1976 г. Апрель *Том 118, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.12

ВОЗРАСТ ЭЛЕМЕНТОВ *)

Д. Шрамм

Изучение образования и спонтанного распада радиоактивных ядер помогает выяснить, когда были созданы некоторые из элементов. По этой информации можно сделать определенное заключение о возрасте Вселенной **).

С тех пор, как человек стал способен мыслить абстрактно, он не переставал интересоваться сущностью Вселенной, включая ее возникновение и возраст. Его можно оценить, изучая процесс радиоактивного распада, который шел миллиарды лет. За весь этот период механизм процесса не менялся. Самое существенное, что с самого возникновения элементов оставалась постоянной скорость их распада. Мы можем быть уверены, что сейчас образец урана-238 независимо от его природы будет постепенно превращаться в свинец и это превращение будет проходить так, что половина атомов урана станет свинцом за 4,5 млрд. лет. Нет оснований полагать, что природа и скорость этого процесса чем-то отличались в том очень отдаленном прошлом, когда Вселенная была молода.

История этих бесчисленных ядерных событий записана в тех химических элементах, из которых созданы Земля и остальная Вселенная. Правильно интерпретируя эту историю, мы можем определить дату возникновения элементов, а из нее вывести возраст самой Вселенной. Раздел науки, который этим занимается, называется ядерной космохронологией.

Существует несколько других способов определения возраста Вселенной. Одно знаменитое вычисление было сделано англиканским архиепископом Дж. Ушером в 1658 г. Складывая поколения, перечисленные в Библии, он зафиксировал время «сотворения» 4004 г. до н. э., что дало бы на сегодняшний день 5 978 лет. Последние измерения отличаются от этой величины на шесть порядков. Однако неопределенность современных вычислений, видимо, составляет несколько миллиардов лет, тогда как архиепископ Ушер считал свою дату точной в пределах одного года.

Кроме ядерной космохронологии есть два главных способа датировки космологических событий — это измерения расширения Вселенной и наблюдения звезд в шаровых скоплениях, ассоциированных со многими

---

*) David N. Schramm, The Age of the Elements, Scientific American **230** (1), 69 (January 1974). Перевод В. С. Птускина.

Дэвид Н. Шрамм — старший преподаватель астрономии и физики Университета штата Техас в Остине, США.

) См. также статью В. П. Чечева и Я. М. Крамаровского в УФН **116, 687 (1975). (*Прим. перев.*)

© Scientific American, Inc., 1974.
© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1976 г.

галактиками, включая и нашу собственную. Обе методики требуют точных астрономических измерений.

Расширение Вселенной было впервые замечено Э. Хабблом в 1929 г. В настоящее время обычно считают, что расширение объясняется каким-нибудь вариантом космологической теории «большого взрыва» («big bang» theory). В такой теории предполагается, что Вселенная взрывается из очень плотного и горячего изначального состояния. Соперничающая теория «стационарного состояния» («steady state» theory), которая постулирует бесконечный возраст, опровергнута наблюдением трехградусного черно-тельного фонового излучения.

История Вселенной не обязательно началась с «большого взрыва». Возможно, что когда-то существовал разреженный газ, который коллапсировал, взорвался и теперь будет вечно расширяться. Возможно также, что все началось из плотного состояния и возвратится в него. На самом деле этот цикл мог бы повторяться опять и опять. Однако наша Вселенная действительно началась с первичного взрыва, поскольку мы не можем получать информацию о событиях, происходивших до этого. Возраст Вселенной есть, следовательно, интервал от большого взрыва до настоящего момента (рис. 1).

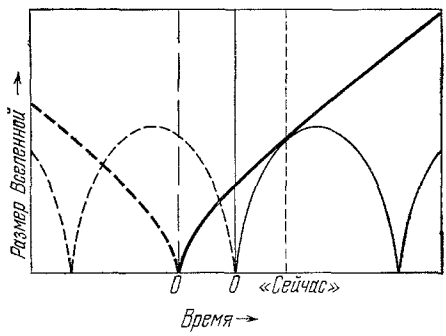

Рис. 1. Расширение Вселенной, измеренное по удалению далеких астрономических объектов, дает один из методов установления даты «большого взрыва».

Скорость расширения можно определить в точке, отмеченной как *сейчас*. Однако только по одной скорости нельзя выяснить, будет ли Вселенная всегда расширяться (толстая кривая) или снова сколлапсирует под действием собственных сил тяготения (кривая потоньше). Максимальный возраст, который дает этот метод, находится в пределах от 10 до 20 млрд. лет, лучшая оценка составляет примерно 18 млрд. лет. Минимальный возраст равен половине максимального. Все события до «большого взрыва» (штриховые кривые) находятся в области непознаваемого прошлого.

А. Сэндидж, работающий с 200-дюймовым халовским телескопом на горе Паломар, недавно провел новые измерения скорости расширения. Его вычисления показывают, что если эта скорость оставалась постоянной с момента большого взрыва, то возраст Вселенной составляет 18 млрд. лет. Это верхний предел возраста, называемый иногда «хаббловским временем». Поскольку гравитация вызывает замедление скорости расширения, то Вселенная должна быть несколько моложе, чем получается по хаббловскому времени. Подобное замедление не было измерено, но Сэндидж определил его максимальное значение по отсутствию соответствующего эффекта. Таким образом, его наблюдения дали также нижний предел возраста Вселенной: оказалось, что он, видимо, не меньше половины хаббловского времени. Неопределенность этих измерений весьма значительна: хаббловское время заключено в пределах 10—20 миллиардов лет, и, следовательно, минимальный возраст, определенный этим методом, составляет величину от 5 до 10 миллиардов лет.

Второй астрономический метод установления шкалы времени во Вселенной зависит от индивидуальных свойств шаровых скоплений. Расчеты звездной эволюции дают возможность оценить возраст звезд, если мы знаем их массу, светимость, состав и поверхностную температуру. О составе и поверхностной температуре можно судить по звездным спектрам; однако в большинстве случаев масса и светимость могут быть определены, если только известно расстояние до звезды. Шаровые скопления

являются уникальными объектами для подобных расчетов. Все звезды в данном скоплении образовались примерно в одно и то же время и из одного и того же материала. Кроме того, все они находятся примерно на одном и том же расстоянии от нас.

Если изобразить температуру группы звезд в зависимости от их светимости, то сравнительно молодые звезды, для которых топливом служит синтез водорода, образуют диагональную полосу, называемую главной последовательностью. На диаграмме более массивные звезды находятся в яркой и горячей области, менее массивные — в холодной и тусклой

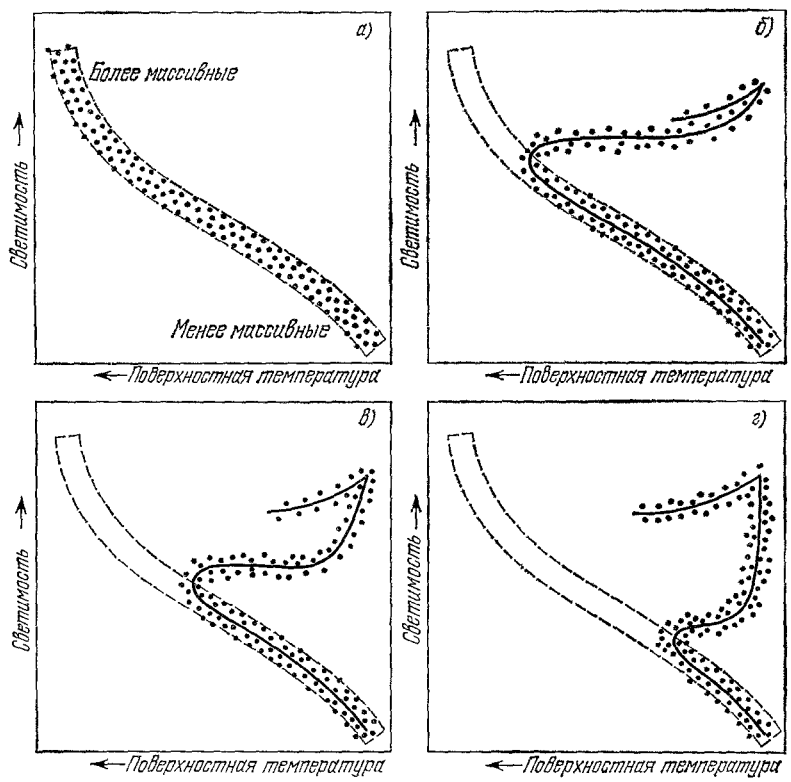

Рис. 2. Возраст звезд в шаровых скоплениях дает другой метод измерения возраста Вселенной.

На этих диаграммах Герцшпрунга — Рассела диагональные полосы представляют собой главную последовательность, которая описывает характеристики всех звезд во время формирования (*а*). С течением времени звезды покидают главную последовательность, начиная с самых массивных в верхнем левом углу (*б*) и далее вниз по кривой (*в*, *г*). Определив, в какой точке в настоящий момент звезды покидают главную последовательность, можно оценить время формирования шаровых скоплений. И. Ибен и Р. Руд недавно подсчитали, что шаровым скоплениям 13 ± 3 млрд. лет.

области. Это и есть диаграмма Герцшпрунга — Рассела, или ГР-диаграмма, по имени Э. Герцшпрунга и Г. Рассела. После того, как в недрах звезды исчерпается водород, она сдвигается с главной последовательности, становясь вскоре красным гигантом. Массивные звезды покидают главную последовательность быстрее, чем менее массивные. В популяции звезд, которые образовались примерно в одно и то же время, можно, следовательно, оценить возраст звезд простым определением той точки ГР-диаграммы, в которой звезды уже не находятся больше на главной последовательности (рис. 2).

И. Ибен и Р. Руд недавно подсчитали, что шаровые скопления образовались 13 ± 3 млрд. лет назад — возраст, согласующийся с 9—

18 млрд. лет, определенными по скорости расширения Вселенной. (Конечно, действительный возраст Вселенной должен быть больше, чем возраст шаровых скоплений, но считается, что скопления образовались за время меньше миллиарда лет после большого взрыва.)

Как и при определении хаббловского времени, в этих вычислениях есть существенная неопределенность. Главный источник этой неопределенности — в теоретическом расчете звездной эволюции и в определении состава звезд. Из-за присущих этим методам ограничений, третий независимый способ мог бы дать важную проверку. Таким способом оценки возраста Вселенной является использование радиоактивных ядер.

В первичном огненном шаре (файерболе), с которого, как мы предполагаем, началась Вселенная, могли бы возникнуть только самые легкие элементы — водород, гелий и, возможно, некоторая часть лития. Все остальные элементы должны были синтезироваться позднее в звездах. Топливом для звезд главной последовательности, включая фактически все звезды, образовавшиеся вскоре после «большого взрыва», является реакция синтеза водорода в гелий. Как мы уже видели, именно истощение запасов водорода в ядре приводит к тому, что звезда покидает главную последовательность. Когда звезда становится красным гигантом, ее внешняя оболочка расширяется, но в то же время под действием гравитации ядро сжимается и становится горячее, так что начинается новая реакция синтеза — горение гелия с образованием углерода. В конце концов гелий также исчерпывается и звезда остается с углеродным ядром.

Последующие события зависят от массы звезды. Звезда с массой меньше четырех солнечных масс становится планетарной туманностью и белым карликом в качестве остатка. Звезда с массой от примерно четырех до восьми солнечных масс, возможно, взорвется как сверхновая. Это происходит, когда начинается синтез в углеродном ядре. После взрыва остается (а может и не остаться) плотное ядро из нейтронов. Этот остаток, если он существует, представляет собой скорее нейтронную звезду, чем белый карлик. Предполагается, что пульсары, наблюдаемые в некоторых остатках сверхновых, являются такими нейтронными звездами.

Звезда с массой больше восьми солнечных масс, возможно, также становится сверхновой. После взрыва такой звезды почти наверняка образуется остаток, который может быть или нейтронной звездой или черной дырой. Именно при взрывах массивных звезд и образуются элементы от углерода до железа. Однако железо — последний элемент в этой последовательности. Реакции синтеза с участием железа не могут служить топливом для звезд, так как все такие реакции идут не с выделением, а с поглощением энергии. Железо и некоторые близлежащие элементы представляют, таким образом, конечный продукт ядерных процессов, из которых звезды черпают свою энергию (рис. 3).

Кажется удивительным, что все тяжелые элементы образовались в крайне редких, по сравнению с полным числом звезд, событиях. Вероятно, в галактике было немногим более миллиарда сверхновых среди всех 100 миллиардов звезд. Однако более 98% Вселенной состоит из водорода и гелия. Поэтому, хотя сверхновые являются сравнительно редкими явлениями, так же редки и элементы, которые в них образуются.

Элементы тяжелее железа получаются сначала путем захвата нейтронов ядрами железа и соседних элементов. Захват происходит двумя способами: медленно (так называемый *s*-процесс) и быстро (*r*-процесс).

Медленный *s*-процесс идет в оболочках красных гигантов. При этом нейтроны прибавляются к ядрам постепенно, так что могут образоваться только сравнительно устойчивые новые ядра. Быстро распадающиеся

изотопы исчезают до того, как смогут поглотить нейтрон. По этой причине *s*-процесс заканчивается на свинце и висмуте. Все тяжелые элементы до некоторой степени радиоактивны, а те, которые следуют за свинцом и висмутом, особенно неустойчивы.

Быстрый *r*-процесс, как предполагается, идет только в сверхновых и, возможно, действует в области взрыва, непосредственно у внешней поверхности остатка (нейтронной звезды или черной дыры), где есть интенсивный поток нейтронов. При этих условиях ядра быстро поглощают нейтрон за нейтроном и, таким образом, перекрывается район нестабильности. Предполагается, что все элементы тяжелее висмута образовались именно таким путем.

Ядра, которые первоначально возникают в *r*-процессе, слишком богаты нейтронами, чтобы быть стабильными или долгоживущими. В результате посредством β-распада они начинают переходить в области большей

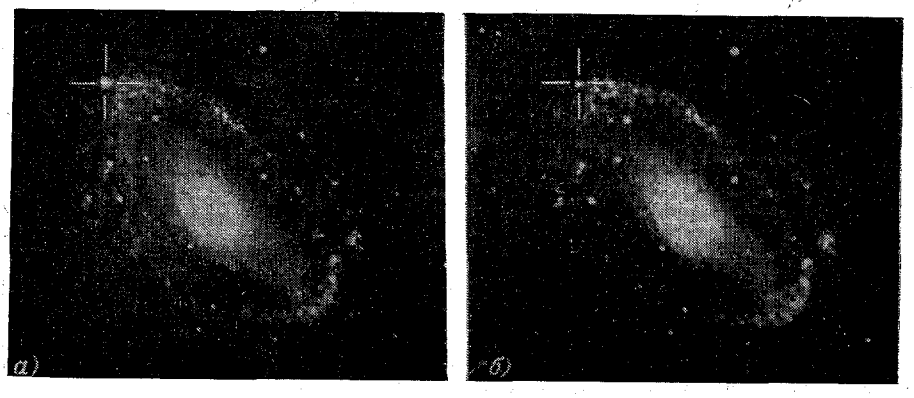

Рис. 3. Сверхновая в галактике из созвездия Волосы Вероники была в максимуме блеска в то время, когда была сделана фотография рис. *а*) (май 1940 г.).

Восемь месяцев спустя (рис. *б*) сверхновая сильно потускнела. Считается, что все элементы тяжелее висмута образовались только в сверхновых. Радиоактивный распад этих элементов позволяет вычислить тот момент, когда взорвались первые сверхновые. Фотографии сделаны на 100-дюймовом телескопе в Маунт-Вильсон.

стабильности. В таком процессе нейтрон испускает электрон (и нейтрино) и превращается в протон, поэтому масса атома остается примерно постоянной, но атомный номер увеличивается на единицу. β-распад идет до тех пор, пока не получится устойчивое отношение числа нейтронов к протонам. Например, свинец-232, образующийся в *r*-процессе с числом нейтронов на 26 бо́льшим, чем в стабильном изотопе свинца-206, после восьми β-распадов переходит в торий-232.

Элементы, которые сейчас используются как подходящие «ядерные хронометры», образовались в *r*-процессе. Поскольку процесс, видимо, идет только в сверхновых, то дата, которую можно установить по этим элементам, фактически относится к взрывам сверхновых. Большинство элементов от углерода до железа и далее также возникает в сверхновых, поэтому метод дает правильный возраст элементов. Более того, из подобных вычислений можно вывести возраст Вселенной в целом. Очень массивные звезды, которые сконденсировались при формировании галактик, должны рано, сразу после «большого взрыва», стать сверхновыми. Датирование этих первых сверхновых дало бы примерный возраст Галактики и Вселенной. Даже если подобные звезды и не эволюционируют так быстро

как предполагается, то ясно, что самые старые сверхновые дают нижний предел возраста Вселенной.

Для проведения вычислений нет необходимости знать действительную распространенность элементов на сегодняшний день и в любой момент в прошлом. Нужно лишь знать пропорцию, в которой находится подходящая пара элементов сейчас («относительную распространенность»), и пропорцию, в которой они были в момент образования («относительное производство»).

Относительная распространенность определяется тщательными экспериментальными измерениями. Земные горные породы, хотя и состоят целиком из того же материала, что остальная часть Солнечной системы,

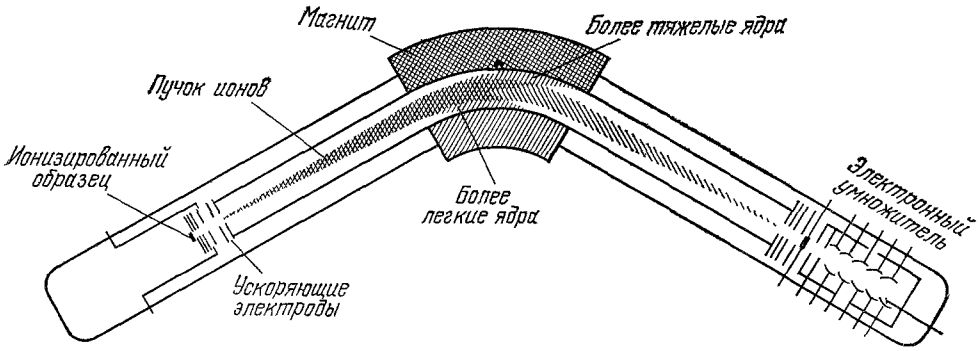

Рис. 4. Масс-спектрометр — инструмент, которым измеряют относительную распространенность ядерных хронометров.

Чистый образец исследуемого элемента сначала отделяется химическим сепарированием. Затем образец ионизуется в вакууме, и положительно заряженные ионы (которые включают ядра) ускоряются серией электродов. Магнитное поле отклоняет пучок ионов таким образом, что только частицы с определенной массой достигают электрода детектора; там они регистрируются, а их ток усиливается электронным усилителем. Ионы с большей массой и соответственно бо́льшим импульсом не смогут достаточно отклоняться и попасть в детектор; ионы с меньшей массой отклоняются слишком сильно. Распространенность каждого изотопа измеряется путем последовательного измерения величины магнитного поля. Так определяется спектр масс и, следовательно, разделяются химически идентичные вещества.

обычно не дают подходящих образцов. За те 4,6 млрд. лет, которые существует Солнечная система после конденсации, земные породы формировались и переформировывались много раз. Химическое фракционирование изменило их состав так, что они больше уже не представляют «средний» состав Солнечной системы. Бо́льшая часть образцов поставляется метеоритами, которые не претерпели изменений за всю историю Солнечной системы. Недавно начали использоваться также и лунные породы.

Для выделения нужных элементов образцы вначале подвергаются химической обработке. Необходимо тщательно избегать загрязнений, поскольку обычно имеют дело с ничтожными количествами материала. Затем образцы анализируют с помощью масс-спектрометра — прибора, который разделяет элементы и изотопы в соответствии с отношением их массы к заряду (рис. 4).

«Относительное производство» может быть подсчитано теоретически. В областях между «магическими числами» нейтронов (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 и, возможно, 184), которые соответствуют необычайно стабильным ядрам, r-процесс дает примерно равное содержание элементов с различными массами. Тот факт, что начальное обилие примерно одинаково способствует успешному расчету относительного производства очень тяжелых ядер, поскольку в этой области в образование каждого ядра-хронометра дают вклад ядра с разными массовыми числами. Вклад многих ядер — это результат α-распада, при котором ядра испускают α-частицы (т. е. ядра

гелия), уменьшая массовое число на четыре, а атомный номер на два. Многочисленные материнские тяжелые элементы, распадаясь, становятся ядерными хронометрами. Одно ядро-хронометр распадается так, что в конце концов дает вклад в содержание другого ядра-хронометра. Из-за

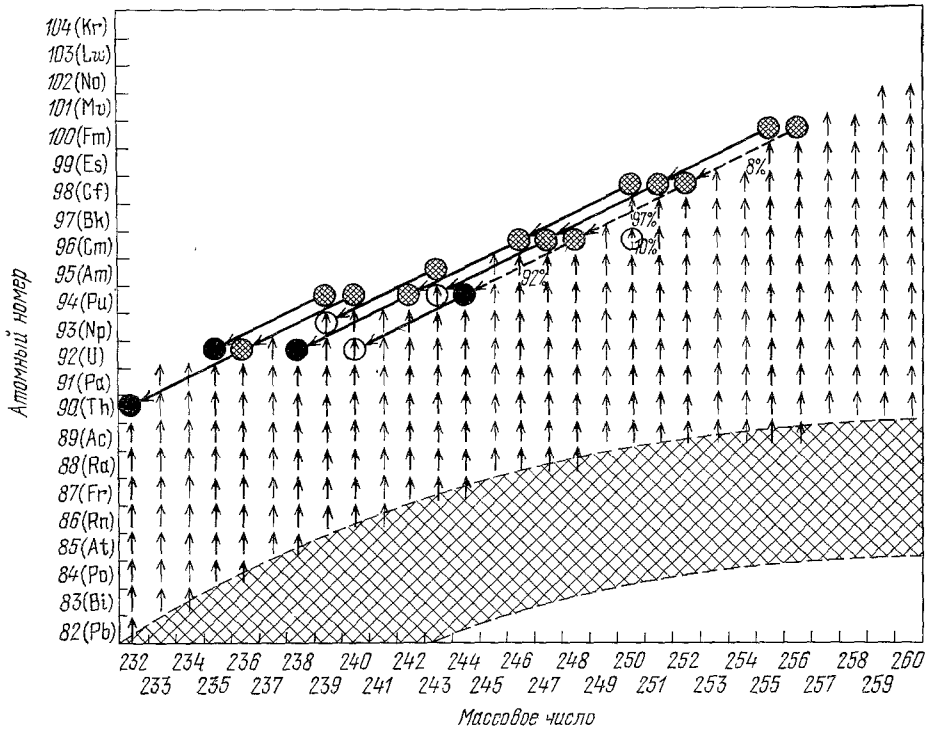

Рис. 5. Схематическое изображение производства четырех элементов, которые служат ядерными хронометрами.

Этими хронометрами являются (заштрихованные кружки): торий-232, уран-235, уран-238 и плутоний-244. Быстрый процесс (r-процесс; изображен полосой, обведенной штриховой линией сверху и снизу) дает ядра с избытком нейтронов; эти ядра посредством β-распада достигают области стабильного отношения чисел протонов и нейтронов. При β-распаде массовое число не меняется, но атомный номер возрастает на единицу. β-распады, которые дают вклад в производство ядерных хронометров, показаны черными стрелками. Другие ядра также распадаются с испусканием β-лучей; это показано тонкими вертикальными стрелками. В области β-стабильности доминирует α-распад; в этом процессе атомная масса уменьшается на четыре, а атомный номер уменьшается на два. α-излучатели показаны как заштрихованные кружки; их путь при распаде обозначен толстыми наклонными стрелками. Несколько ядер распадаются спонтанным делением и поэтому сдвигаются из данной области масс. Траектории α- и β-распадающихся остатков показаны штриховыми стрелками, указан только процент вклада в производство ядер-хронометров. Каждый из хронометров состоит из ядер, образовавшихся с такой же массой и из продуктов распада материнских ядер бо́льших масс. Из-за того, что ядра каждой массы образуются приблизительно в равных количествах, скорости производства можно оценить суммированием чисел материнских ядер. Например, U-238 является продуктом всех ядер с массами 238, 242 и 246 и 10% ядер с массой 250, так что скорость производства равна 3,1. Один хронометр (Pu-244) находится среди материнских ядер другого хронометра (Th-232).

вклада ядер с разными массами эффект отклонения (и так малого) р - пространенности элементов от средней уменьшается (рис. 5).

Подходящими хронометрами являются торий-232, уран-235, уран-238 и плутоний-244. Их относительная скорость производства может быть подсчитана простым суммированием числа соответствующих материнских ядер. Например, U-238 имеет материнские ядра с массовыми числами 238, 242 и 246 и еще получает 10% продуктов распада ядра с массовым числом 250 (остальная часть спонтанно делится). В общем получаем 3,1. Материнскими ядрами Pu-244 являются все ядра с массовым числом 244, 92% ядер 248, 89% ядер 252 и 7% ядер 256, в целом 2,9. Th-232 производится ядрами с массовыми числами 232, 236 и 240, а также всеми материнскими

ядрами, которые дают вклад в ядро 244, в общем получаем 5,9. Наконец, U-235 имеет шесть материнских ядер: 235, 239, 243, 247, 251 и 253.

Теперь можно просто найти относительное производство ядер. Для Th-252 к U-238 оно составляет 5,9 : 3,1 = 1,9, Pu-244 к Th-232 — — 2,9 : 5,9 = 0,5. В случае отношения U-235 к U-238 этим методом получаем 6 : 3,1 = 1,9, однако из-за того, что ядра с нечетными массовыми числами (такие, как U-235) легче разрушаются нейтронным захватом, это отношение составляет 1,5.

Простая демонстрация использования этих отношений для определения возраста элементов состоит в предположении, что все элементы образовались в одном событии. Известно, что это предположение не справедливо, но оно дает некую идеализированную модель процесса ядерной датировки (рис. 6).

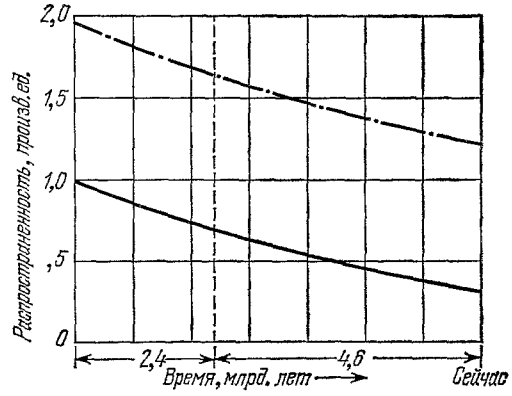

Рис. 6. Модель нуклеосинтеза в единичном взрыве основывается на распаде тория-232 (штрих-пунктирная кривая) и урана-238 (сплошная кривая).

Предполагается, что эти ядра образовались в соотношении 1,9 : 1; их современная относительная распространенность 4 : 1. По известным скоростям распада можно подсчитать, что эти отношения получаются, если единичное событие произошло 7 млрд. лет назад. В момент формирования Солнечной системы (штриховая вертикальная линия) относительная распространенность составляла 2,4 : 1. Известно, что данная модель неверна, но она демонстрирует методы ядерной датировки.

Например, на опыте найдено, что для такого хронометра, как пара Th-232 и U-238 относительная распространенность составляет в настоящее время величину около 4,0. Подсчитанное отношение при производстве составляет 1,9. С учетом времен полураспада соответствующих ядер можно найти время, за которое достигается наблюдаемое отношение: оно равно семи миллиардам лет. Это и есть возраст того гипотетического единичного события, которое соответствует данной паре.

На практике именно таким путем вычисления не делались бы. Вместо непосредственной работы с относительной распространенностью элементов на сегодняшний день, удобнее сначала определить из нее относительные концентрации на момент конденсации Солнечной системы (она произошла 4,6 млрд. лет назад). В этом случае приведенное выше отношение составило бы 2,4, а время от единичного события до образования Солнечной системы равнялось бы 2,4 млрд. лет. Прибавляя возраст Солнечной системы, можно опять получить возраст 7 млрд. лет. Эта процедура становится важной, если в качестве хронометров используются короткоживущие изотопы.

Гипотеза единичного события, очевидно, неприемлема, поскольку крайне маловероятно, что все сверхновые за прошедшие миллиарды лет взорвались в какой-то один момент. Фактически это демонстрируется также тем обстоятельством, что несколько различных пар ядер и ядерных хронометров дают разные даты единичного события. Действительно, ядра-хронометры с малым временем полураспада должны были бы уже полностью распасться, если бы единичное событие произошло за миллиарды лет до возникновения Солнечной системы. Необходимы более сложные модели.

Более десяти лет назад У. Фаулер и Ф. Хойл использовали Th-232, U-235 и U-238 для установления временнóй шкалы нуклосинтеза. Имея

только эти хронометры, невозможно с полной определенностью отвергнуть модель единичного события. Однако в последние несколько лет была разработана техника для использования двух новых ядерных хронометров. Это йод-129 и плутоний-244. Присутствие этих изотопов в Солнечной системе нельзя согласовать с единичным событием нуклеосинтеза.

Измерения содержания I-129 и Pu-244 требуют известной хитрости, поскольку времена полураспада этих изотопов много меньше возраста Солнечной системы. Какое бы количество изотопов не присутствовало в то время, радиоактивный распад сведет его фактически к нулю. (Современная распространенность была бы не нулевая, но она стремится к нулю асимптотически и вполне может оказаться неизмеримой. Исследователи Лос-Аламосской научной лаборатории и «Дженерал электрик» недавно обнаружили в природных образцах следы Pu-244.)

Хотя сами плутониевый и йодный хронометры и недоступны для нас, можно работать с продуктами их распада. Йод-129 посредством β-распада переходит в стабильный ксенон-129. Поэтому, если заданное количество I-129 было в материале метеорита, образовавшегося 4,6 млрд. лет назад, в настоящее время в нем можно обнаружить такое же количество Xe-129. Можно ожидать также присутствия многих других изотопов ксенона. Они отделяются методами масс-спектрометрии, причем так, что присутствие I-129 в метеорите много лет назад было бы обнаружено по избытку Xe-129.

Дж. Рейнольдс и его сотрудники в Калифорнийском университете в Беркли впервые нашли этот избыток Xe-120 и доказали, что он вызван распадом I-129. Искусным методом они смогли определить отношение I-129 к стабильному изотопу I-127 на момент образования метеорита, вернее, на тот момент, когда метеорит достаточно остыл, чтобы удерживать газообразный ксенон. Для того чтобы определить искомое отношение, Рейнольдс облучал образец нейтронами, так что ядро I-127 поглощало нейтрон и превращалось в I-128, который за 25 минут распадается в Xe-128. Таким образом, содержание I-127 было связано с избытком Xe-128. Затем ксенон постепенным нагреванием извлекался из образца и подвергался анализу в масс-спектрометре. В широком интервале температур из образца выходил только ксенон обычного происхождения. Избытки изотопов Xe-128 и Xe-129, когда они появились, выходили в одно и то же время, показывая, что первоначальные вклады этих двух изотопов йода находились в образце в одном и том же месте. Таким образом, возникла возможность отличить обычный ксенон от продуктов распада йода. Из отношения избыточного Xe-128 и Xe-129 Рейнольдс смог вывести отношение изотопов йода на момент формирования Солнечной системы.

Идентификация Pu-244 как хронометра также включает изотопы ксенона. Ядро Pu-244 с периодом полураспада 82 миллиона лет распадается, испуская α-частицы. Однако одно ядро на тысячу претерпевает спонтанное деление. Среди продуктов деления есть и ксенон, точнее лишь четыре его тяжелых изотопа Xe-131, Xe-132, Xe-134 и Xe-136. Эти изотопы появляются и при делении других ядер, но в других характерных отношениях. Поэтому, исследуя спектр масс изотопов ксенона, можно идентифицировать делящееся ядро.

Аномальный спектр изотопов ксенона, свидетельствующий о неизвестном делящемся компоненте, был обнаружен в метеоритах П. Кародой из Арканзасского университета. Г. Вассербург и его сотрудники по Калифорнийскому технологическому институту в 1969 г. обнаружили, что избыточный тяжелый ксенон был связан с распадными треками в метеоритах. Эти треки представляют собой повреждения кристаллической структуры, вызванные разлетающимися осколками ядер. В то время

не был известен спектр изотопов ксенона для распада Pu-244, но это ядро, тем не менее, стало единственным подходящим кандидатом. Некоторые исследователи, включая и автора, начали исследовать его применения в качестве возможного хронометра. Проблема не была решена до 1971 г., когда через 10 лет после открытия Кароды группа Рейнольдса смогла установить спектр изотопов ксенона, образовавшегося при делении известного образца Pu-244.

Шаг от наблюдений продуктов деления Pu-244 в метеоритах к установлению относительного содержания Pu-244 и Th-232 весьма неопределен. Это содержание должно относиться ко всей Солнечной системе, однако возможное химическое разделение материала метеорита может существенно его изменить. Приписываемая величина 0,0062 должна рассматриваться пока как лучшая оценка, но не как окончательное определение.

В случае I-129 для оценки скорости относительного производства также необходимы специальные меры. Йод-129 (53 протона и 76 нейтронов) находится около магического нейтронного числа 82, и поэтому распределение изотопов при захвате нейтрона далеко не однородно. Необходимо определить скорость производства интерполяцией от известных скоростей производства стабильных изотопов, например, теллура-128 и -130, в непосредственной окрестности I-129.

Подобная процедура, в общем, необходима для определения скоростей производства всех более легких радиоактивных ядер. Одним важным исключением является случай пары рений-187 и осмий-187. Это самый долгоживущий ядерный хронометр; соответствующий метод хронологии разработан Д. Клейтоном из университета в Райсе. Было показано, что для этих элементов относительное производство сильно связано с отношением сечений захвата нейтронов. Сечение является мерой способности ядра поглотить нейтрон. К сожалению, соответствующие сечения до сих пор не были экспериментально измерены, а используемые предварительные теоретические оценки вносят большую неопределенность в хронологию, основанную на этой паре изотопов.

Применяя несколько таких ядерных хронометров для определения возраста Вселенной, можно использовать более усложненный подход, чем модель единичного взрыва. Если при этом предполагается множество событий (взрывов), то возраст можно считать установленным в том случае, когда совокупность остающихся от каждой сверхновой радиоактивных продуктов соответствует наблюдаемому содержанию на момент формирования Солнечной системы.

Считается, что продукты взрыва каждой сверхновой смешиваются с межзвездным газом по мере вращения Галактики и что Солнечная система конденсируется именно из этого газа. Мы не знаем, однако, как много сверхновых взрывалось в разные периоды истории Галактики; оценку можно получить только по наблюдениям других галактик. Изменения в частоте, с которой взрываются сверхновые, очевидно, повлияют на возраст, полученный с помощью ядерных хронометров. Например, если аномально большое число сверхновых взрывалось незадолго до формирования Солнечной системы, то такой долгоживущий хронометр, как U-238, покажет слишком малый возраст Вселенной. Наблюдаемое содержание отражало бы не скорость распада, а искусственный эффект, связанный со скоростью производства изотопа.

Один из подходов к этой проблеме состоит в конструировании модели для относительного числа сверхновых за всю историю Галактики. Модель единичного события — это только одна из возможностей, но есть и много других. Проверить модель можно, выяснив, воспроизводит ли она наблю-

даемые распространенности всех пар изотопов, используемых как хронометры (рис. 7).

Вассербург и автор разработали метод ядерной космохронологии, который не зависит от модели. Используя различные временные шкалы разных хронометров для определения относительного числа сверхновых в каждый период, истинная модель выводится из распространенности самих же ядер-хронометров. Например, любая правильная модель должна включать нуклеосинтез в течение нескольких сотен миллионов лет до образования Солнечной системы, иначе невозможно объяснить присутствие

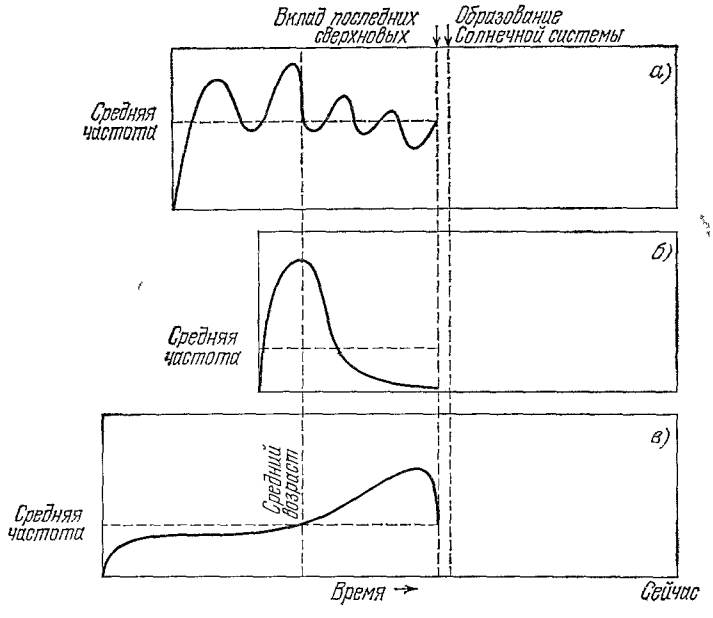

Рис. 7. В гипотетических моделях нуклеосинтеза принимаются три возможных распределения частоты взрывов сверхновых на ранних этапах истории Вселенной.

Во всех трех моделях предполагается один и тот же средний возраст элементов, но вводятся различные средние частоты. Если число сверхновых было примерно постоянно или флуктуации симметричны (*а*), то средний возраст примерно равен половине среднего возраста процесса нуклеосинтеза. Если число сверхновых особенно велико на ранних стадиях (*б*), то Вселенная моложе, чем в модели с постоянной частотой. Малая начальная частота (*в*) дает несколько бо́льший полный возраст. Эта последняя модель не соответствует наблюдениям.

продуктов распада I-129 и Pu-244. Уже одно это условие позволяет отвергнуть модель единичного события, в которой элементы образовались семь миллиардов лет назад.

Строя модель, мы можем не только оценить временну́ю шкалу во Вселенной, но и найти частоту взрывов сверхновых в Галактике. (В действительности мы не определяем строго сверхновые per se, а только находим скорость *r*-процесса. Однако считается, что *r*-процесс происходит только в сверхновых.)

Поскольку в Галактике, видимо, было почти миллиард сверхновых, легче использовать методы статистики, чем суммировать эффекты каждого события. Любое распределение сверхновых имеет частоту взрывов и средний возраст. Существует также время, после которого сверхновые больше не могут дать вклад в вещество, из которого состоит Солнечная система. Наконец, самые старые ядра должны быть старше, чем средний возраст элементов.

Из данных, поставляемых ядерными хронометрами, можно найти средний возраст, а также частоту взрывов сверхновых в различные момен-

ты времени, отнесенную к средней частоте. Такие вычисления возможны из-за разницы во временах жизни различных хронометров. Ядра с данным временем полураспада должны были образоваться не ранее чем за время в несколько периодов полураспада до конденсации Солнечной системы, иначе они не присутствовали бы в измеримых количествах в веществе Солнечной системы. Следовательно, содержание ядер дает усредненную частоту взрывов сверхновых за время в несколько периодов полураспада этих ядер. Можно показать, что средний возраст событий, в которых

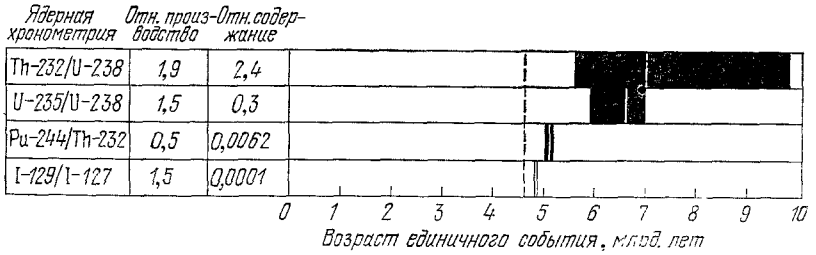

Рис. 8. Четыре периода истории Вселенной измеряются четырьмя парами ядерных хронометров.

Относительное производство оценивается по теории нуклеосинтеза; относительная распространенность вычисляется по наблюдаемой на сегодня распространенности элементов в метеоритах, но приводится на момент конденсации Солнечной системы. Из этих данных можно вывести возраст «единичного события» для каждой пары (светлые линии), хотя в некоторых случаях неопределенность измерений велика (темные полосы). Расхождения между различными возрастами единичного события вызваны разницей во временах полураспада хронометров. Для долгоживущих хронометров, таких, как U-238, ядра могут сохраняться от самых ранних сверхновых. Однако для быстро распадающихся (таких, как I-129) на сегодняшний день остаются только ядра, образовавшиеся незадолго до формирования Солнечной системы; последнее произошло 4,6 млрд. лет назад (штриховая линия).

образовалась какая-то определенная хронометрическая пара, совпадает с возрастом гипотетического единичного события, в котором могла бы образоваться данная пара (рис. 8).

Очень долгоживущие хронометры, такие, как Re-187, Th-232 и, возможно, U-238 сохраняются столь же длительное время или дольше, чем сама продолжительность нуклеосинтеза. Поэтому средняя частота взрывов сверхновых, дающих вклад в образование этих ядер, представляет собой величину, усредненную за всю историю Галактики. Более того средний возраст (или возраст в модели единичного события) для этих ядер является средним возрастом элементов. Очевидно, возрасты, определяемые по парам Th-232, U-238 и Re-187, Os-187, должны совпадать. Лучшая оценка для пары торий — уран составляет 2,4 плюс 4,6, или в сумме 7 миллиардов лет, тогда как пара рений — осмий дает возраст 3,5 плюс 4,6, т. е. 8,1 миллиарада лет. Если учесть неопределенность расчета, то несоответствие невелико.

Вариации в частоте взрывов сверхновых могут быть выявлены при работе с более короткоживущими ядрами-хронометрами. Короткоживущие хронометры поставляют информацию о периоде, непосредственно предшествующем формированию Солнечной системы. Сравнивая полученную таким образом частоту взрывов с той, которая дается долгоживущими элементами, мы можем выяснить, была ли скорость нуклеосинтеза во время конденсации Солнечной системы выше или ниже средней. Поскольку есть два короткоживущих хронометра (I-129 и Pu-244), мы можем определить не только относительную скорость в то время, но также и промежуток времени между последним нуклеосинтезом и формированием объектов Солнечной системы. Оказалось, что соответствующий интервал составляет от 100 до 200 миллионов лет.

Любопытно, что этот период сравним со временем полного оборота Галактики. Совпадение было замечено не только мною, но также Г. Ривсом из Парижа и А. Камероном из Гарвардского университета; они независимо предположили, что ядерные хронометры, возможно, неявно измеряют вращение Галактики. В теории волн плотности для спиральных галактик считается, что звезды с большей вероятностью образуются в областях с большей плотностью. При этом период изменения плотности определялся бы галактическим вращением и составлял бы величину около 100 миллионов лет.

Другое возможное объяснение для этого интервала состоит в том, что он представляет собой время, необходимое для формирования Солнечной системы, после того как последняя сверхновая привела к началу ее

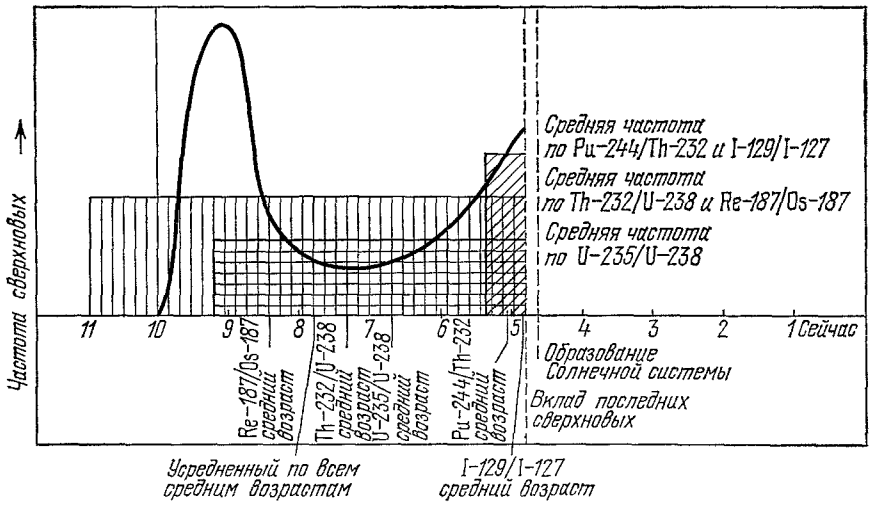

Рис. 9. Возможное распределение сверхновых устанавливается путем сравнения информации по долгоживущим и короткоживущим ядерным хронометрам.

Полная средняя частота дается Th-232/U-238 и Re-187/Os-187 (вертикальная штриховка). Поскольку эта частота выше, чем получаемая по короткоживущему хронометру U-235/U-238 (горизонтальная штриховка), то можно прийти к заключению о большей частоте взрывов сверхновых на ранних этапах истории Вселенной и о последующем спаде. Высокая частота, определяемая по очень короткоживущим йодному и плутониевому хронометрам (диагональная штриховка), наводит на мысль о другом пике в числе сверхновых непосредственно перед образованием Солнечной системы. Результирующая кривая дает возраст Вселенной примерно в 10 млрд. лет. Однако из-за неопределенности в вычислениях нельзя исключить вариант с постоянной частотой взрывов сверхновых. Постоянная частота дает возраст около 11 млрд. лет. На диаграмме масштаб не выдерживается: флуктуации в числе сверхновых сильно преувеличены.

конденсации. Эта теория, однако, встречается со следующим возражением: известно, что все объекты в Солнечной системе затвердели в промежутке времени в несколько миллионов лет. Почему же тогда они вдруг так затвердели через 100 миллионов лет после события, инициировавшего их образование? Считается также, что время, необходимое для образования такой звезды, как Солнце, скорее порядка 10 миллионов лет, чем 100 миллионов лет. Поэтому теория, связанная с галактическим вращением, представляется более подходящей.

Сочетая результаты, полученные от различных хронометров, можно восстановить вероятную частоту взрывов сверхновых за весь период нуклеосинтеза (рис. 9). Самые надежные на сегодняшний день данные о распространенности элементов и об их относительном производстве показывают, что число сверхновых было выше среднего на ранних этапах истории Вселенной и что оно имело несколько меньший пик незадолго до образования

Солнечной системы. Однако неопределенность выводов столь велика, что наблюдения можно объяснить и постоянной скоростью нуклеосинтеза.

Второй, более поздний, пик очень чувствителен к содержанию Pu-244. К несчастью эта величина пока еще очень неопределенна.

Ранний пик зависит от сравнительного производства U-235 по отношению к более долгоживущим ядрам. Если средняя скорость производства U-235 низка, то в ранний период частота взрывов сверхновых должна иметь резкий пик, так как данные о U-235 должны быть согласованы со средним темпом нуклеосинтеза, который определяется по долгоживущим хронометрам. Хотя величина этого пика пока не определена, вероятно, что частота ранних сверхновых была выше или по крайней мере равна средней частоте. Высокая частота ранних сверхновых наводит на мысль,

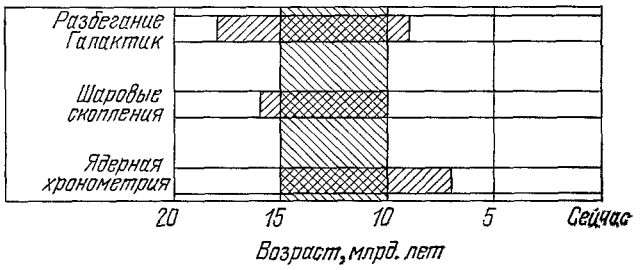

Рис. 10. Возрасты Вселенной по трем методам датировки довольно хорошо согласуются между собой.

Принятой оценкой является величина, определяемая по разбеганию галактик, но она заключена в пределах от 5 до 20 млрд. лет. Если допускать только возраст, согласующийся со всеми тремя методами (двойная штриховка), то Вселенной должно быть от 10 до 15 млрд. лет.

что в прошлом Галактика могла быть ярче. Возможно, что тогда в галактическом ядре было так много взрывающихся массивных звезд, что Галактика представляла собой квазар.

Рассчитанный возраст Вселенной как целого определяется самыми долгоживущими ядрами. Неопределенность данных для этих хронометров дает возраст элементов от 7 до 15 миллиардов лет; лучшая оценка составляет примерно 10 миллиардов лет. Таким образом, ядерная хронология дает возраст, вполне согласующийся с расчетами по расширению Вселенной и по звездным населениям шаровых скоплений.

В дальнейшем появится возможность существенно уменьшить неопределенность этих вычислений. Большой прогресс будет достигнут после экспериментального измерения сечений захвата нейтронов, что позволит лучше оценить относительное производство Re-187 и Os-187. Более точное определение относительной распространенности Pu-244, Th-232 и U-238 также увеличит точность и подкрепит расчеты *r*-процесса.

Кроме того, можно разработать методику с использованием других ядерных хронометров. Два перспективных ядра — это самарий-146 (время полураспада 100 миллионов лет) и свинец-205 (время полураспада 15 миллионов лет). Эти ядра не образуются в *r*-процессах и поэтому позволяют выяснить, все ли процессы нуклеосинтеза дают одинаковую хронологию.

Когда-то считалось, что алюминий-26 с временем полураспада 740 тысяч лет мог бы использоваться как хронометр. Однако выполненный мною и моими сотрудниками по Калифорнийскому технологическому институту анализ метеоров и лунных пород показал, что во время формирования этих образцов в них не было заметного количества алюминия-26. Этот результат можно было предвидеть, поскольку время полураспада много меньше интервала, полученного по хронологии I-129 и Pu-244.

Ядерная хронология в совокупности с наблюдениями распространенности тяжелых элементов в звездах и теориями образования звезд использовалась различными исследователями в построении детальных теорий истории Галактики. Последующая работа по сопоставлению ядерной хронологии с другой астрономической информацией в ближайшем будущем должна принести важные результаты.

Поразительно, что три столь различные методики, такие как наблюдение разбегания галактик, измерение возраста шаровых скоплений и расчет ядерной хронологии, действительно дают согласующиеся величины возраста Вселенной (рис. 10). Если принять только возраст, согласующийся со всеми тремя методами, то Вселенной должно быть от 10 до 15 миллиардов лет. Возможно измерения любой астрономической величины, а особенно такой важной, с точностью 33% кажется совсем не плохой.

ЛИТЕРАТУРА

W. A. Fouler, Nuclear Astrophysics, N.Y., American Philosophical Society, 1967.
D. D. Clayton, Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, N.Y., McGraw Hill, 1968.
D. N. Schramm, G. J. Wasserburg, Astrophys. J. 162 (1, pt. 1), 57 (October 1970).