от ее массы. Если масса достаточно большая, то ядро подожмет, станет еще более плотным и горячим, и пойдут следующие реакции: гелий начнет превращаться в углерод, углерод — в кислород, и так цепочка может идти до железа<sup>1</sup>. Лишь до железа и родственных элементов (никеля, кобальта), а не дальше вдоль таблицы Менделеева,

---

<sup>1</sup> Мы говорим здесь лишь о процессах в звездном ядре. В оболочках гигантских звезд может идти синтез тяжелых элементов благодаря так называемые s-процессу, т. е. медленному захвату нейтронов ядрами элементов. Например, так могут образовываться свинец и стронций.



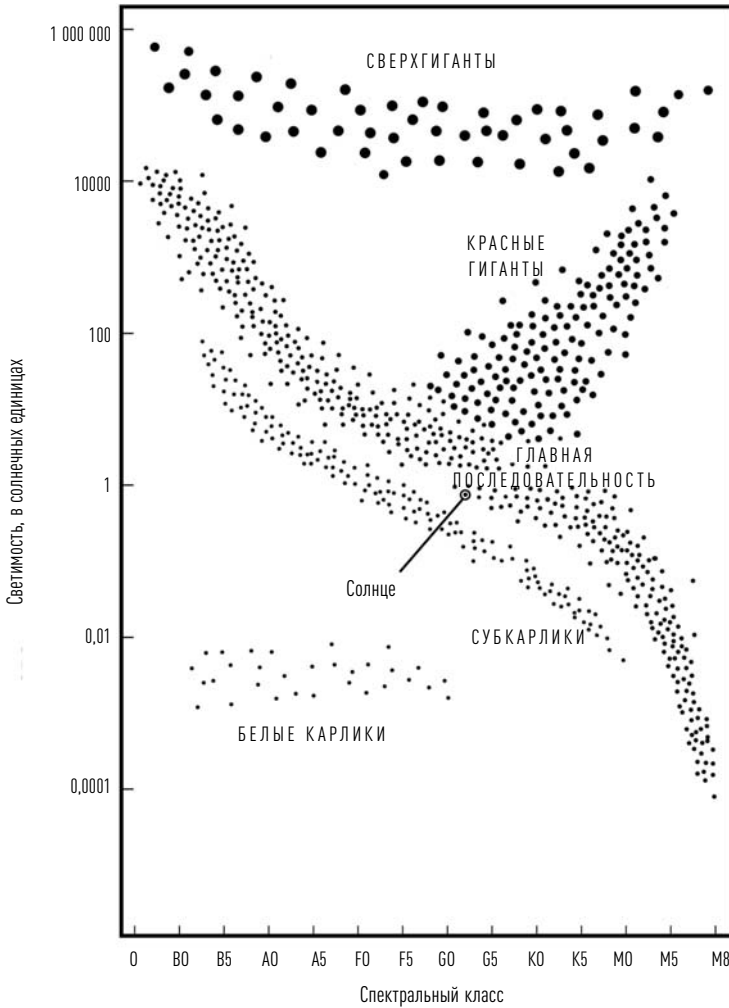


Диаграмма Герцшпрунга–Рассела. Горизонтальная ось, на которой указаны спектральные классы, соответствует температуре звезд (горячие — слева, холодные — справа). Вертикальная — светимости (яркие вверху, слабые — внизу), она выражена в единицах светимости Солнца. Хорошо видны основные последовательности. Они соответствуют различным стадиям эволюции звезд. Важно, что эти последовательности не являются эволюционными треками. Выделяется так называемая главная последовательность, на которой звезда проводит большую часть своей жизни, превращая водород в гелий.

потому что только это энергетически выгодно, так как при таких термоядерных реакциях энергия выделяется. Чтобы процесс шел дальше, необходимы затраты энергии, что невозможно на данном этапе жизни звезды: природа так не действует в стабильном режиме. Нужно чтобы происходило что-то не стационарное, чтобы что-то взрывалось. Что взрывается в звезде? Давайте поговорим об этом.

Легкие звезды живут очень долго и очень медленно пережигают водород в гелий. Поскольку Вселенной всего лишь 13 миллиардов лет с хвостиком, то даже самые первые из легких звезд (с массой раза в два меньше солнечной и более легкие) должны доживать до наших дней. И их можно увидеть. Это очень важная задача — искать первичные звезды, образовавшиеся на самой-самой заре жизни Вселенной — спустя всего лишь несколько десятков миллионов лет после Большого взрыва.

Массивные звезды живут меньше просто потому, что они светят ярче и быстрее пережигают свой запас водорода, хотя его и больше, но светимость очень резко растет с ростом массы из-за роста температуры и плотности в центре. Если звезда имеет массу порядка солнечной, то она живет где-то 10–12 миллиардов лет. Солнце находится в середине жизненного пути, и в конце такой объект не взрывается — наша звезда просто не может взорваться, нет никаких физических причин для этого. Солнце превратится в красного гиганта, внешняя оболочка будет сброшена и останется постепенно остывающее ядро без источников энергии — белый карлик.

Белый карлик — это конечная стадия эволюции не слишком массивных звезд. Если же звезда раз в десять тяжелее Солнца, то она превратится не в белого карлика. В конце ее жизни ядро потеряет устойчивость. Оно уже будет состоять в основном из железа и начнет схлопываться, но этот коллапс может остановиться. И тогда произойдет очень мощное выделение энергии. Звезда как бы упадет сама на себя, но не превратится сразу в черную дыру, а произойдет взрыв сверхновой. Это очень важное событие. Оно не только имеет огромное значение в жизни отдельной звезды, отмечая ее яркий финал, но и позволяет образовывать тяжелые элементы.

В природе некоторые элементы тяжелее железа могут образовываться в заметном количестве практически только при взрывах сверхновых (также массивные ядра элементов могут возникать при слияниях нейтронных звезд и при быстром истечении оболочек красных сверхгигантов). А сверхновые — это в основном результат коллапса ядер массивных звезд (есть еще взрывы сверхкритических белых карликов в двойных системах, но их оставим на потом). Если мы говорим о звезде с массой в 10, 20, может быть, в 30 раз больше солнечной, то после взрыва сверхновой останется нейтронная звезда — крайне интересный объект, очень компактный. Средняя плотность у нейтронной звезды чуть выше, чем у атомного ядра<sup>1</sup>, а в центре, разумеется, еще больше. Неудивительно, что такой объект имеет очень интересные физические свойства. Если же звезда вначале была еще более массивной, то, скорее всего, она превращается в черную дыру. То есть все-таки коллапс не останавливается — все схлопывается, гравитация побеждает все остальные силы, и образуется черная дыра. Иногда это может произойти со взрывом, а иногда — нет. Таким образом, у разных звезд разные судьбы.

## Звезды и элементы

Всем известно, что небо ночью темное. Однако объяснить это явление отнюдь непросто. Лишь в XVIII веке эта загадка стала очень активно обсуждаться учеными и была названа парадоксом Ольберса. Хотя, как полагается, Ольберс был не первым, кто обратил внимание на то, что небо ночью темное, и задумался над этим, связав этот факт с вопросом о бесконечной Вселенной, заполненной звездами<sup>2</sup>. Проблема в том, что, чтобы небо было темным,

---

<sup>1</sup> Так называемая ядерная плотность составляет  $2,3 \times 10^{14}$  грамм в кубическом сантиметре.

<sup>2</sup> Существует шуточный закон Арнольда, названный в честь великого русского математика, гласящий, что парадоксы и законы чаще всего носят имя не того, кто их впервые придумал. Часть шутки состоит в том, что это верно и для закона Арнольда (его скорее стоит связывать с именем Роберта Мертона). Что касается парадокса Ольберса, или так называемого фотометрического парадокса, то он, видимо, впервые детально обсуждался швейцарским астрономом Жаном-Филиппом Луи де Шезо

нужно чтобы звезды где-то заканчивались. Потому что если бесконечная Вселенная заполнена звездами, то в таком вечном мире мы бы своим взглядом везде упирались в поверхность звезды и все небо сияло бы как поверхность Солнца<sup>1</sup>. Мы видим, что это не так — значит, звезды где-то заканчиваются. И самое интересное то, что заканчиваются они не в пространстве, а во времени — Вселенная имеет конечный возраст.

Глядя на самые близкие звезды, мы видим их такими, какими они были несколько лет или несколько десятков лет назад. Большинство звезд на небе видны нам такими, какими они были сотни и тысячи лет назад. Далекие галактики мы видим такими, какими они были миллиарды лет назад. Но нет и не может быть на нашем небе источника, который бы мы видели таким, каким он был 14 миллиардов лет назад, потому что 14 миллиардов лет назад никаких из наблюдаемых нами источников не было. Может быть, наша Вселенная бесконечна, но свет от далеких звезд просто до нас еще не добрался, поэтому у нас темное небо над головой и поэтому возникает вопрос: какими же были самые-самые первые звезды?

Дело в том, что, когда Вселенная образовалась, в ней успели появиться только первые два элемента: водород и гелий (плюс были еще мелкие добавки лития, одного из изотопов водорода — дейтерия, но это несущественные для нашего разговора детали). Соответственно, первые звезды могли состоять только из водорода и гелия, и взрывы этих объектов как раз и давали начало рождению первых тяжелых элементов. Потом цепочка продолжалась: выброшенное вещество входило в состав нового поколения

---

в середине XVIII столетия. А в самом общем виде проблема была сформулирована еще Иоганном Кеплером в 1610 году, для которого это был аргумент против бесконечности Вселенной.

<sup>1</sup> Заполнение Вселенной пылью лишь частично решает проблему. Так можно избавиться от видимого излучения далеких звезд, но пыль нагреется, поглощая излучение, и будет переизлучать его. Или даже испарится, если нагреется слишком сильно. Так что проблема темного неба остается, сдвинувшись в другой спектральный диапазон. Детальнее о парадоксе Ольберса и связанных с ним космологических вопросах можно прочесть в книге Владимира Решетникова «Почему небо темное», изд-во «Век-2» (2012).

звезд и т. д. Последующие поколения звезд имели уже другой химический состав.

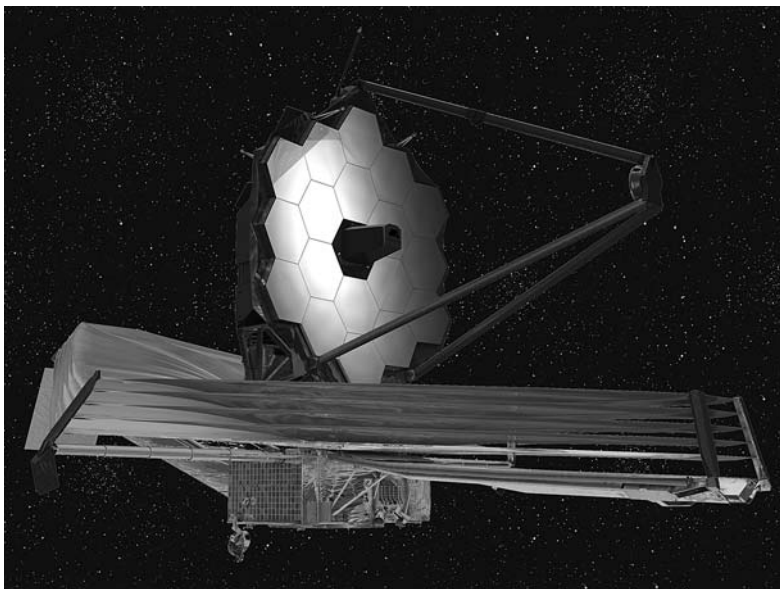
Первые звезды, состоявшие только из водорода и гелия, могли быть очень массивными. В тысячу раз тяжелее Солнца! Сейчас таких уже не делают. Они могли породить первые черные дыры, которые были в десятки раз тяжелее тех, что сейчас возникают из звезд. А потом первые звездные черные дыры стали зародышами того, что сейчас мы наблюдаем как сверхмассивные черные дыры в центрах галактик. Большой вопрос связан с тем, могли ли самые первые звезды быть легкими (легче Солнца). Вначале считалось, что нет. Моделирование показывало, что в облаке газа с массой около 100 000 масс Солнца возникает 1–2 массивные звезды. Однако расчеты, проводимые в последнее время, опровергают эту точку зрения. Компьютерные симуляции показывают, что в некоторых случаях возникает по 5–6 звезд и некоторые из них оказываются настолько легкими, что время их жизни превышает современный возраст Вселенной.

Чтобы увидеть первые звезды, астрономы идут двумя путями. Во-первых, они пытаются строить все более мощные инструменты. По всей видимости, понадобятся новые аппараты за пределами земной атмосферы — космические телескопы следующего поколения, чтобы увидеть хотя бы взрывы самых первых звезд. Увидеть их где-то там, в прошлом, спустя всего лишь десятки миллионов лет после рождения Вселенной. Свет от них будет сильно покрасневшим из-за расширения Вселенной (она растягивается более чем в 10 раз за время распространения света от первых звезд, т. е. длина волны фотонов возрастает во столько же раз), поэтому аппараты должны наблюдать в длинноволновой области спектра, где земная атмосфера в основном непрозрачна. Большие надежды возлагают на космический телескоп имени Джемса Вебба (JWST). Его гигантское, по меркам орбитальных аппаратов, зеркало позволит увидеть то, что ранее оставалось скрытым от нас<sup>1</sup>. Однако, если в ранней Вселенной рождались

---

<sup>1</sup> Гигантский телескоп будет раскладываться на орбите. Как это будет выглядеть, можно посмотреть на подробных анимациях: [http://jwst.nasa.gov/videos\\_deploy.html](http://jwst.nasa.gov/videos_deploy.html).

не только очень тяжелые звезды, но и маленькие — с массой, скажем, около половины массы Солнца, то они могли дожить до наших дней. И тогда, например, где-то в нашей Галактике, даже в наших окрестностях, крутятся звезды с аномальным химическим составом — там только водород и гелий.



James Webb Space Telescope — JWST. Это космический телескоп следующего поколения. Он должен прийти на смену космическому телескопу имени Хаббла. Одна из основных задач для этого инструмента — увидеть взрывы первых массивных звезд.

Регулярно, примерно раз в год, сообщается, что найдена новая рекордная, еще менее металлическая звезда, как говорят астрономы. Астрономы очень просто подходят к терминологии в данном случае — все элементы тяжелее гелия они называют металлами. Так вот, такие звезды ищут, но пока не добрались до первичного состава. Ищут и далекие объекты с первичным составом. На больших красных смещениях, естественно, мы наблюдаем не отдельные звезды, а, например, большие газовые облака с очень низким содержанием тяжелых элементов. Но как

хочется в итоге решить эту важнейшую задачу — в конце концов добраться до первых звезд.

Звезды — самые первые объекты во Вселенной. Современные компьютерные модели эволюции нашего мира говорят нам, что звезды образуются раньше галактик, поэтому самый первый свет, который возник во Вселенной, — это все-таки свет звезд. За исключением того, что когда-то светила сама Вселенная, потому что была еще горячей.

Безусловно, люди воспринимают звезды как что-то далекое. Даже Солнце — это все-таки достаточно далекий объект и к тому же, на наше счастье, объект достаточно спокойный. Оно не взрывается, никуда не девается, очень стабильно светит. Разве только на нем происходят какие-то вспышки, которые, видимо, не могут сильно навредить биологическому миру на Земле. Но теперь человечество становится более уязвимым из-за своей зависимости от разнообразной электроники.

Есть мнение, основанное на наблюдении большого количества звезд, похожих на Солнце, что где-то раз в тысячу лет на нашей звезде происходят достаточно мощные вспышки, в сотни и тысячи раз более мощные, чем уже наблюдавшиеся солнечные. Они сопровождаются не только усилением электромагнитного излучения на некоторых длинных волнах, но и так называемым корональным выбросом. Поток солнечной плазмы устремляется во внешнее пространство. Если бы такое событие произошло сейчас (и выброс был бы направлен на Землю), то оно вывело бы из строя практически все космические аппараты, а также нарушило бы систему электропитания и радиосвязи на Земле. Вот это, наверное, и есть самая большая космическая проблема для нашей цивилизации — не падение астероидов, не что-то, что прямо приведет к исчезновению жизни на Земле (и что происходит примерно раз в десятки миллионов лет), а то, что выведет из строя электрические приборы, из-за чего перестанут работать спутники и прекратится подача электроэнергии. Это может быть крайне серьезной проблемой. Правда, повторим, такое на Солнце происходит редко. Солнце — очень спокойная звезда и поэтому воспринимается как далекий и безобидный объект. Пока еще,

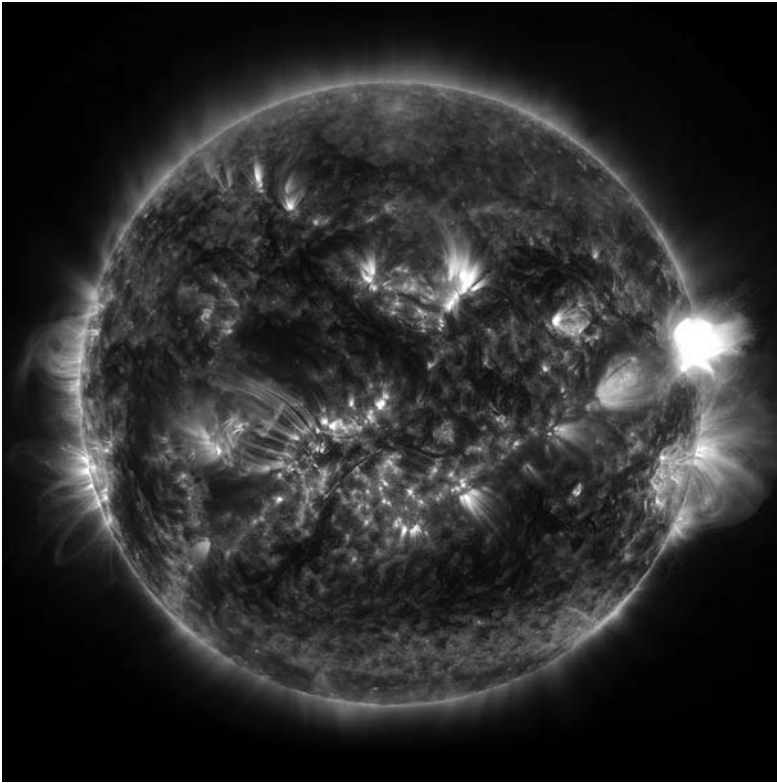
максимум, чего нам приходится опасаться, — это обгореть на пляже.

Довольно мощная вспышка произошла на Солнце в 1859 году. Ее называют событием Каррингтона — по имени астронома, описавшего ее. Современной электроники тогда не было, но были серьезные сбои и аварии в системе телеграфных линий (телеграфистов било током!). Произошла мощнейшая геомагнитная буря. Полярные сияния наблюдались на Кубе, в Колумбии и Мексике и едва ли не в Центральной Африке. Возможно, с тех пор несколько раз на Солнце происходили столь же мощные вспышки, но корональный выброс не был направлен на Землю.

Позже, уже в XX веке, мощные вспышки приводили к большим проблемам в линиях электропередачи. В 1989 году произошла крупная авария в канадских электросетях. Были приняты необходимые меры, чтобы в дальнейшем мы не могли пострадать от подобных событий. По статистике, лишь 4% сбоев в системе электропередачи в США связаны с солнечными вспышками. Однако есть и более тревожные данные.

Анализ содержания изотопа углерод-14 показал, что в VIII веке его содержание было аномально высоким. Если предположить, что это было последствием солнечной вспышки, то она должна была бы быть очень мощной. Углерод-14 образуется в атмосфере при попадании в нее протонов высокой энергии (их как раз много выбрасывается в результате солнечных вспышек) или гамма-квантов (тогда причиной аномального роста содержания изотопа мог быть гамма-всплеск). Протон или гамма-квант взаимодействует с веществом атмосферы. В результате, в частности, образуются нейтроны с относительно небольшой (тепловой) энергией. Когда такой нейтрон взаимодействует с ядром азота, то образуется углерод-14. Затем он может накапливаться, например, в деревьях. От события Каррингтона такой аномалии нет. Поэтому вспышка в VIII веке должна была быть намного мощнее. Тогда на живом мире это не сказалось, но если бы такое произошло сейчас, то у нас были бы проблемы. К счастью, для мощной вспышки нужно, чтобы образовалась очень большая группа солнечных пятен. Так что мы узнаем о грозящей опасности заблаговременно.





© NASA/SDO

Вспышка на Солнце, зарегистрированная 12 января 2015 года. Этот портрет Солнца в экстремальном ультрафиолете получен аппаратом Solar Dynamics Observatory американского космического агентства.

Итак, звезды очень важны для нашей жизни. Мы не только ничего бы не видели, если бы звезд не было — нас действительно не существовало бы, потому что мы состоим в основном из элементов тяжелее гелия. Давайте еще раз вспомним про эти самые тяжелые элементы.

Звезды — это самые главные термоядерные печи во Вселенной, где легкие элементы превращаются в тяжелые. За счет взрывов сверхновых синтез может идти дальше железа. Помните, в самом начале мы говорили, что и свет, связанный с работой атомных электростанций, в конечном счете восходит к звездам. Так

вот, не было бы взрывающихся звезд — не было бы и урана, используемого для выработки электроэнергии.

Не будем забывать, что, когда во Вселенной закончилась короткая стадия первичного нуклеосинтеза, длившаяся лишь пару минут, в ней были только водород и гелий. А мы-то с вами состоим вовсе не из водорода и гелия (водорода по числу атомов в нас много, но по массе он не составляет основную часть нашего тела). То есть на самом деле практически все, что мы видим вокруг, как и мы сами, состоит из атомов, которые синтезировались в звездах. Вначале были только составные части — условно говоря, протоны и немножко нейтронов, поскольку есть гелий. И именно в звездах или при их взрывах образовались углерод, кислород, азот, кальций и т. д., из которых мы в основном и состоим.

Таким образом, не будет большим преувеличением сказать, что каждый атом в нашем теле побывал когда-то внутри какой-то звезды. Может быть, даже неоднократно, поскольку нашей Солнечной системе около пяти миллиардов лет (чуть меньше), а Вселенной — около 13 (чуть больше). Соответственно, у Галактики было достаточно времени, чтобы прошло несколько циклов и выброшенное звездами вещество успело перемешаться в межзвездной среде, облака в межзвездной среде начали конденсироваться, образовалось новое поколение звезд, они взорвались, цикл повторился, и в итоге образовалась Солнечная система с планетами и ее обитателями, состоящими уже из более тяжелых элементов. Таким образом, может быть действительно звезды — самые главные объекты во Вселенной.

## **Будущее звездной Вселенной**

Что же ждет звездный мир в будущем? Сейчас процесс выглядит довольно стационарно. Звезды непрерывно формируются из межзвездной среды (в нашей Галактике образуется несколько звезд в год, а есть системы, где темп в десятки раз выше). В конце своей жизни они сбрасывают внешние слои. Делают они это или спокойно, или в результате взрыва сверхновой. В итоге что-то остается (белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра),

но большая часть вещества попадает обратно в межзвездную среду и может войти в состав следующего поколения звезд. Однако если мы подумаем об очень далеком будущем Вселенной — речь идет не о миллионах или миллиардах, а о десятках или даже сотнях миллиардов лет, — то, конечно же, газ будет потихонечку истощаться. То есть спустя многие-многие годы новые звезды будут образовываться очень редко. Сейчас мы это уже видим в эллиптических галактиках — там очень мало плотного холодного газа, из которого легко могут образоваться новые светила, и поэтому все звезды уже очень старые.



© NASA, ESA,  
and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Фотографии эллиптической и дисковой галактик. Эллиптическая галактика ESO 325-G004 входит в состав скопления Abell S0740 (вокруг видно много других галактик разных типов). А дисковая — известный объект каталога Мессье, M101. В эллиптической газ уже практически закончился и процесс звездообразования очень слаб. Ярких массивных звезд, дающих голубоватый свет, там практически нет. В дисковых галактиках газа еще много, и красивый спиральный узор образован в основном яркими молодыми массивными звездами, которые сформировались менее нескольких десятков миллионов лет назад.

В далеком будущем это ждет все галактики: новые поколения звезд не будут формироваться, и тогда лишь уже образовавшиеся легкие звезды будут потихоньку доживать свой век. Ведь массивные звезды живут не очень долго, они быстро взорвутся, превратятся в нейтронные звезды и черные дыры. А маломассивные

звезды могут существовать десятки миллиардов лет, пока не пережгут весь свой водород и не дойдут до стадии красного гиганта, а потом — белого карлика.

В конце концов, если Вселенная будет вечно расширяться, то через сотни миллиардов лет она останется без звезд. Мир станет «безвидным и пустым»: из объектов звездных масс будут в нем лишь белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. В более отдаленном будущем (которое и вообразить трудно) скорее всего, так или иначе начнут распадаться и они. Белые карлики и нейтронные звезды — из-за распада протонов. А черные дыры — из-за излучения Хокинга. Правда, и распад протонов, и хокинговское излучение пока остаются гипотезами, хотя и очень привлекательными.

К счастью, пока у нас есть и белые карлики, и черные дыры, и нейтронные звезды. Последние проявляют себя как источники очень разных типов.



# **Многообразие нейтронных звезд**



## **Все хорошо в меру**

Нейтронные звезды — самые интересные объекты во Вселенной. Это очень легко доказать. Возьмем любой объект. Например, ядро звезды. В принципе, при наличии неограниченных технических возможностей, можно любой достаточно массивный объект (начиная с красного карлика) превратить в нейтронную звезду, если его сильно сжать. В природе это происходит так: ядро звезды, довольно занимательный объект сам по себе, сжимается гравитацией. Источники энергии внутри исчерпываются, и ядро начало схлопываться — коллапсировать. Оно сжимается и становится все интереснее.

В физике, как правило, когда параметры достигают экстремальных значений, появляется что-то новое и примечательное. При существенном уплотнении вещество ведет себя не так, как при обычных значениях плотностей. Очень сильные магнитные поля меняют свойства вещества не так, как обычные магнитные поля. Количество переходит в качество. Так вот, представим, что мы сжимаем и сжимаем объект, и становится все интереснее и интереснее. Мы можем наблюдать крайне любопытные физические процессы, не встречающиеся в других условиях. Но если сжать его слишком сильно — получится черная дыра. То есть все исчезнет в этой черной дыре. Это уже не так увлекательно, потому что у черной дыры всего один основной параметр — масса. Кроме этого, черная дыра может вращаться, и это важно для описания пространства-времени в непосредственной близости от нее. Правда, эффект значителен лишь при экстремальном вращении, которое в природе у черных дыр достигается нечасто. Наконец, у дыры может существовать электрический