

ЯДЕРНАЯ АСТРОФИЗИКА

Ю. Э. Пенионжкевич

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Nuclear Astrophysics

Yu. E. Penionzhkevich

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

В последнее время научной общественностью было отмечено несколько юбилеев, связанных с открытиями, сыгравшими важную роль в развитии астрофизических исследований. 2009 год был объявлен ООН и ЮНЕСКО годом астрономии. Это было связано с 400-летним юбилеем открытия Галилео Галилеем оптического телескопа, положившего начало регулярным исследованиям в области астрономии. Важным вкладом в развитие не только физики микромира, но и понимание процессов, происходящих во Вселенной, явилось открытие Э. Резерфордом 100 лет назад атомного ядра. С этих пор исследования в области физики элементарных частиц и физики ядра помогают понять многие процессы, происходящие в микромире. 80 лет тому назад К. Янским впервые был использован радиотелескоп для приема излучения космических объектов и в настоящее время это направление физики является наиболее эффективным методом исследования свойств Вселенной. И наконец, запуск 12 апреля 1961 года (немногом более 50 лет тому назад) первого человека, российского космонавта Ю. А. Гагарина, в космическое пространство положило начало новому этапу исследований космоса с непосредственным участием человека. Все эти достижения существенно расширили наши представления о Вселенной. В настоящей работе автор попытается представить некоторые проблемы эволюции Вселенной, нуклеосинтеза и космохронологии с точки зрения физики ядра и элементарных частиц, в частности с использованием последних результатов, полученных с помощью пучков радиоактивных ядер. В статье приводится сравнение процессов, происходящих во Вселенной, с механизмами образования и распада ядер, а также их взаимодействия при различных энергиях. Даны примеры, показывающие возможности методов ядерной физики в исследовании космических объектов и свойств Вселенной. Результаты исследований ядерных реакций с пучками радиоактивных ядер, позволяют по-новому рассматривать сценарий нуклеосинтеза в области легких элементов.

Recently the scientific society marked several anniversaries, connected with discoveries which have played significant role in the development of astrophysical investigations. The year 2009 was chosen by the United Nations and UNESCO to be the year of astronomy. This was inspired by the 400th anniversary of Galileo Galilei's discovery of the telescope, giving the start of regular studies in the field of astronomy. An important contribution to the development not only of the physics of the micro-world, but also to the understanding of the processes occurring in the Universe, was the discovery done 100 years ago by E. Rutherford of the atomic nucleus. Since then the investigations in the fields of elementary particles and atomic nuclei have helped to understand many processes in the micro-world. 80 years ago K. Yanski used a radio-telescope for the first time in order to accept signals from cosmic objects and at present this part of physics is the most efficient method for studying the properties of the Universe. And finally, the launching into space on 12 April 1961 (50 years ago) of the first sputnik with a human being on board, the Soviet cosmonaut Yuri Gagarin, marked the beginning of the investigation of the Universe with the direct participation of man. All these achievements considerably extended our ideas about the Universe. The author of the present work has tried to present some problems of the evolution of the Universe, the nucleosynthesis and cosmochronology from the point of view of nuclear physics and elementary particles, in particular using the latest results, obtained with radioactive nuclear beams. Comparison is made between the processes taking place in the Universe and the mechanism of formation and decay of nuclei, as well as with their interaction at different energies. Examples are given to show the possibilities of nuclear methods to study cosmic objects and the properties of the Universe. The results of studying nuclear reactions, induced by radioactive ion beams, make it possible to analyze in a different way the nucleosynthesis scenario in the region of the lightest elements.

Основные представления об эволюции Вселенной

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 распространённости элементов и сценария их образования, а также свойств различных звёзд и космических объектов. Не претендуя в этом обзоре на полное изложение всех проблем космологии, остановлюсь лишь на тех, которые имеют на мой взгляд, много общего со свойствами ядерной материи, проявляющихся при ядерных взаимодействиях.

Модель расширяющейся Вселенной

В 1965 году с помощью радиотелескопа было обнаружено существование изотропного «шума», который был отождествлён с тем, что сейчас называют реликтовым излучением, т.е. излучением равномерно распределённым по небесной сфере и по интенсивности соответствующем тепловому излучению абсолютно чёрного тела при температуре $\sim 3^\circ\text{K}$. Это наблюдение имело очень важное значение для космологии, так как ранее Гамовым было предсказано теоретически существование подобного излучения в рамках модели, опирающейся на закон Хаббла: «Красное смещение излучения, испускаемого галактиками, пропорционально удалённости 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, причём возникла в чудовищном взрыве. Большой взрыв, как его называют, положил начало не толь-

ко Вселенной, но и всем известным нам физическим понятиям, включая понятия пространства и времени. Некоторые авторы [1, 2] рассматривают эволюцию Вселенной в виде четырёх последовательных эр, в результате смены которых согласно новейшим моделям, она пришла к своему теперешнему состоянию ($\rho \approx 10^{-30} \text{ г/см}^3$, $T=3^\circ\text{K}$) (рис. 1).

В этих моделях предполагается, что Вселенная ведёт себя как абсолютно чёрное тело, начальная температура и плотность которого очень высокие (начальная плотность его больше ядерной 10^{15} г/см^3 , а температура выше 1 ГэВ (10^{13} K). Излучение этого абсолютно чёрного тела состоит из известных адронов, лептонов и фотонов и происходит до тех пор, пока температура выше, чем масса самого лёгкого из адронов, т.е. π -мезона ($m_\pi c^2 \approx 140 \text{ МэВ}$, температура $1,6 \cdot 10^{12} \text{ K}$). Это соответствует «адронной эре», продолжительность которой составляет примерно 10^{-4} с . К концу её плотность сравнима с плотностью ядерного вещества. Когда температура становится ниже 100 МэВ (10^{12} K) адроны ещё остаются, но уже не могут рождаться спонтанно в излучении абсолютно чёрного тела. Теперь излучение состоит, главным образом, из лептонов и фотонов, и так остаётся до тех пор, пока температура выше порога рождения пары $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, т.е. примерно 1 МэВ. Охлаждение от 100 МэВ до 1 МэВ занимает около 1 с. Это время соответствует так называемой «лептонной эре», к концу которой плотность становится 10^4 г/см^3 . При температуре ниже 1 МэВ лептоны, хотя и существуют как

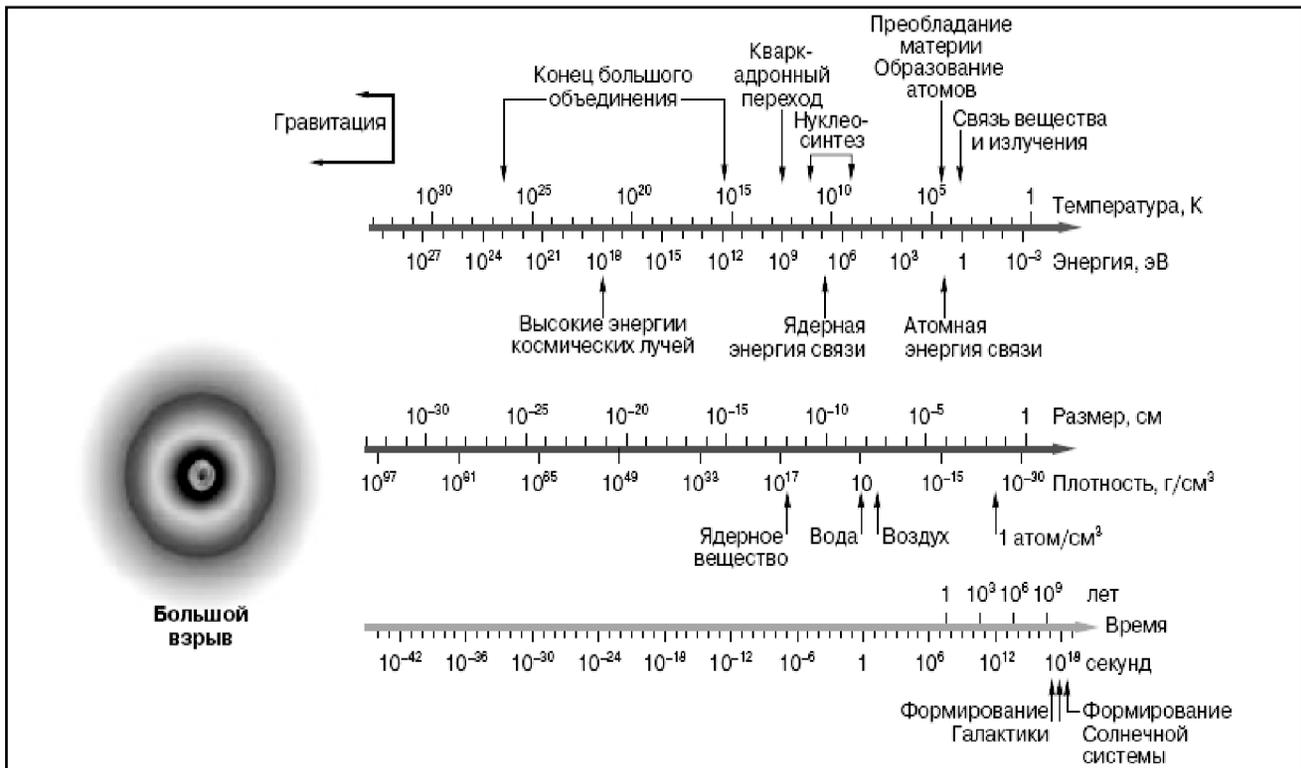


Рис. 1. Связь температуры, энергии, размеров, плотности и времени, существовавшая в ранней Вселенной. Нижняя часть схемы показывает кварковый и лептонный состав материи.

частицы, но уже не могут спонтанно рождаться в излучении абсолютно чёрного 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). Радиационная 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 «звёздной эре», которая продолжается до наших дней. В. А. Гинзбург в своей книге [2] описывает проблему расширяющейся Вселенной взаимодействием большого числа различных частиц: фотонов, электронов, нейтрино, мюонов, пи-мезонов, протонов, нейтронов и др. Хотя, как он сам отмечает, этот подход является достаточно условным, т.к. мы до сих пор не имеем полного понимания физики элементарных частиц. На рис. 1 схематично представлена связь температуры, энергии, размеров, плотности и времени, существовавшая в ранней Вселенной.

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 от развала атомные ядра. Именно интенсивность сильных взаимодействий делает их значительно более трудными для математического анализа, чем электромагнитные взаимодействия. Вклады разного типа взаимодействий между нуклонами символически изображаются «фeyнмановскими диаграммами», с помощью которых физики пытаются учесть все взаимодействия. Эта проблема, заключающаяся в сложности расчёта вероятностей процессов, включающих сильные взаимодействия, была основной причиной, сдерживающей развитие физики элементарных частиц в последнее время. Однако не все процессы включают сильные взаимодействия. Эти взаимодействия испытывает лишь класс частиц, известных 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. Здесь, в физике элементарных частиц, существует 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 элементарной частицей является 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». Более того, каждый «аромат» кварка бывает трёх различных цветов — красного, белого и голубого. Если идея кварков правильна, то в этой концепции можно объяснить физику ранней Вселенной. Экспериментально было показано, что при столкновениях электронов с ядерными частицами сила между кварками чрезвычайно мала, когда кварки находятся близко друг к другу. 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, причём каждая разновидность частиц представляет собой ещё один тип излучения. Между тем, несмотря на успешное описание многих явлений, в том числе и в космологии, кварковая модель однозначно не подтверждена, т.к. до сих пор невозможно разбить любой адрон на составляющие его кварки, даже с помощью современных ускорителей самых высоких энергий. Все, что было сказано выше, относилось 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 определённые процессы радиоактивного распада (например, распада свободного нейтрона) или за любую реакцию, включающую нейтрино.

Авторы работы [3], показали, что интенсивные потоки нейтрино могут образовываться в результате взрыва Сверхновой, что может быть интерпретировано на основе ротационного механизма. Слабые взаимодействия значительно слабее сильных, или электромагнитных взаимодействий. Между тем существует глубокая связь между слабыми и электромагнитными взаимодей-

ствиями, которая и легла в основу новой теории поля, объединяющей эти две силы*). Развитие этой теории позволило также сделать важные выводы по проблемам, относящимся к изучению ранней Вселенной.

В 1998 году С.Перлмуттером, А. Райесом из США и Б. Шмидтом из Австралии было предсказано ускорение расширения Вселенной. За это открытие в 2011 году они удостоились Нобелевской премии по физике. Это открытие было сделано на основании изменчивости светимости сверхновых звезд, заканчивающих свою эволюцию взрывом. Установить ускорение расширения Вселенной позволил так называемый закон Хаббла, связывающий, как уже отмечалось выше, красное смещение галактик (понижение частот излучения, свидетельствующее о динамическом удалении этих источников друг от друга и в том числе от нашей Галактики) и расстояние до них линейным образом.

Раньше считалось, что Вселенная после Большого взрыва должна расширяться с замедлением, поскольку все тела, которым взрыв придал ускорение, притягиваются друг к другу. Впрочем, впоследствии выяснилось: то, как она расширяется, зависит от того, чем она заполнена. Если бы она была заполнена обычным веществом, то действительно происходило бы замедление, однако она расширяется с ускорением из-за темной энергии.

Нельзя сказать, чтобы открытие было полной неожиданностью — отмечались и косвенные признаки, наличие которых порождало подозрения, что темная энергия есть. Но нобелевские лауреаты привели непосредственное измерение ускорения расширения Вселенной, что подтвердило теорию и о темной энергии.

Это открытие породило множество рассуждений о последствиях такого расширения Вселенной. Если раньше предполагалось, что концом Вселенной станет «мировой котел», гибель планет в мировом океане энергии, то теперь можно предположить, что Вселенная остынет: разлетевшись по безбрежным уголкам вакуума, звезды взорвутся, и планеты замерзнут. Вселенную ждет ледяное озеро Коцит, как писал в свое время Данте Алигьери. Однако все это требует дальнейшего осмысливания и накопления новой информации и новых подходов к описанию эволюции вселенной.

Нуклеосинтез

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

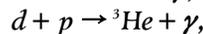
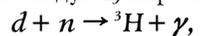
Для раннего периода, когда излучение доминировало, из уравнений Эйнштейна следует простое соот-

ношение между температурой T и временем t , прошедшем с момента Большого взрыва:

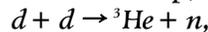
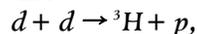
$$T = \alpha(10^{10}/\bar{t})\text{K}.$$

Время \bar{t} здесь выражено в секундах, а температура T — в Кельвинах. Постоянная 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 тяжёлые ядра, такие как ядра углерода, кислорода и т.д. могли синтезироваться лишь в ходе термоядерных реакций в звёздах. Причина этого заключается в том, что есть некоторый интервал неустойчивости лёгких ядер, расположенных около ядра лития, и этот интервал не удаётся преодолеть в ходе первичного нуклеосинтеза. Поэтому синтез в раннюю эпоху останавливается на стадии образования гелия.

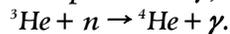
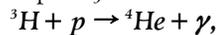
Полагают, что одной из первых реакций, приводящей к образованию тяжёлых ядер, является реакция $n+p \rightarrow \alpha + \gamma$. Как показали расчёты эта реакция идёт при температуре $T = 9 \cdot 10^9$ К, что соответствует соотношению нейтронов и протонов во Вселенной $N_n/N_p = 0,2$ и времени ~ 3 с. При этих условиях дейтерия образуется в достаточном количестве для производства ядер с массой 3 в следующих реакциях:



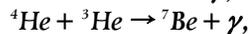
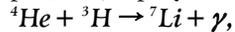
или



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



Энергия связи продуктов этих реакций больше чем дейтерия (2,225 МэВ), тогда если фотон может образовать дейтерий, то он может реализовать и другие реакции. Т. к. не существует стабильной массы 5, то ${}^4\text{He}$ является последним ядром в начальном этапе нуклеосинтеза. В принципе, он мог бы образовать более тяжёлые 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 [4] приводятся в хронологическом порядке события, которые происходили во Вселенной, начиная с момента 10^2 с после её рождения (табл. 1). Из таблицы 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 тяжёлые яд-

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	3×10 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	3×10 ⁹	Начинается образование D и ${}^4\text{He}$; исчезают e^-, e^+ ; есть также свободные n и p .
35 мин	3×10 ⁸	Фиксируется количество D и ${}^4\text{He}$ по отношению к числу протонов и электронов; ${}^4\text{He}/\text{H} - 22 - 28\%$ (по массе).
7×10 ⁵ лет	3×10 ³	Химическая энергия связи становится достаточной, чтобы образовались устойчивые нейтральные атомы. Теперь Вселенная прозрачна для излучения. Вещество начинает доминировать над излучением.

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

ра. 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 тяжёлые ядра образуются уже в результате процессов, связанных с эволюцией звёзд.

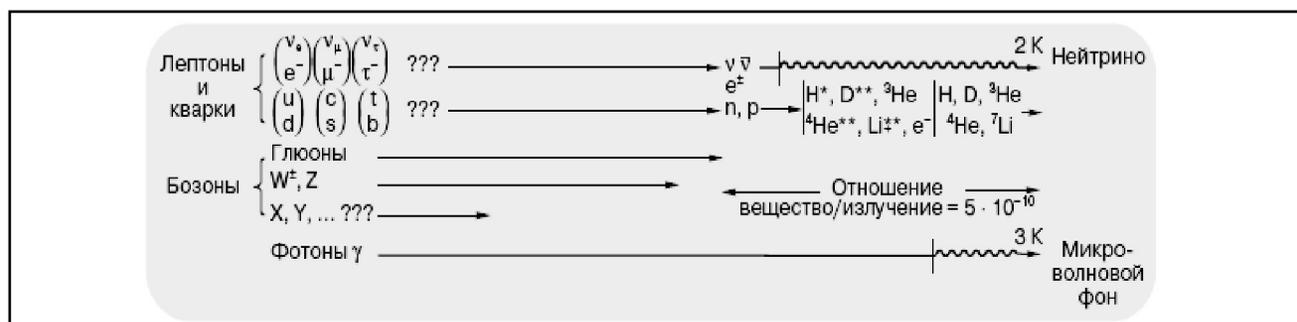
Звёздный нуклеосинтез. В процессе эволюции Вселенная постоянно обогащается всё более тяжёлыми химическими элементами. Распространённость химических элементов во Вселенной определяют разными способами: по спектру излучения звёзд, путём элементного анализа земных и космических образцов (метеоритов, лунных образцов). Полученная таким образом кривая распространённости элементов показана на рис. 2. Кривая имеет максимумы для группы кремния и группы железа, после чего кривая распространённости распадается на две ветви: одна включает нейтронообогащённые изотопы и характеризуется тремя двойными пиками вблизи магических чисел $N=50, 82$ и 126 , а вторая включает менее распространённые протоннообогащённые изотопы.

Одной из ступеней нуклеосинтеза являлось образование ${}^{12}\text{C}$. Как было показано выше, углерод может быть образован в результате реакции ${}^4\text{He} + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$.

Однако ядро ${}^8\text{Be}$ является нестабильным по отношению к распаду на две α -частицы и живёт 10^{-16} с.

Между тем при температуре близкой к 10^8 К и плотности порядка 10^5 г/см³ три ядра ${}^4\text{He}$ могут образовать ядро ${}^{12}\text{C}$ в результате двухступенчатой реакции ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma$, 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 звёзд, образуются всё более тяжёлые ядра: ${}^4\text{He}, {}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}, {}^{28}\text{S}, {}^{56}\text{Fe}$. 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 [5].

Несколько иной механизм образования ядер тяжелее железа. Этот механизм объясняется последовательными реакциями радиоактивного захвата нейтронов элементами группы железа. Наличие двойных пиков в кривой распространённости элементов (рис. 2) свидетельствует о наличии двух различных процессов захвата нейтронов, т. н. r - и s -процессов. Эти два процесса соответствуют различным нейтронным плотностям. В случае малых плотностей нейтронов (s (*slow*)-процесс) при радиационном захвате $(A, Z) + n \rightarrow (A+1, Z) + \gamma$ образуется изотоп с массой на единицу больше, чем масса ядра мишени. Если конечное ядро $(A+1, Z)$ стабильно, то на нём также может произойти радиационный захват с образованием нового изотопа $(A+2, Z)$.



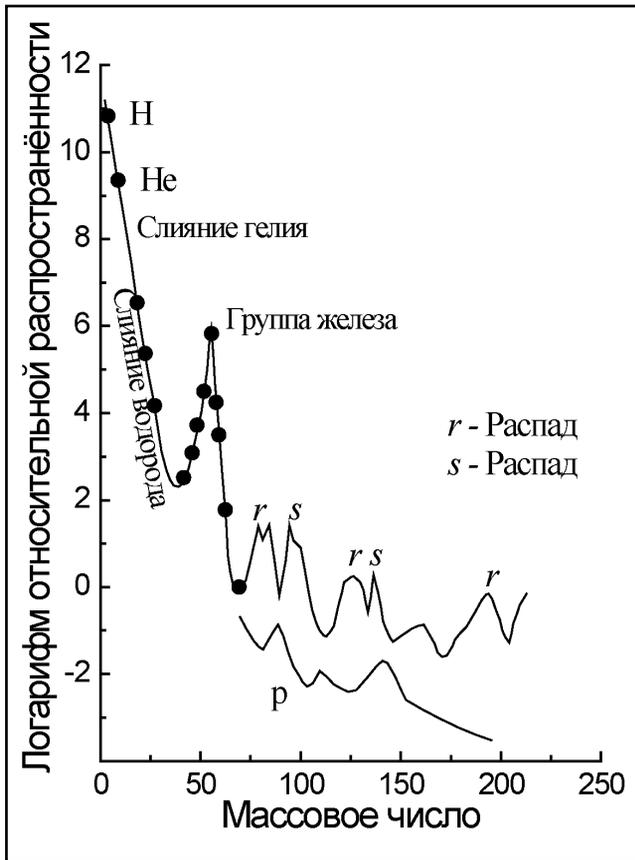


Рис. 3. Цепочки быстрого и медленного захвата нейтронов (r и s -процессы) для ядра ^{56}Fe . Пунктирными линиями представлены альтернативные каналы образования ^{65}Cu .

При малых потоках ядро ($A+x, Z$) распадается раньше, чем поглотит нейтрон. В основном оно распадается путём β -распада, в результате которого образуется новое ядро ($A+x, Z+1$) или же целая цепочка распадов,

заканчивающаяся на ядре, время жизни которого будет достаточно большим для того, чтобы произошёл 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 распадётся и происходят новые радиационные захваты. Это происходит до тех пор, пока цепочка захватов не дойдёт до изотопа с очень малым периодом полураспада, и мы придём 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 распространённость элементов обратно пропорциональна полному сечению захвата нейтронов. Для ядер с магическими числами 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 $Z=114$ и, соответственно, повышение стабильности сверхтяжёлых ядер вблизи дважды магического ядра $^{298}114$ (114 протонов и 184 нейтрона). Расчёты, проведённые по оболочечной модели, показали возможность существования такого сверхтяжёлого ядра с периодом полураспада до $\sim 10^8$ лет [6]. Несмотря на то, что точность таких расчётов невелика, и они скорее носят качественный характер, последние опыты по синтезу тяжёлых изотопов 112—118-го элементов показали, что наблюдается повышение стабильности сверхтяжёлых ядер по отношению к α -распаду [7], что является дополнительным подтверж-

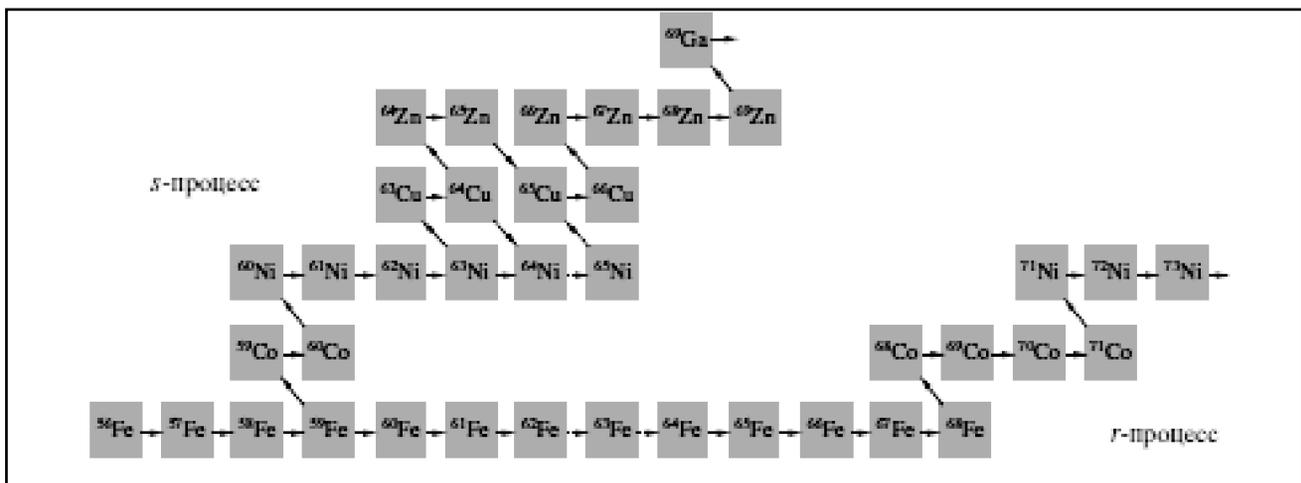


Рис. 4. Зависимость времени жизни сверхтяжёлых элементов относительно их α -распада от числа N нейтронов. Сплошные горизонтальные линии отмечают определенный возраст: 1 — возраст Земли, 2 — 10^8 лет, 3 — 10^5 лет, 4 — 1 год, 5 — 1 сут. Штриховыми линиями указаны экспериментальные пределы поиска элементов в природе (а) и космических лучах (б).

дением повышения стабильности сверхтяжёлых ядер вблизи оболочек (рис. 4).

Если предположить, что наиболее долгоживущие сверхтяжёлые ядра имеет период полураспада 10^5 – 10^6 лет, что не сильно расходится с предсказаниями теории, которая свои оценки делает также с определённой точностью, то не исключено, что они могут быть обнаружены в космических лучах — свидетелях образования элементов на других, более молодых планетах Вселенной. Если предположить также, что период полураспада «долгожителей» может составлять десятки миллионов лет или более, то они могли бы присутствовать в Земле, сохранившись в очень малых количествах от момента образования элементов в Солнечной системе до наших дней. Среди возможных кандидатов наиболее реальными являются изотопы 108-го элемента (Hs), ядра которых содержат около 180 нейтронов. Химические опыты, проведенные с короткоживущим изотопом ^{269}Hs ($T_{1/2} \sim 9$ с) показали, что 108 элемент, как и ожидалось, согласно Периодическому закону, является химическим гомологом 76-го элемента — осмия (Os) [8]. Тогда образец металлического осмия, может содержать в очень малых количествах 108 элемент Ека(Os). Присутствие Ека(Os) в осмии можно определить по его радиоактивному распаду. Возможно, сверхтяжёлый элемент будет испытывать спонтанное деление, либо спонтанное деление наступит после предшествующих альфа или бета — распадов (вид радиоактивного превращения, при котором один из нейтронов ядра превращается в протон) более легкого и более короткоживущего дочернего или внучатого ядра. Тогда распад сверхтяжёлого ядра будет регистрироваться по нейтронной вспышке сопровождающей спонтанное деление. Такая установка, включающая в себя 4 — нейтронный детектор была создана в Лаборатории ядерных реакций ОИ-ЯИ и расположена для уменьшения космического фона нейтронов в подземной лаборатории, расположенной под Альпами в середине тоннеля соединяющего Францию с Италией на глубине соответствующей 4000-метровому слою водного эквивалента. Если в течении года измерений наблюдалось хотя бы одно событие спонтанного деления сверхтяжёлого ядра, то это будет соответствовать концентрации 108 элемента в Os-образце около $5 \cdot 10^{-15}$ г/гр., в предположении, что его период полураспада равен 10^9 лет. Столь малая величина составляет всего 10^{-16} часть от концентрации урана в земной коре.

Несмотря на сверхвысокую чувствительность эксперимента, шансы обнаружить реликтовые, сверхтяжёлые нуклиды малы. Отсутствие эффекта даст лишь верхнюю границу периода полураспада долгожителя на уровне $T_{1/2} \leq 3 \cdot 10^7$ лет [9].

Пока активные поиски в природных объектах (космических лучах, материалах, лунных образцах, концентратах тяжёлых химических элементов земных образцов) не дали положительного результата. В настоящее время проводятся эксперименты на ускорителях в

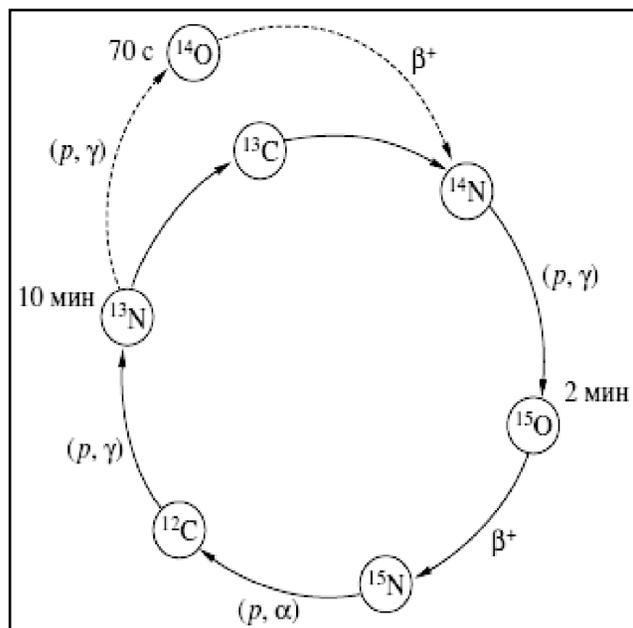


Рис. 5. «Холодный» и «горячий» CNO-цикл. Указаны периоды полураспада ($T_{1/2}$) для изотопов ^{13}N , ^{15}O .

Дубне и Дармштадте (Германия), направленные на искусственный синтез сверхтяжёлых элементов в ядерных реакциях с тяжёлыми ионами, но, естественно, при меньших временах жизни. Таким образом, в ближайшее время, очевидно, будет дан ответ на вопрос существования сверхтяжёлых элементов.

Говоря о проблеме звёздного нуклеосинтеза, нельзя также не упомянуть о некоторых процессах, происходящих в них и в первую очередь на Солнце, которые существенно меняют начальную распространённость элементов. Главным образом это относится к т.н. «CNO» циклу, в котором углерод, азот и кислород играют роль катализатора в образовании $4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$ (рис. 5).

Ядерно-физические эксперименты в астрофизике. Наиболее фундаментальные проблемы астрофизики — процессы выделения энергии при образовании и взрыве звёзд, а также нуклеосинтез, самым непосредственным образом связаны с физикой элементарных частиц, а также с исследованиями методами ядерной физики различных характеристик ядер и ядерных взаимодействий при различных энергиях, в том числе и при энергиях вблизи кулоновского барьера.

Основную информацию для решения тех или иных астрофизических проблем получают из следующих экспериментальных данных:

- периодов полураспада ядер у границ нулевой стабильности (для r и s -процессов);
- вероятности нейтронной эмиссии после β -распада;
- характеристики ядерных реакций, приводящих к синтезу новых ядер;
- значения полных сечений ядерных реакций;
- характеристики ядерных реакций под действием экзотических ядер;

— энергии связи и массы ядер, удаленных от линии β -стабильности;

— характеристики супернейтронно- избыточных ядер легчайших элементов (мультинейтронные системы, сверхтяжелые изотопы водорода (${}^{4,5,6,7}\text{H}$), гелия (${}^{6,8,9,10}\text{He}$), лития (${}^{9,10,11,13}\text{Li}$) и др.);

— измерение ядерной температуры;

— характеристики эмиссии нейтрино из экзотических ядер (${}^8\text{B}$);

— вероятности протекания термоядерных реакций с легкими экзотическими ядрами.

Список этих данных, извлекаемых из ядерно-физических экспериментов можно продолжить. Однако, уже из вышеперечисленного видно насколько обширная информация может быть получена из ядерных экспериментов для решения многих проблем астрофизики.

Экзотизм ядер. Экзотические состояния ядерной материи, т.е. ядер, находящихся в экстремальных состояниях- с высоким спином, большой деформацией, высокой плотностью и температурой, ядер, обогащенных нейтронами или протонами на границе нуклонной стабильности, играют важную роль в исследованиях фундаментальных свойств ядер, приближающих нас к получению уравнения состояния ядерной материи. Это несомненно имеет большое значение при экстраполяции характеристик микромира в макромир, представляющий нашу Вселенную.

Синтез и изучение нейтроноизбыточных изотопов имеют две основные цели: установление местоположения границ нейтронной стабильности и получение информации о свойствах экзотических ядер вблизи этих границ. С развитием ускорительной техники стало возможным получать ускоренные пучки вторичных радиоактивных ядер. В связи с этим открылись новые широкие возможности для изучения, как структуры самих легких экзотических ядер, так и особенности ядерных реакций под действием этих ядер.

Чрезвычайно важным является получение новой информации о ядрах, находящихся вблизи границы нуклонной стабильности, так как для свойств таких ядер можно ожидать (и уже экспериментально наблюдаются) существенные отклонения от общеизвестных закономерностей. Здесь удобными объектами для исследования служат ядра в области малых Z . Однако принципиальным является вопрос о том, насколько общими могут быть выводы, сделанные для столь небольшого количества ядер. Ответ на этот вопрос также может дать только эксперимент.

Масса ядер. Фундаментальной характеристикой ядра является его масса. Значение массы является одним из необходимых условий определения стабильности и свойств слабосвязанных ядер. На основе измеренной массы определяется энергия связи ядра, которая отражает баланс между ядерными и кулоновскими силами и, следовательно, конфигурацию нуклонов. Измерение масс ядер дает также непосредственную ин-

формацию о границах стабильности. Так, для целого ряда ядер, например ${}^{8-10}\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{16}\text{B}$, эксперимент не только показал, что они более связаны по сравнению с теоретическими предсказаниями (${}^{9,10}\text{He}$, ${}^{16}\text{B}$), а некоторые из них вообще являются стабильными (${}^8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$) [10]. В случаях, когда ядро не связано, важно определить насколько оно нестабильно. Значение массы ядра необходимо также при определении энергии всех процессов, в которых участвует исследуемое ядро.

Измерение масс ядер дает также информацию об эволюции формы ядер, которая может происходить у ядер вблизи границы нуклонной стабильности [11].

Форма ядер. В последнее время активно обсуждаются вопросы, связанные с тем, что деформация может привести к увеличению энергии связи ядер. С этой точки зрения особый интерес представляют ядра с числом нейтронов $N = 20$, для основного состояния которых ожидается сферическая форма вследствие заполнения замкнутой оболочки $N = 20$. Однако последние теоретические расчеты их энергий связи предсказывают для некоторых из них наличие сильной продольной деформации ($\beta \sim 0.3$) и даже существование изомерных состояний. Предполагается, что следствием этой деформации является экспериментально обнаруженное резкое увеличение энергии связи двух нейтронов в нейтроноизбыточных ядрах ${}^{31}\text{Na}$ и ${}^{32}\text{Mg}$, т. е. имеет место инверсия нильсоновских уровней, соответствующих большой деформации [12]. Это свидетельствует о том, что разрушается замкнутая оболочка и $N = 20$ не является больше «магическим» числом. Последующие эксперименты по изучению ядер ${}^{33-35}\text{Al}$, ${}^{35}\text{Si}$, ${}^{36,37}\text{P}$ [13] показали возможность нахождения ядер в области между магическими числами $N = 20$ и 28 в сферической и деформированной форме (область сосуществования двух видов деформации).

Эксперименты по измерению $T_{1/2}$ для ядер ${}^{27,29}\text{F}$, ${}^{30}\text{Ne}$ показали также, что они являются более стабильными, чем это предсказывалось оболочечной моделью [14]. Измеренная большая величина вероятности перехода $B(E2; 0^+ \rightarrow 2^+)$ для ядра ${}^{32}\text{Mg}$ ($N = 20$) подтвердила возможность существования деформации в магических легких ядрах [15]. Обнаружение последних связанных сильно нейтроноизбыточных изотопов ${}^{32}\text{Ne}$ и ${}^{40}\text{Mg}$ [16, 17] также показало справедливость предсказания увеличения стабильности нейтроноизбыточных ядер с увеличением их деформации.

Весьма показателен в этом отношении изотоп ${}^{28}\text{O}$. Это дважды магическое ($N = 20$, $Z = 8$) ядро пока экспериментально не обнаружено. Однако ядро ${}^{29}\text{F}$ с тем же числом нейтронов, но на один протон больше ($N = 20$, $Z = 9$), оказалось нуклонно-стабильным. Если n -взаимодействие не является причиной этой стабильности, можно предположить, что эффект деформации в ядре ${}^{29}\text{F}$ существеннее, чем в ядрах ${}^{31,32}\text{Na}$, что и обуславливает его стабильность. Исследование свойств ядер вблизи магических чисел нейтронов $N = 20, 28, 50$ является интереснейшей задачей ядерной

физики и требует своего дальнейшего развития с использованием разнообразных методов для измерения деформации ядер и их радиусов. Информация о свойствах таких ядер необходима для расчета сценариев нуклеосинтеза в r -процессе.

Размеры ядер. Определение размеров ядер всегда являлось фундаментальной задачей ядерной физики, поскольку для многих расчетов необходимы точные значения распределения ядерной материи (зарядовых и нуклонных радиусов). Эти распределения изучались преимущественно в экспериментах по рассеянию электронов (извлекалась информация о распределении заряда в ядрах) и адронов (определялось распределение нуклонов в ядре).

С появлением возможности получать вторичные радиоактивные пучки существенно расширился диапазон ядер, для которых можно было определить прямым способом их размеры используя информацию из экспериментов по измерению сечений реакций, вызванных такими ядрами. Известно, что изменения в энергии связи коррелируют с размером ядра. Наиболее ярко это проявилось в области легких ядер — был выявлен ряд новых интересных свойств, которые связаны с исключительно малой энергией связи валентных нейтронов в ядрах, находящихся на границе нейтронной стабильности. Так, в реакциях с вторичными радиоактивными пучками изотопов He, Li, Be и B было обнаружено исключительно высокое значение сечения реакции для некоторых изотопов [18]. Извлеченные в этих экспериментах значения радиусов распределения ядерного вещества показали постепенное их увеличение с ростом числа нейтронов, а для слабосвязанных ядер ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be и ^{17}B , близких к границе стабильности, эти радиусы существенно превысили значения, определяемые стандартным приращением в зависимости от массы $\sim A_{1/3}$ (см. рис. 6).

Систематика всего 7 пар зеркальных ядер подтвердила существование нейтронного гало в изотопах ^6He и ^8He , предсказала гало в ядрах ^9Be и ^{15}C ($R_n^{\text{rms}} - R_p^{\text{rms}} \sim 0.20\text{--}0.30$ фм), а также указывает на инверсию s - и d -орбит в зеркальной паре $^{17}\text{Ne} - ^{17}\text{N}$. Полученные таким образом значения радиусов распределения нуклонов позволяют определять вероятности их взаимодействия с другими ядрами, что является принципиальным в расчетах сценария нуклеосинтеза.

Нейтронное гало. Такое аномальное значение радиуса сильно нейтронообогащенных ядер было интерпретировано как проявление в этих ядрах так называемого «нейтронного гало», когда в слабосвязанных ядрах валентные нейтроны образуют длинный хвост в распределении плотности нейтронов [19]. Гало является характеристикой связанного состояния, лежащего вблизи порога эмиссии частиц. Дальнейшие эксперименты с применением реакций фрагментации, реакций диссоциации в поле ядра мишени, а также измерения импульсных распределений нуклонов или фрагментов, образующихся в результате взаимодействия таких ядер, подтвердили предположение о

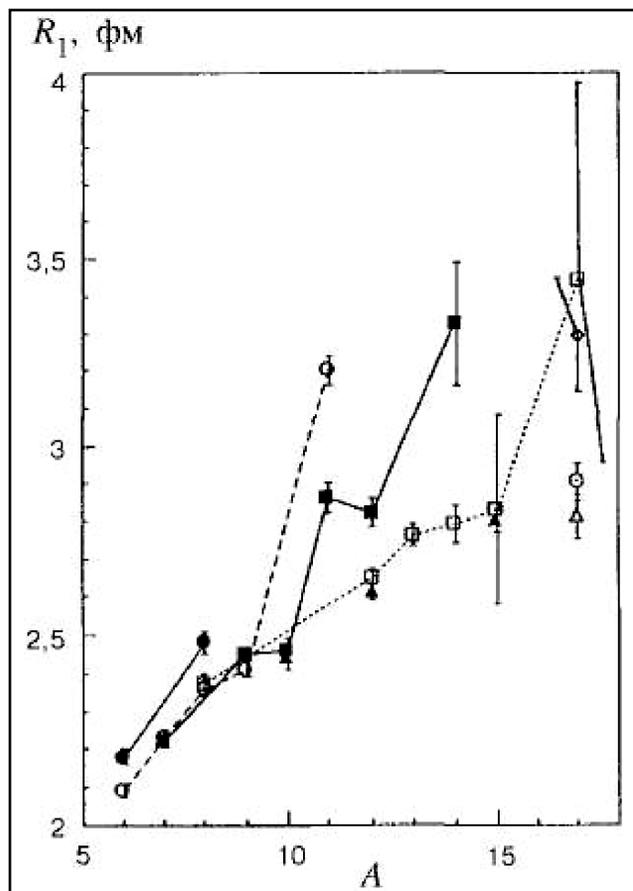


Рис. 6. Радиусы взаимодействия легких ядер, извлеченные из экспериментальных значений сечений взаимодействия [21]: (•) — He, (○) — Li, (!) — Be, (□) — B, (7) — C, (.) — N, (8) — F, (M) — Ne.

существовании в легких нейтроноизбыточных ядрах нейтронного гало.

Таким образом, увеличение среднеквадратичного радиуса распределения нейтронов является первым признаком наличия гало в экзотических ядрах. В дальнейшем было обнаружено существование двух типов гало. Первый тип связан с общим увеличением размера ядра (в случае ядер ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be , ^{17}B). Второй тип гало имеет место в ядрах с нормальными размерами (например, ^6He , ^8He). Отличие между этими двумя видами гало показано на рис. 7 для ядер ^{11}Li и ^8He . Считается, что гало первого рода объясняется очень малой энергией связи валентных нейтронов, тогда как гало второго рода — результат очень компактного (α -частичного) кора ядер ^6He и ^8He . В работе [20] были измерены сечения взаимодействия и фрагментации для ядер $^{4,6,8}\text{He}$ при энергиях 800 МэВ/А и сделан вывод о том, что увеличение сечения взаимодействия с массовым числом связано с сечением срыва нейтронов. Определив пространственное распределение нейтронов и протонов, авторы получили, что $R_n^{\text{rms}} - R_p^{\text{rms}} \sim 0.9$ фм для ^6He и ^8He .

Этот эффект протяженного нейтронного распределения по сравнению с протонным был назван

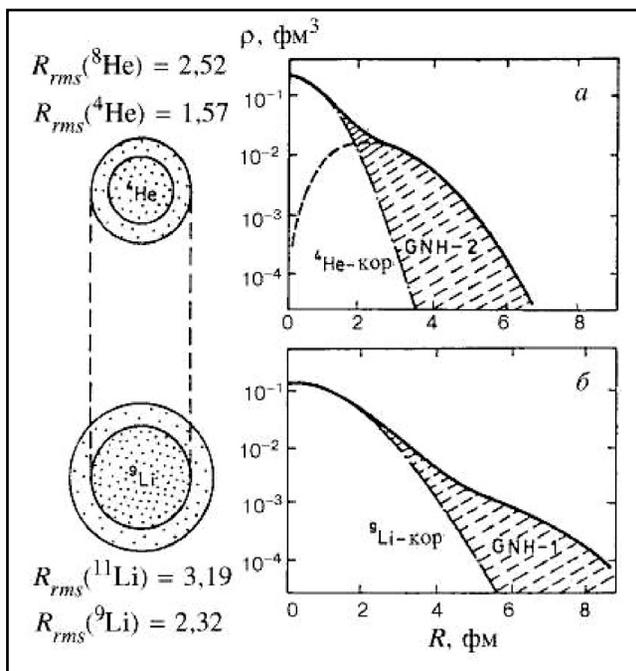


Рис. 7. Распределение нейтронной плотности в ядрах ${}^8\text{He}$ (а), ${}^{11}\text{Li}$ (б).

«нейтронной шубой» (рис. 7). Четкой разницы между нейтронной шубой и нейтронным гало нет, хотя с помощью этих понятий можно попытаться разграничить случаи с очень малой энергией связи последних нейтронов (например, $S_{2n}(\text{Li}) \approx 0.3$ МэВ, $S_n(\text{Be}) = 0.5$ МэВ) от случаев со сравнительно большими значениями (например, $S_{2n}({}^6\text{He}) = 0.97$ МэВ, $S_{2n}({}^8\text{He}) = 2.14$ МэВ). Существует предположение о существовании двухнейтронного гало в виде динейтрона. Этот вопрос так же важен, как и вопрос о корреляциях между нейтронами гало и кором ядра.

Таким образом, обнаруженные в последние годы новые явления при изучении свойств легчайших ядер у границы нейтронной стабильности привели к необходимости пересмотра ряда представлений об этих ядрах.

Экспериментальное решение этих и ряда других проблем в области легких нейтроноизбыточных ядер связано с возможностью получения в достаточно больших количествах таких ядер. В последнее время в связи с развитием мощных ускорительных комплексов пучков стабильных и радиоактивных ядер эта задача успешно решается.

Ядерные реакции и нуклеосинтез. Важную роль в процессах нуклеосинтеза играют ядерные реакции, идущие с захватом протонов, нейтронов или более тяжелых частиц (α -частиц, тяжелых ионов) различными ядрами, в том числе и нестабильными. Определение скорости протекания этих реакций является сложной экспериментальной задачей. Сечение таких процессов также сильно зависит от температуры объекта. В процессе невзрывной эволюции звезды её температура от-

носительно низкая и эффективное сечение реакций составляет от пикобарн до нанобарн ($10^{-36} - 10^{-33}$ см 2). При взрыве звезд температура очень высокая (10^9 К) и эффективное сечение составляет миллибарны ($10-27$ см 2). Для моделирования этих процессов в лабораториях условий необходимо иметь широкий диапазон радиоактивных ядер, которые играют основную роль при взрыве звезд. Такая возможность в последнее время появилась с созданием ускорительных комплексов пучков радиоактивных ядер.

Среди последних успехов ядерной физики — обнаружение и исследование новых видов радиоактивного распада — β -запаздывающего деления; протонного распада, изомерии формы. Учет этих видов распада существенно влияет на цепочки образования нуклидов и является важной проблемой, связывающей ядерную физику и астрофизику.

Особый интерес для астрофизики представляют реакции с легкими слабосвязанными ядрами, протекающие при энергиях близких к кулоновскому барьеру. Эти реакции имеют много особенностей, которые были обнаружены в последнее время с помощью пучков радиоактивных ядер. Одной из таких особенностей является усиление сечений взаимодействия в подбарьерной области энергий. Особенно сильно этот эффект проявляется для кластерных ядер (${}^{6,9,11}\text{Li}$) [21, 22] а также ядер с нейтронным гало (${}^{6,8}\text{He}$) [23].

Такие особенности взаимодействия, проявляющиеся в усилении сечения реакций передачи кластеров, а также реакций полного слияния вблизи кулоновского барьера характерны для многих слабосвязанных кластерных ядер.

Эти результаты являются чрезвычайно важными для решения астрофизических проблем, в частности понимания механизма образования легких элементов во Вселенной. При нуклеосинтезе большое сечение взаимодействия кластерных слабосвязанных ядер (${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$) может изменить цепочки β -распадов, приводящих к образованию различных элементов [26, 27]. Например могут оказаться наиболее вероятными для синтеза легких стабильных ядер следующие каналы реакций ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, n){}^6\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}({}^6\text{He}, 2n){}^{16}\text{O}$, ${}^1\text{H}({}^9\text{Li}, n){}^9\text{Be}$, ${}^3\text{He}({}^9\text{Li}, 2n){}^{10}\text{B}$ и др. (см. рис. 8).

Этот пример еще раз подтверждает тот факт, что фундаментальная ядерная физика, расширяет наши познания не только микромира, но и способствует развитию наших представлений об окружающем нас макром мире, а также вносит вклад в смежные области науки и техники. Фундаментальная наука, приносящая знание об окружающем нас мире, и прикладная наука, претворяющая полученные знания в практическую пользу, развиваются совместно, обогащая и дополняя друг друга.

Формирование наших представлений об образовании Вселенной, нуклеосинтезе, свойствах новых звездных образований продолжается, и они нераз-

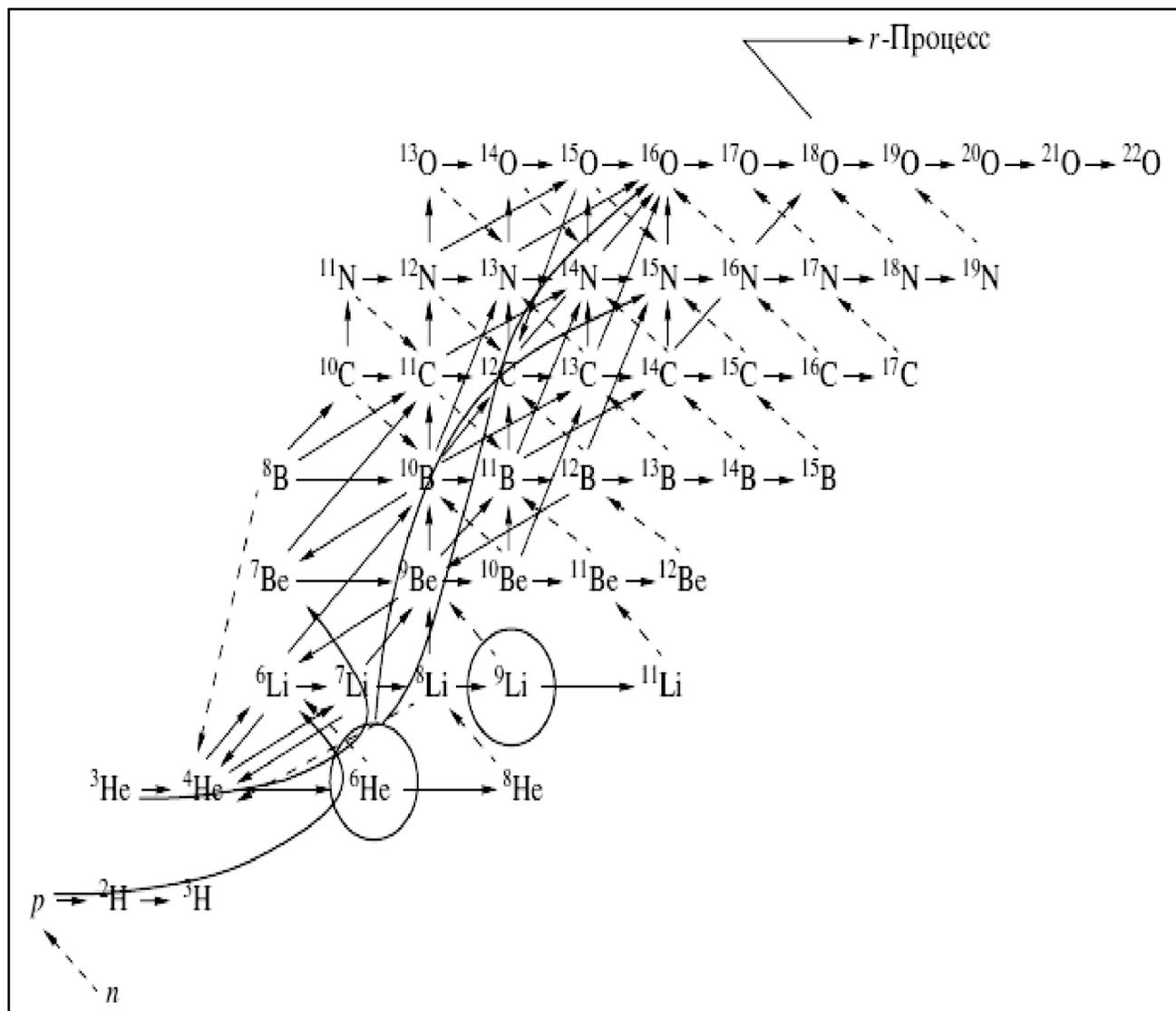


Рис. 8. Новый сценарий развития процесса слияния легких нейтронно-избыточных ядер для синтеза легких ядер во Вселенной с участием ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^9\text{Li}$ [40]

рывно связаны с накоплением новых данных в ядерной физике и физике элементарных частиц. Поэтому получение информации о механизмах образования Вселенной и нуклеосинтеза, основанное на современных представлениях ядерной астрофизики, является

одной из основных задач построения единой космологической модели.

Большинство из приведенных выше исследований были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проект 13-02-00533).

Литература

1. Волантэн А. Субатомная физика ядра и частицы. Т.1. М: Мир, 1986.
2. Гинзбург В.А. О физике и астрофизике. // М: Мир, 1974.
3. Гапонов Ю.В. и др. Взаимодействие электронных нейтрино с ${}^{56}\text{Fe}$ // Ядерная физика. 2004. Том 67, вып. 11. С.
4. Нарликар Дж. Неистовая Вселенная. // М: Мир, 1985.
5. Баранов Д.Г. и др. Энергетические спектры ядер железа малых энергий галактических космических лучей в экстремумах солнечной активности // Известия РАН. Серия физическая. 2005. Том 69, вып. 6. С.
6. Оганесян Ю.Ц. // ЯФ. 2006. Том 69. С. 961.
7. Oganessian Yu. // Int. J. Mod. Phys. E. 2007. V. 16. P. 949.
8. Stoyer N.J. et al. // Nucl.Phys. A. 2007. V. 787. P. 388.
9. Oganessian Yu. // J. Phys. G. 2007. V. 34. P. R165.
10. Ogloblin A.A., Penionzhkevich Yu.E. // Treatise on Heavy Ion Science. / Ed. D.Allan Bromley. New York: Plenum Press. V. 8. P. 260.
11. Sorlin O. et al. // Phys. Rev. C. 1993. V. 47. P. 2941.
12. Thibault C. et al. // Phys. Rev. 1975. V. 12. P. 644.
13. Fifield L.K. et al. // Nucl. Phys. A. 1988. V. 484. P. 117.
14. Tarasov O.B. et al. // Phys. Lett. 1997. V. 409. P. 64.
15. Motobayashi T. et al. // Phys. Lett. B. 1995. V. 346. P. 9.
16. Sakurai H. et al. // Phys. Rev. C. 1996. V. 54. P. R2802.
17. Baumann T. et al. // Nature (London). 2007. V. 449. P. 1022.
18. Tanibata et al. // Phys. Lett. B. 1988. V. 206. P. 592.
19. Hansen P. G., Jonson B. // Europhys. Lett. 1987. V. 4. P. 409.
20. Tanibata I. et al. // Phys. Lett. B. 1992. V. 289. P. 261.
21. Penionzhkevich Yu. et al. // J. Phys. G. 2009. V. 36. P. 025104.
22. Loveland et al. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 064609.
23. Lukyanov S. et al. // Phys. Lett. B. 2009. V. 670. P. 321.
24. Bartlett A. et al. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 015802.
25. Zagrebaev V. et al. // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. P. 035809.