

Квазар

Выпуск №4 от 01.05.2016



**Первые секунды
после взрыва**

стр. 12-15

**Синтез
Элементов**

стр. 16-33

**История
Вселенной**

стр. 4-11



Здравствуй, дорогой читатель!

Тебя приветствует редакция научно-познавательного журнала «Квазар»! Перед тобой лежит майский выпуск, полный интересных и загадочных статей. Рады сообщить, что мы сохранили большинство наших концепций, в том числе и следование одной тематике.

Майский выпуск называется: «История звезды». Мы поговорим о наших представлениях об окружающем мире, которые менялись на протяжении тысячелетий. Расскажем о современных теориях, которые пытаются описать явления наблюдаемые на практике. Конечно же, мы не сможем пройти мимо теории Большого Взрыва, которая является основной теорией принятой научным сообществом для описания многих явлений. Сильно копнем вглубь химических, а точнее ядерно-химических процессов протекающих внутри звезд.

Мы приветствуем как новых читателей, так уже и старожилов «Квазара». Желаем приятного времяпровождения с «Квазаром» в руке, а также напоминаем, что все выпуски нашего журнала взаимосвязаны: вам будет гораздо проще воспринимать информацию, если вы ознакомитесь и с предыдущими выпусками журнала.

Еще один важный момент, касающийся концептуальности журнала. В большинстве случаев статьи из разных рубрик взаимосвязаны, их последовательность не случайна, для полного понимания темы рекомендуем читать журнал полностью. Ведь ни для кого не секрет, что все естественные науки неразрывно взаимосвязаны. Приятного чтения!

С уважением, редакция журнала «Квазар»

ИСТОРИЯ

ВСЕЛЕННОЙ





Кто мы? Зачем мы здесь? Как мы стали тем, кем являемся?

Человек всегда интересовался тем, что его окружало. В древности люди были убеждены в том, что Земля плоская, держится на трех китах, а те на черепахе. Хотя... Почему в древности?

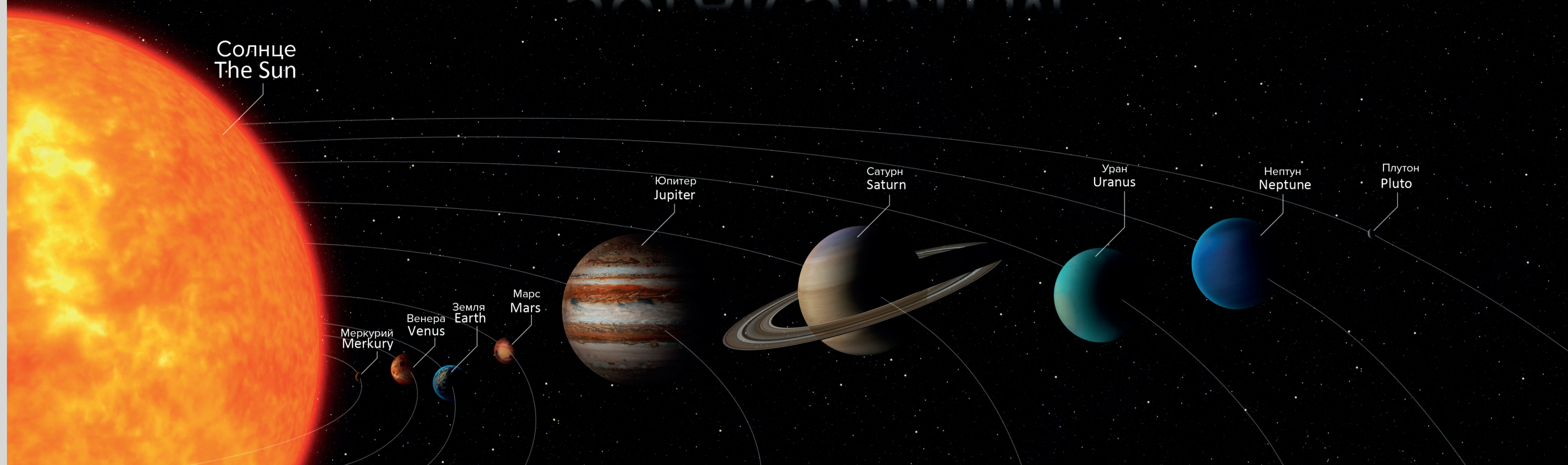
В предисловии к «Краткой истории времени» Стивен Хокинг писал:

Как-то один известный ученый (говорят, это был Бертран Рассел) читал публичную лекцию об астрономии. Он рассказывал, как Земля обращается вокруг Солнца, а Солнце, в свою очередь, обращается вокруг центра огромного скопления звезд, которое называют нашей Галактикой. Когда лекция подошла к концу, из последних рядов зала поднялась маленькая пожилая леди и сказала: «Все, что вы нам говорили, - чепуха. На самом деле наш мир - это плоская тарелка, которая стоит па спине гигантской черепахи». Снисходительно улыбнувшись, ученый спросил: «А на чем держится черепаха?» - «Вы очень умны, молодой человек, - ответила пожилая леди. - Черепаха - на другой черепахе, та - тоже на черепахе, и так все ниже и ниже».

Вы должно быть улыбнулись прочитав эту историю. Но как же большинство здравомыслящих людей в нашем мире убедилось, что Земля не плоская, что она не держится на трех китах, что Вселенная расширяется? Что мы вообще знаем о Вселенной?

Что же, пришло время пройти всю историю развития Вселенной до нашего времени. От начала, и до конца.

SOLAR SYSTEM



Еще в древности, греческий философ Аристотель в книге «О небе» (340 г. до н. э.) высказал свое несогласие с мнением, что Земля это плоская тарелка. Более того, он догадался, что Земля – это круглый шар. Во-первых, Аристотеля смущало то, что лунные затмения происходят тогда, когда Земля оказывается между Луной и Солнцем, при этом она отбрасывает на Луну круглую тень, что является веским поводом для того, чтобы утверждать, что Земля – это шар. Даже если бы земля была плоским диском, тень была бы эллиптической. Во-вторых, греки часто путешествовали. Они сделали наблюдение, что в южных районах Полярная звезда на небе располагается ниже, чем в Северных, что объясняется тем, что она находится прямо над Северным полюсом, и людям с экватора кажется, что полярная звезда находится прямо над горизонтом. Поразительно, но Аристотель смог посчитать длину экватора, зная только разницу в кажущемся положении Полярной звезды в Египте и в Греции. Численные оценки оказались в два раза больше значения, принятого сейчас.

Однако, несмотря на свои достижения, Аристотель повел людей в неправильную сторону. Он думал, что Земля неподвижна, а Солнце, Луна, планеты и звезды обращаются вокруг нее по круговым орбитам. Он так полагал, потому что считал Землю центром Вселенной, а круговое движение – самым совершенным.

Еще один выдающийся ученый, Птолемей, развил идеи Аристотеля, и даже создал полную космологическую модель. Согласно ей, Земля стоит в центре, ее окружают восемь сфер, несущими на себе Луну, Солнце, Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн. Сами планеты движутся по меньшим окружностям, скрепленным с соответствующими сферами. Довольно грубая оценка, на удивление, смогла в какой то мере объяснить сложный путь, который совершают планеты. На самой последней сфере располагаются неподвижные звезды, которые остаются в одном и том же положении друг

относительно друга, движутся как единое целое. Что находится дальше – неизвестно, но и знать это, не было необходимости.

Однако, как вы могли бы догадаться, модель Птолемея совершала грубые ошибки при предсказании, например, траектория Луны в одних местах подходит к Земле в два раза ближе, чем в других. Иными словами, Луна должна быть в два раза больше в определенном месте на Земле. Птолемей знал об этом недостатке, но его теорию приняли, чему поспособствовало благодарение со стороны христианской церкви. Как же так, спросите вы, религиозное заведение принимает научную модель? Так и есть, просто модель была удобной для них, она не противоречила Библии, за последней сферой было много места и для ада, и для рая. Однако, господству геоцентрической (гео – земля) модели должен был прийти конец.

Что в принципе, и произошло в 1514 году, когда Коперник предложил простую и правдивую модель – Солнце стоит неподвижно в центре, а Земля и другие планеты обращаются вокруг нее по круговым орбитам. Опасаясь нападок со стороны Церкви, он продвигал свою теорию анонимно. Прошло почти столетие, прежде чем его начали слушать.

Однажды, два астронома, Иоганн Кеплер и Галилео Галилей – публично выступили в поддержку теории Коперника, хоть даже и были какие-то разногласия с его моделью, в плане предсказания орбит планет. Теория Аристотеля-Птолемея окончательно сгинула в небытие, когда в 1609 г. Галилей начал наблюдать ночное небо с помощью самостоятельно изобретенного телескопа. Первым делом, он заметил, что у Юпитера есть свои спутники, вращающиеся вокруг него. Это уже означало, что космическому телу, вовсе не обязательно вращаться вокруг Земли.

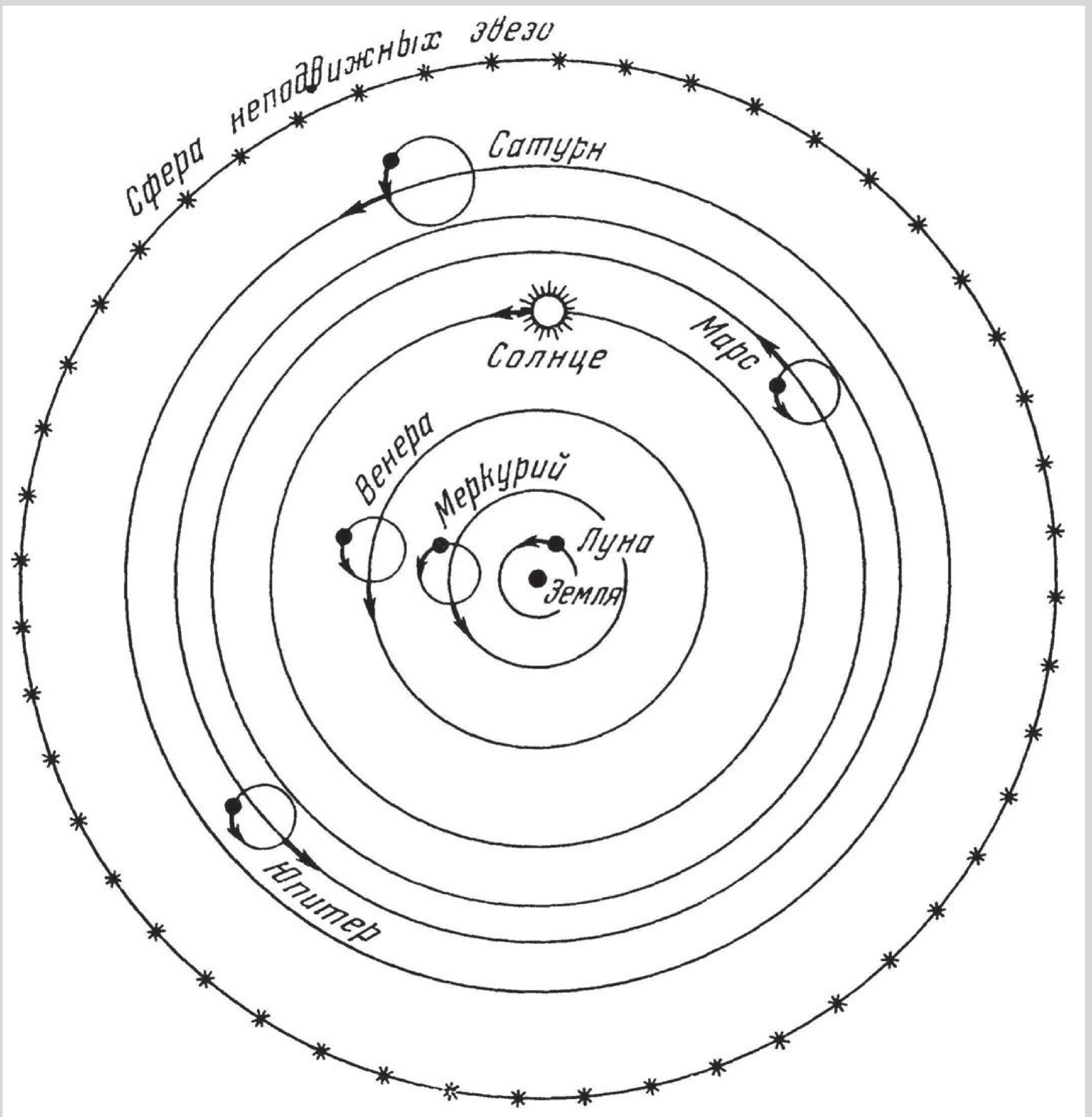
В то же время, Кеплер модифицировал теорию Коперника, отойдя от привычных «совершенных»

круговых орбит, и предположив, что планеты вращаются по эллиптическим орбитам (вытянутые окружности). Теперь предсказания совпадали с результатами наблюдений. Однако это завело Кеплера в тупик, ведь сей факт он обнаружил совершенно случайно, и уже не мог объяснить движение небесных тел обычными магнитными силами. Объяснение пришло в 1687 году, когда Исаак Ньютон опубликовал знаменитую книгу «Математические начала натуральной философии». Там Ньютон, так сказать, выложил по полной, он не только выдвинул теорию движения материальных тел во времени и пространстве, но и разработал сложные математические методы, необходимые для анализа движения небесных тел.

Однако Исаак Ньютон известен большинству за другое, не менее великое открытие – закон всемирного тяготения. Согласно этому закону, всякое тело во Вселенной притягивается к любому другому телу. Причем направление и величина этой силы прямо пропорционально зависит от массы этих тел, и обратно пропорционально зависит от расстояния между ними. Иными словами, чем больше масса, и чем меньше расстояние – тем сильнее сила притяжения.

Кстати, помните историю с яблоком? Стивен Хокинг говорил об этом следующее:

«Рассказ о том, что Ньютона вдохновило яблоко, упавшее ему на голову, почти наверняка недоосто-



Модель Птолемея



Кто только не слышал историю про яблоко, упавшее на Исаака Ньютона?

верен. Сам Ньютон сказал об этом лишь то, что мысль о тяготении пришла, когда он сидел в «созерцательном настроении», и «поводом было падение яблока».

Однако было и несколько недостатков у теории Ньютона. Согласно его теории, звезды должны притягиваться друг к другу, т.е. не могут быть неподвижными (помните восемь сфер?). Почему бы тогда им не сколлапсировать?

«В 1691 г. в письме Ричарду Бентли, еще одному выдающемуся мыслителю того времени, Ньютон говорил, что так действительно должно было бы произойти, если бы у нас было лишь конечное число звезд в конечной области пространства. Но, рассуждал Ньютон, если число звезд бесконечно и они более или менее равномерно распределены по бесконечному пространству, то этого никогда не произойдет, так как нет центральной точки, куда им нужно было бы падать».

Эти рассуждения - пример того, как легко попасть впросак, ведя разговоры о бесконечности. В бесконечной Вселенной любую точку можно считать цен-

тром, так как по обе стороны от нее число звезд бесконечно. Лишь гораздо позже поняли, что более правильный подход - взять конечную систему, в которой все звезды падают друг на друга, стремясь к центру, и посмотреть, какие будут изменения, если добавлять еще и еще звезд, распределенных приблизительно равномерно вне рассматриваемой области. По закону Ньютона дополнительные звезды в среднем никак не повлияют на первоначальные, т.е. звезды будут с той же скоростью падать в центр выделенной области. Сколько бы звезд мы ни добавили, они всегда будут стремиться к центру.

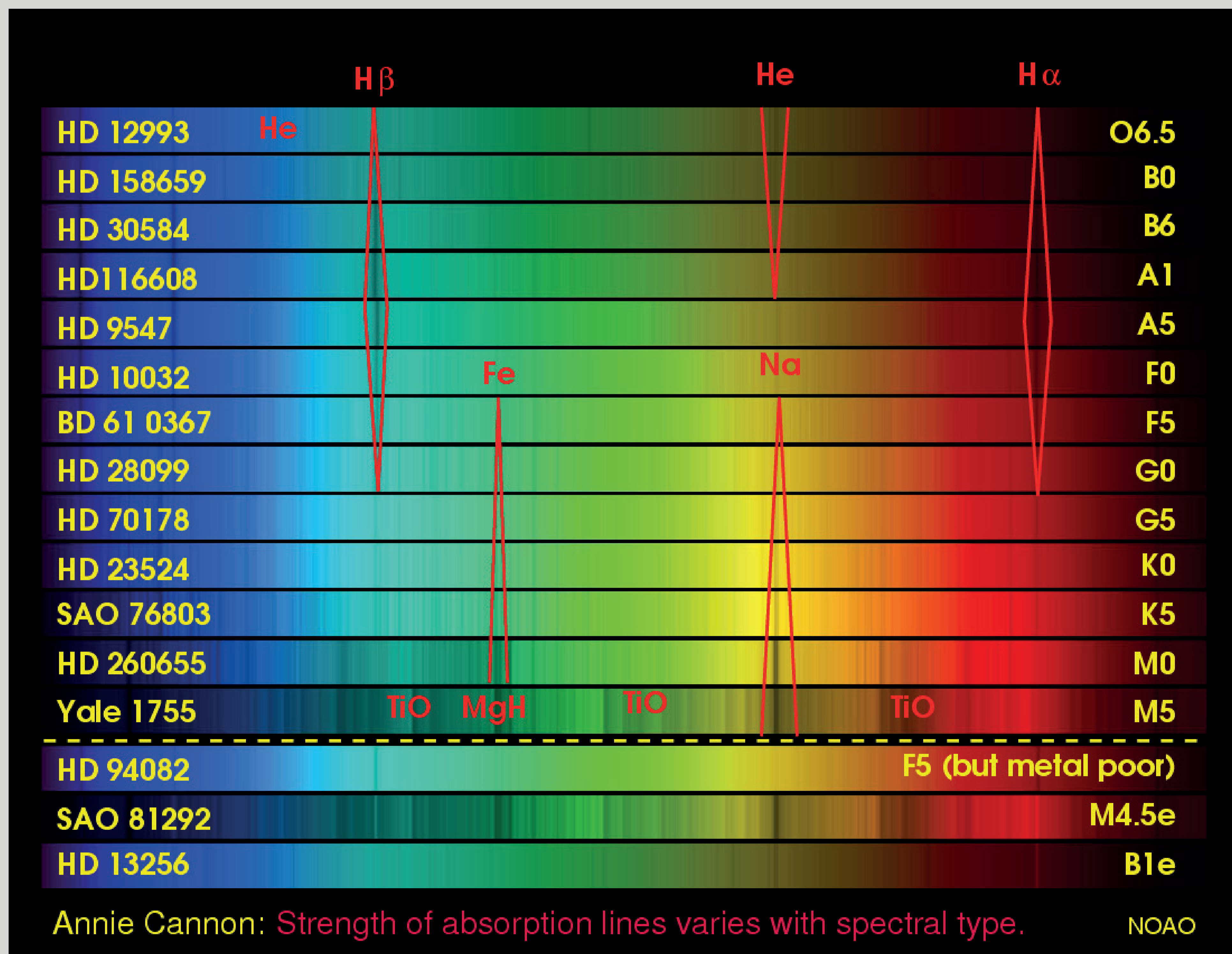
Интересно, каким было общее состояние научной мысли до начала XX в.: никому и в голову не пришло, что Вселенная может расширяться или сжиматься. Все считали, что Вселенная либо существовала всегда в неизменном состоянии, либо была сотворена в какой-то момент времени в прошлом примерно такой, какова она сейчас. Отчасти это, может быть, объясняется склонностью людей верить в вечные истины, а также особой притягательностью той мысли, что, пусть сами они состарятся и умрут, Вселенная останется вечной и неизменной».

Интересный факт, что никому и в голову не могло прийти, что Вселенная может расширяться. Были попытки модифицировать теорию, сделав гравитационную силу отталкивающей на очень больших расстояниях. Это не сильно сказывалось на движениях планет, но позволяло хоть как-то объяснить статичность вселенной. То есть существовало некоторое равновесие, за счет притяжения к близким звездам и отталкивания от далеких. Сейчас же, ученые уверены, что такое равновесие слишком хрупкое, поэтому легко бы нарушилось. В 1924 г., астроном Эдвин Хаббл показал, что наша Галактика не единственная. В самом деле, существует множество других галактик, разделенных огромными областями пустого пространства, или как некоторые предполагают, заполненного темной материей.

Для доказательства Хаббл требовалось определить расстояния до этих галактик, которые настолько велики, что, в отличие от положений близких звезд, видимые положения галактик действительно не меняются. Поэтому для измерения расстояний Хаббл был вынужден прибегнуть

к косвенным методам. Видимая яркость звезды зависит от двух факторов: от того, какое количество света излучает звезда (ее светимости), и от того, где она находится. Яркость близких звезд и расстояние до них мы можем измерить; следовательно, мы можем вычислить и их светимость. И наоборот, зная светимость звезд в других галактиках, мы могли бы вычислить расстояние до них, измерив их видимую яркость. Хаббл заметил, что светимость некоторых типов звезд всегда одна и та же, когда они находятся достаточно близко для того, чтобы можно было производить измерения. Следовательно, рассуждал Хаббл, если такие звезды обнаружатся в другой галактике, то, предположив у них такую же светимость, мы сумеем вычислить расстояние до этой галактики. Если подобные расчеты для нескольких звезд одной и той же галактики дадут один и тот же результат, то полученную оценку расстояния можно считать надежной.

Таким путем Хаббл рассчитал расстояния до девяти разных галактик. Теперь известно, что наша Галактика - одна из нескольких сотен тысяч мил-



Спектры некоторых звезд. В столбце справа показаны астрономические классы звезд. Темные линии в непрерывной цветной полосе - места поглощения. Некоторые элементы отмечены на диаграмме

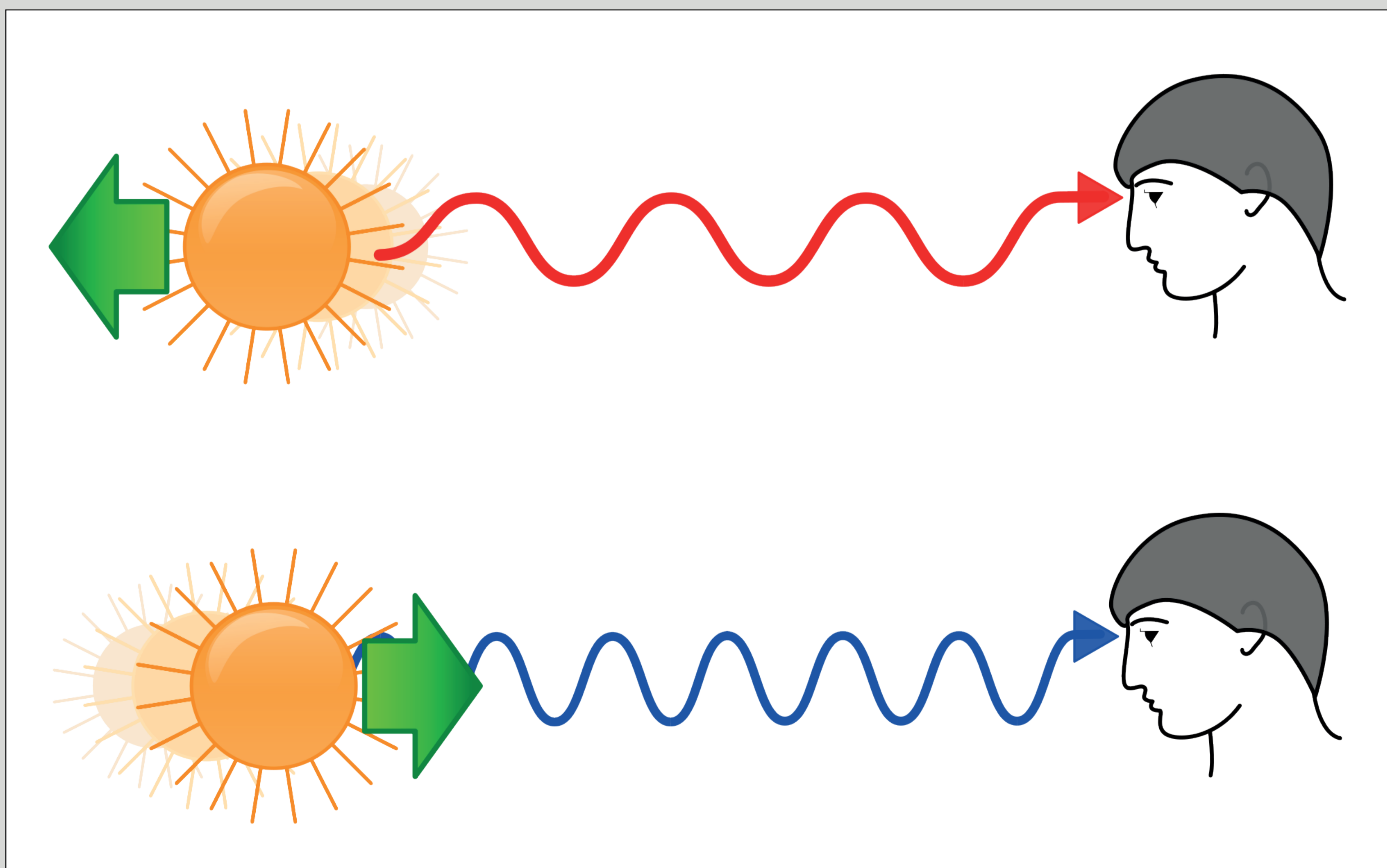
лионов галактик, которые можно наблюдать в современные телескопы, а каждая из этих галактик в свою очередь содержит сотни тысяч миллионов звезд. Наша Галактика имеет около ста тысяч световых лет в поперечнике. Она медленно вращается, а звезды в ее спиральных рукавах каждые несколько сотен миллионов лет делают примерно один оборот вокруг ее центра. Наше Солнце представляет собой обычную желтую звезду средней величины, расположенную на внутренней стороне одного из спиральных рукавов.

Звезды находятся так далеко от нас, что кажутся просто светящимися точками в небе. Мы не различаем ни их размеров, ни формы. Как же можно говорить о разных типах звезд? Для подавляющего большинства звезд существует только одно характерное свойство, которое можно наблюдать - это цвет идущего от них света. Ньютон открыл, что, проходя через трехгранный кусок стекла, называемый призмой, солнечный свет разлагается, как в радуге, на цветовые компоненты (спектр). Настроив телескоп на какую-нибудь отдельную звезду или галактику, можно аналогичным образом разложить в спектр свет, испускаемый этой звездой или галактикой.

Разные звезды имеют разные спектры, но относительная яркость разных цветов всегда в точности такая же, как в свете, который излучает какой-нибудь раскаленный докрасна предмет.

(Свет, излучаемый раскаленным докрасна непрозрачным предметом, имеет очень характерный спектр, зависящий только от температуры предмета - тепловой спектр. Поэтому мы можем определить температуру звезды по спектру излучаемого ею света). Кроме того, мы обнаружим, что некоторые очень специфические цвета вообще отсутствуют в спектрах звезд, причем отсутствующие цвета разные для разных звезд. Поскольку, как мы знаем, каждый химический элемент поглощает свой определенный набор характерных цветов, мы можем сравнить их с теми цветами, которых нет в спектре звезды, и таким образом точно определить, какие элементы присутствуют в ее атмосфере В 20-х годах, когда астрономы начали исследование спектров звезд других галактик, обнаружилось нечто еще более странное: в нашей собственной Галактике оказались те же самые характерные наборы отсутствующих цветов, что и у звезд, но все они были сдвинуты на одну и ту же величину к красному концу спектра.

Чтобы понять смысл сказанного, следует сначала разобраться с эффектом Доплера. Как мы уже знаем, видимый свет - это колебания, или волны электромагнитного поля. Частота (число волн в одну секунду) световых колебаний чрезвычайно высока - от четырехсот до семисот миллионов миллионов волн в секунду. Человеческий глаз воспринимает свет разных частот как разные цвета, причем самые низкие частоты соответствуют красному



Красное и синее смещение. Эффект Доплера.

концу спектра, а самые высокие - фиолетовому. Представим себе источник света, расположенный на фиксированном расстоянии от нас (например, звезду), излучающий с постоянной частотой световые волны. Очевидно, что частота приходящих волн будет такой же, как та, с которой они излучаются (пусть гравитационное поле галактики невелико и его влияние несущественно). Предположим теперь, что источник начинает двигаться в нашу сторону. При испускании следующей волны источник окажется ближе к нам, а потому время, за которое гребень этой волны до нас дойдет, будет меньше, чем в случае неподвижной звезды. Стало быть, время между гребнями двух пришедших волн будет меньше, а число волн, принимаемых нами за одну секунду (т. е. частота), будет больше, чем когда звезда была неподвижна. При удалении же источника частота приходящих волн будет меньше. Это означает, что спектры удаляющихся звезд будут сдвинуты к красному концу (красное смещение), а спектры приближающихся звезд должны испытывать фиолетовое смещение.

Такое соотношение между скоростью и частотой называется эффектом Доплера, и этот эффект обычен даже в нашей повседневной жизни. Прислушайтесь к тому, как идет по шоссе машина: когда она приближается, звук двигателя выше (т. е. выше частота испускаемых им звуковых волн), а когда, проехав мимо, машина начинает удаляться, звук становится ниже. Световые волны и радиоволны ведут себя аналогичным образом. Эффектом Доплера пользуется полиция, определяя издали скорость движения автомашин по частоте радиосигналов, отражающихся от них. Доказав, что существуют другие галактики, Хаббл все последующие годы посвятил составлению каталогов расстояний до этих галактик и наблюдению их спектров. В то время большинство ученых считали, что движение галактик происходит случайным образом и поэтому спектров, смещенных в красную сторону, должно наблюдаться столько же, сколько и смещенных в фиолетовую. Каково же было удивление, когда у большей части галактик обнаружилось красное смещение спектров, т. е. оказалось, что почти все галактики удаляются от нас! Еще более удивительным было открытие, опубликованное Хабблом в 1929 г.: Хаббл обнаружил, что даже величина красного смещения не случайна, а прямо пропорциональна расстоянию от нас до галактики. Иными словами, чем дальше находится галактика, тем быстрее она удаляется! А это означало, что Вселенная не может быть статической, как думали раньше, что на самом деле она непрерывно расширяется и расстояния между галактиками все время растут.


Открытие расширяющейся Вселенной было од-

ним из великих интеллектуальных переворотов двадцатого века. Задним числом мы можем лишь удивляться тому, что эта идея не пришла никому в голову раньше. Ньютон и другие ученые должны были бы сообразить, что статическая Вселенная вскоре обязательно начала бы сжиматься под действием гравитации. Но предположим, что Вселенная, наоборот, расширяется. Если бы расширение происходило достаточно медленно, то под действием гравитационной силы оно в конце концов прекратилось бы и перешло в сжатие. Однако если бы скорость расширения превышала некоторое критическое значение, то гравитационного взаимодействия не хватило бы, чтобы остановить расширение, и оно продолжалось бы вечно. Все это немного напоминает ситуацию, возникающую, когда с поверхности Земли запускают ракету. Если скорость ракеты не очень велика, то из-за гравитации она в конце концов остановится и начнет падать обратно. Если же скорость ракеты больше некоторой критической (около одиннадцати километров в секунду), то гравитационная сила не сможет ее вернуть, и ракета будет вечно продолжать свое движение от Земли. Расширение Вселенной могло быть предсказано на основе Ньютоновской теории тяготения в XIX, XVIII и даже в конце XVII века. Однако вера в статическую Вселенную была столь велика, что жила в умах еще в начале нашего века. Даже Эйнштейн, разрабатывая в 1915 г. общую теорию относительности, был уверен в статичности Вселенной.

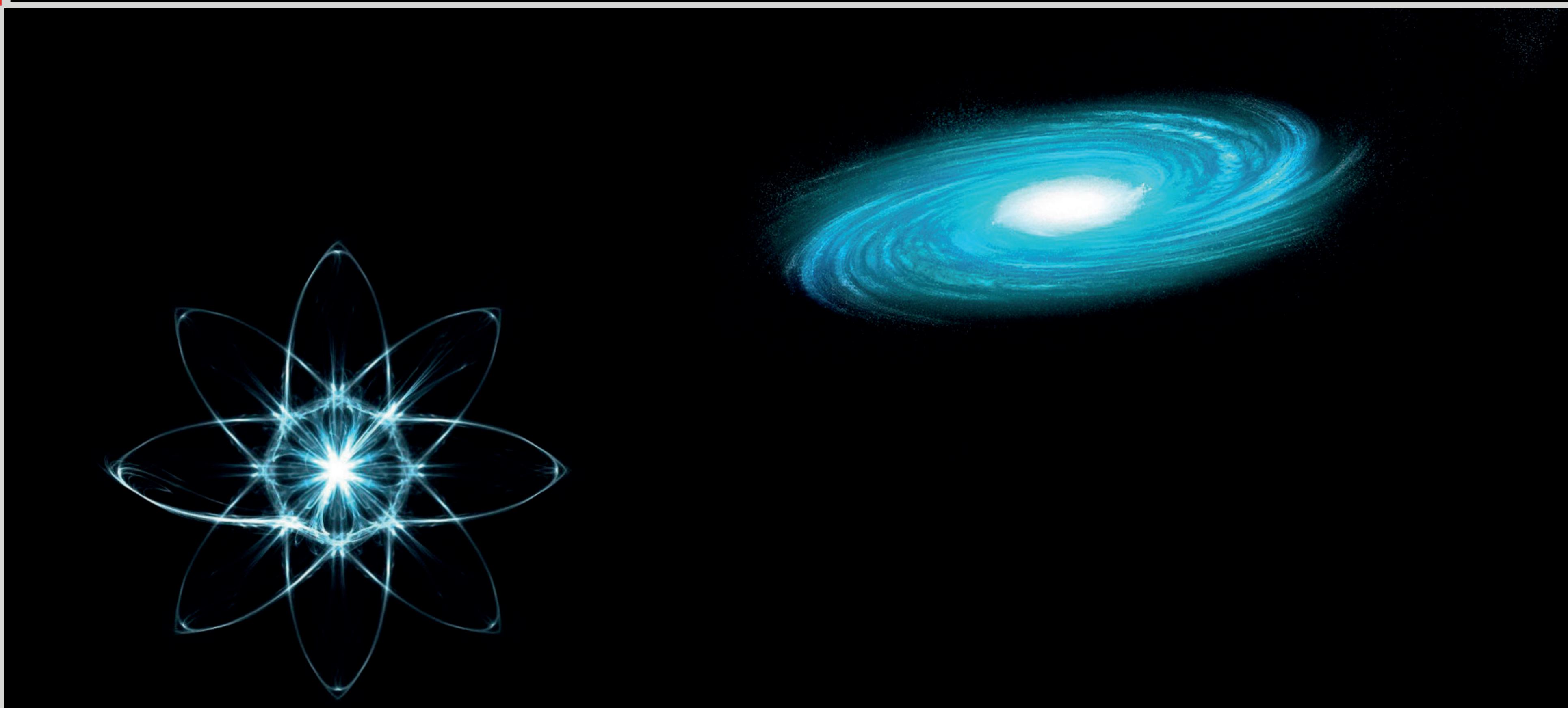
Чтобы не вступать в противоречие со статичностью, Эйнштейн модифицировал свою теорию, введя в уравнения так называемую космологическую постоянную. Он ввел новую «антигравитационную» силу, которая в отличие от других сил не порождалась каким-либо источником, а была заложена в саму структуру пространства-времени. Эйнштейн утверждал, что пространство-время само по себе всегда расширяется и этим расширением точно уравновешивается притяжение всей остальной материи во Вселенной, так что в результате Вселенная оказывается статической. Теперь предлагаем провести мысленный эксперимент. Допустим Вселенная расширяется в данный момент времени. А что если прокрутить время назад? Вселенная будет сжиматься до тех пор, пока не достигнет минимума – безразмерной точки с бесконечно большой плотностью материи – сингулярности. Оттуда начинается история Вселенной, которую описывает Теория Большого взрыва.

Первые секунды после взрыва





Представьте себе Вселенную около 13 млрд лет тому назад. Простая «точка». Ничего. Именно такой представляется Вселенной в самом начале по одной из самых известных теорий в мире - теории большого взрыва. Данная теория рассматривает начало жизни Вселенной, как взрыв космологической сингулярности(точки, которая обладает бесконечной плотностью, а следовательно бесконечной массой, и бесконечно малым объемом), в результате, которого и образовалась наша с вами Вселенная. Давайте вместе пройдемся по каждой эпохе после этого взрыва, и попытаемся узнать, что же является материей, как она образовалась, постараемся ответить на многие вопросы, которые волновали людей много лет



1. Планковская эпоха

(13,77 млрд лет тому назад)

По подсчётам физиков, самой ранней эпохой нашей вселенной была Планковская эпоха, которая характеризуется своими температурами и плотностью, также носящих имя Макса Планка.

В этой эпохе Вселенная была однородным, изотропным (обладающей высокой степенью симметрии в плане физических явлений), а также очень маленьким пространством. В этот период, начали образовываться первые элементарные частицы, такие как кварки, глюоны (кварк-глюонная плазма). Начали формироваться дальнейшие «материалы» нашей Вселенной. Однако, как известно элементарные частицы не берутся из ниоткуда, назревает вопрос:» Откуда и как образовались элементарные частицы в Планковской эпохе?» Ответ довольно прост. Изначально, все элементарные частицы находились в виде энергии, которая высвободилась из сингулярности, а затем начался процесс «материализации» частиц, т.е образования материи. Но из-за высокой неустойчивости такого состояния, Вселенная переходит в другую эпоху, которая получила интересное, а также загадочное название космическая инфляция.

2. Космическая инфляция

(10^{-41} секунд после Планковской эпохи)

Фазовые переходы в Планковской эпохе вызвали экспоненциальное расширение Вселенной. «Выход из равновесия» Вселенной стал новой эпохой, именуемой Космической инфляцией. Термин «инфляция» подразумевает расширение, увеличение. В этот период происходит быстрый рост объема Вселенной, падает общая температура, полностью завершается фазовый переход в кварки и глюоны, ознаменовывавший переход в новую эпоху.

3. Эпоха кварк-глюонной плазмы

(10^{-35} секунд после Планковской эпохи)

Период кварк-глюонной плазмы является одним из самых значимых периодов в формировании материи. Для начала, хотелось бы объяснить, что такое кварк-глюонная плазма. Говоря простыми словами, кварк-глюонная плазма - это поток «моря» кварков и глюонов, которые имеют минимальные взаимодействия друг с другом. Возникает вопрос:» Когда это возможно, ведь глюоны являются своеобразным «клеем» для кварков в формировании барионов (как рассказывали в предыдущем выпуске, барионы - это частицы состоящие из трех кварков, связанных глюонами, например, протоны и нейтроны)?» Ответ на этот вопрос будоражил умы величайших физиков около 40 лет, пока не было рассчитано, что взаимодействия минимизируются при огромной температурах, которые были недостижимы в экспериментальной физике того времени.

Однако, уже сейчас, в наше время, проводятся опыты по изучению кварк-глюонных плазм(кварковых супов) в которых можно наблюдать кварк-глюонную плазму. Вернёмся, к эпохе, которая очень важна для современной физики. Примечательно то, что в этой эпохе, как и в предыдущих наблюдается процесс расширения и постепенного охлаждения Вселенной. Кварк-глюонная плазма, фактически, подготовила основу для новой эпохи, и для формирования более сложных структур во Вселенной, таких как барионы. Процесс синтеза барионов из кварк-глюонной плазмы получил название бариогенезиса.

4. Бариогенезис

(10^{-34} секунд после Планковской эпохи)

Процесс бариогенезиса, наряду с процессами расщепления кварк-глюонной плазмы, являются

очень важным в синтезе материи. Бариогенезис представляет собой синтез протонов, нейтронов, три- и тетракварков. Хотя более общей формулировкой является образование не только барионов, но и остальных адронов, название процессу дали именно из-за синтеза барионов. В процессе бариогенезиса, происходит очень интересный процесс образования 2-х видов материи: анти- и обычной материи. Образование антиматерии происходило лишь по одной причине, по причине небольшого наличия антикварков в кварк-глюонной плазме. Однако, количество кварков оказалось много больше, количества антикварков, что и проявилось в преимуществе материи над антиматерией. Существуют и другие мнения на этот счет, например возможность взаимопревращений материи и антиматерии (например электрон-антикварки, позитрон-кварки). Однако окончательного ответа до сих пор нет. Примечательно то, что антиматерия аннигилировала при взаимодействии с материей, с образованием излучения, именуемого сейчас реликтовым. Однако, процесс «развития» вселенной не остановился и началась новая эпоха нуклеосинтеза.

5. Нуклеосинтез

Появление протонов и нейтронов не заставило себя ждать, как и дальнейшее их взаимодействие. Начался процесс образования ядер легких изотопов, а также появление нового, теперь, бозонного фазового перехода: формирование физических сил в современном виде. В результате нуклео-

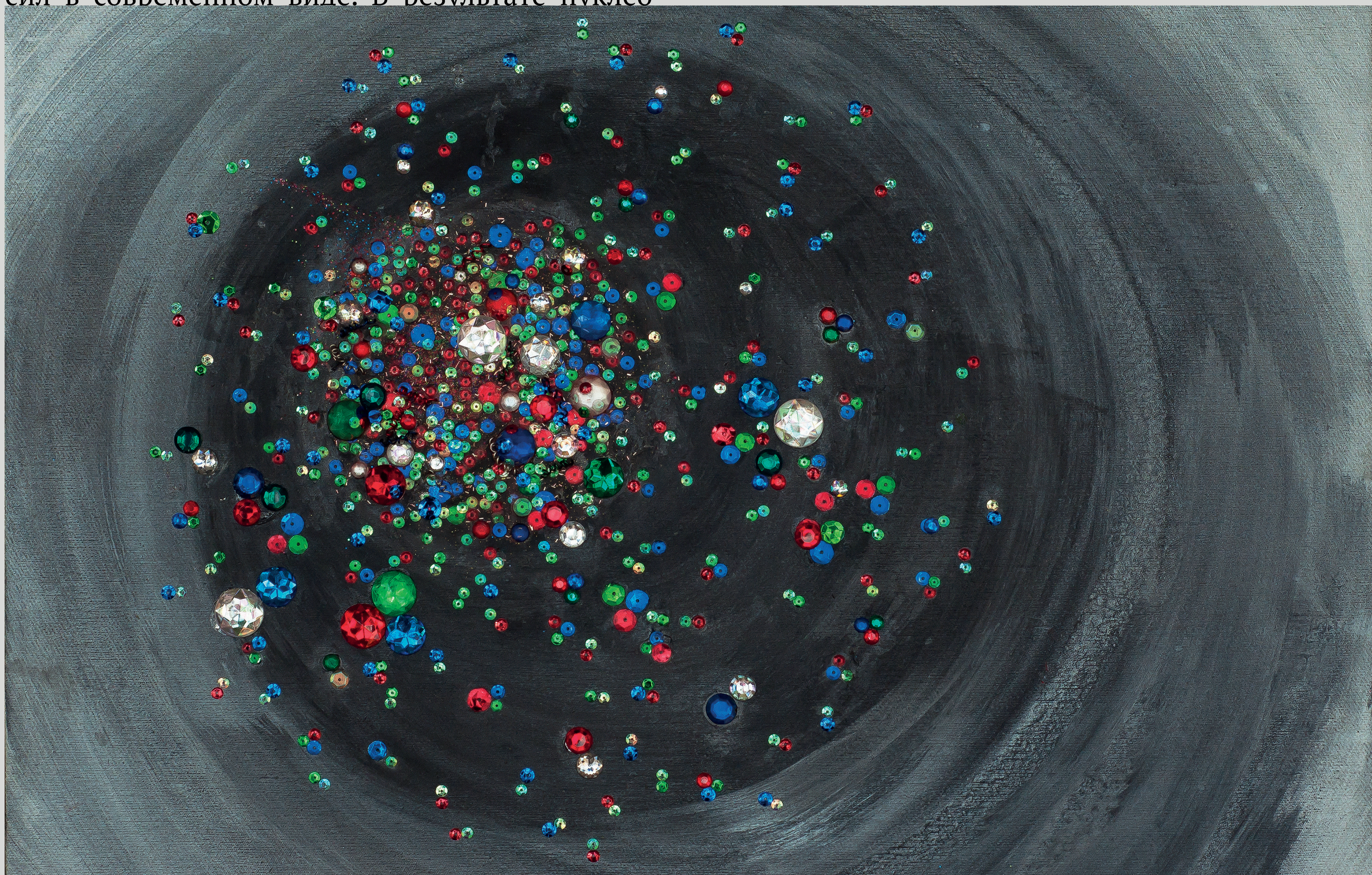
синтеза образовывались ядра лития, дейтерия, гелия-4. Очень интересным фактом является то, что на данном этапе экспериментальные данные, снятые с спектров квазаров, сходятся с теоретическими, что можно считать за возможную достоверность этой мировой теории.

6. Эпоха воцарения гравитации.

Эпоха развития Вселенной, которую не всегда упоминают, это отделение гравитации от других физических сил, т.е. особенное выделение гравитационного бозона. Природу гравитации, человек, увы, понять не может, пока что. Сей факт и делает эту эпоху, не столь значимой для современной науки. Стоит отметить, что по мере охлаждения Вселенной, все четыре основных взаимодействия начали постепенно выделяться. При высоких энергиях, все четыре взаимодействия объединяются в единую силу. Описанием этого явления должна заняться теория Всего, над которой бьют умы лучшие физики всего мира.

7. Эпоха рекомбинации (380 тысяч лет после Планковской эпохи)


Эпоха рекомбинации, наконец, подразумевает логический конец теории современного строения Вселенной и материи, рекомбинация - это процесс образования атомов, а затем и молекул (раньше образование атомов было почти невозможным, по причине слишком высоких энергий, способных разрушить любую связь).



©Sarah Szabo. Художественное представление кварк-глюонной плазмы.

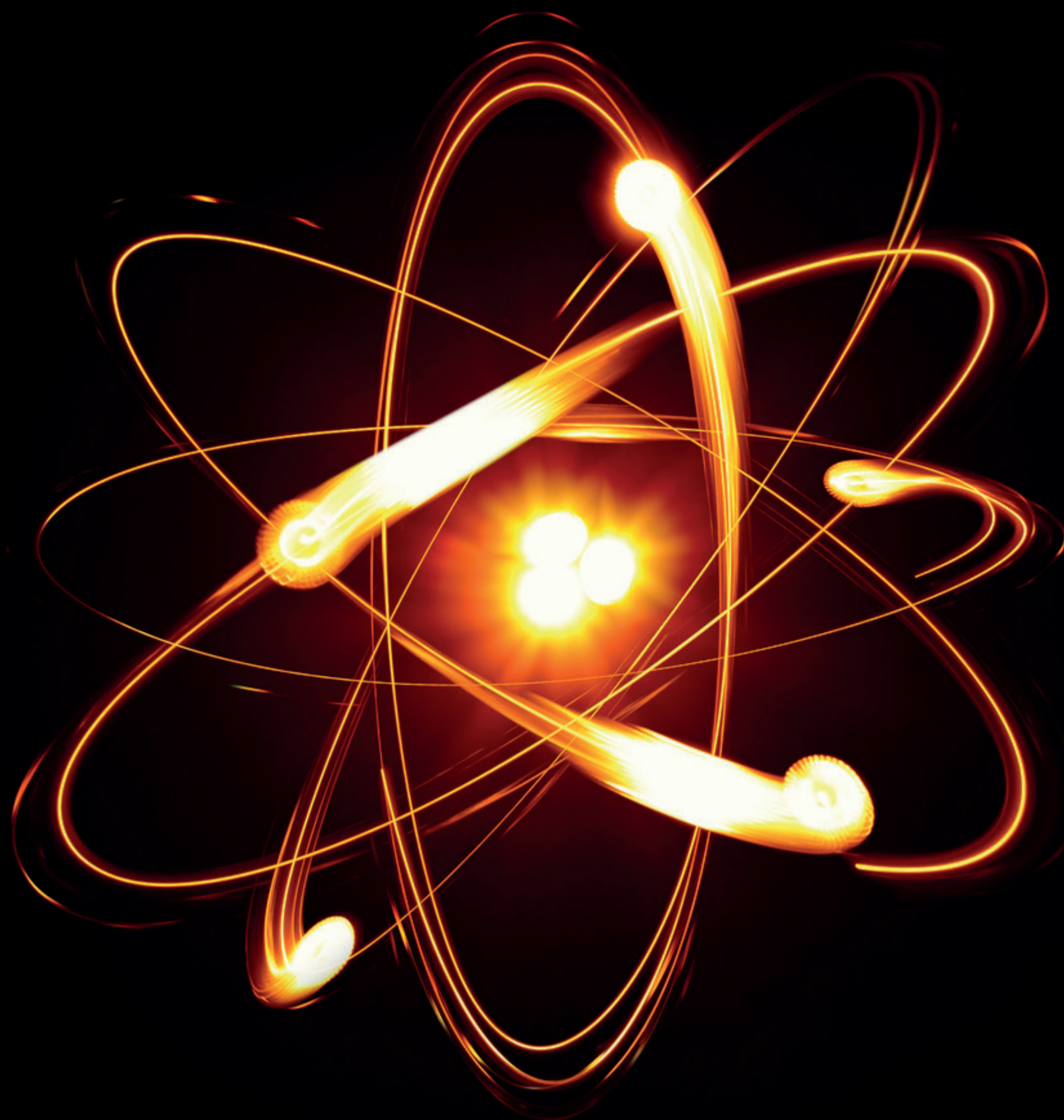
СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ

The background of the image is a vibrant cosmic scene. It features a bright, glowing nebula on the right side, transitioning from white and yellow to deep red and purple. The rest of the image is dark, filled with numerous small, distant stars and wisps of interstellar dust in various colors like blue, green, and orange.



В настоящее время большинство ученых объясняют происхождение и эволюцию Вселенной к ее современному виду теорией Большого взрыва. Эта теория предполагает, что вся материя вселенной некогда была сосредоточена в первичном ядре с огромной плотностью (около 10^{26} г/см³) и температурой (около 10^{32} К), которое по некоторым причинам взорвалось и распространило излучение и материю по всему пространству.

Примечание: в Физике используется иная система измерения температуры – шкала Кельвина. Чтобы перевести градусы Цельсия в градусы Кельвина, достаточно сделать нехитрую математическую операцию, прибавить 273 к численному значению температуры в градусах Цельсия. Интересен факт, что температура не может опуститься ниже значения 0 по Кельвину, другими словами температуры абсолютного нуля. Исследуя многочисленные зависимости энергий движения частиц газа, и в общем, изучения термодинамики, было подсчитано, что при этой температуре любая энергия движения молекул и атомов будет равна нулю, хаотическое движение частиц прекращается, достигается максимально упорядоченная структура вещества – энтропия стремится к нулю.



По мере расширения Вселенная охлаждалась, это позволило постепенно дифференцироваться четырем основным типам взаимодействия и привело к образованию частиц различных типов. Наука ничего не может сказать об условиях, существовавших до достижения времени планка – $1,33 \cdot 10^{-43}$ секунды, когда гравитационные и электромагнитные, а также сильные и слабые ядерные взаимодействия были не дифференцированы и равносильны. Через 10^{-43} с после Большого Взрыва ($T=10^{31}$ К) гравитация выделилась как отдельная сила, а через 10^{-35} с (10^{28} К) сильные ядерные взаимодействия отделились от все еще не разделенных сил электромагнитного и слабого ядерного взаимодействия. Речь здесь идет о невообразимо малых временах и высоких температурах, так например, фотону движущемуся со скоростью света, нужно 10^{-24} с, чтобы преодолеть расстояние равное диаметру атомного ядра.

Через 10^{-10} с после Большого Взрыва температура, согласно расчетам, понизилась до 10^{15} К, что позволило дифференцироваться электромагнитным и слабым взаимодействиям. К моменту $6 \cdot 10^{-6}$ с, при температуре $1,4 \cdot 10^{12}$ К из кварков образовались протоны и нейтроны, затем стабилизировались электроны. Через одну секунду от момента Взрыва, после периода аннигиляции частиц и античастиц и образования электромагнитных фотонов Вселенная уже была населена частицами, названия которых хорошо знакомы всем нам – протонами, нейтронами и электронами.

Вскоре после этого сильные ядерные взаимодействия вызвали соединение большого числа про-

тонов и нейтронов в ядра дейтерия ($p+n$, где p – протон, n – нейтрон), а затем и гелия ($2p+2n$). Так начался процесс возникновения элементов. В течение этого маленького отрезка космической истории, приходящегося на 10-500 с после Взрыва, вся Вселенная представляла собой как бы огромный гомогенный термоядерный реактор, превращающий водород в гелий. До этого ядра гелия не могли существовать – температура была настолько высокой, что мощное излучение немедленно превратило бы их снова в протоны и нейтроны. В дальнейшем вследствие продолжающегося расширения Вселенной плотность частиц стала слишком низкой для реализации этих хотя и сильных, но короткодействующих взаимодействий. Вычисления, таким образом, показывают, что в течение примерно 8 минут около четверти массы Вселенной превратилось в ядра гелия, а около трех четвертей осталось в виде водорода.

Одновременно, около 0,001% ее массы превратилось в ядра дейтерия и около 0,000001% в ядра лития. Эти выводы космологической теории Большого Взрыва подтверждаются экспериментальными наблюдениями. Повсюду во Вселенной – и в самых старых звездах нашей Галактики, и в молодых звездах удаленных от нас галактик – распространенность гелия близка к 25%. Еще более удивительно, что предсказанная концентрация дейтерия была обнаружена в межзвездных облаках. Кроме того, как станет понятно далее, на звездах ядра дейтерия разрушаются сразу после их образования, и вблизи них не создается заметной равновесной концентрации ядер дейтерия из-за высокой температуры звездного окружения.

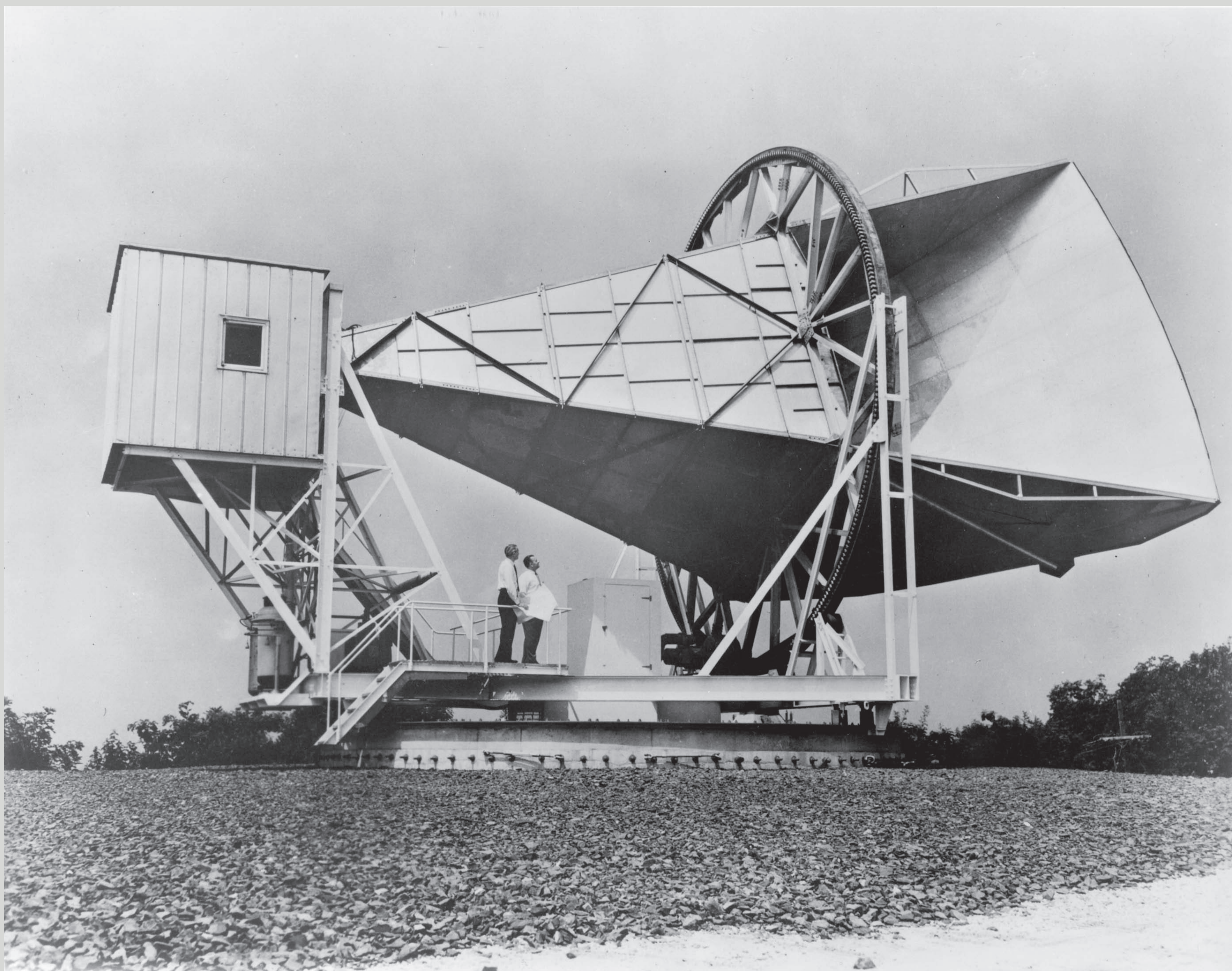
Единственным источником дейтерия во Вселенной предстает, таким образом, Большой взрыв. Никакая другая космологическая теория не может в настоящее время объяснить наблюдаемое соотношение H:He:D (водорода:гелия:дейтерия).

Две другие характеристики Вселенной также легко объясняются теорией Большого Взрыва. Во-первых, как было обнаружено Хабблом в 1929 г., свет получаемый Землей от далеких галактик, всегда тем более смещен к красному концу спектра, чем больше расстояние до его источника. Это означает, что Вселенная все еще расширяется, и если провести расчеты провернув время вспять, можно посчитать, что Большой Взрыв произошел около 14 млрд лет тому назад. Независимые оценки возраста Вселенной, выполненные другими способами, неизменно приводят к близкому результату.

Во-вторых, теория убедительно объясняет существование всемирного космического излучения (реликтового) со спектром черного тела. Это излучение, соответствующее по последним измерениям температуре 2,735 К было открыто в 1965

году Пензиасом и Вильсоном. Ни одна из других предложенных к настоящему времени космологических теорий не может объяснить все эти разнообразные наблюдения.

В 1965 году два физика Арно Пензиас и Роберт Вильсон, работавших на фирме Bell Laboratories в штате Нью Джерси, проводили эксперимент, в котором испытывали очень чувствительный, микроволновый детектор. Пензиас и Вильсон стали замечать, что уровень шума, который регистрируется детектором гораздо выше нормы. Причем шум не был направленным, приходящим с какой-то определенной стороны. Сначала исследователи пытались объяснить явление технической неисправностью, и чудом заметили в детекторе птичий помет, свалив всю вину на него. Однако шум остался. Любой шум приходящий из атмосферы, всегда сильнее когда детектор наклонен, а не когда направлен строго вверх, потому что лучи света, идущие изза горизонта, проходят через значительно более толстые слои атмосферы, и соответственно увеличивается доля шума. Лишний шум, обнаруженный исследователями, был совершенно одинаков, независимо от распо-



Установка Пензиаса-Вильсона для исследования микроволнового фона

ложения детектора. Значит, источник шума находится за пределами атмосферы. Учитывая вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, шум должен быть разным в разное время суток и в разное время года. Но интенсивность была всегда одинаковой. Это означает, что источник шума находится далеко за нашей галактикой. В это же время, два других физика, Боб Дикке и Джим Пиблс, тоже занимались исследованием микроволн. Они высказали предположение, что мы можем видеть свечение ранней Вселенной, ибо свет испущенный очень далекими ее областями, мог бы дойти до нас только сейчас. Но из-за расширения Вселенной, красное смещение светового спектра должно быть очень большим, поэтому дошедший до нас свет уже будет микроволновым излучением. Они уже готовились к поиску такого излучения, когда Пензиас и Вильсон узнав об их работе, сообразили, что они уже его нашли.

Потрясающе, не правда ли? Два человека в 1965 году слышали Большой Взрыв... Если быть точнее – то его отголоски, в виде реликтового излучения.

Распространенность элементов во Вселенной.

Информация о распространенности по крайней мере некоторых элементов на Солнце, звездах, в газовых туманностях и в межзвездном пространстве была получена при детальном спектроскопическом анализе в различных диапазонах электромагнитного спектра. Эти данные дополняются

прямым анализом образцов земных пород и метеоритов, а в последние годы все в большей степени и образцов вещества комет, лунных пород и проб, взятых с поверхности других планет Солнечной системы и их спутников. Результаты свидетельствуют о сильной дифференциации вещества в Солнечной системе и некоторых звездах, но картинка в целом удивляет однородностью состава. Водород – наиболее распространенный элемент во Вселенной, на его долю приходится 88,6% всех атомов (или ядер). Гелия примерно в 8 раз меньше (11,3%), и на эти два элемента вместе приходится 99,9% всех атомов и около 99% массы Вселенной. Ядерный синтез более тяжелых элементов из водорода и гелия прошел, таким образом, в малой степени.

Имеются различные оценки распространенности элементов во Вселенной, и хотя они иногда различаются в деталях для отдельных элементов, эти расхождения редко превышают коэффициент 3 на шкале, охватывающей 12 порядков. Соответствующие данные представлены на рисунке ниже. На нем хорошо видны некоторые особенности, которые должны быть объяснены любой удовлетворительной теорией происхождения элементов. К этим особенностям относятся, например, следующие:

1) Распространенность элементов с ростом атомного массового числа A уменьшается экспонен-

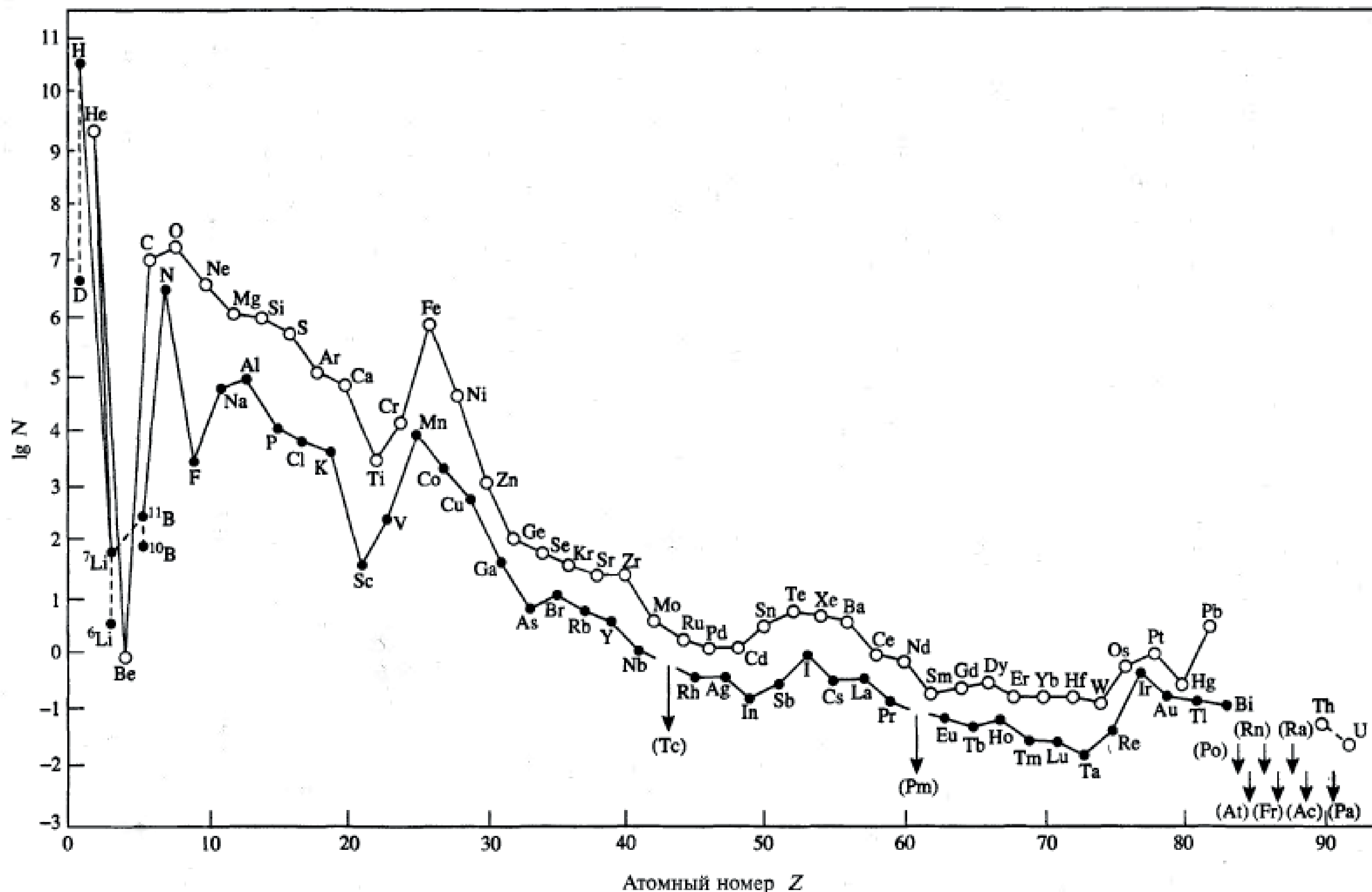


Рис. 1.1. Распространенность элементов во Вселенной как функция атомного номера Z . Распространенность выражена как число атомов на 10^6 атомов Si и отложена в логарифмической шкале [A.G.W. Cameron, Space Sci. Rev., 15, 121–146 (1973)], учтены также некоторые более новые данные)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H ¹																	He ²
2	Li ³	Be ⁴											B ⁵	C ⁶	N ⁷	O ⁸	F ⁹	Ne ¹⁰
3	Na ¹¹	Mg ¹²											Al ¹³	Si ¹⁴	P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷	Ar ¹⁸
4	K ¹⁹	Ca ²⁰	Sc ²¹	Ti ²²	V ²³	Cr ²⁴	Mn ²⁵	Fe ²⁶	Co ²⁷	Ni ²⁸	Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵	Kr ³⁶
5	Rb ³⁷	Sr ³⁸	Y ³⁹	Zr ⁴⁰	Nb ⁴¹	Mo ⁴²	Tc ⁴³	Ru ⁴⁴	Rh ⁴⁵	Pd ⁴⁶	Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³	Xe ⁵⁴
6	Cs ⁵⁵	Ba ⁵⁶	La-Lu ⁵⁷⁻⁷¹	Hf ⁷²	Ta ⁷³	W ⁷⁴	Re ⁷⁵	Os ⁷⁶	Ir ⁷⁷	Pt ⁷⁸	Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵	Rn ⁸⁶
7	Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸	Ac-Lr ⁸⁹⁻¹⁰³	Rf ¹⁰⁴	Db ¹⁰⁵	Sg ¹⁰⁶	Bh ¹⁰⁷	Hs ¹⁰⁸	Mt ¹⁰⁹	Ds ¹¹⁰	Rg ¹¹¹	Cn ¹¹²	Uut ¹¹³	Fl ¹¹⁴	Uup ¹¹⁵	Lv ¹¹⁶	Uus ¹¹⁷	Uuo ¹¹⁸

Для элементов, не имеющих стабильных изотопов, в скобках указывается масса изотопа с наибольшим периодом полураспада.

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Периодическая таблица химических элементов.

циально до $A=100$ (т.е. $Z=42$); после этого уменьшение замедляется и временами маскируется локальными флуктуациями;

2) В интервале Z от 23 до 28 присутствует явно выраженный пик, охватывающий V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni; максимум этого пика приходится на Fe, распространенность которого примерно в 1000 раз превышает значение, ожидаемое из общего хода кривой;

3) Дейтерий (D), Li, Be и B – более редкие элементы по сравнению с соседними H, He, C и N;

4) Среди более легких ядер (вплоть до Sc, $Z=21$) те из них, массы которых кратны 4, более распространены по сравнению с их соседями, например ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{36}Ar и ^{40}Ca ;

5) Атомы с четными A более распространены по сравнению с нечетными A

Еще две особенности становятся заметными, если рассмотреть график зависимости распространенности элементов от A , а не от Z ;

6) Атомы тяжелых элементов, как правило, обогащены нейтронами, тяжелые обогащенные протонами нуклиды редки;

7) Двойные максимумы распространенности наблюдаются при $A=80, 90, 130, 138, 196, 208$

Необходимо также объяснить существование в природе естественных радиоактивных элементов, периоды полураспада которых (или периоды полураспада их предшественников) существенно меньше, чем предполагаемый возраст Вселенной. В результате широких исследований, стало возможным дать детальное и убедительное объяснение изложенных выше экспериментальных данных.

Эволюция звезд.

В общих чертах эволюцию звезд можно представить следующим образом. Первая стадия – формирование звезды за счет аккреции, т.е. обусловленного силами гравитации падения вещества исходного холодного водородно-гелиевого облака на первоначально образовавшееся в нем ядро. Для звезды с размерами и средней плотностью Солнца (масса $1,991 \cdot 10^{30}$ кг = 1M (здесь и далее M – масса солнца)) данная стадия может занять около 20 лет. Это гравитационное сжатие сопровождается выделением тепла, часть которого теряется в виде излучения, однако продолжающееся сжатие приводит к росту температуры, до тех пор пока в центральной части звезды (ядре) при 10^7 K не начинаются ядерные реакции. Энергия этих реакций компенсирует радиационные потери (как говорили ранее, часть материи уходит в виде излучения), вследствие чего устанавливается состояние временного равновесия или стационарное состояние.

Когда около 10% водорода в ядре звезды уже истрачено на ядерные реакции, возобновляется процесс гравитационного сжатия и роста температуры. При $2 \cdot 10^8$ K начинается выгорание гелия за счет реакций ядерного слияния. Далее следует истощение запаса гелия и сжатие с ростом температуры до 10^9 K, когда становятся возможными ядерные реакции с участием более тяжелых ядер ($Z=8-22$, где Z – порядковый номер, т.е. кол-во протонов в ядре). Продолжительность этих процессов зависит от массы звезды. Она может составить 10^{12} лет для звезды с массой 0.2M, 10^{10} лет для одной солнечной массы, 10^7 лет для массы 10M, и всего 80000 лет для звезды с массой 50M, т.е. чем

массивнее звезда, тем быстрее она расходует свое ядерное топливо.

Дальнейшие катастрофические изменения приводят к выбросу значительной части звездного вещества в окружающее пространство, где оно вместе с водородом и гелием вовлекается в формирование следующего поколения звезд. Следует, однако, заметить, что поскольку максимум кривой энергии связи в ядре приходится на железо (т.е. энергии в ядре звезды достаточно для синтеза ядра железа), в экзотермических процессах рассмотренного типа, протекающих самопроизвольно при достаточном повышении температуры, возникают только элементы легче железа. Для образования элементов тяжелее железа требуется уже подвод энергии.

Доказательства, на которых основывается обсуждаемая теория эволюции звезд, почерпнуты не только из совокупности известных ядерных реакций и релятивистского принципа эквивалентности массы и энергии. Важнейшее значение имеет спектроскопическое изучение света, поступающего к нам от звезд. Спектральная классификация звезд – это краеугольный камень современной экспериментальной астрофизики. Спектроскопический анализ звездного света дает ценную информацию о химическом составе звезд, позволяя не только идентифицировать присутствующие там элементы, но и оценить их относительные концентрации.

Кроме того, обусловленное эффектом Доплера «красное смещение» спектральных линий может быть использовано для оценки относительных движений звезд и их удаленности от Земли. Более тонкие измерения позволяют определить

температуру поверхности звезд по спектральным характеристикам их теплового излучения: чем выше температура, тем короче длина волны в спектре излучения. Поэтому более холодные звезды кажутся нам красными, а более горячие звезды по мере роста температуры – соответственно желтыми, белыми и голубыми. Различия в цвете звезд, связаны также с различиями в их химическом составе.

Если спектральные классы звезд (или их температуры) отложить в зависимости от звездной величины (или светимости). На диаграмме выявится несколько предпочтительных областей, в которые попадает большинство звезд. Такие диаграммы были впервые построены независимо друг от друга Э. Герцшпрунгом в 1905-1907 гг. и Г. Ресселом в 1913 г. и теперь называются диаграммами Герцшпрунга-Рессела. Более 90% всех звезд располагаются вдоль широкой полосы, называемой главной последовательностью. Она охватывает все спектральные классы и весь интервал изменения звездных величин от больших и горячих звезд класса O с большой массой в верхней части диаграммы до маленьких плотных, красноватых звезд класса M в ее нижней части. Определения большой и маленький имеют здесь лишь относительное значение, так как все звезды вдоль главной последовательности классифицируются как карлики.

Следующая наиболее многочисленная группа звезд расположена выше и правее главной последовательности. Звезды этой группы называются красными гигантами. Например, Капелла и Солнце относятся к классу G, но Капелла в 100 раз ярче Солнца. Так как обе звезды имеют одинаковую температуру, следует заключить, что излучающая

Класс ^{a)}	Цвет	Температура поверхности, К	Спектральная характеристика	Примеры
O	Голубой	> 25 000	Линии ионизированного He и других элементов; слабые линии H	10 в созвездии Ящерицы
B	Голубовато-белый	11 000–25 000	Преобладают H и He	Ригель, Спика,
A	Белый	7500–11 000	Очень сильные линии H	Сириус, Вега
F	Желтовато-белый	6000–7000	Линии H слабее; становятся хорошо заметными линии ионизированных металлов	Канопус, Процион
G	Желтый	5000–6000	Преобладают линии ионизированных и нейтральных металлов (особенно Ca)	Солнце, Капелла
K	Оранжевый	3500–5000	Линии нейтральных металлов и полосатые спектры простых радикалов (например, CN, OH, CH)	Арктур, Альдебаран
M	Красный	2000–3500	Преобладают полосатые спектры простых молекул (например, TiO)	Бетельгейзе, Антарес

^{a)} Существует дальнейшее деление каждого класса на 10 подклассов, например ...F8, F9, G0, G1, G2,... Солнце (температура поверхности 5780 К) относится к подклассу G2. Последовательность букв, обозначающих классы звезд, сложилась исторически и, возможно, ее легче всего запомнить с помощью мнемонической фразы «Oh Be A Fine Girl (Guy), Kiss Me».



Рис. 1.2. Диаграмма Герцшпрунга–Ресселла для звезд с известной светимостью и спектральным классом

поверхность Капеллы в 100 раз, а радиус в 10 раз больше, чем у Солнца. Выше красных гигантов расположены супергиганты, подобные Антаресу, температура поверхности которого вдвое ниже, чем у Солнца, но яркость в 10 000 раз больше; отсюда мы заключаем, что его радиус в 100 раз превышает раз радиус Солнца. Нижний левый угол диаграммы, напротив, населен относительно горячими звездами с низкой яркостью, что указывает на их небольшие размеры. Это белые карлики, подобные Сириусу В, имеющему массу солнца при размерах Земли и плотности достигающей 50 000 г/см³.

Теперь можно связать описание типов звезд с предстоящим в следующем разделе обсуждением термоядерных процессов и синтеза элементов. Когда протозвезда (сгусток газов) начинает за счет гравитационного сжатия формироваться из межзвездного облака, состоящего из водорода и гелия, ее температура возрастает, пока не достигает такого значения, при котором в ее центральной части может поддерживаться реакция протонного горения (ядерные реакции с участием водорода).

На этой стадии звезда с массой, приблизительно равной массе Солнца, попадает в главную последовательность, где проводит, возможно, 90%

своей жизни, понемногу теряя массу, но генерируя колоссальные количества энергии. Последующее истощение водорода в ядре звезды (но не в ее внешних слоях) приводит к дальнейшему сжатию и формированию ядра, в котором начинается реакция горения гелия. При этом большая часть оставшегося водорода выталкивается в протяженную и разреженную внешнюю оболочку – звезда

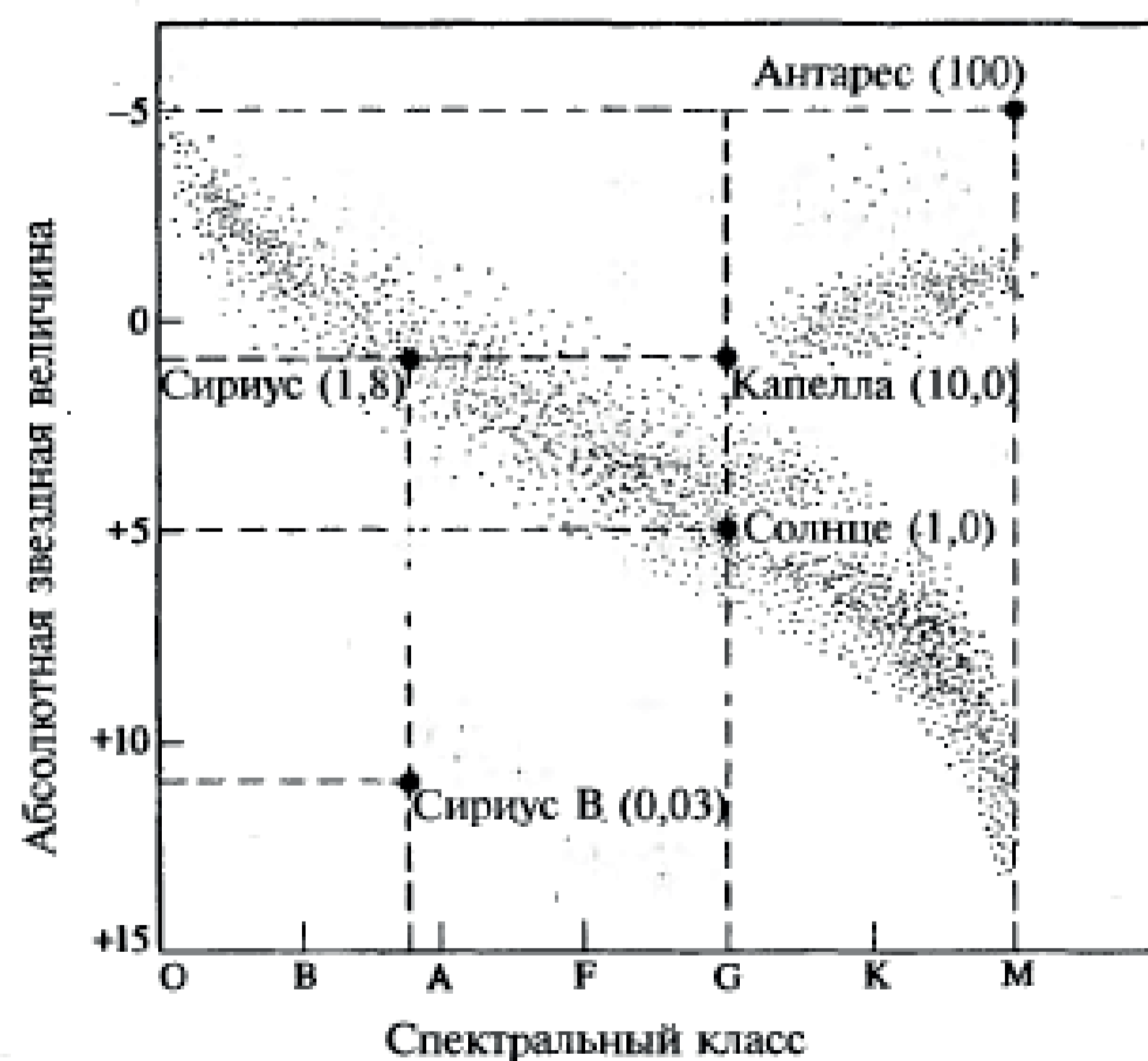
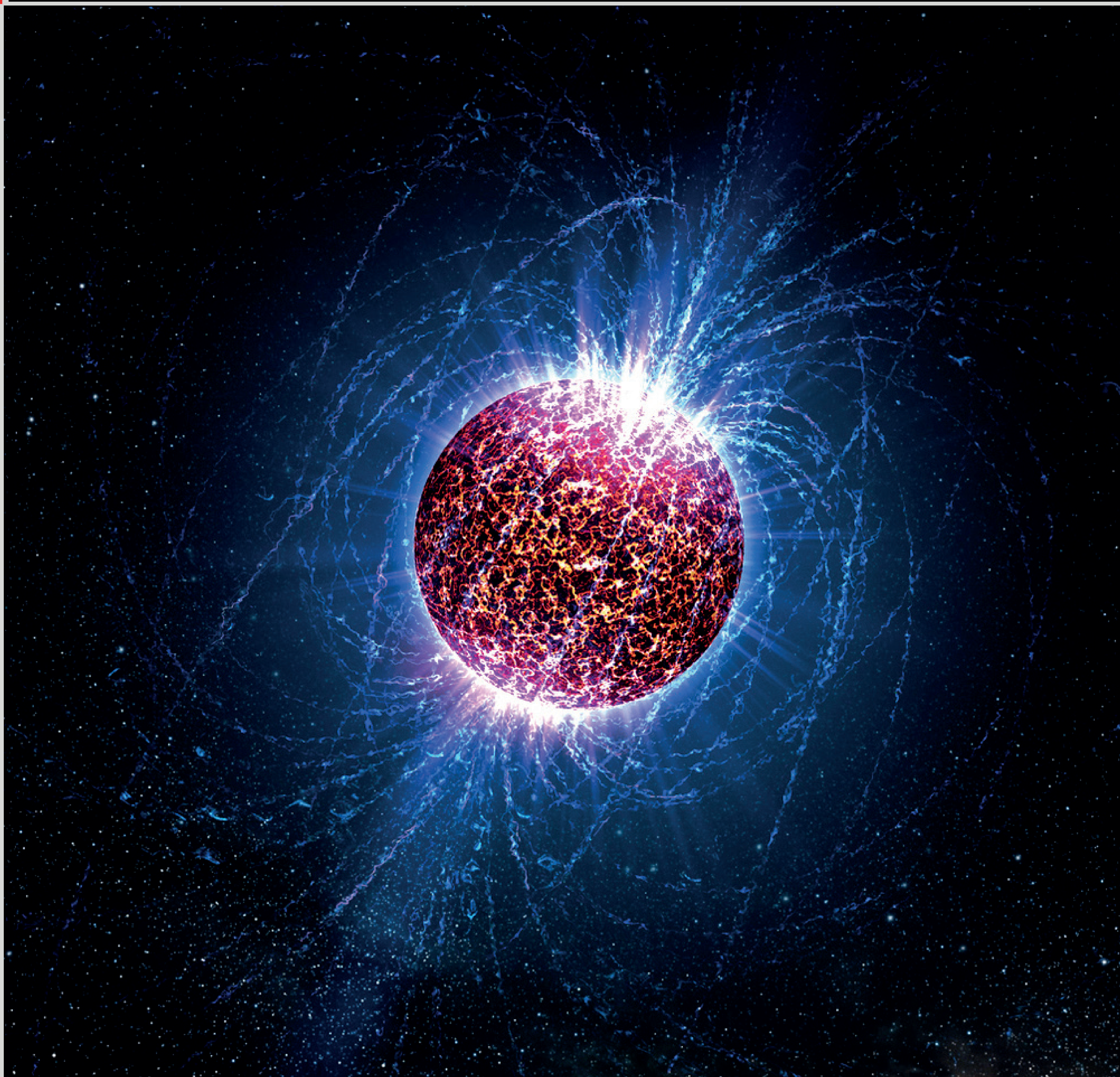


Рис. 1.3. Сопоставление различных звезд на диаграмме Герцшпрунга–Ресселла. Числа в скобках обозначают приблизительный диаметр звезды (диаметр Солнца принят за единицу)



Нейтронная звезда

становится красным гигантом, так как ее огромная излучающая поверхность не может более поддерживаться при столь же высокой температуре, что и ранее, несмотря на более высокую температуру ядра. Температура поверхности типичных красных гигантов составляет 3 500 – 5 500 К, они в 100-10 000 раз ярче и в 10-100 раз больше Солнца. На более поздних стадиях в красных гигантах могут протекать реакция горения углерода и затем, в ходе окончательного превращения звезды в белого карлика, альфа-процесс.

Многие звезды образуют связанные системы двойных звезд, обращающихся вокруг общего центра масс. Если, как это часто случается, две звезды имеют различные массы, более массивная из них эволюционирует быстрее и достигает стадии белого карлика раньше своего партнера. Когда вто-

рая звезда расширяется, превращаясь в красного гиганта, ее протяженная атмосфера достигает белого карлика. Это приводит к неустойчивости, заканчивающейся взрывом и выбросом вещества по направлению к более массивному партнеру. Яркость белого карлика при этом увеличивается иногда даже в десятки тысяч раз, что выглядит как рождение новой звезды (так как сама двойная звезда до этого была невидима для невооруженного глаза).

Как мы увидим при описании α - и γ -процессов, в звездах главной последовательности могут возникать еще более эффектные неустойчивости. Если начальная масса звезды превышает 3,5 солнечной массы, ее гравитационный коллапс, согласно современным теориям, может быть настолько катастрофичным, что система сжимается

до плотности, превышающей плотность ядерной материи, и превращается в черную дыру. Для звезд главной последовательности с массой 1,4-3,5 солнечных масс, сжатие, вероятно, останавливается при достижении ядерной плотности, приводя к образованию быстро вращающейся нейтронной звезды (с плотностью 10^{14} г/см³), которая может быть наблюдаема как пульсар, испускающий импульсное электромагнитное излучение в широком интервале частот при частоте пульсаций, составляющей доли секунды.

Внезапная остановка коллапсирующего ядра в процессе сжатия звезды после достижения им ядерной плотности приводит к быстрому подъему температуры до 10^{12} К и давления, вследствие чего возникает ударная волна. Достигнув внешней оболочки звезды, она вызывает быстрое сжатие и резкий рост температуры, что, в свою очередь, инициирует многие новые ядерные реакции и приводит к взрыву с выбросом вонне значительной части массы звезды. Конечным результатом становится рождение сверхновой звезды, яркость которой может быть в 10^8 раз выше, чем у исходной звезды. В этот момент яркость сверхновой звезды сравнима с яркостью всей остальной галактики, в которой она сформировалась. Далее яркость падает экспоненциально, часто период ее полуослабления составляет около двух месяцев. Сверхновые, новые и неустойчивые переменные звезды из числа угасающих красных гигантов являются.

Таким образом, наиболее вероятными кандидатами на синтез более тяжелых элементов и их выброс в межзвездное пространство с последующим вовлечением при конденсации межзвездной материи в более поздние генерации звезд главной последовательности, подобных Солнцу. Следует, однако, подчеркнуть, что теории происхождения химических элементов возникли совсем недавно и все детали протекающих при этом процессов еще далеко не поняты. Эта область знаний в настоящее время очень активно развивается, и большинству вещей еще предстоит быть открытыми.

Синтез элементов.

Для объяснения существования разных типов звезд и наблюдаемой распространенности элементов предложены следующие классы ядерных реакций:

1) Экзотермические процессы (те, что протекают с выделением тепла) в недрах звезд, протекающие в такой последовательности: горение водорода, горение гелия, горение углерода, альфа процесс, равновесный процесс (е-процесс)

2) Процессы захвата нейтронов – s-процесс и r-процесс протекающие соответственно с участием медленных (slow) и быстрых (rapid) нейтронов; 3) Различные процессы, включающие p-процесс (захват протона) и реакции скалывания внутри звезд, а также x-процесс – скалывание галактическими космическими лучами в межзвездном пространстве

Горение водорода.

Когда температура сжимающейся массы атомов водорода и гели достигает $10\ 000\ 000$ К, становится возможным протекание последовательности термоядерных реакций, наиболее важные из которых приведены ниже:

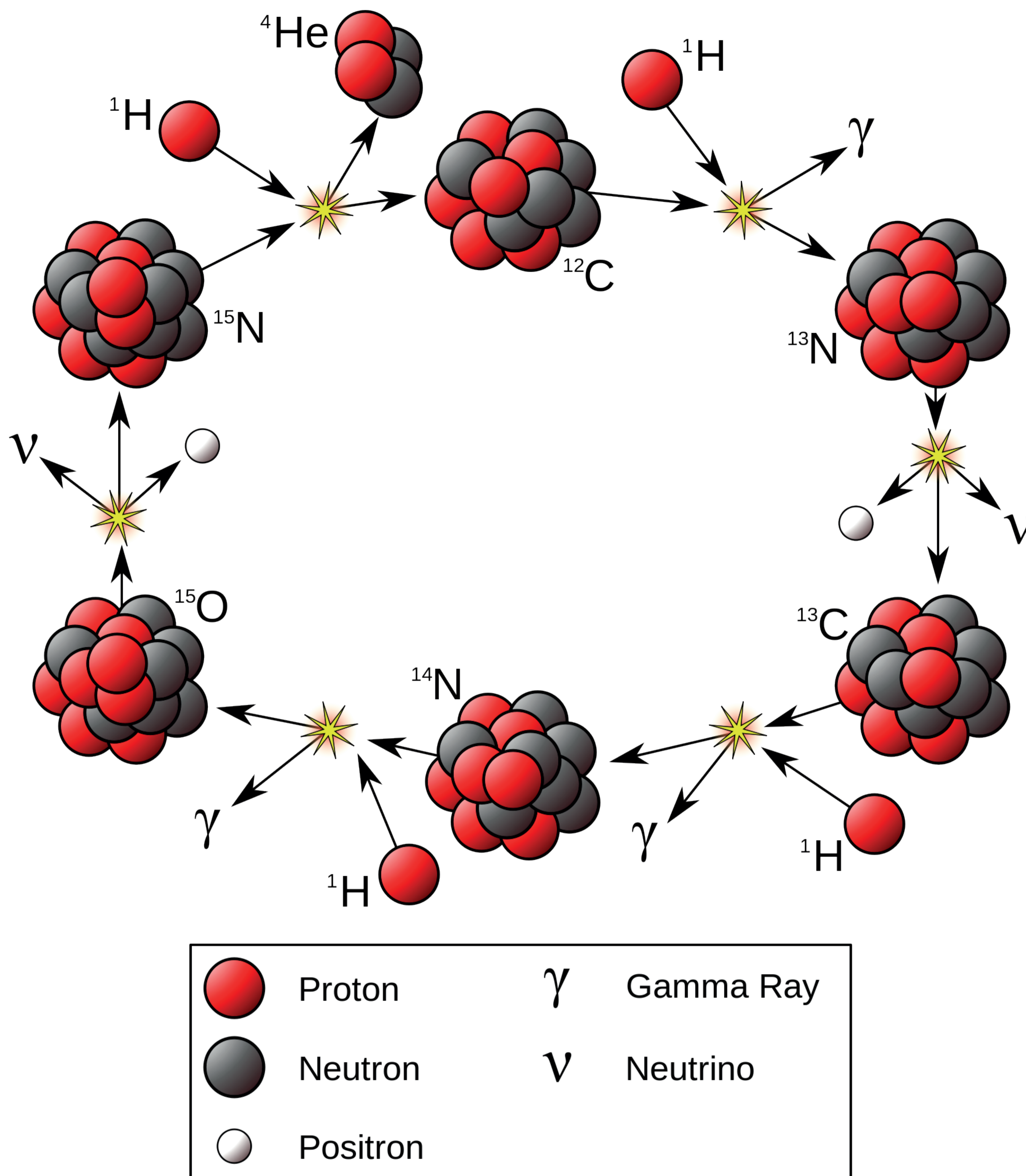
Реакция	Выделяющаяся энергия	Время реакции
${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	1,44 МэВ	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет
${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{gamma}$	5,49 МэВ	0,6 с
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} = {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$	12,86 МэВ	10^6 лет
Суммарно: $4{}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$	26,72 МэВ	

Примечание: приведенное здесь время реакции – это время, необходимое для того, чтобы половина исходных частиц вступила в реакцию, оно сильно зависит от температуры и плотности. Приведенные значения соответствуют условиям в центре Солнца, т.е $1,3 \cdot 10^7$ К и 200 г/см³. 1 МэВ на атом = $96,485 \cdot 10^6$ кДж/моль (приведя аналогию, энергия в 1 МэВ достигается при сгорании $1,33 \cdot 10^8$ молекул природного газа). Где моль – условное обозначение для определенного кол-ва атомов, а именно $6 \cdot 10^{23}$ атомов(молекул). Столько же атомов содержится в 63.5г чистой медной проволоки.

Процесс в целом, как легко видеть, превращает четыре протона в ядро гелия с одновременным испусканием двух позитронов (электрон, только с положительным зарядом) и двух нейтрино.

После учета энергии, уносимой двумя нейтрино ($2 \cdot 0.25$ МэВ) на долю излучения остается 26,2 МэВ, т.е $2.53 \cdot 10^9$ кДж/моль. Эта огромная энергия выделяется за счет разности между массой образовавшегося ядра гелия-4 и массой четырех протонов, из которых оно возникло (выделившаяся энергия – энергия связи, а сам эффект потери массы виде энергии при синтезе нового ядра – дефект массы). Например, на Солнце каждую секунду 600 млн т водорода превращается в 595,5 млн т гелия, а 4,5 млн т материи трансформируется в энергию. Эта энергия высвобождается глубоко в недрах Солнца в виде жесткого гамма-излучения, которое, взаимодействуя со звездным веществом, постепенно превращается в фотоны с большей длиной волны. Чтобы достичь поверхности Солнца излучению нужно, вероятно, около 1 млн лет.

Солнце не относится к звездам первого поколе-



Цикл Бете и Вайцзеккера (он же C-N-O цикл)

ния в главной последовательности, поскольку имеются спектроскопические свидетельства наличия на нем многих более тяжелых элементов, сформировавшихся, как полагают, в других типах звезд и затем распространившихся по Галактике, чтобы при удобном случае оказаться вовлеченными в последующие поколения звезд главной последовательности. В присутствии более тяжелых элементов, в частности углерода и азота, возможна каталитическая последовательность ядерных реакций, содействующая превращению протонов в гелий (открыта Х.Бете и К. фон Вайцзеккером в 1938 г.).

Результирующая реакция с выделением энергии 26,72 МэВ здесь точно та же, что и рассмотренная

раньше, но два нейтрино уносят 0,7 и 1,0 МэВ соответственно, оставляя на излучение 25,0 МэВ на цикл. Кулоновские барьеры в C-N-O цикле (силы отталкивания действующие между двумя положительно заряженными ядрами) в 6-7 раз выше, чем при прямом взаимодействии протон-протон, поэтому каталитический цикл не становится доминирующим до тех пор, пока температура не достигнет $1,6 \cdot 10^7$ К. Оценки показывают, что на Солнце доля каталитического процесса в общем балансе энергии составляет около 10%.

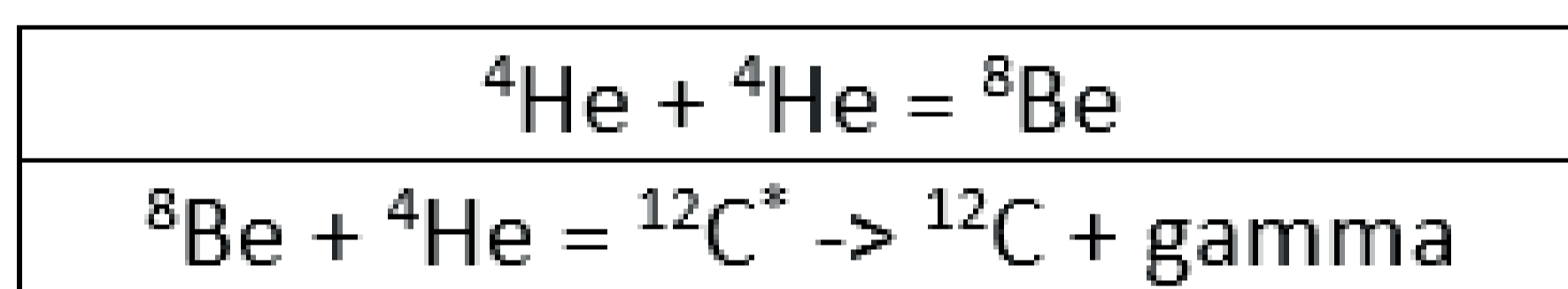
Когда в подобной Солнцу звезде главной последовательности выгорает, превратившись в гелий, около 10% водорода, направленное вовне тепло-

вое давление излучения становится недостаточным, чтобы противостоять силам гравитации, и наступает следующая стадия сжатия. В ходе этого процесса гелий концентрируется в плотном ($100\ 000\text{г/см}^3$) центральном ядре и температура возрастает до $2 \cdot 10^8\text{ К}$. Этого достаточно для преодоления кулоновских потенциальных барьеров вокруг ядер гелия, чтобы сделать возможным процесс горения гелия, т.е слияния его ядер.

Водород на этой стадии образует огромную разреженную оболочку вокруг ядра звезды, вследствие чего звезда быстро превращается в красного гиганта и покидает главную последовательность. Необходимо подчеркнуть, что горение водорода во всех звездах главной последовательности привело к настоящему времени к возникновению лишь 20% от того количества гелия, которое сформировалось в первые несколько минут непосредственно после Большого Взрыва.

Горение гелия и углерода.

Основные реакции при горения гелия таковы:

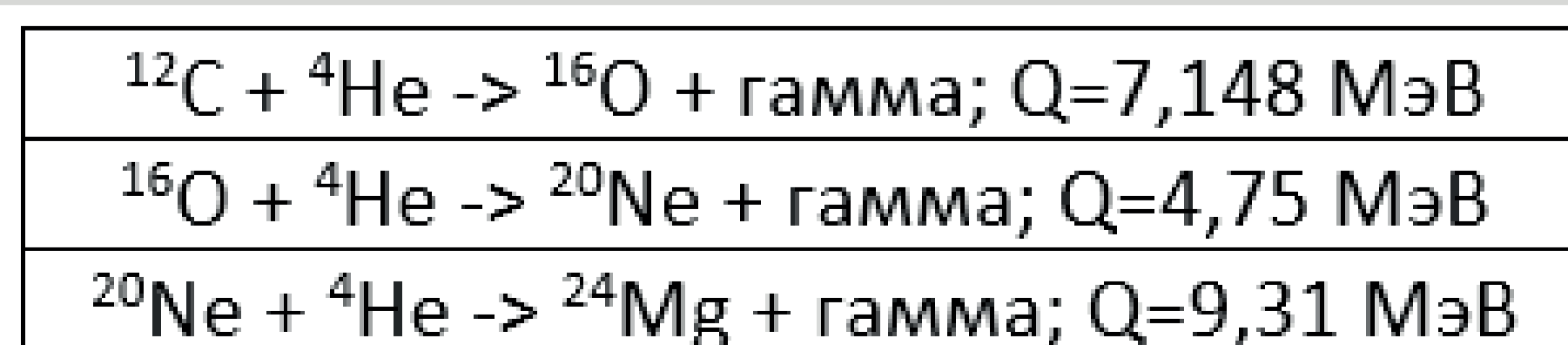


Ядро 8Be неустойчиво по отношению к альфа-распаду (распаду, при котором количество протонов уменьшается на два, атомная масса на четыре, что получается в результате испускания альфа-частицы, т.е атома гелия), так как его энергия на $0,09\text{ МэВ}$ выше энергии двух ядер гелия; рассчитано, что равновесное соотношение $8\text{Be}:4\text{He}$ в ядре красного гиганта близко к 10^{-9} . Это очень маленькая величина, но ее достаточно, чтобы обеспечить слияние трех ядер, ибо вероятность непосредственного их слияния ничтожно мала.

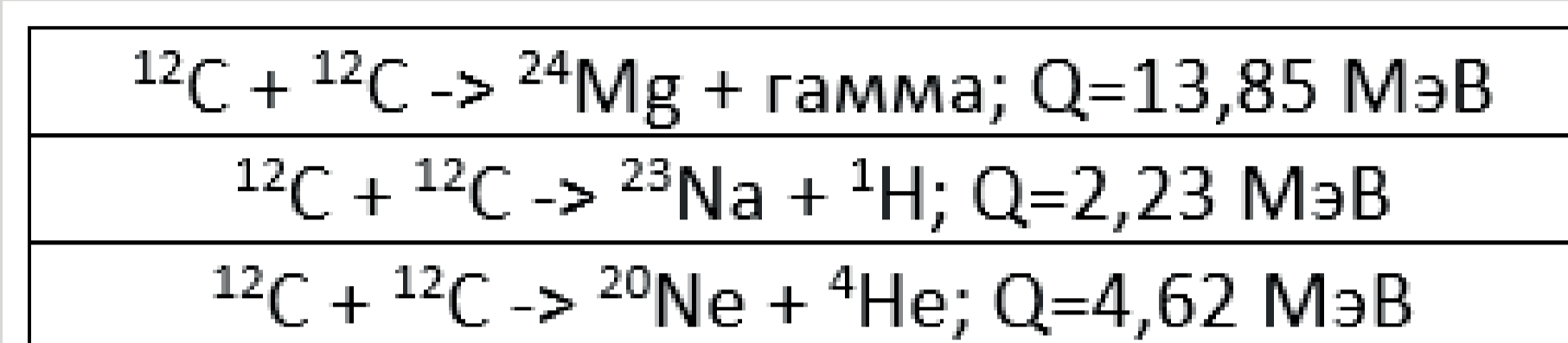
В 1954 г. Ф.Хойл, исследуя процессы нуклеосинтеза в звездах, предсказал, что ядро 12C должно иметь радиоактивное возбужденное состояние с энергией на $7,7\text{ МэВ}$ выше, чем в основном состоянии. Через три года отвечающая этому переходу активность с энергией $7,653\text{ МэВ}$ была обнаружена экспериментально. Измеренная разность энергий $Q(12\text{C}^* - 34\text{He})$ равна $0,373\text{ МэВ}$. Все это позволяет определить энергию реакции в целом:



В последующих реакциях горения гелия образуются более тяжелые четные ядра:



Эти реакции приводят к выгоранию гелия, ранее образовавшегося при горении водорода, и к появлению состоящего из углерода, кислорода и неона внутреннего ядра звезды, которое, как и ранее, разогревается за счет гравитационного сжати. При температуре $5 \cdot 10^8\text{ К}$ становится возможным, наряду с другими процессами, горение углерода. Обогащенное углеродом ядро стареющего красного гиганта с плотностью около 10^4 г/см^3 , представляет собой, таким образом, как бы ядерный реактор, со следующими первоначально протекающими в нем типичными реакциями;



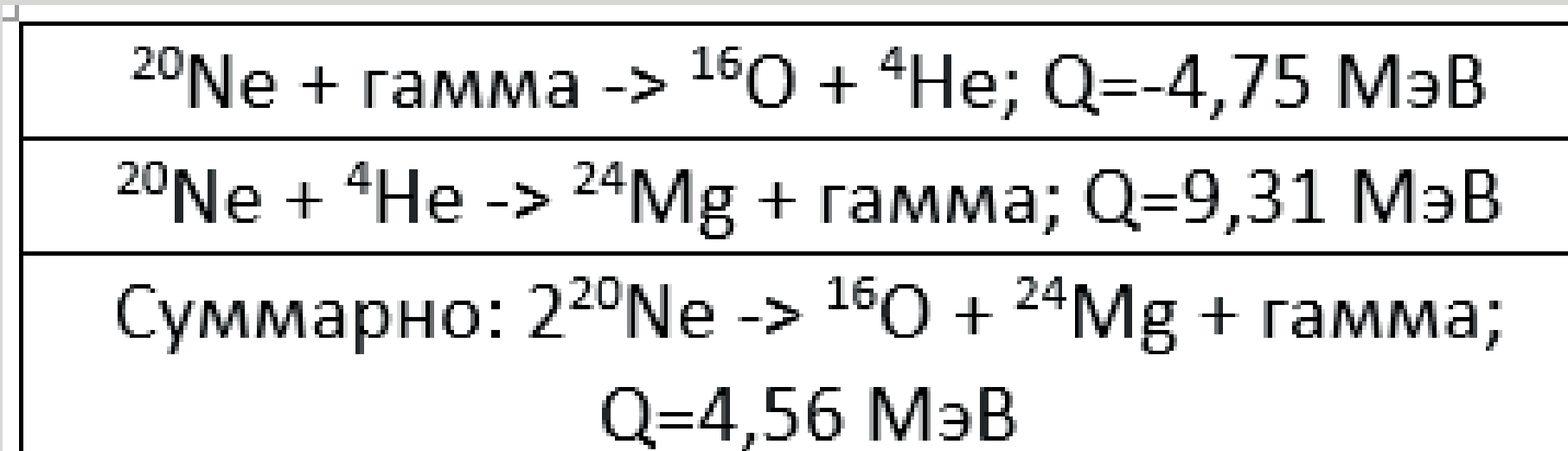
Расчеты показывают, что время протекания таких реакций составляет $100\ 000$ лет при $6 \cdot 10^8\text{ К}$ и 1 год при $8,5 \cdot 10^8\text{ К}$. Следует отметить, что ядра водорода и гелия частично регенерируются в ходе этих процессов, обеспечивая возможность протекания многочисленных реакций образования разнообразных нуклидов (ядер) в рассматриваемом интервале масс.

Альфа-процесс.

Дальнейшая эволюция звезды после фазы красного гиганта до некоторой степени зависит от ее массы. Если она не превышает $1,4$ массы солнца, может снова произойти сжатие, после чего звезда вступает в колебательную стадию своей жизни, прежде чем стать белым карликом. Когда вследствие выгорания гелия и углерода ядро звезды сжимается и разогревается выше 10^9 К , энергия гамма-излучения в недрах звезды достигает значений, достаточных для возбуждения эндотермической реакции (реакции идущей с поглощением тепла) $20\text{Ne}(\text{gamma}, \alpha)16\text{O}$.

Примечание: в общем виде, ядерные реакции записывают кратко так: $nA(x,y)mB$, где A – основной реагент (первоначальное ядро), n – его масса, B – основной продукт (конечно ядро), m – его масса, x – дополнительный реагент, y – дополнительный продукт.

Образующиеся при этом альфа-частицы в состоянии преодолеть кулоновский барьер других ядер неона и, вступая с ними в экзотермическую реакцию, образуя 24Mg ;



Знак минус в предыдущей диаграмме означает, что энергия поглощается.

Некоторые из альфа-частиц могут также атаковать ядро ^{12}C , образуя ^{16}O , а появляющийся ^{24}Mg может вступить в реакцию $^{24}\text{Mg}(\text{альфа},\text{гамма})^{28}\text{Si}$. Подобным путем возникают ^{32}S , ^{36}Ar , ^{40}Ca . таким образом, альфа процесс приводит к образованию во все уменьшающихся количествах таких ядер, которые как бы составлены из альфа частиц.

В некотором смысле альфа-процесс напоминает горение гелия, отличаясь от него лишь совершенно другим источником расходуемых альфа-частиц. Прямой альфа-процесс заканчивается на ^{40}Ca , так как $^{44}\text{Ti}^*$ неустойчив по отношению к захвату электрона. Поэтому далее протекают следующие реакции (для ясности указаны также атомные номера нуклидов):

$^{40}_{20}\text{Ca} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{44}_{22}\text{Ti}^* + \text{гамма};$
$^{44}_{22}\text{Ti}^* + e^- \rightarrow ^{44}_{21}\text{Sc}^* + \nu_+;$ период полураспада=49 лет
$^{44}_{21}\text{Sc}^* \rightarrow ^{44}_{20}\text{Ca} + b^+ + \nu_+;$ период полураспада=3,93 часа
И наконец, $^{44}_{20}\text{Ca} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{48}_{22}\text{Ti}^* + \text{гамма}$

Примечание: период полураспада – время, за которое распадается ровно половина от первоначального количества частиц.

На стадии альфа-процесса звезда может находиться в течение 100-10 000 лет.

е-Процесс (равновесный процесс)

Эволюция более массивных звезд в верхней части главной последовательности (т.е звезд с массами 1,4-3,5М несколько отличается от описанной в предыдущем разделе. Мы уже видели, что такие звезды расходуют водород намного быстрее звезд с меньшей массой и поэтому проводят меньше времени в главной последовательности. Реакции горения гелия начинаются в их недрах задолго до исчерпания водорода, и на этой срединной стадии жизни их расширение невелико.

Однако в конечном счете они становятся неустойчивыми и взрываются, выбрасывая в межзвездное пространство огромное количество вещества. На Земле такой взрыв регистрируется как рождение сверхновой звезды, ее яркость может быть в 10 000 раз больше, чем у обычной новой. В течение нескольких секунд (или минут), предшествующих катастрофической вспышке, при температуре выше $3 \cdot 10^9$ К становятся возможными многочисленные ядерные реакции, невозможные ранее.

Разнообразные взаимопревращения ядер приводят к быстрому становлению статистического равновесия между различными ядрами, фотонами и нейтронами. Как полагают, это объясняет

наблюдаемую в космосе распространенность элементов от ^{22}Ti до ^{29}Cu . Поскольку $^{56}_{26}\text{Fe}$ находится в максимуме кривой энергии ядерных связей, распространенность этого элемента значительно выше распространенности элементов с менее устойчивыми ядрами.

s-, r-Процессы

(медленный и быстрый захват нейтронов).

Медленное поглощение нейтронов с испусканием гамма-квантов считают ответственным за образование большинства изотопов в интервале масс $A=63-209$, а также большинства не возникающих при альфа-процессе изотопов в интервале $A=23-46$.

Примечание: изотопы - ядра элементов с одинаковым порядковым номером (Z), т.е числом протонов, и разной атомной массой(A), что достигается за счет разницы в количестве нейтронов.

Эти процессы, вероятно, происходят в пульсирующих красных гигантах в течение 10^7 лет, а синтез отдельных изотопов – обычно в течение 100-10 000 лет. Предложено несколько возможных источников нейтронов в звездах, но наиболее вероятные кандидаты на эту роль – экзотермические реакции $^{13}\text{C}(\text{альфа},n)^{16}\text{O}$ (2,2 МэВ) и $^{21}\text{Ne}(\text{альфа}, n)^{24}\text{Mg}$ (2,58 МэВ). В обоих случаях ядра мишени ($A=4n+1$) образуются по реакции (p, гамма) из более устойчивых ядер типа $4n$ с последующим испусканием позитрона.

Вследствие длительного протекания s-процесса имеется достаточно времени для последующего бета-распада неустойчивых нуклидов, возникающих первоначально по реакциям (n, гамма). Решающим фактором, определяющим относительную распространенность элементов, которые образуются в s-процессе, является, таким образом, поперечное сечение захвата нейтронов для предшествующего нуклида (т.е способность поглощать нейтроны).

s-Процесс позволяет также объяснить локальные пики распространенности при значениях A около 90, 138 и 208. Эти пики приходятся на необычно устойчивые ядра с магическим числом нейтронов (50, 82 и 126), для которых характерны очень низкие сечения захвата нейтронов. Из-за торможения последующих реакций, обусловленного малостью этих сечений, сами ядра с магическими числами нейтронов постепенно накапливаются. Таким образом можно объяснить относительно высокую распространенность изотопов $^{89}_{39}\text{Y}$, $^{90}_{40}\text{Zr}$, $^{138}_{56}\text{Ba}$ и $^{140}_{58}\text{Ce}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$ и $^{209}_{83}\text{Bi}$.

В противоположность более спокойным и мед-



Взрыв сверхновой

ленным процессам, обсуждавшимся в предыдущем абзаце, могут возникнуть условия (например, при 10^9K в момент вспышки сверхновой звезды), когда много нейтронов быстро и последовательно поглощается ядром, прежде чем происходит бета-распад. Характерное время для r -процесса оценивается в $0,01-10\text{ с}$, так что, например, около 200 нейтронов может добавиться к ядру железа в течении $10-100\text{ с}$. Только когда достигается крайняя степень неустойчивости нейтроноизбыточных ядер по отношению к бета-распаду, а сечение захвата нейтронов при поглощении нейтронов уменьшается по мере приближения к магическому числу нейтронов в ядре, происходит последовательная эмиссия сразу 8-10 бета-частиц, возвращающая ядро в область стабильных изотопов.

Используя эти представления, удастся убедительно объяснить локальные пики распространенности при A около 80, 130 и 194, т.е. на 8-10 единиц массы ниже массы нуклидов, расположенных в максимумах s -процесса. Продуктами r -процесса могут быть также нейтроноизбыточные нуклиды некоторых более легких элементов, например ^{36}S , ^{46}Ca , ^{48}Ca и возможно, ^{47}Ti , ^{49}Ti , ^{50}Ti . Для этих менее распространенных, но вполне устойчивых изотопов, трудно представить какие либо иные пути образования.

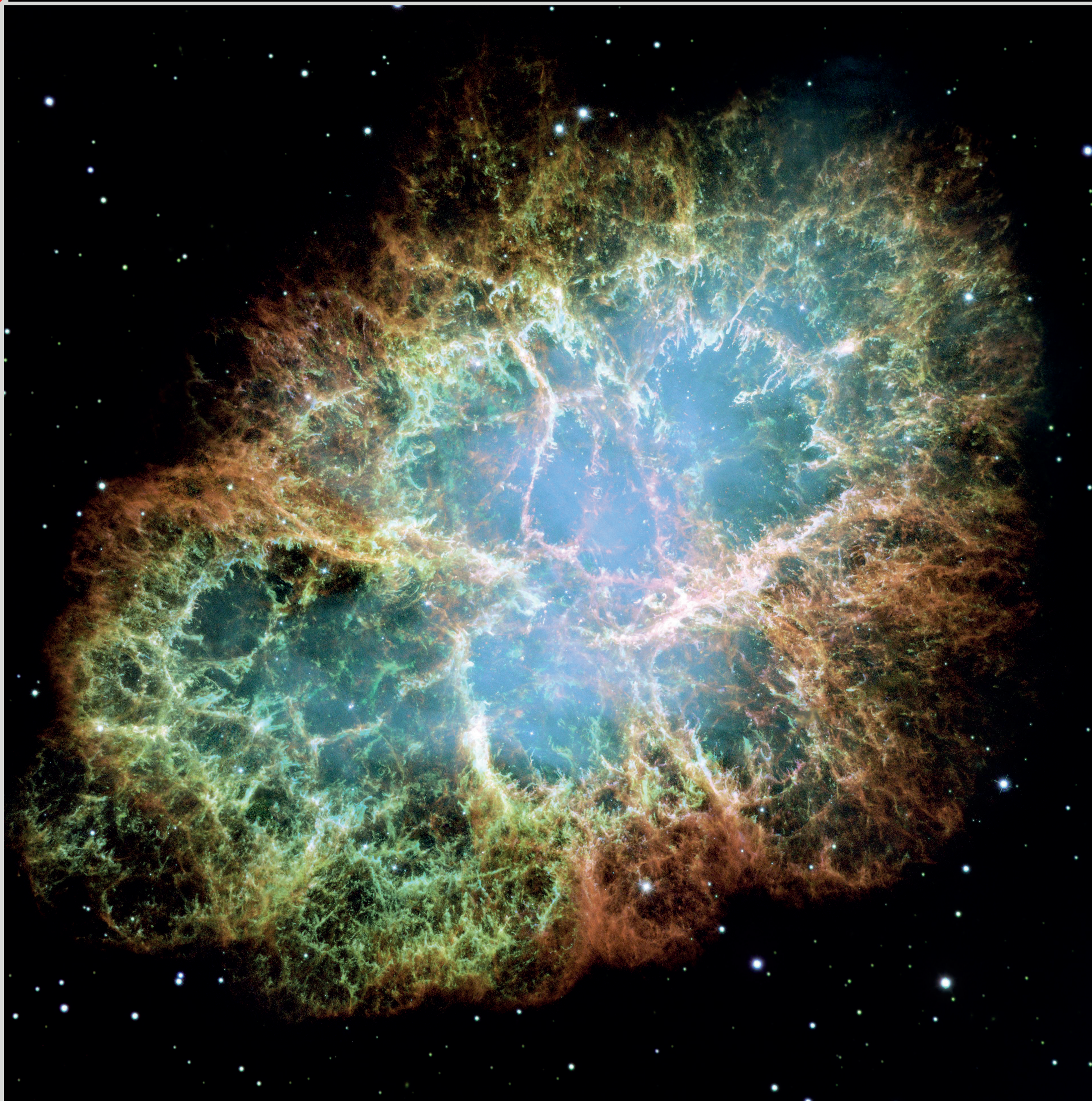
Необходимо также рассмотреть проблему существования тяжелых элементов. Короткие периоды полураспада всех изотопов технеция и прометия полностью объясняют отсутствие этих элементов на Земле. Однако устойчивых изотопов не имеет ни один элемент с атомным номером больше, чем у ^{83}Bi . Наличие многих изотопов (особенно

^{84}Po , ^{85}At , ^{86}Rn , ^{87}Fr , ^{88}Ra , ^{89}Ac , ^{91}Pa) объясняется вековым равновесием с радиоактивными предшественниками; их относительные концентрации определяются периодами полураспада предшествующих изотопов в радиоактивных рядах. Проблема, таким образом, сводится к необходимости объяснить присутствие в космосе тория и урана, наиболее долгоживущие изотопы которых – ^{232}Th ($t=1,4 \cdot 10^{10}$ лет), ^{238}U ($4,5 \cdot 10^9$ лет) и ^{235}U ($7 \cdot 10^8$ лет).

Период полураспада тория сопоставим с возрастом Вселенной ($1,4 \cdot 10^{10}$ лет), т.е. проблемы здесь не возникает. Если весь присутствующий на Земле уран образовался в результате r -процесса, в единственном случае рождения сверхновой звезды, тогда это событие произошло $6,6 \cdot 10^9$ лет назад. Если, что кажется более вероятным, в этом процессе участвовало много сверхновых звезд, тогда эти события, если они были равномерно распределены во времени, должны были начаться за 10^{10} лет до нашего времени. В любом случае уран, по-видимому образовался задолго до возникновения Солнечной системы, возраст которой составляет $4,6-5 \cdot 10^9$ лет. Последние исследования образования и распада тория и урана позволяют оценить возраст нашей Галактики в $1,2-2,0 \cdot 10^{10}$ лет.

r -Процесс (захват протона)

О возможности захвата протона тяжелыми ядрами мы уже несколько раз упоминали в предыдущих разделах. Реакция (p , гамма) может быть также привлечена для объяснения существования ряда протоноизбыточных изотопов, распространенность которых ниже, чем у соседних изотопов с нормальным соотношением протонов и ней-



Крабовидная туманность. Образовалась после взрыва сверхновой.
Разные цвета сгустков газа соответствуют разным элементам.

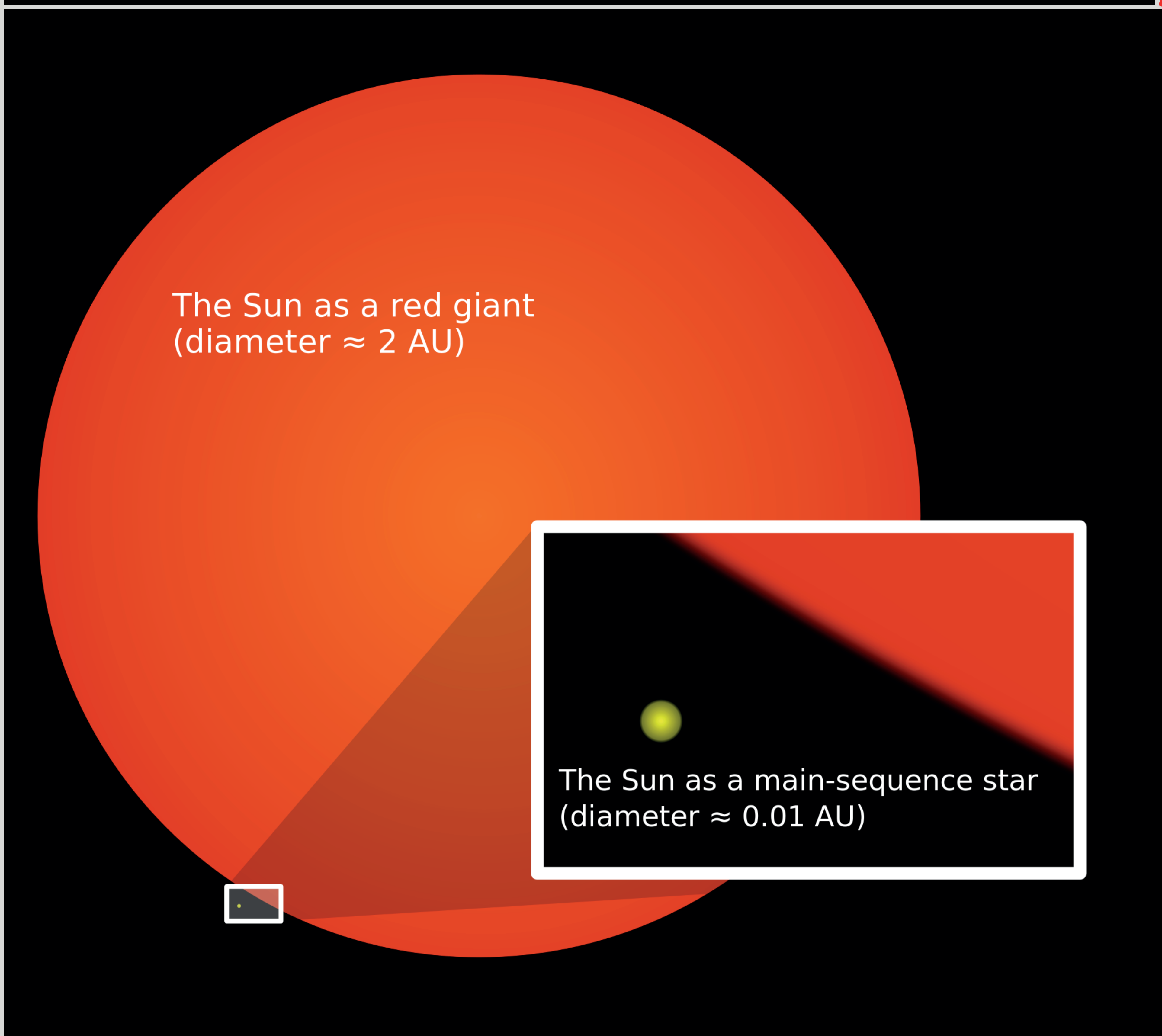
тронов или избытком последних. Такие изотопы могли также образовываться при выбивании нейтрона гамма-квантом, т.е. по реакции (гамма, n). Подобные процессы можно связать с очень короткими периодами активности сверхновых звезд. За исключением ^{113}In и ^{115}Sn , все 36 изотопов, которые, как полагают, образовались этим способом, имеют четные атомные массы; самый легкий из них $^{74}_{34}\text{Se}$, самый тяжелый – $^{196}_{80}\text{Hg}$.

х-Процесс.

Одна из наиболее очевидных особенностей распространенности изотопов в природе – очень низкая космическая распространенность стабильных изотопов лития, бериллия и бора. Парадоксально,

но проблема состоит не в том, чтобы объяснить, почему их распространенности так низки, а в том, чтобы объяснить, почему эти элементы вообще существуют, так как их изотопы обойдены описанной выше нормальной цепью термоядерных реакций.

Кроме того, дейтерий и ^3He , хотя и образуются в процессе горения водорода, должны в этом же процессе полностью расходоваться. Поэтому их существование во Вселенной, пусть и в относительно малых количествах, кажется очень удивительным. Более того, даже если бы все эти изотопы каким-то способом и образовались в звездах, они не могли бы выдержать температуру в их не-



Солнце как звезда главной последовательности и как красный гигант.

драх: их энергии связи таковы, что дейтерий разрушился бы при температуре выше $0.5 \cdot 10^6$ К, Li – выше $2 \cdot 10^6$ К, Be – выше $3,5 \cdot 10^6$ К, B – выше $5 \cdot 10^6$ К. Дейтерий и ^3He отсутствуют в спектрах почти всех звезд; в настоящее время полагают, что они образовались в процессе нуклеосинтеза, протекавшем в последние несколько секунд первоначального Большого Взрыва, а образование звезд – это основной фактор их разрушения.

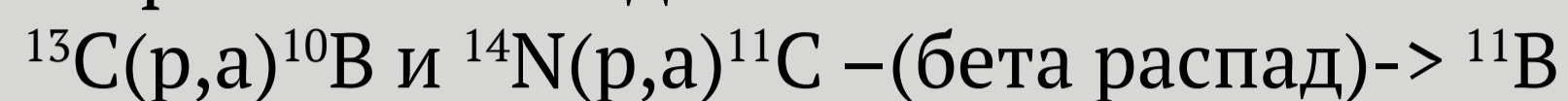
Наиболее вероятно, что пять стабильных изотопов – ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}B , ^{11}B – образовались, главным образом, в реакциях скалывания (фрагментации), обусловленных бомбардировкой ядер галактическими космическими лучами (x-процесс). Космические лучи – это поток разнообразных атомных частиц, движущихся в галактике с релятивистскими скоростями. В космических лучах обнаружены ядра от водорода до урана, хотя преобладают ^1H и ^4He (соотношение $^1\text{H}:\text{}^4\text{He}$:атомные номера от 3-9:Z>10 – 500:40:5:1). В составе космических лу-

чей имеется, однако, поразительная особенность: ядер Li, Be и B, слабо представленных в звездном веществе, в них намного больше, чем Sc, Ti, V и Cr, непосредственно предшествующих пику распространенности вблизи железа.

Самое простое объяснение этого факта состоит в том, что более тяжелые частицы космических лучей, пересекая галактические пространства, время от времени сталкиваются с атомами межзвездного газа (это преимущественно ^1H и ^4He), откалывающимися от них небольшие фрагменты. Скалывание, как называют этот процесс, порождает более легкие ядра из более тяжелых. Возможны также столкновения движущихся с высокой скоростью частиц ^4He с межзвездными атомами элементов группы железа и другими тяжелыми ядрами, в результате которых образуются Li, Be и B (и, возможно, даже ^2H и ^3He), с одной стороны, и элементы в интервале от Sc до Cr, с другой. Как мы уже видели, легкие переходные элементы образуются

также в различных процессах, протекающих внутри звезд, но присутствие в природе элементов с массами от 6-12 свидетельствует о процессах, протекающих в разреженной межзвездной среде в условиях низких температур.

Изотопы бора, помимо процессов скалывания, могут образоваться при реакциях (p,a) внутри звезд, протекающих в ударных волнах при рождении сверхновых звезд:



Недавно была поставлена на обсуждение еще одна интригующая возможность. Если в первые минуты после Большого Взрыва Вселенная не была полностью изотропна и однородна по плотности, то участки с более высокой плотностью характеризовались бы более высокой концентрацией протонов, а участки с меньшей плотностью – большей концентрацией нейтронов. Это вызвано тем, что диффузия протонов из участков с большей плотностью в области с меньшей плотностью затруднена присутствием противоположно заряженных электронов, тогда как электрически нейтральные нейтроны могут диффундировать беспрепятственно. В областях с низкой плотностью и повышенным содержанием нейтронов могли образоваться некоторые нейтроноизбыточные нуклиды.

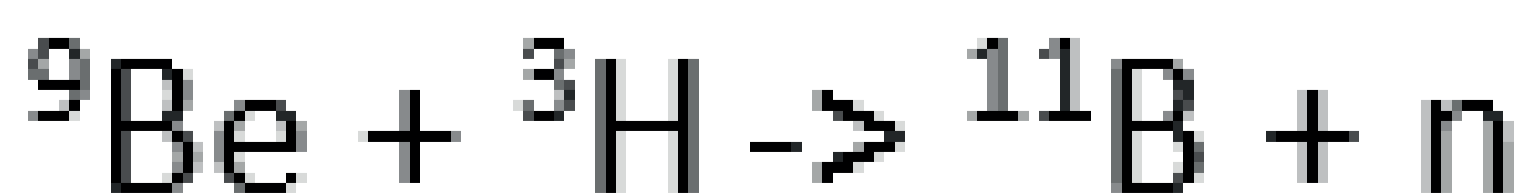
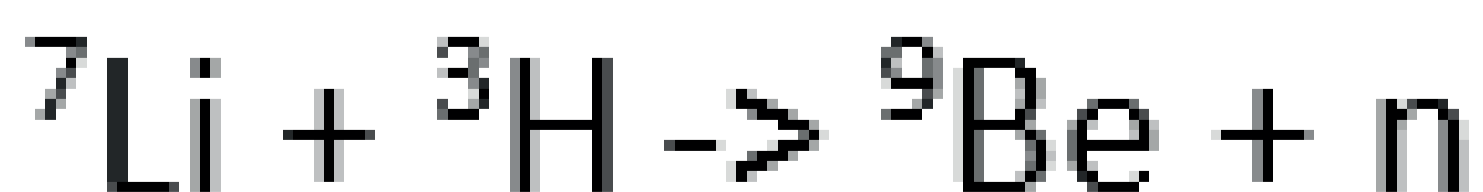
Например, при однородном Большом Взрыве большая часть образовавшегося ^7Li быстро разрушается в результате протонной бомбардировки по реакции $^7\text{Li} + p \rightarrow ^4\text{He}$, но в обогащенном нейтронами участке мог возникнуть радиоактивный изотоп ^8Li .



Если $^8\text{Li}^*$, прежде чем распасться, столкнется с одним из наиболее часто встречающихся здесь ядер ^4He , может образоваться ^{11}B , который в этих усло-



виях более устойчив, чем в областях с повышенным содержанием протонов, где выше вероятность реакции $^{11}\text{B} + p \rightarrow ^4\text{He}$. Другие нейтроноизбыточные нуклиды также могут образоваться и «выжить» в описанных условиях в больших количествах, чем это возможно при высокой концентрации протонов. Например:



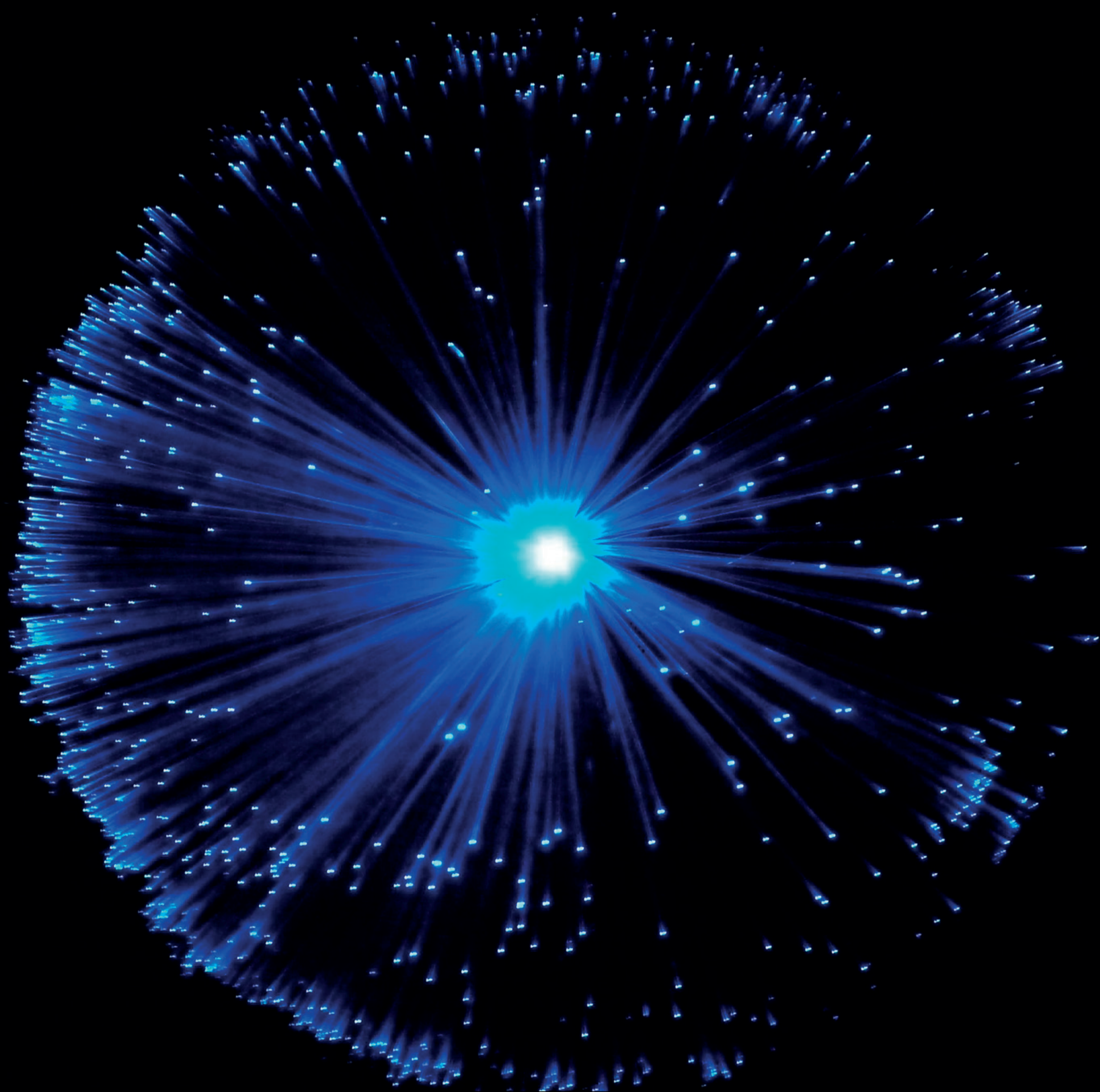
Таким образом, оценки относительной распространенности различных изотопов легких элементов Li, Be и B в некоторой степени зависят от принятой модели Большого Взрыва. Экспериментальные значения их распространенности, возможно, позволят со временем сделать более определенные заключения об относительной важности этих процессов по сравнению с реакциями скалывания в x-процессе.

Подводя итог, можно сказать, что разнообразные процессы нуклеосинтеза в настоящее время позволяют объяснить существование в природе 270 известных стабильных изотопов элементов вплоть до $^{209}_{83}\text{Bi}$ и понять, во всяком случае в общих чертах, чем обусловлены их относительные концентрации во Вселенной. Огромное число гипотетически возможных межъядерных превращений и реакций делает детальный расчет необычайно трудным. Изменения энергии легко рассчитываются по известным значениям относительных атомных масс различных нуклидов.

В то же время поперечные сечения многих реакций, определяющие их вероятности, неизвестны, что препятствует точным расчетам скоростей реакций и равновесных концентраций в тех экстремальных условиях, которые существуют даже внутри стабильных звезд. Еще труднее точно определить условия, возникающие при взрывах сверхновых, и протекающие при этом реакции.

Однако несомненно, что в течение последних десятилетий достигнут существенный прогресс в интерпретации ошеломляющего разнообразия распространенностей изотопов, которые составляют химические элементы, используемые химиками. Приблизительное постоянство изотопного состава химических элементов – это удачный для нас результат тех квазистационарных условий (псевдопостоянных), которые установились во Вселенной за время, необходимое для формирования Солнечной системы. Не стоит поддаваться искушению порассуждать о том, могла ли бы химия стать количественной наукой, если бы элементы имели изменяющийся в широких пределах изотопный состав, поскольку тогда гравиметрический анализ (основанный на изменениях масс в течении реакции) был бы невозможен и вряд ли в химии могли бы произойти великие открытия 19 века. В то же время нас не должно теперь удивлять то, что атомные массы элементов не обязательно всегда являются «природными постоянными». Напротив, следует ожидать вариаций атомных масс, которые могут оказывать заметное влияние на результаты физико-химических измерений и количественного анализа.





© Квazar 2016
support@kvazar-nis.ru
www.kvazar-nis.ru
www.vk.com/kvazar_nis
All rights reserved