

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1978 ГОДА

541.136

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ *)

А. Пензиас

На протяжении почти всей истории человечества считалось, что материя состоит из различных сочетаний четырех основных элементов: земли, воздуха, огня и воды. Современная наука существенно удлинила этот список: число известных в настоящее время химических элементов больше ста. Многие из них образовались в глубинах Вселенной: в пламени внутри звезд в течение их жизни и во время взрывов, приводящих к их смерти. Это такие элементы, как кислород, которым мы дышим, железо, содержащееся в нашей крови, уран в наших реакторах. Какая-то часть элементов возникла, когда еще не было звезд, в процессе рождения самой Вселенной.

Цель этого обзора — рассказать о том, как было достигнуто современное понимание происхождения химических элементов. Правильнее всего начать с Лавуазье, который в 1789 г. опубликовал первый научный перечень элементов. Из двадцати элементов этого перечня пять или около того были взяты из работы Карла Вильгельма Шееле из Готенберга. (Он получил субсидию от Академии, которой адресована настоящая речь. Это было более чем за столетие до того, как Альфред Нобель предоставил ей иную возможность для признания научных достижений.) Систематизация элементов в таблицу Менделеева была выполнена к концу прошлого столетия. При этом росла надежда на последовательное понимание как природы, так и происхождения химических элементов.

Исчерпывающее научное понимание происхождения элементов требует описания их синтеза из общих составляющих частей (например, протонов и нейтронов) в условиях, о которых известно, что в некотором доступном месте они осуществляются или должны были осуществляться в прошлом. По этой причине попытки достичь такого понимания начались с привлечения идей ядерной физики. Как только были идентифицированы возможные процессы образования элементов и были определены условия, необходимые для их осуществления, возникла следующая задача — поиск подходящих мест, где могли бы осуществляться ядерные реакции. Хотя всерьез такой анализ начался с тридцатых годов, лишь в 60-х годах он приблизился к концу. Только к этому времени возникли законченные контуры удовлетворительного теоретического описания. За рассматриваемый промежуток времени в границах соответствующих научных воззрений можно заметить приливы и отливы внимания исследователей к двум основным представлениям. В рамках одного из них считалось, что эле-

*) P e n z i a s Arno A. The Origin of the Elements: Nobel Lecture. December 8, 1978. — Перевод С. В. Буланова.

менты созданы внутри звезд нашей галактики и выброшены в межзвездное пространство, поставляя таким образом сырой материал для образования различных объектов, от новых солнц и планет до камней под нашими ногами. В представлениях второго типа предполагалось, что имеющиеся в настоящее время элементы «сварились» в горячем «супе» ядерных частиц задолго до того, как образовались звезды. Это дозвездное состояние обычно ассоциируется с начальным горячим и плотным состоянием расширяющейся Вселенной.

В тридцатых годах нашего столетия были даны первые количественные формулировки процессов нуклеосинтеза. Были найдены требуемые для этого условия. Считалось, что они не могут встречаться внутри звезд. Поэтому в сороковых годах внимание было направлено на изучение дозвездного состояния вещества, где, как полагалось, образуются элементы. Эти усилия не достигли поставленной цели и в пятидесятых годах синтез элементов в звездах вновь стал привлекать к себе интерес. К тому времени стало признанным существование внутри звезд широкого диапазона состояний, которые ранее исключались из рассмотрения. Наконец, в шестидесятых годах стало заметным новое пробуждение интереса к воззрениям о дозвездном состоянии. В то же самое время было дано решительное подтверждение Вселенной «Большого взрыва» в результате открытия фонового космического радиоизлучения и его идентификации как реликтового излучения огненного шара, которым была Вселенная в начале своего существования.

Оглядываясь на пройденный путь, мы видим, что процесс научного познания сильно тормозился ограничениями, связанными с узким диапазоном температур и давлений, которые в то время считались необходимыми для нуклеосинтеза в звездах. Казалось, что основанная на классической термодинамике теория внутреннего строения звезд^{1,2} была способна объяснить состояние известных тогда звезд, используя условия, не слишком отличающиеся от условий внутри нашего Солнца. Полагали, что намного более высокие температуры и давления, требуемые в ядерной физике для образования элементов, возможны только в случае необратимого коллапса (т. е. в теории не хватало механизмов противодействия гравитационным силам). Следовательно, никакое вещество, полученное в таких условиях, не могло бы вновь выйти в межзвездную среду и оказаться в обычных звездах. Сведенные воедино доводы и механизмы, необходимые для объяснения синтеза тяжелых ядер и их выброса в межзвездное пространство, представлялись искусственными. Описывая их, С. Чандрасекхар писал: «...Нужно иметь веру при выводе следствий из существования предела белых карликов. Но этой веры не хватало в тридцатых и сороковых годах, по причинам, приведенным в моей статье «Почему звезды такие, какие они есть?» (в печати)». Таким образом, наш рассказ о сорокалетнем путешествии начинается с отсутствия достаточной веры.

Ядерная физика была использована для описания образования элементов в астрофизических условиях в статье Вейцеккера «О превращениях элементов внутри звезд»^{3, 4}. (Интересующиеся читатели могут найти ссылки на более раннюю литературу в обзоре Альфера и Германа 1950 г.⁵) Основной чертой работы Вейцеккера является гипотеза синтеза из нейтронов и последующего β -распада: непосредственный синтез из протонов невозможен из-за кулоновского отталкивания положительно заряженных ядер тяжелых элементов. Следующие из этой гипотезы количественные предсказания могут быть получены из эмпирических данных о связи стабильности ядра с распространенностью элемента при использовании условий термодинамического равновесия, аналогичных тем, которые используются в химических реакциях.

Рассмотрим обратимую экзотермическую реакцию двух элементов А и В, сочетание которых образует устойчивое связанное состояние АВ с энергией образования ΔE, т. е.



Мы можем рассчитать относительное содержание элементов при тепловом равновесии из соотношения

$$\frac{[A][B]}{[AB]} \propto e^{-\Delta E/kT}, \tag{2}$$

где k — постоянная Больцмана. Квадратные скобки используются для обозначения концентраций.

Стабильные изотопы легких элементов имеют приблизительно равные числа нейтронов и протонов (рис. 1). Последовательное прибавление нейтронов к ядрам (скажем, ¹⁶O) приводит в результате к более тяжелым изотопам того же самого элемента (¹⁷O и ¹⁸O в нашем случае) до тех пор, пока разность протонов и нейтронов не станет достаточно велика, чтобы сделать ядро нестабильным (β-распад ¹⁹O в ¹⁹Fe происходит за время порядка 29 с). Мера устойчивости изотопа — приращение энергии связи при добавлении последней частицы. В случае ¹⁷O, например, это приращение равно

$$\Delta E (17) = [M (16) + M (n) - M (17)] c^2, \tag{3}$$

где M (16), M (n) и M (17) — массы ¹⁶O, нейтрона и ¹⁷O соответственно; c² — квадрат скорости света. В нашем примере масса ¹⁷O равна 17,004 533 а. е. м., масса нейтрона — 1,008986 а. е. м., а масса ¹⁶O — 16,000 000. Подставляя

эти значения в уравнения (3), находим, что приращение энергии связи должно быть равно 0,004 453 а. е. м. или 6,7 · 10⁻⁶ эрг. Используя соотношение (2), мы можем сделать некоторые выводы о температурах, при которых происходит добавление нейтрона к ядру ¹⁶O. Вследствие экспоненциального характера этой зависимости можно ожидать, что ΔE и kT должны быть сравнимы по величине в широком диапазоне относительных распространенностей изотопов. Таким образом, в приближении

$$\Delta E \approx kT \tag{4}$$

мы находим, что 6,7 · 10⁻⁶ эрг соответствует температуре 5 · 10¹⁰ К.

Следуя более ранним работам, Вейцзеккер применил перечисленные выше соотношения к относительному содержанию изотопов элемента, имеющего три стабильных изотопа (например, ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O), в состоянии

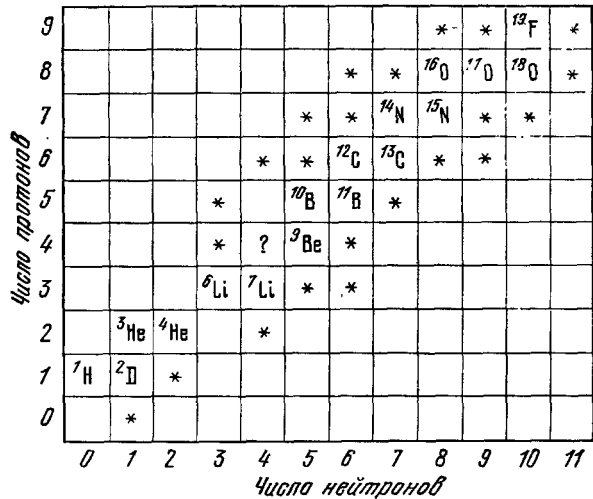


Рис. 1. Элементы от водорода до фтора.

Стабильные ядра нанесены как функции от чисел протонов и нейтронов в них. Радиоактивные образования обозначаются звездочками. Пустые клетки указывают на то, что соответствующие комбинации протонов и нейтронов не могут существовать. (Отметим, что обе клетки, соответствующие массе, равной 5, пусты.) Знак вопроса обозначает ⁹Be. Это ядро может существовать в специальных условиях в виде метастабильной комбинации двух ядер ⁴He, что создает возможность для преобразования трех ядер ⁴He в ¹²C.

теплового равновесия, устанавливаемом при контакте с резервуаром нейтронов при температуре T . Если обозначить через $[^{16}\text{O}]$, $[^{17}\text{O}]$, $[^{18}\text{O}]$ и $[n]$ концентрации ядер кислорода и нейтронов соответственно, то мы можем использовать выражения (2) и (3) для того, чтобы записать

$$\frac{[^{16}\text{O}][n]}{[^{17}\text{O}]} \propto e^{\Delta E(17)/kT},$$

а также

$$\frac{[^{17}\text{O}][n]}{[^{18}\text{O}]} \propto e^{\Delta E(18)/kT}.$$

Таким образом, для относительной распространенности трех изотопов имеются два выражения. Они содержат концентрацию нейтронов и температуру, что позволяет отдельно определить эти две величины из одних

только данных о распространенности кислорода. (Распространенность нескольких сотен стабильных ядер (рис. 2) была определена на основании изучения земных образцов, звездных спектров и метеоритов).

Используя метод трех изотопов, Чандрасекхар и Генрич в 1942 г. ⁶ получили плотности нейтронов в тепловом равновесии и температуры для пяти элементов. В соответствии с представлениями предыдущих работ не было неожиданным то, что для каждого элемента требовались разные температуры и плотности нейтронов. В то время как диапазон значений температуры был относительно невелик — между $2,9 \cdot 10^9$ К для неона и $12,9 \cdot 10^9$ К для кремния, плотности нейтронов изменялись от $\sim 10^{31}$ см⁻³ для кремния до $\sim 10^{19}$ см⁻³ для серы: двенадцать порядков величины! Полученные высокие значения температур и давлений, так же как и недостаточная их согласованность при переходе от элемента к элементу, свидетельствуют о скоротечности этой термодинамически равновесной картины образования элементов в звездах.

Эта картина синтеза элементов из нейтронов сталкивалась и с другой трудностью. Она состояла в одновременном требовании очень быстрого за-

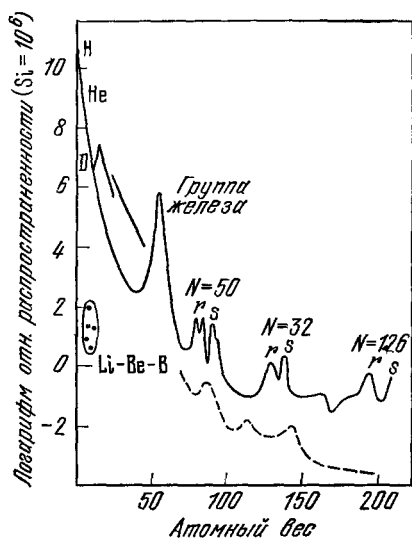


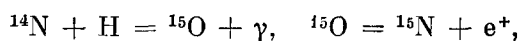
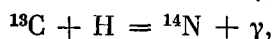
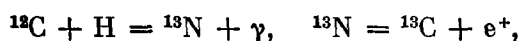
Рис. 2. Относительные распространенности элементов.

Плавные кривые представляют распространенности различных групп элементов согласно ¹², где было предложено восемь процессов для того, чтобы объяснить эти данные. (Более современное описание см. в ²⁸.) Литий, бериллий и бор (обведены овалом) не образуются в процессах синтеза, которые поставляют ядра от гелия до углерода. Небольшие количества этих элементов, найденные в природе, представляют собой продукты распада тяжелых элементов.

захвата нейтронов при образовании таких ядер, как уран и торий, и очень медленного захвата для образования других элементов. При синтезе «медленных» элементов требуется, чтобы последовательный захват нейтронов был достаточно медленным для того, чтобы допустить необходимый на промежуточных этапах β -распад. В то же время для других элементов необходим быстрый последовательный захват нейтронов для того, чтобы сделать возможным их образование через ряд короткоживущих ядер. Элементы, образованные в результате таких медленных и быстрых процессов, соответствуют s- и r-максимумам на рис. 2. (Краткое обсуждение началь-

ного состояния этого вопроса приводится в последней главе книги Чандра-секхара 1939 г. ⁷).

Огромный вклад в понимание ядерной физики звезд был внесен другим подходом к проблеме образования элементов. В своей прекрасной статье, озаглавленной «Источники энергии звезд» Бете в 1939 г. ⁸ рассмотрел отдельные ядерные реакции легких ядер, от водорода до кислорода. В этой статье была установлена роль выгорания водорода в гелий посредством двух процессов и демонстрировалось количественное согласие с наблюдениями. В первом процессе протоны объединяются, образуя дейтерий, который при последующем захвате протонов преобразуется в ${}^4\text{He}$. Во втором — углерод и азот используются как катализаторы, давая



(обозначения и форма записи взяты из цитируемой статьи).

Однако, что касается синтеза более тяжелых элементов, то не существует стабильного процесса, в результате которого возникали бы ядра с массой, большей 4. Ядро с массой 4 не может дать более тяжелых ядер в сочетании с каким-либо другим ядром. В частности, не существует устойчивых ядер с массой, равной 5, так что добавление нейтрона или протона к ${}^4\text{He}$ не дает результата. Бете писал: «Прогресс ядерной физики за последние несколько лет позволяет довольно уверенно решить, какие процессы могут, а какие не могут иметь место внутри звезд... в настоящих условиях элементы тяжелее гелия не могут в значительной мере быть синтезированы». В попытке обойти барьер массы 4 Бете рассмотрел и отверг прямое образование ${}^{12}\text{C}$ при одновременном столкновении трех ядер гелия. Он также отметил, что образованию ${}^8\text{Be}$ из двух ядер гелия препятствует то известное обстоятельство, что эти ядра имеют отрицательную энергию связи «между 40 и 100 кэВ», и, следовательно, неустойчивы. Эта разность энергий соответствует температуре около 10^9 К. Это значение вновь необходимо сравнивать с $\sim 2 \cdot 10^7$ К — величиной, которая тогда считалась допустимой для температуры звезд. В то время не было осознано, что можно получить ${}^8\text{Be}$ из ${}^4\text{He}$ при достаточно высокой плотности ${}^4\text{He}$ и достаточно большой температуре и таким образом обойти барьер массы 4. Решающая роль ${}^8\text{Be}$ в происхождении элементов должна была ждать признания в рамках нового понимания физики внутреннего строения звезд в начале 50-х г.

Поэтому в промежуточном десятилетии внимание было привлечено к процессам, которые должны были происходить в эпоху, предшествующую звездообразованию, а именно, к горячему и плотному состоянию, ассоциируемому с рождением Вселенной. Формальное математическое представление, позволяющее описывать рождение Вселенной, было заложено в работах Фридмана 1922 г. ⁹, Леметра 1927 г. ¹⁰ и Эйнштейна и де Ситтера 1932 г. ¹¹. Применимость этого формализма к реальному миру основывалась на замечательном по простоте и силе результате Хаббла 1929 г. ¹², свидетельствующем о том, что наблюдаемые скорости «внегалактических туманностей» (т. е. составляющих Вселенную галактик) пропорциональны их расстоянию от наблюдателя. В простейшей форме он формулируется так: наиболее удаленные галактики удаляются с наибольшей скоростью, а ближайшие — медленнее всех. Это в точности то, чего можно ожидать, если все галактики начали свой разлет из общего начала и если в один

и тот же начальный момент их движению был дан старт, представляющий собой громадный взрыв.

Эта идея расширяющейся Вселенной была не слишком популярна среди респектабельных ученых того времени. Она была принята в 40-х годах, частично из-за того, что теории звездного нуклеосинтеза потерпели неудачу в 30-х г. (Представление о расширяющейся Вселенной вновь игнорировалось в 50-х г., когда стало понятным большое разнообразие звездных явлений. Более уравновешенная точка зрения появилась в 60-х г., но в нашем рассказе об этом речь будет идти позже.) Заглавие статьи Чандрасекхара и Генрича 1942 г. ⁶ «Попытка интерпретировать относительное содержание элементов и их изотопов» отражает условность и неудовлетворительность понимания вопроса в то время. Статья начинается так: «В настоящее время, в основном, считается, что химические элементы не могут быть синтезированы в тех условиях, которые, как мы *сейчас предполагаем* (курсив А. Пензиаса), существуют внутри звезд». В качестве альтернативы авторы предполагали, что эти процессы возможны в расширяющейся и остывающей на ранней стадии Вселенной. В рамках этого представления каждый элемент сохраняет относительную распространенность, «замороженную» в соответствующей фазе расширения горячей ($T \geq 10^9$ К) и плотной ($\beta \geq 10^6$ г/см³) Вселенной.

Однако, как было показано Гамовым в 1926 г. ¹³, образование элементов в ранней Вселенной не может быть осуществлено посредством таких равновесных процессов. Он продемонстрировал это непосредственными расчетами требуемых масштабов времени (интересующийся читатель может найти обсуждение относящихся к этой проблеме вопросов в замечательной книге С. Вейнберга «Первые три минуты» ¹⁴).

Рассмотрим точечную массу m , расположенную на поверхности расширяющейся сферы с плотностью ρ . Энергия E этой массы по отношению к центру сферы является заданной величиной, равной сумме ее кинетической и потенциальной энергий (последняя — отрицательная величина):

$$E = \text{const} = \frac{mv^2}{2} - \frac{Gm(4\pi\rho R^3/3)}{R}; \quad (5)$$

здесь G — гравитационная постоянная, ρ — плотность, R — радиус сферы и v — направленная вовне скорость точечной массы суть функции времени. Так как $4\pi\rho R^3/3$ — масса, содержащаяся внутри сферы, — представляет собой не возрастающую функцию времени, то последний член в правой части (5) должен стать сколь угодно большим для достаточно малых значений $R(t)$, т. е. на ранних стадиях расширения. Для этого «приближения начальной стадии расширения» оба слагаемых в правой части (5) должны стать очень большими, потому что разность между ними фиксирована. Таким образом, мы замечаем, что эти два члена, по существу, равны на раннем этапе, и после простой перестановки получаем

$$\frac{R^2(t)}{v^2(t)} \approx \frac{3}{8\pi\rho(t)G}; \quad (6)$$

здесь R/v (характерный масштаб времени расширения) — обратная величина постоянной Хаббла. В космологии она называется хаббловским возрастом. (Хаббловская «константа» постоянна в пространстве; она изменяется со временем.) Подставляя численные значения в (6), имеем

$$\text{возраст} \approx \sqrt{\frac{10^6}{\rho}} \text{ с}, \quad (7)$$

где ρ выражается в г/см³. Отсюда, как заметил Гамов, плотность нейтронов, равная 10^{30} см⁻³ (около 10^6 г/см³), может существовать на раннем этапе развития Вселенной в течение времени меньшего, чем одна секунда. Харак-

терное время β -распада, необходимого для установления соответствующих соотношений между протонами и нейтронами, порядка минуты. В стадии расширения Вселенной просто не хватает времени для установления равновесия с нейтронами при высоких плотностях.

С этого примера началось рассмотрение неравновесных процессов. К счастью, тогда были выполнены два своевременных исследования, необходимых для изучения такого рода процессов. После конца второй мировой войны в открытой литературе были опубликованы значения сечений захвата нейтронов. Это — первое из упомянутых выше исследований.

История второго начинается с того, что один одаренный студент нуждался в диссертационной теме. В 1946 г. ученик Гамова Р. Альфер выбрал себе в качестве темы диссертации исследование вопроса о турбулентности и образовании галактик в ранней Вселенной, но Лифшиц¹⁵ решил эту проблему. В результате Альфер вскоре приступил к работе над новой темой о неравновесном образовании элементов при захвате нейтронов. Так как не все сечения были известны, Альфер экстраполировал неизвестные значения плавной кривой, проведенной через опубликованные точки. Он использовал эту кривую для своих расчетов. С результатами расчетов Альфера научный мир ознакомился по краткому письму, список авторов которого сделался частью физического фольклора (Альфер, Бете, Гамов, 1948 г.¹⁶).

В этом месте дорога, по которой шло наше повествование, разделяется. Надо проследить за двумя различными путями, которые в конечном результате соединятся вновь. Мы проследуем по одному из них, понимая, что должны будем позже вернуться к началу, чтобы проследовать по другому пути.

Доклад Альфера о результатах своей работы вызвал ряд новых предложений, которые привели последовательно к результатам, сильно отличающимся от того, что он мог ожидать. Во-первых, у Энрико Ферми, присутствовавшего на семинаре, на котором выступал Альфер, вскоре возникло важное возражение, состоящее в следующем. Линейная интерполяция сечений захвата в случае легких ядер приводила к серьезной ошибке. Известно, что сечение захвата нейтронов частицами с массой, равной 4, должно быть практически равно нулю. В то же время кривая Альфера была проведена по сечениям ближайших ядер, которые намного больше. Ферми поручил своему студенту Туркевичу повторить расчеты Альфера, используя для сечений точно измеренные значения. Результаты Ферми и Туркевича не были опубликованы (см. ¹⁵), а были просто посланы непосредственно Альферу. Они продемонстрировали то, что Гамов и его сотрудники уже знали и в частном порядке признавали: в их модели невозможно образование элементов с массой, большей 4, из одних только нейтронов.

Во-вторых, Ферми предложил своему другу Мартину Шварцшильду заняться наблюдениями, результаты которых могли бы свидетельствовать о синтезе тяжелых элементов в звездах. Вместе со своей женой Барбарой, Шварцшильд в полной мере исполнил это пожелание. В одной из классических работ¹⁷ по наблюдательной астрономии они измерили слабые спектры двух групп звезд одного и того же звездного типа. Это были F-карлики — спокойные звезды, обладающие большим временем жизни.

Разделение на две группы (население I типа и население II типа) проводилось на основании их скоростей. Это различие, следуя Бааде, использует тот факт, что межзвездный газ почти полностью содержится в галактической плоскости из-за того, что вертикальное (т. е. перпендикулярное к плоскости галактики) движение быстро затухает вследствие столкновений облаков друг с другом. По этой причине новые звезды, родившиеся из этого газа, должны находиться в плоскости галактики и не должны

иметь заметной вертикальной скорости. (Такие легко обнаружимые звезды были замечены первыми и поэтому были названы населением I.) Старые звезды, возникшие до образования галактического диска, сохраняют большие скорости газа, из которого они были образованы, потому что столкновения между звездами пренебрежимо редки. Следовательно, более старые звезды (население II) могут быть выделены по их более высоким скоростям. Проведенное Шварцшильдами сравнение спектров звезд привело к четким выводам: более молодые звезды населения I обладали более высоким содержанием железа и других металлов. Это говорило об обогащении межзвездной среды тяжелыми элементами за время между образованием старых и молодых звезд.

Это безошибочное свидетельство производства металлов в звездах в течение времени жизни галактики устраняло необходимость в дозвездном механизме образования элементов.

Для звездного нуклеосинтеза оставалось только найти путь в обход барьера массы, равной 4. Это был третий и последний шаг.

Мартин Шварцшильд сообщил об этом вызывающем факте молодому физику-ядерщику Эду Солпиту. Солпитер принялся за работу, имея в виду намного более широкий диапазон условий внутри звезд, с которыми можно было работать, по сравнению с тем, что ограничивало Бете в его ранних исследованиях. Он вскоре нашел ¹⁸, что хотя ⁸Ве неустойчив, он может присутствовать в горячих плотных ядрах красных гигантов. Количество ⁸Ве оказалось достаточным, чтобы обеспечить существование промежуточной ступеньки для образования ¹²C посредством добавления ядер гелия-4.

Триумф гипотезы звездного происхождения элементов в то время казался полным. Она опиралась как на наблюдательные подтверждения, так и на существование теоретического пути в обход барьера массы 4. Фред Хойл отвергал все дозвездные теории нуклеосинтеза, как «требующие состояния Вселенной, в пользу которого у нас нет свидетельств» ¹⁹. Довольно говорить о теории Альфера и Гамова! Гамов сказал: «Если кривая проста, то ее объяснение должно быть простым» ²⁰. Но кривая пространенности элементов не так проста (рис. 2). Бербиджи и др. ¹⁹ для объяснения этих данных привлекли не менее семи различных процессов. После того как они оставили эту проблему, потребовался восьмой процесс для того, чтобы заполнить некоторые оставшиеся пробелы в их картине.

Иронией судьбы сам Фред Хойл обнаружил пробел, который не мог быть заполнен в теории звездного нуклеосинтеза. Это был пробел в наиболее хорошо понятом процессе — синтезе гелия из водорода. Сгорание водорода в гелий снабжает энергией Солнце и другие звезды и поставяет строительный материал для образования более тяжелых элементов. Но Хойл пришел к заключению о том, что около девяноста процентов обнаруженного в звездах гелия должно было образоваться до рождения галактики. Основой для этого вывода были энергетические соображения. Полная величина энергии, которая выделяется во время синтеза всего наблюдаемого гелия, в несколько десятков раз больше, чем энергия, которую излучают галактики с момента их образования. Таким образом, было «трудно предположить, что весь гелий был произведен в обычных звездах» (Хойл и Тэйлор, 1964 г. ²⁶). Центр внимания сместился от теории звездного образования гелия к его синтезу на ранних этапах расширения Вселенной. Тем самым была возрождена работа, начатая Джорджем Гамовым около шестнадцати лет до этого. Как упоминалось выше, мы отложили изложение работы Гамова для того, чтобы сначала проследить за развитием картины звездного нуклеосинтеза. Теперь можно следовать по второму пути.

Несмотря на трудности, присущие трактовке Альфера (см., например, обзор Альфера и Германа, 1950 г. ⁵), она дает основу для теории, обладающей глубокой простотой и огромной силой (Гамов, 1948 г. ²²). Хотя и некорректная почти во всех своих детальных предсказаниях, новая теория Гамова указала путь, по которому должны были следовать другие. Он заметил, что нуклеосинтез не может происходить в раннюю наиболее горячую и плотную эпоху расширения Вселенной потому, что тепловые фотоны при температурах $\geq 10^{10}$ К достаточно энергичны для того, чтобы разрушать связанные группы частиц. Ядерные реакции могут начаться, только когда температура понизится до $\sim 10^9$ К. Однако любой синтез должен быть закончен в течение нескольких сотен секунд до того, как все свободные нейтроны распадутся в протоны. Гамов рассмотрел цилиндр (рис. 3), сквозь который за время их жизни пролетают нейтроны с тепловой скоростью, соответствующей 10^9 К. Поперечное сечение цилиндра было равно сечению захвата с образованием дейтрона. Гамов приводит следующие доводы. Если синтез элементов на раннем этапе развития Вселенной должен был быть заметным, то некоторая часть, скажем, половина, исходных нейтронов должна была столкнуться с протонами для того, чтобы образовать дейтроны прежде, чем распасться. Следовательно, половина элементарных цилиндров Гамова должна содержать протоны. Отсюда можно определить число протонов в единице объема. Исходя из этого результата, массы протона и оценки части вещества, которая была в форме протонов (грубо говоря, половина), Гамов получил, что плотность вещества во Вселенной с температурой $\sim 10^9$ К приблизительно равна 10^{-6} г/см³. 3

Гамов затем заметил, что плотность излучения при 10^9 К (т. е. плотность энергии, деленная на c^2) была около 10 г/см³ по сравнению с только 10^{-6} г/см³ для вещества. Это делает излучение доминирующим слагаемым в энтропии Вселенной на ранних этапах. В результате Вселенная остывает при расширении, как если бы вещества не было. В таком случае температура меняется обратно пропорционально радиусу расширяющегося элемента объема ^{23, 24}, т. е.

$$T \propto R^{-1}. \tag{8}$$

Так как плотность вещества ρ меняется обратно пропорционально кубу радиуса, то теперь мы можем заменить (8) на

$$T \propto \sqrt[3]{\rho}, \tag{9}$$

и

$$T_1/T_2 = \sqrt[3]{\rho_1/\rho_2}.$$

Эта четкая связь между температурой и плотностью вещества справедлива до тех пор, пока излучение остается доминирующей составляющей. Когда температура падает ниже $\sim 3 \cdot 10^3$ К, вещество оказывается слишком холодным для того, чтобы оставаться ионизованным. Как только вещество становится нейтральным, излучение свободно проходит через него и оказывается с ним больше не связанным: оно свободно расширяется в полной обособленности. Уравнение (9) остается при этом справедливым.

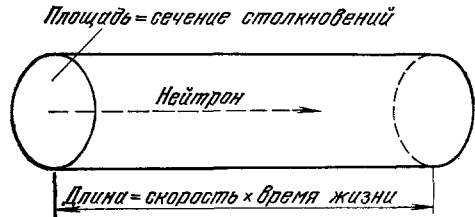


Рис. 3. Элементарный цилиндр Гамова.

Объем, который пронизывают нейтроны на ранней стадии расширения Вселенной. Длина цилиндра равна произведению тепловой скорости нейтронов (при 10^9 К) на их время распада. Площадь поперечного сечения равна сечению образования дейтрона при столкновении протона с нейтроном. Доля нейтронов, образующих дейтроны, равна вероятности нахождения протона в цилиндре.

Гамова интересовало только распространение излучения до эпохи, когда вещество становится нейтральным и отсоединяется от излучения. Далее вещество обладает только своей собственной внутренней энергией, противодействующей гравитационному сжатию. Поэтому оно разбивается на куски и сжимается, образуя галактики. Гамов использовал уравнение (9) для того, чтобы найти плотность вещества при температуре $3 \cdot 10^3$ К, и критерий Джинса для определения размеров сжимающихся фрагментов. Таким образом, используя простое предположение о том, что половина исходного количества нейтронов пошла на образование дейтронов, он смог получить выражение для масс галактик, содержащее только фундаментальные постоянные. Это был ловкий прием даже для него!

Статья Гамова воодушевила его бывшего студента Альфера и его сотрудника Роберта Германа провести более строгие расчеты²⁵. Наиболее важно то, что они заменили приближение «начальной эпохи» Гамова на более точную формулировку и проследили за изменением температуры первичного реликтового излучения до настоящего времени. Взяв современную плотность вещества во Вселенной равной 10^{-30} г/см³, они пришли к выводу, что современная плотность энергии реликтового излучения должна соответствовать температуре в несколько градусов Кельвина. Хотя ссылки на это предсказание постоянно встречались в научно-популярных произведениях Гамова, но оно было явно повторено лишь в небольшом числе их последующих научных работ. Что же касается обнаружения реликтового излучения, то, по-видимому, они считали, что в первую очередь это излучение проявит себя как увеличение плотности энергии²⁵, с. 1093). Этот вклад в приходящий на Землю общий поток энергии должен быть замаскирован космическими лучами и суммарным оптическим излучением звезд. Обе эти составляющие имеют сравнимые плотности энергии. Мнение о том, что действия трех составляющих с приблизительно равными энергиями нельзя разделить, можно найти в письме Гамова, написанном Альферу в 1948 г. (неопубликовано; любезно предоставлено мне Р. А. Альфером). «Температура космического пространства, равная ~ 5 К, объясняется современным излучением звезд (С-циклы). Единственно, что мы можем сказать, это что оставшаяся от исходного тепла Вселенной температура *не выше* 5 К». Они, по-видимому, не осознавали того, что своеобразные спектральные характеристики реликтового излучения должны выделять его среди других эффектов.

Первое опубликованное признание реликтового излучения в качестве обнаружимого явления в радиодиапазоне появилось весной 1964 г. в краткой статье А. Г. Дорошкевича и И. Д. Новикова, озаглавленной «Средняя плотность излучения в Мегалактике и некоторые вопросы релятивистской космологии»²⁶. Хотя английский перевод²⁷ появился в том же году, но несколько позже, в широко известном журнале «Soviet Physics — Doklady», статья, по-видимому, не привлекла к себе внимания других специалистов в этой области. В этой замечательной статье не только выведен спектр реликтового излучения как чернотельного радиоволнового явления, но также отчетливо сконцентрировано внимание на двадцатифутовом рупорном рефлекторе лабораторий «Белл» в Кроуфорд Хилл, как на наиболее подходящем инструменте для его обнаружения! Найдя соответствующую ссылку (Ом, 1961 г.,²⁸), они неправильно истолковали ее результаты и сделали вывод о том, что излучение, предсказанное «теорией Гамова», противоречило опубликованным измерениям *).

* Выводы авторов²⁶ менее категоричны. В работе утверждается: «Дополнительные измерения в этой области (10^9 — $5 \cdot 10^{10}$ Гц, желательно с ИСЗ) помогут окончательно решить вопрос о справедливости теории Гамова». (Прим. перев.)

Статья Ома представляет собой технический отчет о малошумящих микроволновых приемных системах. Приведенный уровень шума системы содержал остаточное превышение, почти в точности равное трем градусам! Ом измерил полную температуру шума системы, приблизительно равную 22 К, включая вклад приемника, атмосферы и внеатмосферного излучения. Отдельные измерения каждой составляющей этой шумовой температуры, за исключением внеатмосферного излучения, в итоге дали ~ 19 К. (Из анализов ошибок своих измерений Ом сделал вывод о том, что обе серии измерений — общего и суммы отдельных вкладов, не противоречат промежуточному значению.) Вклад атмосферы измерялся при помощи движения антенны по высоте и установления соответствия изменения температуры системы закону косеканса. Эта стандартная процедура описана в лекции Вилсона²⁹. Для того чтобы избежать путаницы с другими величинами, выделенный таким образом атмосферный вклад обозначался T_{sky} «температура неба». Значение Ома 2,3 К для этой величины было в хорошем согласии с теорией атмосферного ослабления излучения. Фоновый вклад реликтового излучения не имеет высокоширотной зависимости и не может быть обнаружен таким способом. Вероятно из-за неудачного наименования Дорошкевич и Новиков сочли T_{sky} содержащей фоновое излучение и поэтому приводящей к нулевому результату. Разочарование было отражено в гл. IV появившегося в то время обзора Зельдовича³⁰.

1964 г. был отмечен как пробуждением интереса Хойла и Тэйлора²¹ к «теории Гамова», так и первым несомненным обнаружением реликтового излучения. Приблизительные контуры исходной теории Гамова в течение долгого времени совершенствовались в работах других исследователей. Например, Хаяши в 1950 г.³¹ отметил, что предположение о первоначальном нейтронном состоянии материи было некорректным. Поле излучения с температурой $T > 10^9$ К приводит к образованию электрон-позитронных пар, которые поддерживают квазиплотовое равновесие между нейтронами и протонами (см. также статью Чандрасекхара и Генрича⁶, которые пришли к аналогичному выводу). Альфер, Фоллин и Герман в 1953 г.³² включили этот процесс в свое строгое исследование проблемы нуклеосинтеза. Их работа выгодным образом отличалась от стандартных работ того времени. Использование мощной электронно-вычислительной машины позволило им включить в рассмотрение влияния динамических эффектов расширения и охлаждения из-за столкновений и процессов фоторасщепления. Их результаты не были существенно изменены последующими работами. Они в основном характеризовались, во-первых, преобразованием $\sim 15\%$ вещества в гелий (точная величина слабо зависит от значения плотности при $T \approx 10^9$ К), во-вторых, производством дейтерия, современная распространенность которого чувствительным образом зависит от отношения начальной температуры к плотности. Тому же самому кругу вопросов была посвящена статья Хойла и Тэйлора²¹, которые цитировали статью Альфера, Фоллина и Германа и отмечали согласие своих результатов с результатами более ранних работ. Ни в одной из статей не было никакого упоминания о сохранившемся до наших дней реликтовом излучении.

Вскоре по иной причине П. Пиблз обратился к этой же самой проблеме. Дикке вместе с Роллом и Уилкинсоном собирался измерить величину фоновой яркости неба в радиоволновом диапазоне. По его предложению Пиблз начал рассматривать ограничения на космологические модели, которые могли быть наложены результатами такого измерения. Статья Пиблза была послана в журнал «Physical Review» и циркулировала в виде препринта в марте 1965 г. В этой статье, как и в упомянутых выше работах, речь шла о синтезе легких элементов; ее список цитированной литературы

включал в себя работу ²¹. К тому же в ней явно было описано реликтовое излучение, сохранившееся до наших дней и обнаружимое в радиодиапазоне. Приблизительно в то же время фоновое радиоизлучение было открыто в лабораториях «Белл» и установлено его внегалактическое происхождение. Никакое сочетание известных тогда источников радиоизлучения не могло его объяснить. Поставленная этим необъясненным явлением проблема была решена в полученном нами препринте Пиблза. Эддингтон учит нас: «Никогда полностью не доверяйте результатам наблюдений до тех пор, пока вы не имеете по крайней мере одну объясняющую их теорию». Теория и эксперимент были опубликованы тогда вместе в двух статьях ^{33, 34}. Эти статьи оказали решительную поддержку эволюционной космологии и, кроме того, возродили интерес к ее наблюдательным последствиям.

Существование реликтового излучения подтвердило справедливость представлений о расширяющейся Вселенной с присутствующим ей образованием легких элементов — дейтерия, гелия-3 и гелия-4 — во время горячей ранней фазы расширения. Синтез тяжелых элементов происходит на более поздней стадии, после образования звезд. В звездах гелий-4 космологического происхождения вместе с дополнительным количеством гелия, синтезированного на месте, преобразуется (через бериллий-8) в углерод-12, из которого затем получаются более тяжелые элементы. Звездные процессы синтеза элементов, описанные в ¹⁸, были дополнены, а в ряде случаев заменены на процессы, существование которых было установлено в последующих работах и для которых более важен нуклеосинтез во время взрывов звезд (см. книгу Клэйтона ³⁵). Большинство реакций, приводящих к появлению тяжелых элементов, происходит в течение тех нескольких минут, когда внешние оболочки массивных звезд сбрасываются при взрыве сверхновой. Этот механизм объясняет как образование тяжелых элементов, так и их проникновение в межзвездное пространство. Таким образом, представляется, что общая картина близка к завершению, но в ней остаются еще загадочные проблемы, такие, как отсутствие солнечных нейтрино ³⁶. Ясно, однако, что в наши дни наблюдательная космология — это представительная и успешно развивающаяся наука.

Я должен поблагодарить прежде всего членов Академии за большую честь, которую они мне оказали. Работа, результатов которой я касался в этой лекции, описана в соответствующей статье моего друга и коллеги Роберта Вилсона. Я глубоко благодарен ему за неизменную помощь в течение пятнадцати лет нашей совместной работы.

В подготовке к лекции, текст которой представлен здесь, мне помогало множество лиц. Общение с Р. Альфером, Дж. Бакалом, С. Чандрасекхаром и М. Шварцшильдом было особенно полезным. Я также благодарен К. Кроуфорду, Р. Дикке, Дж. Филду, Р. Компфнеру, П. Пиблзу, Д. Шьяме, П. Таддеусу и С. Вейнбергу за помощь, оказанную персонально, и за те знания, которые я получил, читая их работы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E d d i n g t o n A. S. The Internal Constitution of the Stars.— Cambridge: University Press, 1926.
2. F o w l e r R. H.— Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1926, v. 87, p. 114.
3. W e i z s a c k e r C. F.— Phys. Zs., 1937, Bd. 38, S. 176.
4. W e i z s a c k e r C. F.— Ibid., 1938, Bd. 39, S. 633.
5. A l p h e r R. A., H e r m a n n R. C.— Rev. Mod. Phys., 1950, v. 22, p. 453.— (Перевод части обзора Альфера и Германа, касающийся результатов работы Ферми и Туркевича см.: Ферми Э. Научные труды. Т. II.— М.: Наука, 1972.— С. 673 *).

*) Переводы здесь и далее указаны переводчиком. (Прим. ред.)

6. Chandrasekhar S., Henrich L. R.— *Astrophys. J.*, 1942, v. 95, p. 288.
7. Chandrasekhar S.— *An Introduction to the Study of Stellar Structure.*— Dover Publication; Univ. of Chicago, 1939.— (Перевод: Чандрасекар Ш. Введение в учение о строении звезд.— М.: ИЛ, 1950.)
8. Bethe H. A.— *Phys. Rev.*, 1939, v. 55, p. 434.
9. Friedmann A.— *Zs. Phys.*, 1922, Bd. 10, S. 377.— (Перевод: Фридман А. А. Избранные труды.— М.: Наука, 1966.— С. 229).
10. Lemaitre G.— *Ann. Soc. Sci. Brux.*, 1927, t. A47, p. 49.
11. Einstein A., de Sitter W.— *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 1932, v. 18, p. 213.— (Перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. II.— М.: Наука, 1966.— С. 396).
12. Hubble E. P.— *Ibid.*, 1929, v. 15, p. 168.
13. Gamow G.— *Phys. Rev.*, 1946, v. 70, p. 572.
14. Weinberg S.— *The First Three Minutes.*— Basic Books, 1977.
15. Лифшиц Е. М.— *ЖЭТФ*, 1946, т. 16, с. 587.
16. Alpher R. A., Bethe H. A., Gamow G.— *Phys. Rev.*, 1949, v. 73, p. 803.
17. Schwartzschild B., Schwartzschild M.— *Astrophys. J.*, 1950, v. 112, p. 248.
18. Salpeter E. E.— *Ibid.*, 1952, v. 115, p. 326.
19. Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F.— *Rev. Mod. Phys.*, 1957, v. 29, p. 547.
20. Gamow G.— *Phys. Today*, 1950, v. 3, p. 16.
21. Hoyle F., Taylor R. J.— *Nature*, 1964, v. 203, p. 1108.
22. Gamow G.— *Nature*, 1948, v. 162, p. 680.
23. Tolman R. C.— *Relativity Thermodynamics and Cosmology.*— Oxford: Clarendon Press, 1934.— (Перевод: Толман Р. Относительность, термодинамика и космология.— М.: Мир, 1974).
24. Peebles P. J. E.— *Physical Cosmology.*— Princeton: University Press, 1971.— (Перевод: Пиблс Дж. Физическая космология.— М.: Мир, 1975.)
25. Alpher R. A., Herman R. C.— *Phys. Rev.*, 1949, v. 75, p. 1089.
26. Дорошкевич А. Г., Новиков И. Д.— *ДАН СССР*, 1964, т. 154, с. 809.
27. Doroshkevich A. G., Novikov I. D.— *Sov. Phys.— Doklady*, 1964, v. 9, p. 111.
28. Ohm E. A.— *Bell Syst. Tech. J.*, 1961, v. 40, p. 1065.
29. Wilson R. W. Nobel Lecture.— 1978.— (Перевод: УФН, 1979, т. 129, с. 595.)
30. Zeldovich Ya. B.— *Adv. Astron. and Astrophys.*, 1965, v. 3, p. 241.
31. Hayashi C.— *Progr. Theor. Phys.*, 1950, v. 5, p. 224.
32. Alpher R. A., Follin J. W., Herman R. C.— *Phys. Rev.*, 1953, v. 92, p. 1347.
33. Dicke R. H., Peebles P. J. E., Roll P. G., Wilkinson D. T.— *Astrophys. J.*, 1965, v. 142, p. 414.
34. Penzias A. A., Wilson R. W.— *Ibid.*, p. 419.
35. Clayton D. D.— *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis.*— N.Y.: Mc Graw-Hill, 1968.
36. Bahcall J. N., Davis R., Jr.— *Science*, 1976, v. 191, p. 264.