

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

541.9

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ *)

Д. Клейтон

Как объяснить наблюдаемую распространенность элементов во Вселенной? Спектры звезд в сочетании с лабораторными данными о ядерных реакциях позволяют объяснить синтез элементов.

Ядерная теория происхождения элементов, обычно называемая *теорией ядерного синтеза*, представляет собой попытку интерпретировать распространенность ядер различного сорта, опираясь на свойства этих ядер и учитывая те естественные условия, в которых эти ядра могли образоваться.

В нашем распоряжении имеется достаточное количество данных, чтобы заняться построением теории и проверить ее следствия. Существует 81 стабильный элемент наряду с многочисленными устойчивыми изотопами; число изотопов изменяется от одного для натрия, например, и до десяти для олова; всего известны 280 стабильных разновидностей ядер. Распространенность этих ядер в солнечной системе дает 280 экспериментальных точек для теории, к которым добавляются все известные относительные распространенности ядер на других звездах.

С другой стороны, значительная доля информации идет и из ядерных лабораторий. В лабораториях были не только тщательно изучены свойства всех 280 стабильных ядер, но были изучены также — в той степени, в какой это возможно в лаборатории, — свыше тысячи искусственно созданных радиоактивных ядер; тысячи сечений ядерных реакций, идущих при образовании или распаде 280 стабильных ядер, были экспериментально определены.

Систематика и теория ядер, носящие полуэмпирический характер, придают больший вес всей этой информации и превращают ее в мощное средство исследования ядерного синтеза. Многолетние скрупулезные астрономические наблюдения последнего времени, использующие самую современную технику, интерпретировались вместе с бесчисленными расчетами, относящимися к строению и эволюции внутренних областей звезд. Несмотря на явную неполноту этих данных, все они имеют существенное значение для решений основной для нас проблемы: образовались ли элементы в процессе термоядерных реакций?

*) Donald D. Clayton, The Origin of the Elements, Phys. Today 22 (5), 28 (1969). Перевод В. А. Угарова.

Предполагается, что ядерный синтез происходит в остатках сверхновых звезд, подобных Крабовидной туманности (рис. 1). Есть надежда, что γ -телескопы, установленные на искусственных спутниках Земли, смогут обнаружить потоки γ -квантов от взрывов сверхновых звезд и подтверждать сделанные расчеты.

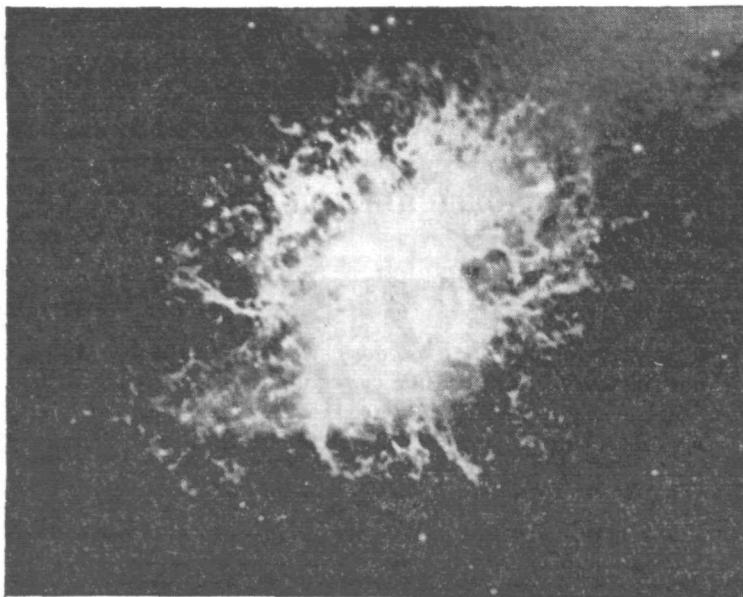


Рис. 1. Крабовидная туманность — визуально наблюдаемый остаток галактической сверхновой звезды, вспыхнувшей в 1054 г. и описанной китайскими астрономами.

Основная часть синтеза элементов в галактике, по всей вероятности, произошла при взрывах сверхновых, подобных тому, что вы видите на фотографии.

ЭЛЕМЕНТЫ НА СОЛНЦЕ

Распространенность элементов установлена, вообще говоря, не очень надежно. Необходимые сведения довольно трудно получить и еще труднее интерпретировать. Наиболее изученным объектом, естественно, является солнечная система, состав которой определен по составу Солнца, метеоритов и, наконец, самой Земли. Хотя Солнце является наиболее интересным объектом в том смысле, что в первоначальной стадии своего развития оно было однородным, а в настоящее время в нем нет разделения на химические фракции, мы можем использовать только те линии атомных спектров, которые наблюдаются в спектре Солнца. Что касается изотопического состава каждого элемента, то, вообще говоря, эта величина не поддается измерению. Линейчатый спектр солнечной фотосферы изучается уже в течение полустолетия, и существует несколько обзорных работ, содержащих данные по распространенности элементов на Солнце^{1, 2}.

Интенсивность спектральных линий соотносится с интенсивностью спектральных линий водорода, самого распространенного элемента во Вселенной, и интерпретируется сравнением с различными моделями солнечной атмосферы и теорией переноса энергии, позволяющими подсчитать распространенность элементов, отнесенную к распространенностии водорода.

В последние годы стало известно³, что в солнечных космических лучах отношение распространенностей элементов, более тяжелых, чем водород, практически постоянно и совпадает с известным отношением распространенностей в фотосфере Солнца. Частицы солнечных космических лучей, по предположению, ускоряются при солнечных вспышках в фотосфере; отношения распространенностей элементов в солнечных космических лучах были использованы для получения дополнительных сведений о фотосфере. Особенно интересно вполне объяснимое совпадение значения отношения распространенностей $H/He \approx 16$, полученного указанным способом, с усредненным по времени отношением $H/He \approx 20$, обнаруженным в солнечном ветре⁴. Оба приведенных значения этого отношения, имеющего критическое значение как для экспериментов с солнечными нейтрино, так и для космологии «большого взрыва», существенно и многозначительно больше, чем значение $H/He \approx 10$, которое принималось в течение многих лет.

Ультрафиолетовые спектры, полученные с помощью ракет, запущенных за пределы земной атмосферы, позволили получить информацию о составе солнечной короны. Анализ этих спектров^{5, 6} обнаруживает загадочную особенность: распространности железа, никеля и кобальта, отнесенные к распространности водорода, оказываются почти на порядок выше, чем в солнечной фотосфере. А. Камерон⁷ предположил, что давление излучения, действующего на металлы, могло бы оказаться достаточным для увеличения содержания металлов в короне и истощения фотосферы по содержанию металлов. Однако Д. Ламберт⁸ считает этот механизм неэффективным.

МЕТЕОРИТЫ

Распространенность многих элементов нельзя установить по спектральным линиям фотосферы, и мысль о том, что хондриты или по крайней мере некоторая часть их могут дать представление о распространенностях нелетучих элементов, была, несомненно, плодотворной. Г. Зюсс и Г. Юри использовали эту идею в своей знаменитой обзорной статье⁹, которая послужила отправной точкой для развития всей науки о ядерном синтезе; в дальнейшем эта идея развивалась и проверялась многими авторами¹⁰.

У метеоритов, однако, обнаруживаются следы довольно сложной и вместе с тем неизвестной химической истории, поэтому с их помощью нельзя получить вполне определенные значения распространенностей элементов до тех пор, пока прошлое метеоритов не станет ясным. Самым загадочным опять-таки представляется содержание железа¹⁰ в метеоритах. Если отнести его к содержанию кремния, эта цифра будет на порядок больше цифры, полученной для солнечной фотосферы. Фактически содержание элементов в метеоритах тождественно с содержанием элементов в солнечной короне¹¹. Метеориты представляют нам значительно лучшие образцы для определения распространенностей нелетучих элементов, чем сама Земля, химическая история которой развивалась куда более бурно. Все же большое количество определений изотопного состава элементов, произведенных на Земле, оказалось весьма полезным для теории. Физические и химические процессы, происходящие в солнечной системе, — за небольшим числом хороших известных исключений — не могут изменять изотопический состав элементов.

Можно сказать, что наши сведения о содержании элементов в солнечной системе непрерывно увеличиваются, однако эти важные данные в настоящее время трудно считать окончательными, поскольку неизвест-

но: а) представляют ли солнечная фотосфера, солнечная корона, солнечный ветер и солнечные космические лучи фракции солнечного состава элементов; б) какова химическая история метеоритов и как следует интерпретировать их химический состав.

ЭЛЕМЕНТЫ В ЗВЕЗДАХ

Спектры поглощения звезд резко отличаются от спектров поглощения Солнца. Эти различия обусловлены в первую очередь широким диапазоном температур, наблюдаемых в звездных фотосферах, и, в известной мере, различием в силах гравитации, действующих на их поверхностях. Интерпретация интенсивностей линий показывает, что средний состав звезд одинаков, но он не совпадает с составом Солнца. Но именно в отличии состава звезд от состава Солнца, которое с большим трудом поддается количественному описанию, мы находим самые многообещающие проверки ядерной теории происхождения элементов. Важнейшие различия в основном сводятся к двум типам:

а) Наиболее старые из известных звезд образовывались из материала, который был не столь богат элементами тяжелее гелия, чем те звезды, которые образовывались позднее. Этот факт указывает на то, что большинство элементов существовало вовсе не всегда, а, наоборот, порождалось в процессе развития Вселенной.

б) Многие звезды, обнаруживающие весьма необычный состав, по-видимому, демонстрируют вещество, находящееся на их поверхностях, которое, до того как оказаться на поверхности, было сильно изменено в ходе ядерных реакций, происходивших во внутренней части звезд. Такие изменения в составе звезд указывают на наличие специфических ядерных процессов.

В настоящее время звезда с наименьшим содержанием металлов имеет номер HD 122563 в каталоге Генри Дрепера. Подробные исследования этой звезды¹² показали, что все тяжелые элементы в этой звезде, отнесенные к водороду, представлены меньше, чем на Солнце, в 100—1000 раз. Как я уже упоминал, первая звезда небольшой массы, возникшая во Вселенной, согласно космологии «большого взрыва», должна образовываться из материала, в котором тяжелые элементы практически должны отсутствовать; поэтому результаты наблюдений над HD 122563 не вызывают удивления.

Все объекты населения-II (в первую очередь шаровые скопления и звезды, обладающие высокими скоростями) обнаруживают существенно заниженное содержание такого же типа; таким образом, звезда HD 122563 выделяется только крайней степенью заниженного содержания. Если же предположить, что некогда во Вселенной было мало металлов, то отсюда следует, что по крайней мере 99% тяжелых элементов были синтезированы в промежутках времени между очень ранним образованием первых объектов населения-II и образованием молодых звезд. Логически ядерный синтез должен был бы происходить в естественной последовательности термоядерных эпох, с которыми мы сталкиваемся при тепловой эволюции внутренних частей звезд.

ВСЕЛЕННАЯ «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА»

После того как А. Пензиас и Р. Вильсон¹³ обнаружили, что Вселенная, по всей видимости, наполнена фотонным газом, обладающим температурой около 3° К, появились подробные пересчеты распространенностей элементов с тем, чтобы эти распространенности могли пережить

первоначальное расширение во Вселенной большого взрыва. Эти расчеты ¹⁴⁻¹⁶ опирались на предположение о том, что трехградусный фотонный газ — это тот же самый фотонный газ, который существовал тогда, когда первоначально плотная Вселенная внезапно расширилась и стала прозрачной для фотонов средней тепловой энергии, но что высокотемпературный фотонный газ этой эпохи растворился и испытал красное смещение за счет общего релятивистского расширения Вселенной. Наблюданное хаббловское расширение ¹⁷ для масштабного фактора Вселенной $R(t) H = (1/R) dR/dt \approx (10^{10} \text{ лет})^{-1}$ в сочетании с наблюдаемой средней плотностью $\rho_{\text{ср}}$ вещества во Вселенной ¹⁸ $3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3 < \rho_{\text{ср}} < 3 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3$ и современной температурой фоновых тепловых фотонов позволяют рас считать тепловую историю Вселенной. Связь между ними устанавливается

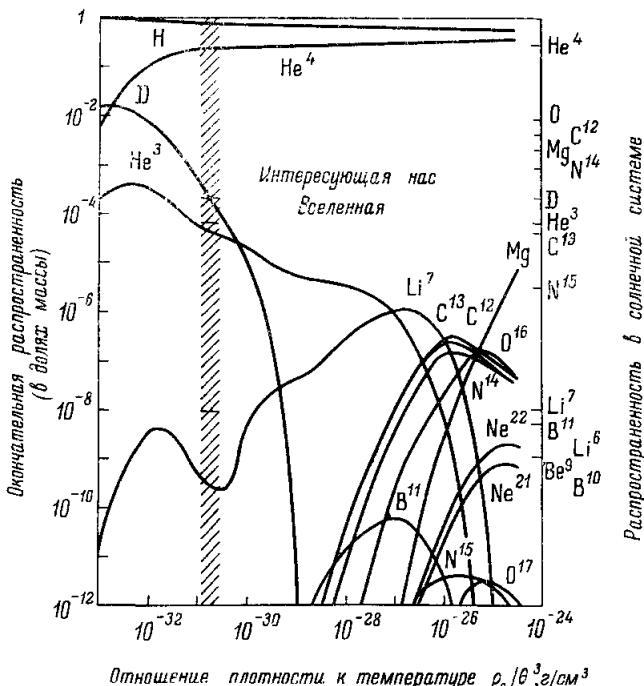


Рис. 2. Окончательный состав, отнесенный к полной массе Вселенной, испытавшей расширение от исходного плотного «огненного шара», в зависимости от отношения средней плотности массы в настоящее время ρ_0 к кубу величины θ .

Величина θ определяется отношением современной температуры к температуре фонового (изотропного) теплового излучения ^{16, 20}. Распространенность элементов с Солнцем показана на правой оси ординат. Из известных свойств нашей Вселенной можно заключить, что только H, D, He³, He⁴ и Li⁷ могли быть произведены в таких количествах, какие фактически обнаруживаются.

после выбора теории тяготения. Если справедлива общая теория относительности, как это большинство и считает, изотропная Вселенная расширяется по закону ¹⁹

$$(1/V) dV/dt = (24\pi G\rho)^{1/2}.$$

За расширением исходной плотной и горячей Вселенной, состав которой известен благодаря тому, что она находится в тепловом равновесии, можно проследить, наложив на это расширение требование, чтобы оно приводило к наблюдаемой в настоящее время плотности. Точный подсчет скорости каждой ядерной реакции, вносящей свой вклад в эволюцию содержания элементов, а также результаты различных расчетов сведены на рис. 2.

Окончательный состав, отнесенный к полной массе, зависит от скорости расширения, которая в свою очередь зависит от величины ρ_0/θ^3 , где ρ_0 — современная средняя плотность, а $\theta = T/3^\circ$ К. Значение ρ_0/θ^3 , по-видимому, лежит в пределах 10^{-30} — 10^{-31} г/см³. Очень интересно, что для такой Вселенной содержания H, D, He³, He⁴ и, возможно, Li⁷ совпадают с их наблюдаемыми средними значениями. Какая увлекательная мысль считать эти ядра цеплом начальной стадии нашей современной Вселенной! То, что все более тяжелые ядра в настоящее время имеют значительно большие содержания, очевидно, может быть объяснено тем же самым образом; с этих позиций вполне понятно, что шаровые скопления, которые могли бы быть первыми массивными объектами, сконденсировавшимися во время расширения, имеют столь малое содержание тяжелых элементов.

ЗАГАДКА ГЕЛИЯ

Справедливость этих идей трудно проверить, потому что концентрации D, He³, He⁴ и Li⁷ невозможно измерить непосредственно на поверхностях старейших звезд главной последовательности. Концентрации ядер D и Li⁷ слишком малы, а поверхностные температуры слишком незначительны, чтобы возбуждались спектральные линии гелия. Однако ситуация с гелием более обнадеживающая в эволюционирующих звездах населения-II. Расчеты пульсаций звезд RR Лиры, выполненные Р. Кристи²¹, и эволюционные треки звезд на диаграмме Герцшпрунга — Рессела, рассмотренные Дж. Фолкнером и И. Ибеном²², дают совершенно очевидные указания на то, что даже у очень старых звезд горизонтальной ветви гало населения-II отношение He/H имеет числовое значение около 0,1 (доля гелия по массе $Y = 0,27$). Так как образование гелия в схемах большого взрыва очень близко к значению $Y = 0,27$ для наблюдаемых свойств Вселенной, эти результаты говорят в пользу модели большого взрыва.

С другой стороны, озадачивающие наблюдения У. Сарджента и Л. Сирля²³, Дж. Гринстейна и Г. Мюнха²⁴ показывают аномально низкое содержание гелия в старых B-звездах горизонтальной ветви, тогда как более молодые звезды того же самого типа обнаруживают нормальное содержание гелия. Эти данные показывают, что значительная часть гелия синтезируется во внутренней части звезд или звездообразных объектов и что простейшая модель большого взрыва неверна. Вместе с тем Дж. Гринстейн, Дж. Труран и А. Камерон²⁵ указали, что B-звезды горизонтальной ветви являются единственным общим классом звезд, в которых можно ожидать, что гелий за счет действия гравитационных сил будет удален из фотосферы.

Астрономия не может претендовать сейчас на окончательное решение этого вопроса, столь существенного для ядерного происхождения гелия и понимания Вселенной вообще. Ясно также, что нужно с большой осторожностью интерпретировать малые значения отношений He/H, полученные в солнечных космических лучах и в солнечном ветре; представляется крайне невероятным, чтобы на Солнце содержалось меньше гелия, чем в старых звездах. Решение этой загадки гелия является, быть может, самой важной проблемой сегодняшней астрономии.

Если всеобщая концентрация гелия была на самом деле меньше в тот момент, когда формировались первые звезды, мы будем вынуждены отказаться от космологии большого взрыва, если только хотя бы одно из ниже-следующих утверждений^{16, 26} является правильным:

1) Правильной теорией тяготения является не общая теория относительности. Другим наиболее исследованным вариантом теории тяготе-

ния может служить скалярно-тензорная теория, предложенная Р. Дике. Эта теория обеспечивает образование гелия в малых количествах²⁶.

2) В прошлом Вселенная была в высшей степени анизотропна. Но такая значительная анизотропия, которая необходима, чтобы свести содержание гелия до весьма низкого уровня, по всей вероятности, исключается изотропией теплового трехградусного излучения²⁷.

3) Основная масса Вселенной в тот промежуток времени, когда образовались элементы, приходилась не на те частицы, которые нам сейчас известны.

4) Во Вселенной содержатся вырожденные нейтрино.

ЕСТЬ И ЕЩЕ ЗАГАДКИ

Существует и еще один интригующий аспект вопроса. Среднее значение плотности гелия, наблюдаемого во Вселенной, составляет около 10^{-31} г/см^3 . Если эта плотность возникла не в результате большого взрыва, а в результате превращения водорода в гелий в звездах с выделением энергии $6 \cdot 10^{18} \text{ эрг/г}$, Вселенная должна обладать плотностью энергии излучения $6 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$. Такая средняя плотность энергии звездного света в ночном небе не обнаруживается, однако, если физические процессы поглощения и реэмиссии²⁸ термализовали эту плотность энергии, результирующая температура фотонов будет как раз равна 3° К . Может быть, это просто забавное совпадение, что наблюдаемое фоновое микроволновое излучение имеет как раз температуру 3° К . Те, кому нравится происхождение гелия в большом взрыве, могут сказать «да», потому что энергия, высвобожденная при образовании гелия в большом взрыве, к настоящему времени полностью утрачена. В модели большого взрыва плотность гелия убывает как $1/R^3$ при возрастании масштабного фактора Вселенной $R(t)$; что касается температуры тепловых фотонов, то она убывает как $1/R$. Следовательно, случайное совпадение чисел, упомянутое выше, следует с этой точки зрения рассматривать как совпадение только в современную эпоху²⁹.

Если Галактика образовалась с малой долей массы гелия, светимость Галактики на ранней стадии ее развития должна была бы быть значительно больше, чем сейчас. Дело в том, что современная светимость Галактики соответствует превращению всего лишь от 3 до 5% водорода в гелий за 10^{10} лет. Обычные звезды едва ли в состоянии обеспечить реакцию слияния, необходимую на ранних стадиях, и весьма вероятно, что для этого процесса важнейшую роль играют сверхмассивные звезды²⁹, образующиеся в ассоциации с галактическим диском. Когда такая звезда, обладающая высокой плотностью, взрывается (малый взрыв), возникающая при заданной температуре плотность выше, чем соответствующая плотность при расширении Вселенной, а сам процесс расширения идет быстрее. Около 40% массы, расширяющейся от температур выше $20 \cdot 10^9 \text{ }^\circ\text{К}$, представляет собой гелий. Эта фаза галактической светимости может проявляться как квазизвездные объекты — квазары (при том условии, что они не являются локальными объектами).

УГЛЕРОДНО-АЗОТНЫЙ ЦИКЛ

Присуждая в 1967 г. Нобелевскую премию по физике Гансу Бете, Шведская Академия наук особенно отметила работу Бете³⁰, указавшую цикл реакций, позволяющих осуществить превращение водорода в гелий во внутренних частях звезд.

Работа Бете весьма удачно развila общие идеи, высказанные в 1929 г. Р. Аткинсоном и Ф. Хаутерманом³¹; эти авторы использовали результат Г. Гамова³², выяснившего значение туннельного эффекта для кулоновских барьеров.

Если даже первоначально гелий существует как остаток космической огненной сферы («файрболла»), протон-протонные цепи и углеродно-азотный цикл обеспечивают внутренний механизм для эволюции звезд главной последовательности. Как следствие этих процессов, по крайней мере несколько процентов массы галактического водорода превращаются в гелий. К концу второй мировой войны Лоритсен и Фаулер (Калифорнийский технологический институт) сосредоточили основную деятельность своей ядерной лаборатории на исследовании различных деталей ядерных реакций, упомянутых Бете. К ним присоединились другие лаборатории и отдельные исследователи, и в конечном счете циклы горения водорода в настоящее время являются наиболее изученной областью лабораторной ядерной астрофизики^{34, 35}. Поставленные эксперименты включали в себя многочасовые бомбардировки частицами низких энергий. Сечения рассмотренных реакций были наименьшими из тех, какие приходилось измерять в ядерных лабораториях. Потребовалось предельное внимание к характеристикам пучков частиц, мишней и фона. И даже при всем том понадобилась экстраполяция результатов к еще более низким энергиям, при которых могут идти реакции в термических условиях внутренних частей звезд.

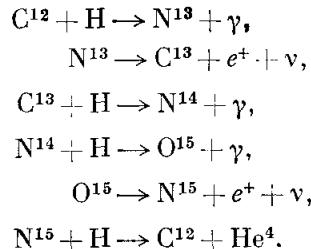
СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

В 1958 г. Фаулер³⁶ указал на возможность обнаружения нейтрино, возникающих при распаде B^8 в центре Солнца. Очень слабое взаимодействие нейтрино с веществом позволяет им выйти даже из самого центра Солнца, но именно то же свойство в сильнейшей степени затрудняет их обнаружение. Вместе с тем такая возможность проверки теории является уникальной, потому что мы не знаем никакого другого способа заглянуть в центры звезд. Если наши сведения о ядерных реакциях точны, а теория строения звезд соответствует действительности, то можно найти поток нейтрино, идущих от распада B^8 . Уже в 1955 г. Р. Дэвис³⁷ рассмотрел реакцию $Cl^{37}(v, e^-) A^{37}$, пригодную для регистрации таких нейтрино. С теоретической точки зрения реакция поглощения нейтрино была рассмотрена Дж. Бакалом³⁸. Дэвисом были проведены соответствующие наблюдения в Брукхейвенской лаборатории солнечных нейтрино в глубокой шахте Южной Дакоты. Он обнаружил, что ядра Cl^{37} поглощают в среднем нейтрино со скоростью, меньшей или равной $3 \cdot 10^{-36} \text{ сек}^{-1}$. Такая скорость примерно в два раза меньше, чем наиболее вероятная оценка, полученная из сочетания данных ядерной физики и теории строения звезд⁴⁰.

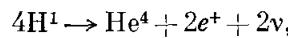
Сейчас еще совсем не ясно, останется ли верхний предел, указанный Дэвисом, просто верхней границей или — в результате продолжения измерений — превратится в реальное измерение. Дело в том, что неопределенность порядка 2 остается и в расчетных данных; поэтому говорить о том, есть ли расхождение между экспериментом и теорией, пока просто не следует. Эта увлекательная программа исследований должна проводиться очень осмотрительно. Загадка гелия снова всплывает, потому что, если данные ядерной физики правильны, а теория строения звезд пригодна, поток нейтрино от B^8 может служить мерой исходного содержания гелия на Солнце. Если границу Дэвиса принять за реальное измерение, можно получить значение доли массы гелия, равное $Y = 0,16$; близкое

к этому значение получается из данных по солнечному ветру и солнечным космическим лучам.

Астрономия солнечных нейтрино³⁹ сумела уже доказать, что менее 9% мощности, излучаемой Солнцем, обеспечивается углеродно-азотным циклом



Мы думаем³⁸, однако, что этот цикл, в котором изотопы углерода и азота играют роль ядерных катализаторов в суммарной реакции



является основным энергетическим источником для звезд главной последовательности, массы которых превышают значение около полутора солнечных масс. Скорости этих термоядерных реакций, обусловленных протонами, стали предметом большого количества исследований³⁴, и, судя по всему, они уже известны с той степенью точности, какая необходима для астрофизических целей. Звезды, источником излучения которых служит рассмотренный цикл, слишком далеки от нас, чтобы возможность воспользоваться услугами нейтринной астрономии, стала реальностью; поэтому подтверждение существования этого цикла может состоять в определении отношений содержаний элементов, обусловленных этим циклом.

Хотя полное число изотопов С и N в этом цикле остается неизменным, их относительное содержание меняется и перераспределяется пропорционально времени их жизни по отношению к ядерным взаимодействиям со свободными протонами во внутренних частях звезд. Времена жизни, измеренные в лаборатории, приводят к тому, что отношения содержаний катализаторов должны иметь следующие величины: C/N = 0,01 и C¹³/C¹² = 0,25. Оба этих отношения, конечно, существенно отличаются от «солнечных» значений C/N = 5,5 и C¹³/C¹² = 1/90 по определениям в⁴¹; солнечные значения упомянутых отношений рассматриваются как сочетание всех ядерных процессов, участвующих в ядерном синтезе.

Невозможно выделить случай чистого CN-цикла, поскольку этот цикл реализуется в центральных частях звезд. Звезды на высших стадиях эволюции, однако, во многих случаях состоят из перемешанного материала, причем перемешивание происходит от внутренних частей до поверхности. В этом случае отношение содержаний элементов на поверхности должно быть равно отношению, получаемому «разбавлением» отношений, возникающих в CN-цикле, различными количествами ядер CN, главным образом C¹², находящихся на поверхности. Из этих соображений следует ожидать различные отношения содержаний, имеющие, однако, верхние границы C¹³/C¹² = 0,25 и N/C = 100. Именно такая картина фактически и наблюдается. Углерод принадлежит к тем немногим элементам, для которых можно измерить соотношение между изотопами в звездах. Для углерода это делается по спектру молекулярного углерода, образующегося на холодной поверхности звезд. Различие в приведенных массах

молекул, если одно из ядер C^{12} заменено на ядро C^{13} , вызывает смещение линий поглощения. Наблюдаемое относительное содержание изотопов 42 оказывается различным, но наибольшее обнаруженное значение отношения C^{13}/C^{12} близко к 0,25. Обнаружены также звезды, богатые азотом 43 , 44 . Поскольку CN-цикл является единственным известным термоядерным случаем, приводящим к большим избыткам азота по отношению к углероду, большие значения отношения N/C , наблюдаемые в этих звездах, служат убедительным доказательством правильности нашего представления о CN-цикле.

СОДЕРЖАНИЕ O^{16}

После ядер H и He^4 наиболее важными для нас являются O^{16} и C^{12} ; долгое время считалось 33 , что они возникают как основные продукты при слиянии ядер He^4 . Этую термоядерную эпоху следовало ожидать после

того, как истощится за счет выгорания водород. Э. Соллитеер показал в 1952 г. 45 , что процесс горения начнется с появления в газе небольшой стабильной концентрации нестабильного Be^8 . Однако лишь совсем недавно Г. Штауб с сотрудниками 46 сумел определить ядерные параметры прямыми измерениями свойств ядер Be^8 , используя рассеяние α -частиц низкой энергии на гелии. Захват третьей α -частицы ядром Be^8 ведет к образованию C^{12} , хотя все еще осталась незначительная неопределенность при определении скорости процесса.

Другой, отнюдь не простой эксперимент был недавно осуществлен с целью определения скорости реакции



которая, по предположению, определяет заметное содержание O^{16} . Скорость этой реакции при низких энергиях измерить непосредственно никогда не удавалось, так как — довольно удивительным образом — она зависит от приведенной ширины состояния α -частицы в ядре O^{16} ; это состояние оказывается устойчивым относительно распада на C^{12} и He^4 . Таким образом, система $C^{12} + He^4$ даже при нулевой кинетической энергии обладает большей энергией, чем соответствующее состояние O^{16} . Группа сотрудников Калифорнийского технологического института 47

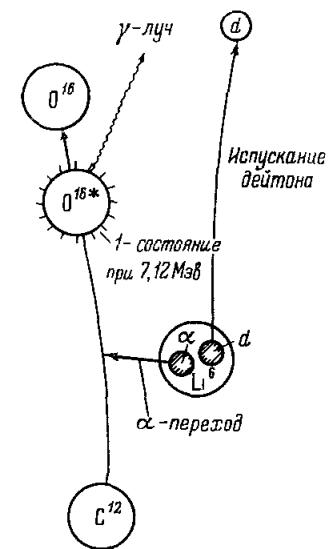


Рис. 3. Механизм реакции, обеспечивающий введение α -частицы в ядро C^{12} и непосредственное создание ядра O^{16*} , обладающего меньшей массой, чем $C^{12} + He^4$.

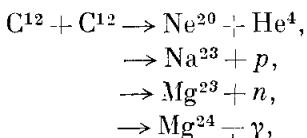
Этот остроумный эксперимент 47 позволяет нам понять ядерный синтез при горении гелия.

пытаясь стимулировать эту реакцию непосредственной передачей α -частицы от ядра Li^6 в ядро C^{12} . Механизм реакции иллюстрируется на рис. 3. Энергия связи α -частицы с дейтоном в Li^6 влияет на энергетику процесса таким образом, что требуемое состояние O^{16} может быть создано. Окончательный результат этой работы может быть сформулирован следующим образом: скорости реакции горения гелия сейчас определены уже с высокой точностью; можно уверенно сказать, что слияние гелия в звездах действительно приводит к образованию C^{12} и O^{16} в сопоставимых количествах. Природа в среднем как будто бы не возражает против этого утверждения, но холодные углеродные звезды однозначно указывают на то, что это отношение обнаруживает некоторые вариации 48 . После образования

СО обнаруживаются соединения кислорода, такие, как TiO и ZrO , если $\text{O/C} > 1$, в то же время обнаруживаются соединения углерода, например CH и CN , если $\text{O/C} < 1$. Отношение O/C , возникающее во внутренней части звезд, несколько увеличивается с ростом массы звезды; поэтому наблюдаемые вариации не вызывают удивления. Более того, вариации наблюдаемых соотношений скорее говорят в пользу гипотезы о ядерном синтезе в звездах.

ГОРЕНИЕ УГЛЕРОДА

Хотя горение водорода и гелия обеспечивает большую часть времени жизни звезд, синтез элементов происходит в более поздние термоядерные эпохи. Следующим начинает выгорать углерод. Измерения, произведенные недавно группой Калифорнийского технологического института⁴⁹, позволили существенно улучшить данные о скоростях реакций



с которых начинается выгорание углерода.

Чтобы оценить окончательный состав продуктов реакций, необходимо учесть еще реакции между p , n , α и γ со всеми составляющими газами. Скорости большинства этих реакций известны с довольно ограниченной точностью, но Арнетт и Труран⁵⁰ произвели численные расчеты результатов сложного переплетения реакций; полученные выводы довольно удивительны. На рис. 4 воспроизведено кинетическое содержание различных ядер в зависимости от температуры горения, если начальный состав был образован равными количествами C^{12} и O^{16} . Главную долю образующихся ядер составляют Ne^{20} , Mg^{24} и Na^{23} . При температурах вблизи 10^9 К, которая, как считается, соответствует температуре горения углерода в звездах, эти ядра образуются в относительных количествах, почти в точности соответствующих относительным количествам в солнечной системе. Трудно привести разумные доводы против того, что три эти ядра ведут свое происхождение от горения углерода.

Ситуация становится даже еще более драматической, если рассмотреть углерод, внезапно нагретый до высоких температур и затем подвергшийся быстрому расширению и охлаждению. Такая ситуация может встретиться в оболочках сверхновых звезд, разогретых волнами сжатия⁵¹.

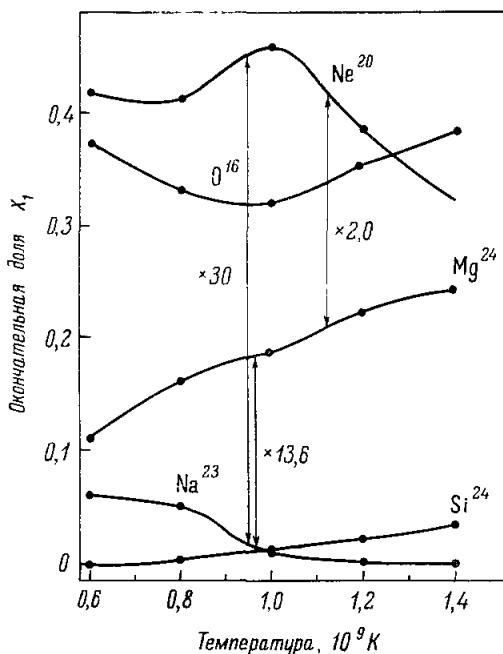


Рис. 4. Горение углерода.

Окончательные доли массы наиболее распространенных ядер, возникающих при горении углерода в условиях постоянной температуры, приведены в зависимости от температуры⁵⁰. Отношения содержаний, наблюдаемые в солнечной системе, показаны стрелками при тех температурах, для которых эти отношения были получены. Представляется довольно очевидным, что Ne^{20} , Mg^{24} и Na^{23} возникают при горении углерода около 10^9 К. Исходный состав — половина кислорода и половина углерода.

или взрывным воспламенением углерода⁵². В случае, проиллюстрированным на рис. 5, каждое из ядер C^{12} , O^{16} , Ne^{20} , Na^{23} , Mg^{24} , Mg^{25} , Mg^{26} , Al^{27} и Si^{28} имеет конечное содержание, близкое к содержанию этих ядер в солнечной системе.

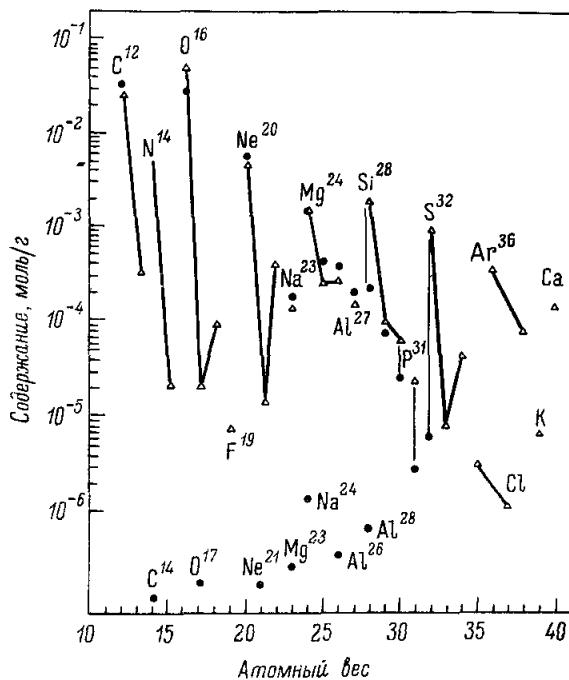


Рис. 5. Частичное горение углерода взрывного характера.

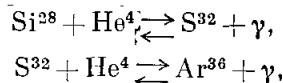
После быстрого нагревания до температуры $1,8 \cdot 10^9$ °К газ расширяется и охлаждается до температуры $0,5 \cdot 10^9$ °К за 1,25 сек; за этот промежуток времени сжигается до 22% C^{12} . Расчетные содержания (кружки) обнаруживают драматическое совпадение с солнечными распространенными (треугольники). Рисунок заимствован из неопубликованных расчетов В. Арнетта.

ядер с $A = 4n$ и «железный» пик самым драматическим образом воспроизводят «солнечные» содержания. Д. Боданский, У. Фаулер и я пришли поэтому к выводу⁵⁴, что горение кремния обеспечивает в первую очередь синтез ядер с $A = 28$ и $A = 57$. Этот вывод будет подтвержден непосредственной опытной проверкой⁵⁵. Естественные распространности Fe^{56} , Cr^{52} , Ti^{48} и Ca^{44} , указанные на рис. 5, сравниваются с содержанием радиоактивных ядер Ni^{58} , Fe^{52} , Cr^{48} и Ti^{44} , устанавливающемся при равновесии. После выброса из сверхновых звезд эти радиоактивные ядра претерпевают радиоактивный распад, превращаясь в дочерние ядра; эти переходы сопровождаются испусканием характеристических γ -лучей, которые мы и обнаруживаем в молодых остатках сверхновых звезд.

На рис. 7 изображен поток γ -лучей, наблюдаемый на Земле от гипотетической сверхновой, взрыв которой произошел на значительном удалении в $10^6 pc$ ($3 \cdot 10^6$ световых лет). Ожидается, что такие события можно будет наблюдать с помощью γ -телескопов, установленных на спутниках; непосредственное наблюдение таких событий было бы весомым подтверждением наличия ядерных процессов, идущих внутри звезд. Успешное наблюдение такой радиоактивности по глубине получаемой информации могло бы соперничать с экспериментами с солнечными нейтрино. Мы возлагаем большие надежды на результаты таких наблюдений.

ГОРЕНИЕ КРЕМНИЯ

Когда ядра Si^{28} , представляющие собой главную ядерную составляющую, после того как выгорел кислород, нагреваются до температур выше $3 \cdot 10^9$ °К, образуется свободный ансамбль α -частиц, так что реакции захвата оказываются в равновесии с обратными реакциями фоторазложения⁵³



и т. д.

Ядра более тяжелые, чем Si^{28} , оказываются в равновесии с ядрами Si^{28} и свободными плотностями p , n и α . В этих условиях нетрудно рассчитать содержание элементов; как это видно из рис. 6, квазиравновесное содержание

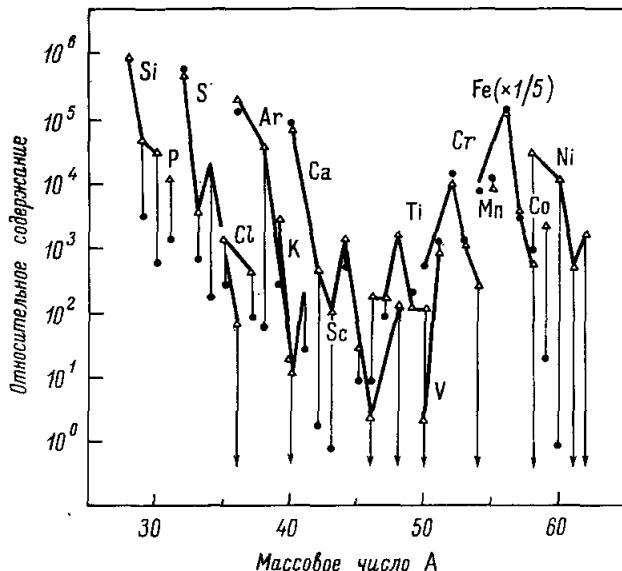


Рис. 6. Солнечные распространности, показанные жирными линиями, сравниваются с распространенностями ядер, находящимися в равновесии с Si^{28} , показанными тонкими линиями.

Хорошее согласие для наиболее распространенных ядер указывает на то, что кремниевое квазиравновесие в значительной мере обусловливает ядерный синтез для массовых чисел A от 28 до 57.

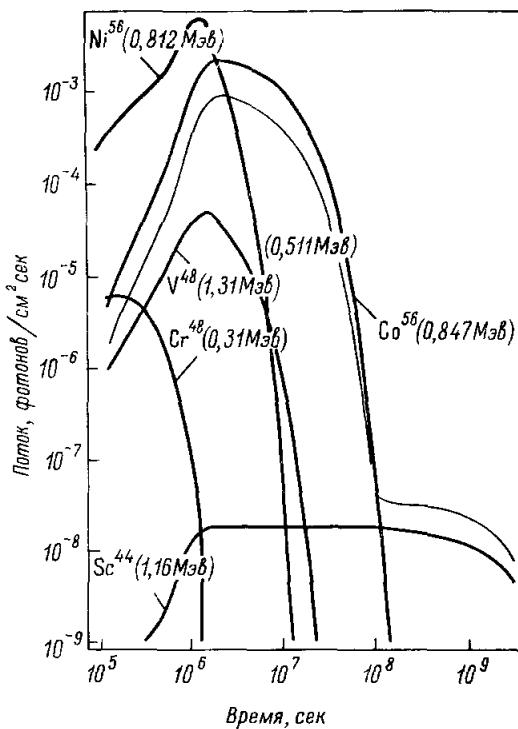


Рис. 7. Поток γ -излучения для отдельных линий в зависимости от времени для гипотетической сверхновой, удаленной от нас на расстояние 10^6 pc ⁵⁵.

Предполагается, что был выброшен кремниевый квазиравновесный материал в количестве, равном примерно половине солнечной массы. Перспектива обнаружения этих линий на спутниках вполне реальна.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЯЖЕЛЕЕ ЖЕЛЕЗА

Последние десять лет я все время занимался вопросами синтеза элементов более тяжелых, чем железо. Первичным механизмом этого синтеза является захват нейтронов⁵⁶, для которого большой кулоновский барьер атомных ядер высокого номера не играет роли. Процесс захвата медленных нейтронов⁵⁷ в количественном отношении был весьма успешно описан теоретически. Содержания ядер, обусловленные таким цепным медленным «s-процессом» (*s* — от *slow*) захвата, благодаря очень простой цепи последовательных захватов обратно пропорциональны средним тепловым сечениям захвата нейтронов ядрами в этой цепи. Р. Маклин и Дж. Гиббонс в Оксфорде систематически изучали количественные выводы этой теории и в недавно появившейся статье⁵⁸ подвели итоги. Успех теории лучше всего иллюстрируется на двух изотопах самария Sm¹⁴⁸ и Sm¹⁵⁰. Экспериментально определенное отношение произведения содержаний и сечений нейтронного захвата дает значение

$$\frac{N(\text{Sm}^{148}) \sigma(\text{Sm}^{148})}{N(\text{Sm}^{150}) \sigma(\text{Sm}^{150})} = 0,98 \pm 0,06.$$

Это значение потрясающе близко к теоретическому. Успех этой теории позволил мне разработать технику определения времени⁵⁹, когда происходили реакции ядерного синтеза. В ситуации, в частности сходной с ситуацией для изотопов самария, оказывается, что около 60% Os¹⁸⁷ возникает при распаде Re¹⁸⁷ до образования солнечной системы; более того, появится возможность еще более точных определений, когда будут получены раздельные образцы Os¹⁸⁶ и Os¹⁸⁷ в достаточных количествах для измерения сечений нейтронного захвата. Эти измерения, имеющие важнейшее значение для космологии, не имели бы особого смысла без исследований^{60, 61} изохрон Os¹⁸⁷/Re¹⁸⁷ в железных метеоритах и времени жизни Re¹⁸⁷; очень важно также примерное постоянство отношения содержаний Re/Os. Я не могу привести лучшего примера того глубокого влияния, которое оказывает космохимия на космологию.

Ядерная астрофизика и космология переживают волнующие времена. Почти все результаты, описанные в этой статье, получены совсем недавно; я просто не мог остановиться на многих других работах. Я хотел бы упомянуть только угасшую радиоактивность J¹²⁹ и Ru²⁴⁴, следы которой столь отчетливо были прослежены в метеоритах⁶² группой Дж. Рейнольдса в Беркли и другими авторами, и трансурановые заряды, обнаруженные Фаулером⁶³ в космических лучах. Наличие в заметных количествах тяжелых радиоактивных ядер может служить вернейшим доказательством того, что химические элементы не всегда были в составе Вселенной. Количественные достижения нашей теории оставляют мало сомнений в том, что первичное образование элементов происходило в термоядерных процессах. Остается, конечно, вопрос о том, где и когда они происходили.

Университет Райса,
США

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. H. Aller, *Advances in Astronomy and Astrophysics* (Z. Kopal Ed.) 3, 1 (1965).
2. D. L. Lambert, B. Warner, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 138, 181, 213 (1968).
3. S. Biswas, C. E. Fichtel, D. E. Guss, *Phys. Rev.* 128, 2756 (1962); S. Biswas, C. E. Fichtel, D. E. Guss, C. J. Waddington, *J. Geophys. Res.* 68, 3109 (1963); S. Biswas, C. E. Fichtel, *Astrophys. J.* 134, 941 (1964); D. L. Lambert, *Nature* 215, 43 (1967); J. N. Bahcall, G. Shaviv, *Astrophys. J.* 153, 113 (1968).

4. S. J. Bame, O. J. H undhausen, J. R. Osbridge, I. B. Strong, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 393 (1968).
5. S. R. Pottasch, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **125**, 543 (1963); **128**, 73 (1964); *Ann. d'astrophys.* **27**, 163 (1964); *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **19**, 113 (1967).
6. C. Jordan, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **132**, 463, 515 (1966).
7. A. G. W. Cameron, *Astrophys. Lett.* **1**, 35 (1967).
8. D. L. Lambert, *Astrophys. Lett.* **2**, 37 (1968).
9. H. E. Suess, H. C. Urey, *Rev. Mod. Phys.* **28**, 53 (1956).
10. H. C. Urey, *Rev. geophys.* **2**, 1 (1964); H. Craig, в сб. *Isotopic and Cosmic Chemistry* (H. Craig, S. L. Miller, G. J. Wasserburg, Eds.), North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1964; L. Greenland, J. F. Lovering, *Geochim. Cosmochim. Acta* **29**, 821 (1965).
11. H. C. Urey, J. R. Arnold, *On the Abundance Differences between the Corona and the Photosphere* (будет опубликовано).
12. G. Wallerstein, J. L. Greenstein, R. A. R. Parker, H. L. Hele-fier, L. H. Aller, *Astrophys. J.* **137**, 280 (1963); B. E. J. Page, *Roy. Obs. Bull.* No 87 (1964); S. C. Wolff, G. Wallerstein, *Astrophys. J.* **130**, 257 (1967).
13. A. A. Penzias, R. W. Wilson, *Astrophys. J.* **142**, 419 (1963).
14. F. Hoyle, R. J. Tayler, *Nature* **203**, 1108 (1964).
15. P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **146**, 542 (1966).
16. R. V. Wagoner, *Science* **155**, 1369 (1967); R. V. Wagoner, W. A. Fowler, F. Hoyle, *Astrophys. J.* **148**, 3 (1967).
17. A. Sandage, *Astrophys. J.* **133**, 355 (1961).
18. J. H. Oort, в сб. *La Structure et l'évolution de l'univers*, Stoops, Brussels, 1958; S. van den Berg, *Zs. Astrophys.* **53**, 219 (1961).
19. H. Bondi, *Cosmology*, Cambridge University Press, London, 1961.
20. P. J. E. Peebles, R. H. Dicke, *Astrophys. J.* **134**, 891 (1968).
21. R. F. Christy, *Astrophys. J.* **144**, 108 (1966).
22. J. Faulkner, I. Iben, Jr., *Astrophys. J.* **144**, 995 (1966); I. Iben, Jr., J. Faulkner, *Astrophys. J.* **153**, 101 (1968).
23. W. L. W. Sargent, L. Searle, *Astrophys. J.* **145**, 652 (1966).
24. J. L. Greenstein, G. Münch, *Astrophys. J.* **146**, 652 (1966).
25. G. S. Greenstein, J. W. Truran, A. G. W. Cameron, *Nature* **213**, 871 (1967).
26. R. H. Dicke, *Astrophys. J.* **152**, 1 (1968).
27. R. B. Patridge, D. T. Wilkinson, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 557 (1967).
28. F. Hoyle, N. E. Wickramasinghe, V. C. Reddish, *Nature* **218**, 1124 (1968).
29. W. A. Fowler, *Nucleosynthesis in Big and Little Bangs*, в сб. *High Energy Physics and Nuclear Structure*, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1967.
30. H. A. Bethe, *Phys. Rev.* **55**, 434 (1939).
31. R. d'E. Atkinson, F. G. Houtermans, *Zs. Phys.* **54**, 656 (1928); G. Gamow, *My Early Memories of Fritz Houtermans*, в сб. *Earth Science and Meteoritics* (J. Geiss, E. D. Goldberg, Eds.), North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1963.
32. G. Gamow, *Zs. Phys.* **52**, 510 (1928).
33. D. D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1968.
34. G. R. Caughlan, W. A. Fowler, *Astrophys. J.* **136**, 453 (1962).
35. T. A. Tombrello, *Astrophysical Problems*, в сб. *Nuclear Research with Low-Energy Accelerators* (J. B. Marion, D. M. Van Patter, Eds.), Academic Press, New York, 1967.
36. W. A. Fowler, *Astrophys. J.* **127**, 551 (1958).
37. R. Davis, Jr., *Phys. Rev.* **97**, 766 (1955).
38. J. N. Bahcall, *Phys. Rev.* **135**, B137 (1964).
39. R. Davis, Jr., D. S. Harriger, K. C. Hoffman, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1209 (1968).
40. J. N. Bahcall, N. A. Bahcall, G. Shaviv, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1205 (1968); J. N. Bahcall, G. Shaviv, *Astrophys. J.* **153**, 113 (1968).
41. A. G. W. Cameron, A. New Table of Abundances of the Elements in the Solar System, в сб. *Origin and Distribution of the Elements* (L. Ahrens, Ed.), Pergamon Press, New York, 1968.
42. A. McKellar, в сб. *Stellar Atmospheres* (J. L. Greenstein, Ed.), University of Chicago Press, Chicago, 1960, стр. 569.
43. W. P. Bidelman, *Astrophys. J.* **117**, 25 (1958).
44. C. Wallerstein, T. F. Greene, L. J. Tompley, *Astrophys. J.* **150**, 245 (1967).
45. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **115**, 326 (1952).

46. W. Reichart, H. H. Staub, H. Stuessi, F. Zamboni, *Phys. Lett.* **20**, 40 (1966); J. Benn, E. B. Dailey, H. H. Muller, R. E. Pixley, H. H. Staub, H. Winkler, *Phys. Lett.* **20**, 43 (1966).
47. H. M. Loebenstein, D. W. Mингay, H. Winkler, C. S. Zaidins, *Nucl. Phys.* **A91**, 481 (1967).
48. G. W. Wallerstein, *Science* **162**, 625 (1968).
49. J. R. Patterson, H. C. Winkler, C. S. Zaidins, *Astrophys. J.* (опубликовано).
50. W. D. Arnett, J. W. Truran, *Astrophys. J.* (будет опубликовано).
51. S. A. Colgate, R. H. White, *Astrophys. J.* **143**, 626 (1966).
52. W. D. Arnett, *Nature* **219**, 1344 (1968).
53. D. Bodansky, D. D. Clayton, W. A. Fowler, *Astrophys. J. Suppl.* № 148 (1968).
54. D. Bodansky, D. D. Clayton, W. A. Fowler, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 161 (1968).
55. D. D. Clayton, S. A. Colgate, G. J. Fishman, *Astrophys. J.* **155**, 75 (1969).
56. E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 547 (1957).
57. D. D. Clayton, W. A. Fowler, T. E. Hull, B. A. Zimmerman, *Ann. Phys.* **12**, 331 (1964).
58. R. L. Macklin, J. H. Gibbons, *Astrophys. J.* **149**, 577 (1967).
59. D. D. Clayton, *Astrophys. J.* **139**, 637 (1964).
60. W. Herr, W. Hoffmeister, J. Langhoff, *Naturforsch.* **13a**, 231 (1958).
61. B. Hirt, G. R. Tilton, W. Herr, W. Hoffmeister, в сб. *Earth Science and Meteoritics* (J. Geiss, E. D. Goldberg, Eds.), North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1963, стр. 273.
62. J. H. Reynolds, в сб. *Ann. Rev. Nucl. Sci.* (E. Segré, Ed.), vol. 17, *Annual Reviews Inc.*, Palo Alto, 1967.
63. P. H. Fowler, R. A. Adams, V. G. Cowen, J. M. Kidd, *Proc. Roy. Soc. A301*, 39 (1967) (частное сообщение о результатах, которые будут опубликованы).