

NUCLEAR ASTROPHYSICS

Yu. E. PENIONZHKEVICH

Some problems of the Universe evolution, nucleosynthesis and cosmochronology are presented from the point of view of nuclear and elementary particle physics. The processes taking place in the Universe are compared with the mechanism of the nuclear formation and decay, as well as with the mechanism of nuclear interaction at high energies. Presented are the examples revealing the possibilities of nuclear physics methods in investigations of the Universe.

Представлены некоторые проблемы эволюции Вселенной, нуклеосинтеза и космохронологии с точки зрения физики ядра и элементарных частиц. Проводится сравнение процессов, происходящих во Вселенной, с механизмами образования и распада ядер, а также их взаимодействия при высоких энергиях. Даны примеры, показывающие возможности методов ядерной физики в исследовании Вселенной.

© Пенионжкевич Ю.Э., 1998

ЯДЕРНАЯ АСТРОФИЗИКА

Ю. Э. ПЕНИОНЖКЕВИЧ

Московский инженерно-физический институт

Исследования законов микромира, которыми занимается ядерная физика, в последнее время помогли существенно расширить наши представления о явлениях, происходящих в макромире — нашей Вселенной, внесли огромный вклад в разработку астрофизических и космологических теорий. Прежде всего это касается модели расширяющейся Вселенной, эволюции звезд и распространенности элементов, а также свойств различных звезд и космических объектов: “холодных”, нейтронных, черных дыр, пульсаров и др. Не претендуя в короткой статье на полное изложение всех проблем космологии, остановимся лишь на тех, которые имеют, на наш взгляд, много общего со свойствами ядерной материи, проявляющимися при ядерных взаимодействиях.

МОДЕЛЬ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ

В 1965 году при наладке радиотелескопа было случайно обнаружено существование изотропного “шума”, который был отождествлен с тем, что сейчас называют реликтовым излучением, то есть излучением, равномерно распределенным по небесной сфере и по интенсивности соответствующим тепловому излучению абсолютно черного тела при температуре ~ 3 К. Это наблюдение имело очень важное значение для космологии, так как ранее Дж. Гамовым было предсказано теоретически существование подобного излучения в рамках модели, опирающейся на закон Хаббла: красное смещение излучения, испускаемого галактиками, пропорционально удаленности от этих галактик. Если объяснять такое смещение эффектом Доплера, то это приводит к картине расширяющейся Вселенной, в которой галактики “разлетаются”. Если экстраполировать эту ситуацию назад в прошлое, то можно прийти к заключению, что в прошлом скорость расширения была больше, а плотность Вселенной выше, чем сейчас. Насколько же далеко в прошлое мы вправе проводить подобную экстраполяцию? Очевидно, это можно делать до той эпохи, когда вся Вселенная была сжата в точку. Согласно оценкам, это было около 10 млрд лет назад. Полагают, что именно в эту эпоху и возникла наблюдаемая ныне Вселенная, причем возникла в чудовищном взрыве. Большой взрыв, как его называют, положил начало не только Вселенной, но и всем известным физическим понятиям, включая понятие пространства и времени. Здесь уместно напомнить, что первые решение задачи связи пространства и времени было осуществлено А. Эйнштейном на основе созданной

им специальной теории относительности. Эта теория позволила объяснить ряд проблем в динамике движущихся сред, связанных с неудачными попытками обнаружить движение Земли относительно эфира. Созданная Эйнштейном общая теория относительности была впоследствии полностью подтверждена опытами и легла в основу таких наук, как астрофизика, ядерная физика, ускорительная техника и др.

Некоторые авторы [1] рассматривают эволюцию Вселенной как смену четырех последовательных эр, в результате которой, согласно новейшим моделям, она пришла к своему теперешнему состоянию ($\rho \approx 10^{-30}$ г/см³, $T = 3$ К) (рис. 1). В этих моделях предполагается, что Вселенная ведет себя как абсолют-

но черное тело¹, температура и плотность которого очень высокие (плотность его больше ядерной 10^{15} г/см³, а температура выше 1 ЭВ (10^{13} К)). Излучение этого абсолютно черного тела состоит из известных адронов, лептонов и фотонов (см. Приложение 1) и происходит до тех пор, пока температура выше, чем масса самого легкого из адронов, то есть π -мезона ($m_\pi c^2 \approx 140$ МэВ, температура $1,6 \cdot 10^{12}$ К). Это соответствует *адронной эре*, продолжительность которой составляет примерно 10^{-4} с. К концу ее плотность сравнима с плотностью ядерного вещества.

¹ Абсолютно черное тело — тело, поглощающее полностью весь падающий на него поток излучения независимо от спектрального состава потока и температуры тела. Излучение абсолютно черного тела определяется только его температурой и не зависит от свойств вещества, из которого оно состоит.

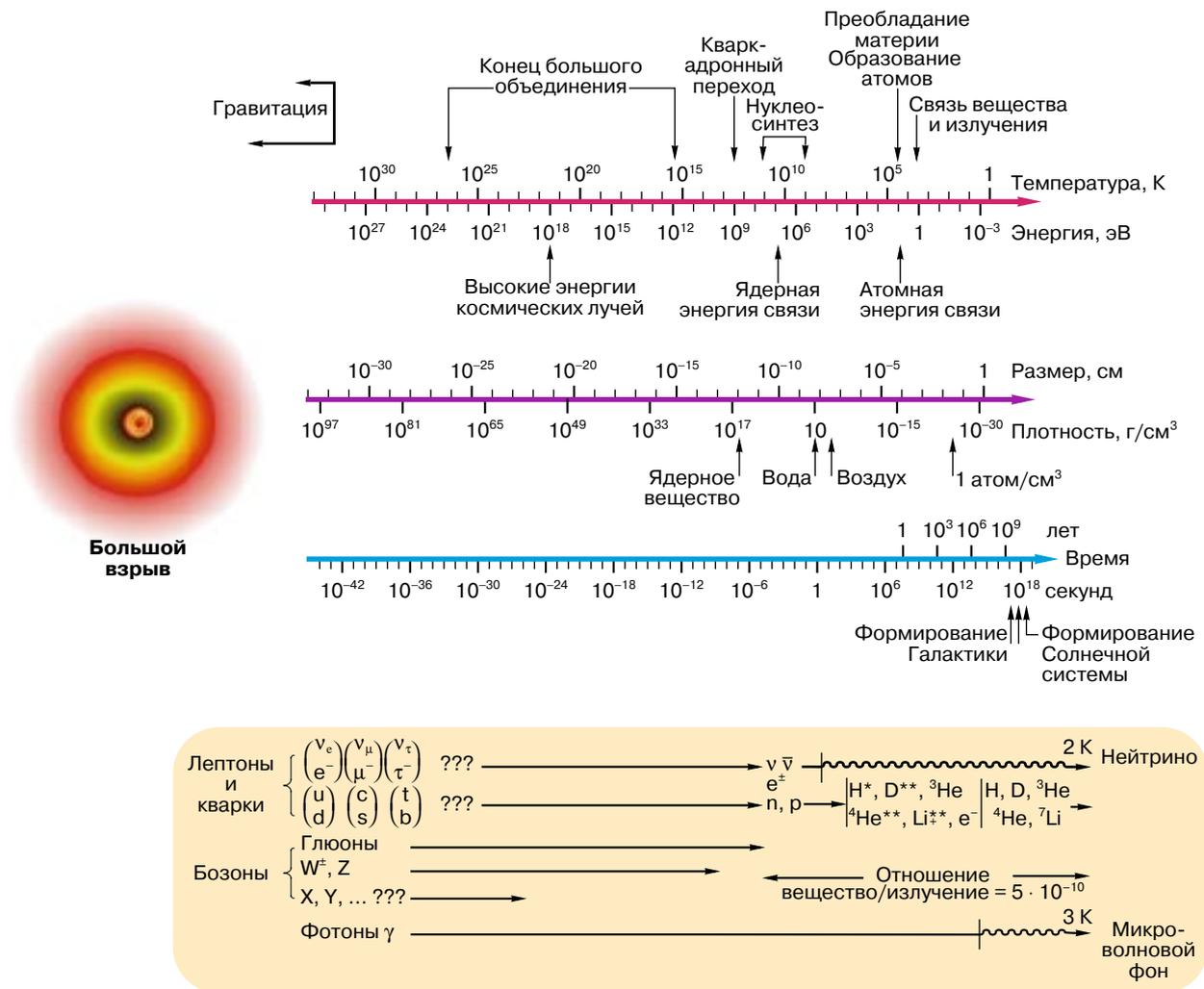


Рис. 1. Связь температуры, энергии, размеров, плотности и времени, существовавшая в ранней Вселенной. Нижняя часть схемы показывает кварковый и лептонный состав материи

Когда температура становится ниже 100 МэВ (10^{12} К), адроны еще остаются, но уже не могут рождаться спонтанно в излучении абсолютно черного тела. Теперь излучение состоит главным образом из лептонов и фотонов, и так остается до тех пор, пока температура выше порога рождения пары $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, то есть примерно 1 МэВ. Охлаждение от 100 до 1 МэВ занимает около 1 с. Это время соответствует так называемой *лептонной эре*, к концу которой плотность становится 10^4 г/см³.

При температуре ниже 1 МэВ лептоны хотя и существуют как частицы, но уже не могут спонтанно рождаться в излучении абсолютно черного тела. Теперь излучение состоит преимущественно из фотонов. Это начало *радиационной эры*, конец которой определяется моментом, после которого излучение (фотонное) существует отдельно от вещества (адронов и лептонов). Эта эра заканчивается примерно через 10^6 лет после Большого взрыва.

Плотность вещества становится больше плотности излучения (плотности энергии фотонов) и увеличивается по мере расширения. Это соответствует *звездной эре*, которая продолжается до наших дней. В.Л. Гинзбург в книге [2] попытался достаточно наглядно описать проблемы расширяющейся Вселенной взаимодействием большого числа различных частиц: фотонов, электронов, нейтрино, мюонов, пи-мезонов, протонов, нейтронов и др. Стоит заметить, что этот подход является достаточно условным, так как мы до сих пор не имеем полного понимания физики элементарных частиц.

Основная проблема, с которой сталкиваются физики при попытке объяснить космологические явления, в том числе и расширяющуюся Вселенную, связана с сильным взаимодействием элементарных частиц. Сильные взаимодействия — это те силы, которые удерживают вместе нейтроны и протоны в атомном ядре. Радиус действия этих сил чрезвычайно мал ($\sim 10^{-13}$ см). Даже в молекулах, ядра которых находятся на расстоянии 10^{-8} см друг от друга, сильные взаимодействия между ядрами не дают никакого эффекта. Когда два протона подходят друг к другу достаточно близко, сильные взаимодействия становятся примерно в 100 раз больше, чем электрическое отталкивание, поэтому они удерживают атомные ядра от развала. Именно интенсивность сильных взаимодействий делает их значительно более трудными для математического анализа, чем электромагнитные взаимодействия. Вклады разного типа взаимодействия между нуклонами символически изображаются фейнмановскими диаграммами, с помощью которых физики пытаются учесть все взаимодействия. Проблема, заключающаяся в сложности расчета вероятностей процессов, включающих сильные взаимодействия, была основной причиной, сдерживающей развитие физики элементарных частиц в последнее время. Однако не все процессы включают сильные взаимо-

действия. Эти взаимодействия испытывают лишь частицы, известные как адроны. Сюда входят ядерные частицы и пи-мезоны, а также другие нестабильные частицы, такие, как К-мезоны, эта-мезоны, лямбда-гипероны и др. Лептоны (нейтрино, электроны и мюоны) легче адронов и в отличие от последних не чувствуют сильных взаимодействий.

При температуре ниже 10^{12} К (лептонная эра) единственными частицами, присутствующими в больших количествах, были лептоны и фотоны, взаимодействиями между которыми можно было пренебречь. Другая ситуация соответствовала более высоким температурам (адронная эра), когда в больших количествах имелись адроны и антиадроны. В физике элементарных частиц существуют несколько различных моделей, с помощью которых пытаются объяснить свойства адронов. Одна из них предполагает, что не все частицы одинаковы, некоторые действительно элементарны, а все остальные состоят из простых комбинаций элементарных частиц. Считается, что элементарными частицами являются фотон и все известные лептоны. Однако адроны не являются элементарными частицами. Они состоят из более фундаментальных частиц — кварков. Кварки бывают различных типов, или ароматов, такие, как верхний, нижний, странный, очарованный (Приложение 1). Более того, каждый аромат кварка бывает трех различных цветов: красного, белого и голубого.

Если идея кварков правильна, то в этой концепции можно объяснить физику ранней Вселенной. Экспериментально при столкновениях электронов с ядерными частицами было показано, что сила между кварками чрезвычайно мала, когда кварки находятся близко один к другому. Таким образом, при некоторой температуре (около нескольких тысяч миллиардов градусов) адроны разбиваются на составляющие их кварки, так же как атомы разбиваются на электроны и ядра при нескольких тысячах градусов, а ядра разбиваются на протоны и нейтроны при нескольких тысячах миллионов градусов. Тогда в ранние времена Вселенную можно рассматривать как состоящую из фотонов, лептонов, антилептонов, кварков и антикварков, причем каждая разновидность частиц представляет собой еще один тип излучения. Между тем, несмотря на успешное описание многих явлений, в том числе и в космологии, кварковая модель однозначно не подтверждена, так как до сих пор невозможно разбить любой адрон на составляющие его кварки, даже с помощью современных ускорителей самых высоких энергий.

Все, что было сказано выше, относится к возможной интерпретации расширения Вселенной на основе сильных взаимодействий элементарных частиц. Между тем одним из наиболее интересных следствий современной теории элементарных частиц является то, что Вселенная могла испытать фазовый переход из одного состояния вещества в другое.

И этот фазовый переход связан с другим классом короткодействующих взаимодействий — слабым взаимодействием. Слабые взаимодействия в ядерной физике ответственны за определенные процессы радиоактивного распада (например, β -распада свободного нейтрона) или за любую реакцию, включающую нейтрино. (За создание этой теории были удостоены в 1979 году Нобелевской премии по физике С. Вайнберг, А. Салам, Ш. Глешоу.) Развитие этой теории позволило также сделать важные выводы по проблемам, относящимся к изучению ранней Вселенной.

НУКЛЕОСИНТЕЗ

Начальный этап нуклеосинтеза

Как уже отмечалось, важную роль в ранней Вселенной играло излучение. Это излучение имеет тепловой спектр, и его интенсивность U можно характеризовать температурой T согласно соотношению $U = aT^4$, где a — постоянная излучения. По мере продвижения к начальному этапу температура излучения растет по закону $T = T_p(1 + Z)$, где T_p — температура излучения сегодня и Z — величина, соответствующая красному смещению.

Для раннего периода, когда излучение доминировало, из уравнений Эйнштейна следует простое соотношение между температурой T и временем t , прошедшим с момента Большого взрыва:

$$T = \alpha \frac{10^{10}}{\sqrt{t}} \text{ К.}$$

Время t здесь выражено в секундах, а температура T — в кельвинах. Постоянная α имеет величину порядка единицы и зависит от состояния вещества и излучения во Вселенной. Если положить $\alpha = 1$, то, согласно этому соотношению, спустя 1 с после Большого взрыва температура излучения во Вселенной была 10^{10} К. При такой температуре в ранней Вселенной, состоящей из электронов, позитронов, нейтрино, антинейтрино, нейтронов, протонов и фотонов, могли образоваться различные ядра, начиная с дейтронов и кончая гелием. Более тяжелые ядра, такие, как ядра углерода, кислорода и т.д., могли синтезироваться лишь в ходе термоядерных реакций в звездах. Причина этого заключается в том, что есть некоторый интервал неустойчивости легких ядер, расположенных около ядра лития, и этот интервал не удается преодолеть в ходе первичного нуклеосинтеза. Поэтому синтез в раннюю эпоху останавливается на стадии образования гелия.

Полагают, что одной из первых реакций, приводящей к образованию тяжелых ядер, является реакция



Как показали расчеты, эта реакция идет при температуре $T = 9 \cdot 10^9$ К, что соответствует соотношению нейтронов и протонов во Вселенной $N_n/N_p = 0,2$ и времени ~ 3 с. При этих условиях дейтерий образуется в достаточном количестве для производства ядер с массой 3 в реакциях



или



и окончательно ${}^4\text{He}$ может образоваться в результате реакций



Так как не существует стабильной массы 5, то ${}^4\text{He}$ является последним ядром в начальном этапе нуклеосинтеза. В принципе он мог бы образовать более тяжелые ядра ($A = 7$) в результате реакций:



но кулоновский барьер для этих реакций около 1 МэВ, тогда как ядра при температуре $T = 9 \cdot 10^8$ К имеют кинетическую энергию только 0,1 МэВ.

В работе [3] приводятся в хронологическом порядке события, которые происходили во Вселенной начиная с момента 10^{-2} с после ее рождения.

Из табл. 1 видно, что процессы образования ядер прекращаются при $t = 35$ мин, когда температура Вселенной падает до $3 \cdot 10^8$ К. Это означает, что протоны и нейтроны уже не сливаются, образуя более тяжелые ядра. Следующий этап осуществляется, когда возраст Вселенной достигает $7 \cdot 10^5$ лет и температура падает до 3000 К. При такой температуре химическая энергия связи атомных ядер и электронов достаточно высока, чтобы удержать их вместе в виде нейтральных атомов. В эту эпоху происходит образование водорода и гелия. На этом завершается этап первичного нуклеосинтеза. Более тяжелые ядра образуются уже в результате процессов, связанных с эволюцией звезд.

Звездный нуклеосинтез

В процессе эволюции Вселенная постоянно обогащается все более тяжелыми химическими элементами. Распространенность химических элементов во Вселенной определяют разными способами — по спектру излучения звезд, путем элементного анализа земных и космических образцов (метеоритов, лунных образцов). Полученная таким образом кривая распространенности элементов показана на

Таблица 1. Первичный нуклеосинтез

Возраст Вселенной	Температура, К	Состояние и состав вещества
10^{-2} с	10^{11}	$n, p, e^-, e^+, \nu, \bar{\nu}$ в тепловом равновесии; n и p в одинаковом количестве
10^{-1} с	$3 \cdot 10^{10}$	Те же частицы, что и выше, но отношение числа нейтронов к числу протонов $n : p \approx 3 : 5$
1 с	10^{10}	$\nu, \bar{\nu}$ отделяется от остальных частиц; e^-, e^+ начинают аннигилировать; $n : p \approx 1 : 3$
13,8 с	$3 \cdot 10^9$	Начинается образование D и ${}^4\text{He}$; исчезают e^-, e^+ ; есть также свободные n и p
35 мин	$3 \cdot 10^8$	Фиксируется количество D и ${}^4\text{He}$ по отношению к числу протонов и электронов; ${}^4\text{He}/\text{H} \sim 22\text{--}28\%$ (по массе)
$7 \cdot 10^5$ лет	$3 \cdot 10^3$	Химическая энергия связи становится достаточной, чтобы образовались устойчивые нейтральные атомы. Теперь Вселенная прозрачна для излучения. Вещество начинает доминировать над излучением

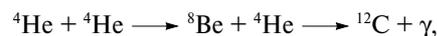
Обозначения: n – нейтрон, p – протон, e^- – электрон, e^+ – позитрон, ν – нейтрино, $\bar{\nu}$ – антинейтрино, D – дейтерий, H – водород, He – гелий.

рис. 2. Кривая имеет максимумы для группы кремния и группы железа, после чего кривая распространенности распадается на две ветви: одна включает нейтронообогащенные изотопы и характеризуется тремя двойными пиками вблизи магических чисел $N = 50, 82$ и 126 , а вторая включает менее распространенные протонообогащенные изотопы.

Одной из ступеней нуклеосинтеза являлось образование ${}^{12}\text{C}$. Как было показано, углерод может быть образован в результате реакции



Однако ядро ${}^8\text{Be}$ является нестабильным по отношению к распаду на две α -частицы и живет 10^{-16} с. Между тем при температуре, близкой к 10^8 К, и плотности порядка 10^5 г/см² три ядра ${}^4\text{He}$ могут образовать ядро ${}^{12}\text{C}$ в результате двухступенчатой реакции



вторая часть которой носит резонансный характер. Эта реакция позволяет объяснить существование углерода, а с ним и других наблюдаемых изотопов. На каждой стадии слияния ядер, инициируемых взрывами внешней оболочки звезд, образуются всё более тяжелые ядра ${}^4\text{He}, {}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}, {}^{28}\text{Si}, {}^{56}\text{Fe}$. При этом процессы образования сопровождаются и процессами распада этих ядер. В этом случае в наиболее благоприятных условиях находятся изотопы, имеющие наибольшую стабильность (энергия связи на нуклон максимальна). К таким относятся ядра в области $A \approx 60$. Это объясняет повышение содержания ядер группы железа. Несколько иной механизм образования ядер тяжелее железа – это последовательные реакции радиоактивного захвата нейтронов элементами группы железа. Наличие двойных пиков в кривой распространенности элементов (рис. 2) свидетельствует о двух различных процессах захвата нейтронов – r - и s -процессах. Эти два процесса соответствуют различным нейтронным плотностям. В случае малых плотностей нейтронов (s (slow)-процесс) при радиационном захвате $(A, Z) + n \longrightarrow (A + 1, Z) + \gamma$ образуется изотоп с массой на единицу больше, чем масса ядра мишени. Если конечное ядро $(A + 1, Z)$ стабильно, то на нем также может произойти радиационный захват с образованием нового изотопа $(A + 2, Z)$. При малых потоках ядро $(A + x, Z)$ распадается раньше, чем поглотит нейтрон. В основном оно распадается путем β -распада, в результате которого образуются новое ядро $(A + x, Z + 1)$ или же целая цепочка

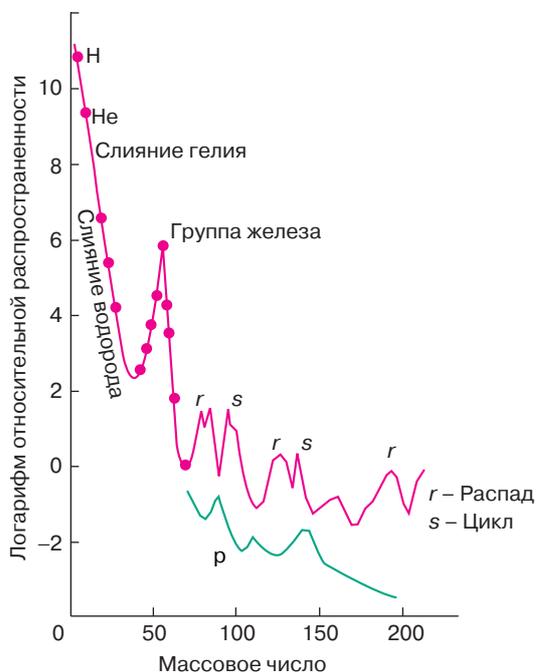


Рис. 2. Кривая распространенности элементов. Красная кривая с двойными (r - и s -) пиками соответствует нейтроноизбыточным изотопам, зеленая (p) – протонообогащенным

ядер, заканчивающаяся на ядре, время жизни которого будет достаточно большим для того, чтобы произошел новый радиационный захват. Этот процесс повторяется многократно и приводит к образованию нейтронодефицитных ядер с массой до 200. После этого ядра с большой вероятностью делятся, что прерывает *s*-процесс. При больших плотностях нейтронов (*r*(*rapid*)-процесс) ядро ($A + x, Z$) поглотит нейтроны раньше, чем распадется, и происходят новые радиационные захваты. Это происходит до тех пор, пока цепочка захватов не дойдет до изотопа с очень малым периодом полураспада, и мы придем к предыдущему случаю.

На рис. 3 показаны цепочки *r*- и *s*-процессов образования изотопов из ядра ^{56}Fe . Подтверждением существования *r*- и *s*-процессов является повышенное содержание изотопов при $N = 50, 82$ и 126 . Экспериментально показано, что распространенность элементов обратно пропорциональна полным сечениям захвата нейтронов. Для ядер с магическими числами (50, 82, 126) это сечение на несколько порядков ниже, чем для других соседних ядер. С точки зрения ядерной физики этот результат является проявлением магических чисел. Для астрофизики это доказательство существования *s*-процесса.

Было предсказано также существование оболочки с числом протонов $Z = 114$ и соответственно повышение стабильности сверхтяжелых ядер вблизи дважды магического ядра $^{298}114$ (114 протонов и 184 нейтрона). Расчеты, проведенные по оболочечной модели, показали возможность существования такого сверхтяжелого ядра с периодом полураспада до $\sim 10^8$ лет. Хотя точность таких расчетов невелика и они скорее носят качественный характер, последние опыты по синтезу тяжелых изотопов 110-го элемента ($^{272}110$) показали, что наблюдается повышение стабильности сверхтяжелых ядер по отношению к α -распаду [4], что является дополнительным подтверждением возможного существования сверхтяжелых

ядер вблизи $Z = 114$. Вместе с тем активные поиски в природных объектах (космических лучах, материалах, лунных образцах, концентратах тяжелых химических элементов земных образцов) не дали положительного результата [5]. Сейчас готовится несколько экспериментов на ускорителях в Дубне и Дармштадте (Германия), направленных на искусственный синтез сверхтяжелых элементов в ядерных реакциях с тяжелыми ионами, но естественно с меньшими временами жизни. Таким образом, в ближайшее время, наверное, будет дан ответ на вопрос существования сверхтяжелых элементов.

Говоря о проблеме звездного нуклеосинтеза, нельзя также не упомянуть о некоторых процессах, происходящих в звездах и в том числе на Солнце, которые существенно меняют начальную распространенность элементов. В первую очередь это относится к так называемому CNO-циклу, в котором углерод, азот и кислород играют роль катализатора в образовании $4p \rightarrow {}^4\text{He}$ (рис. 4).

ЯДЕРНАЯ КОСМОХРОНОЛОГИЯ

Космохронология определяет время происшедших во Вселенной событий путем изучения изменения относительной распространенности изотопов с большими периодами полураспада. С этой целью исследуется содержание родительских и дочерних ядер с периодом полураспада, лежащим в интервале $10^6 - 10^{10}$ лет.

Наиболее удобными для этого являются цепочки

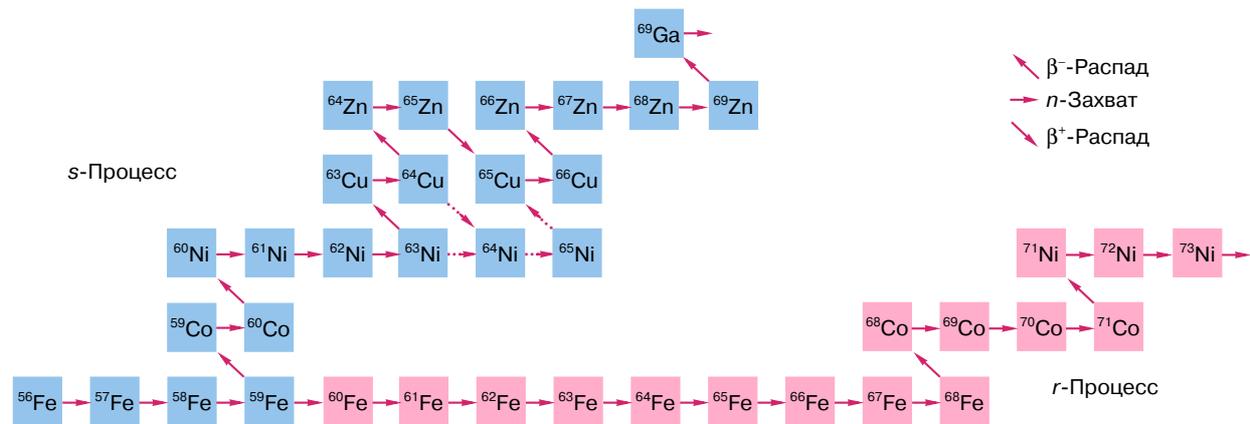
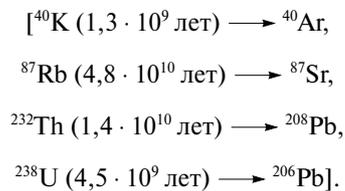


Рис. 3. Цепочки быстрого и медленного захвата нейтронов (*r*- и *s*-процессы) для ядра ^{56}Fe . Точечные стрелками представлены альтернативные каналы образования ^{65}Cu

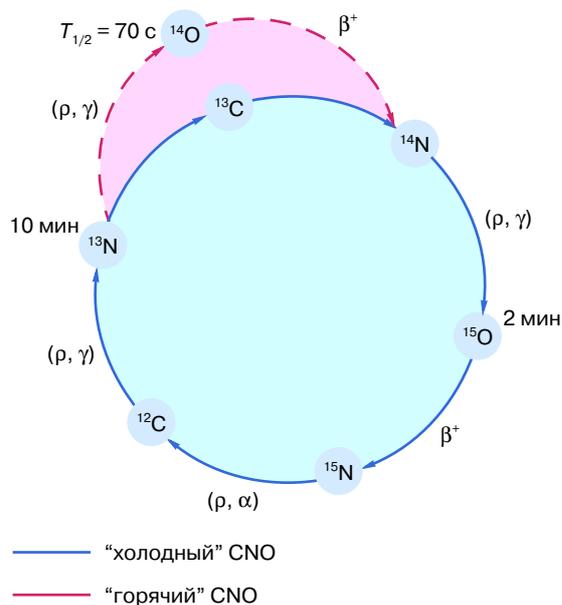


Рис. 4. “Холодный” и “горячий” CNO-циклы. Указаны периоды полураспада $T_{1/2}$ для изотопов ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O

Все эти изотопы образовались в результате r -процесса. Старейшие образцы земного и лунного происхождения, а также метеоритов имеют возраст до 4,55 Глет ($4,55 \cdot 10^9$ лет). Исследования в них дочерних активностей показали, что возраст Солнечной системы составляет 4,6–4,8 Глет и последовательность ее эволюции следующая:

- 1) большой взрыв, приведший к образованию нейтральных атомов ($\sim 10^6$ лет);
- 2) уплотнение галактик и образование звезд (временной интервал $\delta \sim 1\text{--}2$ Глет);
- 3) нуклеосинтез в звездах, ведущий к образованию существующих химических элементов (временной интервал Δ);
- 4) образование Солнечной системы из остатков ранних звезд (временной интервал $T_C = 4,6$ Глет).

Таким образом, возраст Вселенной определяется как

$$T_B = \delta + \Delta + T_C.$$

Для нахождения этих времен обычно сравнивают наблюдаемое содержание того или иного изотопа и их соотношение с вычислениями по какой-либо модели. Расчеты для ядер с массой легче 200 обычно усложняются из-за необходимости учитывать вклад в их образование r - и s -процессов. Для более тяжелых ядер можно рассматривать вклад только r -процесса. Так, соотношение $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ меняется со временем из-за разного периода полураспада. В настоящее время его значение (0,00720) сильно отличается от их содержания в момент образования Солнечной

системы (0,29). В процесс образования ^{238}U вносят вклад после β -распада изотопы с массой 238, образующиеся в результате r -процесса и α -распада ядер с массой 242, 246 и 250. Ядра с массой выше 250 имеют короткий период полураспада по отношению к спонтанному делению и поэтому не вносят существенного вклада в образование ^{238}U . С учетом этого можно оценить соотношение ^{235}U и ^{238}U , образующиеся в r -процессе. На рис. 5 показаны результаты оценки отношения $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ в зависимости от времени. Такие же расчеты проводят для более легких ядер. В этом случае приходится учитывать вклад s -процесса, а также структуру самих ядер (то есть

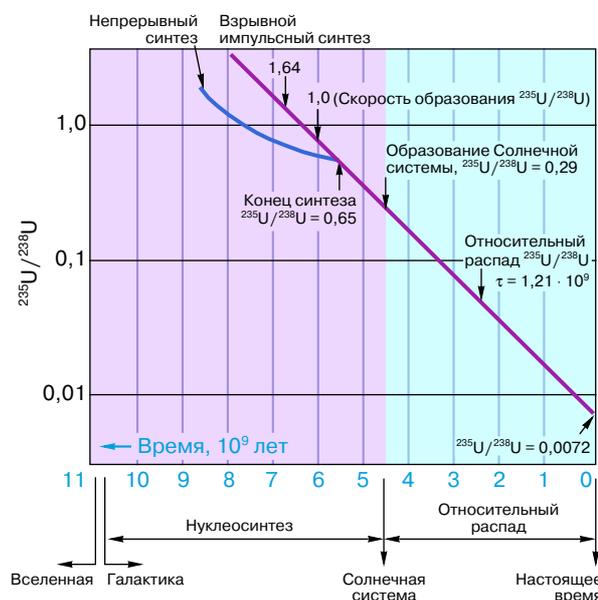


Рис. 5. Содержание ^{235}U по отношению к ^{238}U в зависимости от времени с момента образования Вселенной до нашего времени, когда это соотношение составляет 0,0072

схему ядерных уравнений), которые заселяются с разной вероятностью. Эту информацию о структуре ядерных уровней получают из экспериментов, проводимых на ускорителях в лабораторных условиях.

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И АСТРОФИЗИКА

Как следует из сказанного выше, фундаментальные проблемы астрофизики – процессы выделения энергии при образовании и взрыве звезд, а также нуклеосинтез – непосредственно связаны с физикой элементарных частиц, а также с исследованиями методами ядерной физики эффективных сечений реакций взаимодействия, масс и времен жизни ядер по отношению к различному виду распадов ядер.

Важную роль в процессах нуклеосинтеза играют ядерные реакции, идущие с захватом протонов, нейтронов или α -частиц различными ядрами, в том числе и нестабильными. Определение скорости протекания этих реакций является сложной экспериментальной задачей. Для моделирования в лабораториях условий этих процессов необходимо иметь широкий диапазон радиоактивных ядер, которые играют основную роль при взрыве звезд. Такая возможность появилась с созданием ускорительных комплексов пучков радиоактивных ядер. С помощью таких пучков исследуют характеристики реакций, используя при этом мишени из водорода и гелия. Приведем несколько примеров таких реакций. В последнее время астрофизики активно обсуждают существование неоднородностей в распределении адронной материи. При этом содержание элементов с $A \approx 7$ может быть гораздо выше того, что предсказывается стандартной моделью. Для нуклеосинтеза в таком неоднородном (big band) процессе принципиальными являются реакции типа ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$; ${}^6\text{He}(\alpha, n){}^9\text{Be}$. При моделировании горячего протон-протонного канала, который может возникнуть при взрыве сверхновых, представляет интерес измерение скорости протекания таких реакций, как ${}^7\text{Be}(\rho, \gamma){}^8\text{B}$, ${}^7\text{Be}(\rho, \gamma){}^9\text{C}$, ${}^8\text{Be}(\rho, \gamma){}^9\text{C}$, ${}^{11}\text{C}(\rho, \gamma){}^{12}\text{N}$.

Классический CNO-цикл в звездах протекает тогда, когда реакция ${}^{13}\text{N}(\rho, \gamma){}^{14}\text{O}$ более вероятна, чем β -распад ядра ${}^{13}\text{N}$. Эти процессы играют важную роль в образовании сверхновых и супермассивных объектов. Для исследования CNO-цикла можно использовать такие реакции с радиоактивными ядрами, как ${}^{19}\text{Ne}(\rho, \gamma){}^{20}\text{Na}$, ${}^{14}\text{O}(\alpha, \rho){}^{17}\text{F}$, ${}^{15}\text{O}(\alpha, \gamma){}^{19}\text{Ne}$.

Другой непрямой способ определения скорости реакций, а также исследования нуклеосинтеза состоит в получении методами ядерной физики спектроскопических данных о ядрах, удаленных от линии стабильности. Эти данные непосредственно используются для описания s - и r -процессов. Особенно важно знать с высокой точностью характеристики распада ядер в поворотных точках r -процесса. Среди последних успехов ядерной физики — обнаружение и исследование новых видов радиоактивного распада: β -запаздывающего деления, протонного распада, кластерного распада и др. Учет этих видов распада существенно влияет на расчет цепочек образования нуклидов и является важной проблемой, связывающей ядерную физику и астрофизику. Это лишь несколько примеров связи физики атомного ядра с макроскопической физикой. Несмотря на малое число частиц, участвующих в формировании атомного ядра (не более 300), они представляют собой уникальную систему для моделирования проблем макромира. В лабораторных условиях с помощью ядро-ядерных столкновений, реализуемых на современных ускорителях тяжелых ионов при энергиях в несколько сот МэВ на нуклон, можно получать ядра с необычными свойствами, так назы-

ваемые экзотические ядра (с высокой температурой, высоким угловым моментом, состоящие практически из одних нейтронов, супердеформированные), которые в принципе реализуются в космических процессах.

На рис. 6 представлена зависимость температуры ядра от его энергии возбуждения, пропорциональной энергии бомбардирующей частицы. Эти данные получены в трех экспериментах: при низких энергиях в Дубне, при энергии возбуждения 2–8 МэВ в ЦЕРН (Швейцария) и 8–15 МэВ в Дармштадте (Германия). Видно, что с ростом энергии возбуждения диапазон 2–8 МэВ температура ядра не увеличивается, тогда как при низких энергиях происходит резкое увеличение температуры, так же как и при очень высоких энергиях. Этот сенсационный результат демонстрирует, во-первых, возможность достижения в ядерных реакциях температур, которые существуют только в момент образования звезд, во-вторых, подтверждает существование фазовых переходов в горячих объектах, что предполагалось при рассмотрении расширяющейся Вселенной и взрыве звезд. Это лишь несколько примеров, показывающих возможности методов ядерной физики в исследовании космических объектов и свойств Вселенной. В связи с ограниченным объемом публикации автор не смог остановиться на таких проблемах, как, например, измерение потока

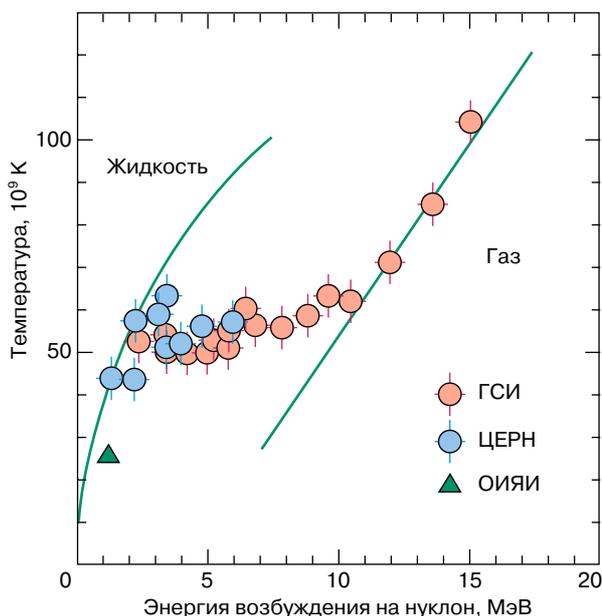


Рис. 6. Экспериментальная зависимость температуры ядра от его энергии возбуждения. Данные получены в ОИЯИ (Дубна), ГСИ (Германия) и ЦЕРН (Швейцария). Экспериментальные точки между кривыми соответствуют фазовому переходу жидкость–газ

солнечных нейтрино, исследование свойств нейтронных ядер (ядер, состоящих из нескольких протонов и большого числа нейтронов). В целом направление ядерной физики вылилась физика космических лучей, где в последнее время обнаружены интереснейшие явления.

Формирование наших представлений об образовании Вселенной, нуклеосинтезе, свойствах новых звездных образований продолжается, и они неразрывно связаны с накоплением новых данных в ядерной физике и физике элементарных частиц. Поэтому описываемые в первых трех разделах механизмы образования Вселенной и нуклеосинтеза представляют собой одну из гипотез, основанных на современных представлениях ядерной астрофизики, основной задачей которой является построение единой космологической модели.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Волантэн Л.* Субатомная физика ядра и частицы. М.: Мир, 1986. Т. 1.

2. *Гинзбург В.Л.* О физике и астрофизике. М.: Наука, 1974.

3. *Нарликар Дж.* Неистовая вселенная. М.: Мир, 1985.

4. *Пенионжкевич Ю.Э.* Физика экзотических ядер // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 92–98.

5. *Флеров Г.Н., Ильинов Ф.С.* На пути к сверхэлементам. М.: Педагогика, 1977. (Б-чка «Детской энциклопедии»).

* * *

Юрий Эрастович Пенионжкевич, доктор физико-математических наук Московского инженерно-физического института, начальник сектора Объединенного института ядерных исследований. Область научных интересов: экспериментальная ядерная физика, ядерные реакции с тяжелыми ионами, синтез и исследование свойств новых экзотических ядер. Автор и соавтор более 200 научных работ, нескольких монографий и научного открытия.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Фундаментальные частицы

фермионы								бозоны (спин 1)		
лептоны (спин 1/2)					кварки (спин 1/2)					
частица	анти-частица	масса, МэВ/c ²	электр. заряд	время жизни, с	название	масса, ГэВ/c ²	электр. заряд	название	масса, ГэВ/c ²	электр. заряд
Электрон e ⁻	e ⁺	0,511	±1	Стаб.	Верхний u	4 · 10 ⁻³	2/3	Фотон γ	0	0
Электронное нейтрино ν _e	$\bar{\nu}_e$	< 46 эВ/c ²	0	Стаб.	Нижний d	7 · 10 ⁻³	-1/3	W [±]	80,6	±1
Мюон μ ⁻	μ ⁺	105,66	±1	2,2 · 10 ⁻⁶	Очарованный c	1,5	2/3	Z ⁰	91,16	+1
Мюонное нейтрино ν _μ	$\bar{\nu}_\mu$	< 0,50	0	Стаб.	Странный s	0,15	-1/3	Глюон g	0	0
Тау τ ⁻	τ ⁺	1784	±1	3,4 · 10 ⁻¹³						
Тау-нейтрино ν _τ	$\bar{\nu}_\tau$	< 164	0	Стаб.						
Фермионные адроны					Бозонные адроны					
барионы и антибарионы					мезоны					
название	кварковый состав	электр. заряд	масса, ГэВ/c ²	спин	название	кварковый состав	электр. заряд	масса, ГэВ/c ²	спин	
Протон p	uud	1	0,938	1/2	Пион π ⁺	u \bar{d}	+1	0,140	0	
Антипротон \bar{p}	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0,938	1/2	Каон K ⁻	s \bar{u}	-1	0,494	0	
Нейтрон n	udd	0	0,940	1/2	ρ ρ ⁺	u \bar{d}	+1	0,770	1	
Лямбда Λ	uds	0	1,116	1/2	D ⁺	c \bar{d}	+1	1,869	0	
Омега Ω ⁻	sss	-1	1,672	3/2	Эта-ц η _c	c \bar{c}	0	2,980	0	