

Элементарная астрофизика и космология

ДЛЯ ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ

Учебный план курса

№ газеты	Лекция
17	Лекция 1. Наш космический дом: Солнце, планеты, Земля
18	Лекция 2. Энергетика звёзд. Галактики, скопления галактик
19	Лекция 3. Эволюция звёзд – от протозвёзд до Сверхновых. Контрольная работа № 1 (срок выполнения – до 15 ноября 2005 г.)
20	Лекция 4. Образование элементов (таблица Менделеева)
21	Лекция 5. Иные миры (экопланеты, проблема SETI)
22	Лекция 6. Космологические модели. Вселенная Большого взрыва. Контрольная работа № 2 (срок выполнения – до 30 декабря 2005 г.)
23	Лекция 7. Эхо из прошлого – реликтовое излучение. Стандартная модель Вселенной
24	Лекция 8. Нерешённые проблемы: чёрные дыры, тёмная материя, тёмная энергия, антропный принцип, барионная асимметрия мира
<p>Итоговая работа. В качестве итоговой работы засчитывается разработка занятий по одной из тем, рассматриваемых в рамках данного курса. На основе этой разработки слушателем должны быть проведены уроки, краткий отчёт об их проведении и справка из учебного заведения (акт о внедрении) должны быть отправлены в Педагогический университет не позднее 28 февраля 2006 г.</p>	

Лекция 4. ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ (таблица Менделеева)

Богат я, казны не считаю,
А всё не скудеет добро.
Я царство моё убираю
В алмазы, жемчуг, серебро.
Н. Некрасов

В настоящее время периодическая система содержит 115 элементов. Из них 23 самых тяжёлых искусственно синтезированы на ускорителях. Известно около 1400 изотопов, из них – 280 стабильных. Откуда такое богатство?

В начале прошлого века была высказана гипотеза, согласно которой все ядра построены из водорода. Когда стало известно, что ядра состоят из нуклонов, гипотеза отошла в прошлое. Но в одном она остаётся верной и сегодня – все ядра действительно возникли из водорода как *исходного материала* эволюции элементов. Они образованы в ядерных реакциях, протекавших в звёздах, что подтверждают сле-

дующие факты:

- спектральный анализ показал, что состав старых звёзд в шаровых скоплениях заметно отличается от среднего по Галактике. Так, доля элементов тяжелее углерода у них примерно в 100 раз меньше. Дело в том, что большинство звёзд – более поздние, возникшие из газа, обогащённого этими элементами, которые появились в результате «ядерной варки» первых звёзд. Старые звёзды менее «загрязнены» продуктами синтеза;

- в спектрах некоторых звёзд наблюдаются линии элементов, отсутствующих на Земле, например, технеция (${}_{61}\text{Tc}$). Причина в том, что все изотопы технеция радиоактивны с временами жизни много меньше возраста Земли (~5 млрд лет), так что они давно распались. Технеций в звёздах может быть только в случае, если он там постоянно образуется.

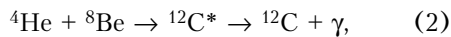
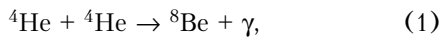
1. Этапы синтеза элементов

Эволюция элементов следует за эволюцией звёзд. По мере истощения лёгкого ядерного горючего и повышения температуры внутри ($T_{\text{ц}}$) в реакции синтеза

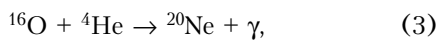
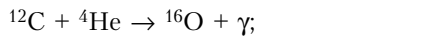
вовлекаются всё более тяжёлые ядра. Происходит естественный процесс «продвижения» по периодической системе элементов.

Звезда Главной последовательности. В реакциях pp - и CN -циклов, которые определяют энергетику звезды ($T_{\text{ц}} = 10^7 - 7 \cdot 10^7$ К), водород перерабатывается в гелий ($A = 4$). Возникают также ядра лёгких элементов (${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}$), но их выход ничтожен, т.к. они быстро сгорают при таких $T_{\text{ц}}$, превращаясь в гелий.

Гелиевая вспышка в красном гиганте. В ядре красного гиганта, когда $T_{\text{ц}}$ достигнет $7 \cdot 10^7$ К, гелий начнёт «сгорать», превращаясь в углерод, кислород, неон. Началом служит тройная гелиевая реакция, протекающая в два этапа:



где C^* – возбуждённое состояние ядра углерода. В результате три ядра гелия объединяются в ${}^{12}\text{C}$. Далее идут реакции:



так что синтезируются ядра с массовыми числами $A = 12-20$. Ряд особенностей оказывает существенное влияние на протекание гелиевой вспышки и дальнейшее заполнение периодической системы.

- *Малое время жизни* ${}^8\text{Be}$. Это ядро нестабильно, за 10^{-16} с оно разваливается на две α -частицы, что должно было бы остановить дальнейший синтез, и мир состоял бы только из водорода и гелия.

- *Уровень 7,65 МэВ в ядре* ${}^{12}\text{C}$. Однако, как мы знаем, в мире много углерода и других элементов. Это значит, что эволюция «сумела» проскочить «узкое место» – нестабильность ${}^8\text{Be}$. Такая возможность появляется, если реакция (2) идёт очень быстро – через ядерный резонанс: ядро ${}^{12}\text{C}$ оказывается на возбуждённом уровне с энергией $W = \Delta M + E$, где $\Delta M = M_{\text{Be}} + M_{\text{He}} - M_{\text{C}} = 7,4$ МэВ, E – «добавка» за счёт кинетической энергии частиц. Хойл, предположив, что реакция (2) имеет резонансный характер, предсказал существование возбуждённого уровня ядра в ${}^{12}\text{C}$ $W \geq 7,4$ МэВ (задолго до исследования спектра возбуждения). Позднее уровень $W = 7,65$ МэВ действительно был обнаружен. Так астрофизика и физика ядра совместно решили трудную задачу, а «нужный» уровень ядра углерода помог обойти «узкое место» синтеза элементов.

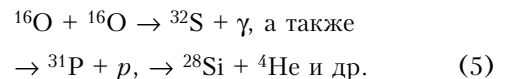
- *Реакция образования ядра* ${}^{16}\text{O}$. В ${}^{16}\text{O}$ «удобного» уровня нет, и реакция (3) протекает сравнительно медленно.

Три указанные случайные особенности приводят к важным следствиям. Благодаря им наш мир богат элементами, а количества углерода и кислорода приблизительно одинаковы, что создает благоприятные условия для образования органических молекул и, в конечном счёте, для возникновения жизни. Вот от чего зависит наблюдаемая картина мира – с обилием атомов, молекул, соединений углерода. Смещение системы уровней ядер С и О всего на 5% катастрофически воздействовало бы на мир, сделав его убогим и безжизненным.

Углеродная и кислородная вспышки. При температуре $2 \cdot 10^8$ К начинает гореть углерод:



в результате чего образуются ядра массой $20-24$. Более высокая температура обеспечивает горение кислорода:



с выходом ядер с $A = 25-32$.

В интервале $T_{\text{ц}} = 2 \cdot 10^8 - 10^9$ К эффективно протекают реакции синтеза более тяжёлых ядер ($A = 36-46$) в результате захвата α -частиц вновь образованными ядрами; α -частицы проникают в активную зону из внешних слоёв или образуются в реакциях фоторасщепления (например, ${}^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow {}^{16}\text{O} + {}^4\text{He}$). Этап быстрый, меньше 10 лет.

Равновесные процессы. Для $T_{\text{ц}} > 4 \cdot 10^9$ К кулоновские барьеры ядер оказываются превзойдёнными, и, следовательно, идут все реакции с положительным выходом энергии. При таких температурах эффективно происходит также фоторасщепление ядер. Вещество находится в состоянии теплового равновесия с излучением: идут равновесные процессы, в результате которых синтезируются все лёгкие и средние ядра до железной группы (Fe, Co, Ni). Равновесные количества ядер определяются в первую очередь их устойчивостью, наибольшей для ядер с заполненными нуклонными оболочками (*магов*), полумагов (заполненные уровни) и близких к ним ядер. Количество ядер определяется также временем протекания равновесных процессов ($\sim 10^4$ с) – короткая переходная фаза от красного гиганта к белому карлику (или Сверхновой).

Термоядерный синтез образует ядра начальной части периодической системы. Они – «зола» звёздных реакторов, которая выносится в космическое пространство при сбросе оболочки красного гиганта и взрыве Сверхновой. В состав звёзд последующих поколений эти элементы войдут наряду с первичным водородом. Планеты почти полностью состоят из «зола». Из неё построены и мы сами. Мы все – звёздные братья.

2. Распространённость (обилие) элементов

Рассмотренные этапы термоядерного синтеза в звёздах позволяют вычислить распространённость элементов (величину η , пропорциональную числу ядер данного элемента). Сведения получены по спектральному анализу Солнца и звёзд, составу солнечного ветра, метеоритов и космических лучей, из данных геологического строения Земли, планет, спутников. Ещё один источник – космическая химия, изучение методом радиоастрономии состава межзвездного газа. К настоящему времени в космосе найдено более 30 типов молекул (от H_2 до C_2H_5OH), по которым можно судить об относительном обилии водорода, углерода, кислорода. Все источники дают в среднем совпадающие результаты, за исключением аномальных случаев, которые вызваны местными условиями. Так, на Земле сравнительно мало водорода и гелия. Это объяснимо – лёгкие газы утеряны Землёй из-за её слабого притяжения. Аномалии могут возникнуть в результате избирательной способности пород концентрировать отдельные элементы, но при усреднении по большим областям местные особенности сглаживаются.

Средняя кривая распространённости элементов приведена на рис. 1 (обилие кремния $\eta = 10^5$). Она указывает на ряд особенностей, которые связаны с происхождением элементов и могут служить критической проверкой: подтверждается ли термоядерный синтез элементов в звёздах?

- **Аномально малое обилие лития, бериллия, бора.** На ядрах Li, Be, B наблюдается резкий провал: меньше на 4 порядка, чем соседних C, N, O, и в 10^8

раз, чем H. Это вполне понятно: Li, Be, B – хорошее термоядерное горючее, сгорают ещё на стадии протозвезды (10^6 – 10^7 К). Трудность не в их малости, а в том, как объяснить, что они всё-таки есть.

- **Относительно большие и равные обилия C и O.** Это прямой результат тройной гелиевой реакции (1, 2) и урвния возбуждения 7,65 МэВ ядра ^{12}C . Кроме того, эти ядра очень устойчивы: ^{16}O – двойной маг (заполнена вторая ядерная оболочка), ^{12}C – двойной полумаг (завершён один уровень второй оболочки).

- **Максимум железной группы.** «Железный максимум» ($A = 54$ – 64) – наиболее сильное подтверждение синтеза в звёздах, поскольку является неизбежным следствием термоядерных экзореакций. Поскольку удельная энергия связи ядер железной группы самая боль-

шая (рис. 2), им обеспечена высокая распространённость. Число элементов с $A > 65$, синтез которых энергетически невыгоден, резко уменьшается.

- **Подавляющее обилие водорода и гелия.** Из этого факта следует, что Вселенная молода, основного строительного элемента – водорода – ещё очень много, нуклеосинтез в самом начале. Возраст Вселенной должен быть одного порядка с возрастом самых старых звёзд ($\sim 10^{10}$ лет).

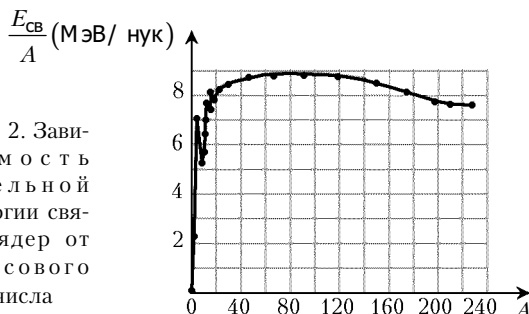


Рис. 2. Зависимость удельной энергии связи ядер от массового числа

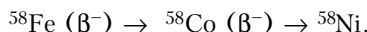
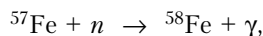
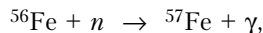
Указанные особенности кривой распространённости элементов до ядер группы железа находят естественное объяснение.

3. Происхождение тяжёлых ядер

Обилие тяжёлых ядер приблизительно постоянно и составляет 10^{-10} от водородного для $A \geq 90$. Столь малое количество могло образоваться в побочных, энергетически невыгодных процессах, протекающих наряду с термоядерным синтезом. Таких процессов известно два, оба связаны с захватом ядрами нейтронов: *s*-процесс (от англ. *slow* – медленный) и *r*-процесс (*rapid* – быстрый). Нейтронный фон всегда сопровождает термоядерный синтез. Реакции с образованием нейтронов идут на всех этапах, например: $^{13}C + ^4He \rightarrow ^{16}O + n$ (горение гелия); $^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{31}S + n$ (кислородная вспышка).

S-процесс

Это реакции последовательного захвата нейтронов ядрами, в результате чего образуются ядра с избытком нейтронов. Когда после нескольких *n*-захватов избыток станет большим, ядро будет радиоактивным и путём бета-распада перейдет в ядро более тяжёлого элемента. В качестве примера покажем *s*-процесс, начиная с железа:



Образованные ядра вновь захватывают нейтроны

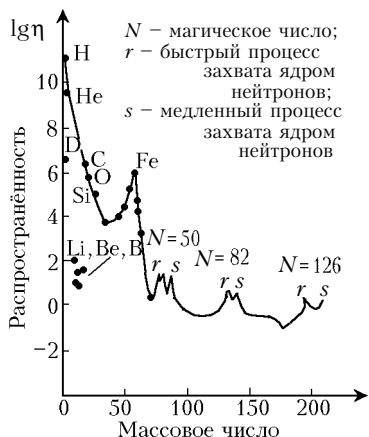


Рис. 1. Распространённость элементов в природе A

и т.д. Процесс повторяется многократно – происходит общее продвижение вещества в сторону элементов с большим атомным номером. *S*-процесс происходит в красных гигантах, где плотность нейтронов составляет $\rho_n \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что определяет время между двумя захватами $t_{\text{зах}} \approx 10^5$ лет.

S-процесс объясняет максимумы на кривой распространённости элементов (*s* и *r* на рис. 1). Рассмотрим ядра с массами *A* и *A* – 1 в потоке нейтронов. Обозначим через n_A, n_{A-1} их числа, через σ – нейтронные сечения. Можно написать следующее уравнение баланса: $dn_A/dt = \rho_n \sigma_{A-1} n_{A-1} - \rho_n \sigma_A n_A$, которое в стационарных условиях ($dn_A/dt = 0$) переходит в $\sigma_{A-1} n_{A-1} = \sigma_A n_A$. Так как число ядер пропорционально распространённости η , в общем случае имеем $\sigma \eta = \text{const}$, из чего следует, что большее обилие будет наблюдаться для ядер, у которых меньше сечение захвата нейтронов. Самые малые нейтронные сечения – у магических ядер. Поэтому распространённости элементов с такими ядрами – самые высокие (максимумы на магических числах $N = 50, 82, 126$).

Однако не все изотопы тяжёлых элементов могут быть образованы в *s*-процессе. Синтезу тяжёлых изотопов какого-либо элемента препятствует β -активность предшествующих изотопов. Пока время жизни ядра τ_β больше среднего времени захвата нейтрона $t_{\text{зах}}$, более тяжёлые изотопы образуются. Если $\tau_\beta < t_{\text{зах}}$, синтез изотопов данного элемента прекращается, т.к. раньше, чем будет захвачен нейтрон, ядро, испытывающее β -распад, превратится в ядро следующего элемента. Более тяжёлые изотопы данного элемента, если они существуют, оказываются обойдёнными. На рис. 3 показан путь *s*-процесса от кадмия до сурьмы. Обойдённые изотопы здесь – ^{116}Cd , ^{122}Sn , ^{124}Sn . Число обойдённых ядер возрастает с увеличением их заряда. Дальше висмута ($Z = 83$) *s*-процесс становится невозможным, т.к. все изотопы следующих элементов (полония, астата и др.) радиоактивны с периодами распада $\tau_\alpha \ll t_{\text{зах}}$. Ядра с $A \geq 210$ не могли образоваться в *s*-процессе.

R-процесс

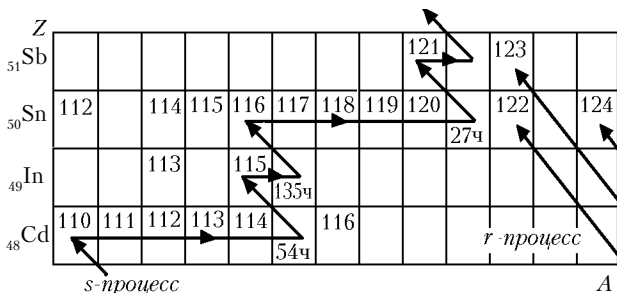
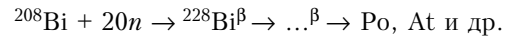


Рис. 3. Образование в *s*-процессе изотопов ядер ($Z = 48 - 51$)

Обойдённые ядра могли бы возникнуть, если последовательный захват нейтронов происходил бы достаточно быстро ($t_{\text{зах}} \ll \tau_\alpha$, отсюда название *быстрый*). Именно так обстоит дело во вспышке СН, когда плотность нейтронов на короткое время возрастает до 10^{20} –

10^{30} см^{-3} . Ядра успевают «перегрузиться» нейтронами настолько, что далеко выходят за полосу стабильности. Последующие β -распады возвращают их в полосу стабильности, но уже с намного большими зарядами (ΔZ равно числу β -переходов). На рис. 3 стрелками показаны треки *r*-процесса, приводящие к образованию обойдённых изотопов ^{116}Cd , ^{122}Sn , ^{124}Sn . Таким же путём преодолевается и «висмутовый барьер»:



R-процесс экспериментально проверен. В продуктах атомного взрыва были открыты новые элементы – эйнштейний (^{253}Es) и фермий (^{255}Fm), которые образовались из ^{238}U путём захвата 15 и 17 нейтронов с последующими β -распадами.

Согласно расчёту, при вспышке Сверхновой *r*-процесс образует далёкие трансураны вплоть до массовых чисел $A \approx 300$. Подтверждением *r*-процесса могут служить кривые блеска СНИ, затухание которых происходит с характерным временем $\tau = 30 \div 100$ дней, что совпадает со временем жизни известных трансурановых ядер.

R-процесс объясняет также вторые максимумы на кривой распространённости элементов (рис. 1): они связаны, как и в *s*-процессе, с магическим числом нейтронов, но из-за массового захвата нейтронов наблюдаются при меньших *A*.

Дополнительные процессы

- Есть небольшая группа дважды обойдённых изотопов – ядер с избытком протонов, которые не могут возникнуть ни в *s*-, ни в *r*-процессах. Как правило, на пути к такому ядру «встаёт» стабильный изотоп. Для объяснения дважды обойдённых ядер вводится *p*-процесс, суть которого в том, что при температуре $2 \cdot 10^9$ К протекают реакции с ускоренными протонами типа (p, γ) , (p, n) , $(p, 2n)$, приводящие к увеличению числа протонов и уменьшению нейтронов в ядрах. Однако механизм ускорения частиц в звёздах точно не известен, что вносит неопределённость в расчёты. Более надёжные результаты даёт *v*-процесс, также приводящий к образованию дважды обойдённых ядер. Нейтрино, генерируемые вспышкой Сверхновой, вызывают реакции $(A, Z) + \nu \rightarrow (A, Z + 1) + e^-$, приводящие к избытку протонов.

- Для объяснения малого количества Li, Be, B вводится *x*-процесс, принимающий в расчёт реакции фрагментации ядер с выносом продуктов, среди которых есть и рассматриваемые ядра, из центральной зоны звезды, где они неминуемо сгорели бы.

Подведём итоги. Качественно вся система элементов – вплоть до далёких трансуранов (в том числе ещё неоткрытых) – находит разумное объяснение в картине термоядерного звёздного горения, сопровождающегося рядом побочных процессов. Есть и количественное согласие. Расчётные и экспериментально наблюдаемые обилия ядер с $A \approx 200$ согласуются в пределах 40%.

4. Загадка гелия

Как ни странно, самым труднообъяснимым элементом оказался гелий – второй по распространённости элемент в природе, весовая доля которого составляет ~30%. Наблюдаемое обилие гелия нельзя объяснить в рассмотренной модели звёздного происхождения элементов. Гелий – отличное ядерное горючее и исходный материал для синтеза остальных элементов. По этой причине он эффективно сгорает в звёздах. Наблюдаемое обилие гелия превосходит даже то, которое могло бы образоваться в звёздах за все время существования Галактики (10^{10} лет) без учёта его сгорания.

Космологический синтез гелия. Сейчас установлено, что гелий в основном имеет космологическое происхождение. Согласно модели Горячей Вселенной он был синтезирован на ранней, дозвёздной стадии развития, когда вещество было очень плотным и горячим и в нём могли протекать термоядерные реакции.

Историческая справка. Модель Горячей Вселенной (ГВ) – вариант нестационарной космологии мира, предложенный А.Фридманом (1922 г.). Фридман не принимал во внимание излучение и считал мир состоящим только из «холодного» вещества. В 1946 г. Г.Гамов высказал предположение, что вначале Вселенная была не только плотной, как следовало из прежних решений, но и очень горячей. Это предположение получило название *теории Большого взрыва (Big Bang)*. Развивая эту идею, Р.Альфер и Г.Гамов (в авторах значился еще Г.Бете, но исключительно для созвучия, – $\alpha\beta\gamma$ -теория) создали модель ГВ (1948 г.), согласно которой электромагнитное излучение доминировало в ранней Вселенной и определяло её развитие. При высокой температуре должны были протекать реакции синтеза элементов. Авторы пытались таким путём объяснить образование всех элементов (звёздный синтез ещё не был развит), но этот замысел не увенчался успехом. Вычисленная ими современная температура излучения, остывшего в результате расширения Вселенной, оказалась очень большой ($T = 25$ К), что противоречило наблюдениям. Правда, сам Гамов в отдельной статье оценил её в 7 К, а Э.Ферми, как выяснилось позднее, в отчёте, засекреченном в годы «холодной войны», довёл до 5 К. Долгое время модель ГВ считалась несостоятельной и была почти забыта. В 1964 г. Ф.Хойл и Д.Тейлор «возродили» её, но уже для объяснения происхождения только гелия. Идею о том, что во Вселенной должно существовать универсальное поле теплового излучения, высказывали также Р.Дикке в США, И.Д.Новиков и А.Г.Дорошкевич в СССР. Наконец, в 1965 г. реальность ГВ была экспериментально доказана. Это стало ясно после открытия А.Пензиасом и Р.Вильсоном изотропного микроволнового фоново-

го излучения температурой $T \approx 3$ К. В том же номере «*Physical Review*», где появилась их статья, Дикке объяснил его как тепловое излучение Вселенной – отголосок бесконечно горячего Большого взрыва. И.С.Шкловский окрестил универсальный микроволновый фон *реликтовым излучением*.

5. Модель Горячей Вселенной

Церковь обещает грешнику ад в будущем, а космология доказывает, что ад был в прошлом.
Я.Б.Зельдович

Вселенная в целом однородна и изотропна. Кажется, такое допущение не соответствует действительности. Однако, если рассматривать мир в масштабе, намного большем, чем скопления галактик, он выглядит столь же однородным и изотропным, как газ, состоящий из атомов и молекул. Наибольший размер неоднородностей в мире – это радиус сверхскоплений галактик (~20 Мпк). Более крупных образований не существует. Начиная с $r \approx 100$ Мпк галактики и кластеры галактик распределены равномерно, а это составляет только 10^{-2} видимого размера Вселенной. Вселенная в высокой степени однородна и одинакова по всем направлениям.

Галактики и звёзды образовались сравнительно недавно в результате местных уплотнений вещества. Изотропия на небе и равномерная плотность галактик в пространстве свидетельствуют о том, что вещество было очень однородно. Однородность и изотропия Вселенной отражают важный космологический принцип: Вселенная не имеет выделенного центра и выглядит одинаково из любой точки.

Модель ГВ внесла ещё один постулат: наряду с веществом в мире существует тепловое излучение, характеризуемое чернотельным (планковским) спектром температурой T . При условии доминирования излучения над веществом: $\epsilon_{\text{из}} \gg \epsilon_{\text{в}} = \rho c^2$, где ϵ – плотности энергии (излучения и вещества), ρ – плотность вещества, – нестационарное решение космологического уравнения Эйнштейна в ОТО приводит к следующим временным соотношениям для масштабного фактора r (пространственная характеристика) и температуры поля излучения T (энергетическая характеристика): $r = C t^{1/2}$; $C = \text{const}$; $T \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ К}/t^{1/2}$, где t – время от начала Большого взрыва.

Вселенная расширяется, температура поля излучения убывает.

Равновесие излучения и частиц вещества означает, что кванты излучения настолько энергичны, что могут рождать пары частица–античастица. Идёт также противоположный процесс: аннигиляция частиц–античастиц при встрече, так что сохраняется их равновесная концентрация. Но энергия фотонов со временем убывает, что выводит частицы из равновесия, начиная с самых тяжёлых и кончая частицами малых масс. В результате состав вещества претерпевает из-

менения, которые определяют следующие этапы (эры) её развития (рис. 4):

- Адронная эра (10^{-44} – 10^{-4} с): плотность веще-

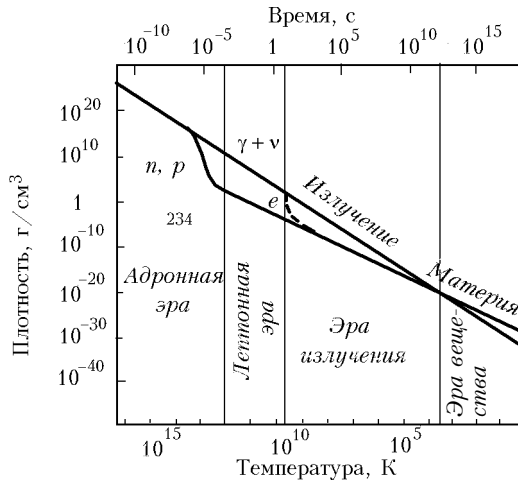


Рис. 4. Временная зависимость вещества и излучения в модели Горячей Вселенной

ства, очень высокая вначале, уменьшается до ядерной (10^{14} г/см³), температура убывает до 10^{12} К. Из равновесия с излучением в это время выходят все адроны (частицы сильного взаимодействия). Последними из тесной связи с излучением уходят самые лёгкие из них — пионы (масса 140 МэВ). Ещё раньше перестают быть связанными с излучением нуклоны — протоны и нейтроны (масса 940 МэВ). Более лёгкие частицы — лептоны (нейтрино, электроны, позитроны, мюоны, не обладающие сильным взаимодействием) остаются «пленниками» поля излучения.

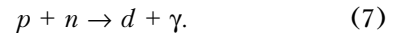
- Лептонная эра (10^{-4} – 10 с): плотность вещества падает до 10^4 г/см³, температура опускается до 10^{10} К. Эра заканчивается, когда из равновесия с излучением выпадают самые лёгкие заряженные лептоны (электрон и позитрон, масса 0,5 МэВ). Нейтрино, практически безмассовая частица, продолжает быть связанной с излучением.

- Эра излучения (10 с– 10^6 лет): излучение всё ещё доминирует ($\epsilon_{\text{из}} > \epsilon_{\text{в}}$), вещество — в виде однородной горячей плазмы, заряженные частицы которой взаимодействуют с излучением, препятствуя гравитационному сжатию вещества. Эра завершается двумя почти одновременными событиями: 1) рекомбинацией зарядов плазмы, в результате чего вещество становится нейтральным, почти не взаимодействующим с фотонами, которые свободно «уходят» и не могут теперь остановить гравитационное сжатие (появляется предпосылка роста структур); 2) наступлением фазы доминирования вещества над излучением ($\epsilon_{\text{в}} > \epsilon_{\text{из}}$). Плотность вещества в конце эры составляет 10^{-21} г/см³, характерная энергия (вместо массы) — потенциал ионизации водорода (~10 эВ).

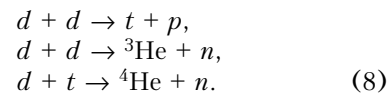
- Эра вещества (10^6 – 10^{10} лет): вещество, освобо-

дившись от опеки излучения, может соединяться в молекулы, принимать разные фазовые состояния (газ, жидкость, твёрдое тело), образовывать нанотрубки, фуллерены, кристаллы и т.д. Наступает «век химии». На первичных флуктуациях плотности начинается неуправляемый рост структур — газовых облаков, звёзд, галактик, планет — гигантская стройка материального мира. Вселенная продолжает расширяться, к настоящему времени её средняя плотность дошла до 10^{-29} г/см³, а энергия «остывших» реликтовых фотонов — до $\sim 10^{-3}$ эВ (радио- и субмиллиметровые волны), что соответствует $T = 2,7$ К.

В этом меняющемся мире выделяется (по температуре и плотности) временной интервал (~1 земной день), когда температура была достаточно высокой, чтобы в нём протекали термоядерные реакции. Он наступил в конце лептонной эры ($T = 2 \cdot 10^{10}$ К). Начало задали реакция соединения протона и нейтрона с образованием дейтона (тяжёлого изотопа водорода):



При более высокой температуре реакция (7) идёт в обе стороны (\rightarrow и \leftarrow), т.к. энергия фотонов достаточно велика, чтобы расщепить дейтон, энергия связи которого ~2 МэВ. Для $T < 2 \cdot 10^{10}$ К реакция идёт в одну сторону, число дейтонов быстро растёт, и термоядерный синтез развивается, как при взрыве водородной бомбы:



Количество гелия (${}^4\text{He}$) определяется рядом обстоятельств:

1. *Соотношение протонов и нейтронов к этому моменту.* Нейтрон тяжелее протона на $\Delta m = 1,3$ МэВ. Эта небольшая разница в массе не имела никакого значения в адронную эру ($T > 10^{12}$ К), и они были в равном числе. Но в лептонную эру, когда температура упала, число нейтронов стало убывать в соответствии со статистическим фактором:

$$\frac{N_n}{N_p} \propto \exp\left(-\frac{\Delta m}{kT}\right), \quad (9)$$

где k — постоянная Больцмана. Формула (9) справедлива при условии постоянного перехода нуклонов друг в друга ($n \rightleftharpoons p$), что осуществляется реакциями нуклонов с лептонами (e^- , e^+ , ν , анти- ν).

2. *В конце лептонной эры* из-за расширения Вселенной плотность вещества упала настолько, что лептоны перестали взаимодействовать с нуклонами (мир для них стал прозрачным). Соотношение нуклонов больше не изменялось (*замороженное обилие*) и при вступлении их в реакции синтеза (7, 8) составляло: доля нейтронов $\delta_n = 0,16$, доля протонов $\delta_p = 0,84$.

3. *Нейтрон нестабилен* (по причине всё той же Δm), он испытывает бета-распад: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ (среднее время $\tau_n = 900$ с). Для времени $t \geq \tau_n$ надо учитывать распад нейтрона.

Учёт указанных факторов позволяет определить количество образованного гелия. Если τ_n много меньше времени реакций синтеза $t_{\text{син}}$, гелий синтезироваться не будет, его доля $\delta_{\text{He}} = 0$. Напротив, если распад нейтрона не играет роли ($\tau_n \gg t_{\text{син}}$), все нейтроны свяжутся с протонами и доля гелия составит $\delta_{\text{He}} = 2\delta_n = 0,32$, поскольку в ${}^4\text{He}$ поровну нейтронов и протонов ($2n + 2p$). Точный расчёт показал, что $\delta_{\text{He}} = 0,27$ при средней плотности вещества в наше время 10^{-29} г/см³. Кроме основного продукта синтеза ${}^4\text{He}$, останется немного дейтерия и гелия-3, не полностью сгоревших в реакциях (8): $\delta_d \approx 10^{-5}$, $\delta({}^3\text{He}) \approx 10^{-6}$, а также очень немного ядер лития ($\sim 10^{-12}$). Для синтеза более тяжёлых ядер (как в звёздах) просто не хватило времени – Вселенная слишком быстро остывала.

Космологический синтез гелия – веский аргумент в пользу модели ГВ и второе (после открытия разлёта галактик) свидетельство нестационарной картины мира. Горячая Вселенная – признанный, очень важный начальный этап развития.

Литература

Пеншонжкевич Ю.Э. Ядерная астрофизика. – Соросовский образовательный журнал, 1998, № 10.

Васильев А.Н. Эволюция Вселенной. – Энциклопедия «Современное естествознание», 2000, Т. 4.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Перечислите этапы термоядерного синтеза элементов в звёздах.
2. Что такое «гелиевая вспышка»?
3. Почему распространённость элементов резко падает за «группой железа» (Fe, Ni, Co)?
4. Какие процессы в звёздах создают тяжёлые элементы ($A \geq 65$)?
5. Каким образом было образовано наблюдаемое обилие гелия (~ 30%)?
6. Что подтверждает модель Горячей Вселенной?

Термины, единицы физических величин

Адроны – элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии; имеют размер; состоят из точечных кварков; две группы адронов – барионы (3 кварка) и мезоны (кварк и антикварк)

Бета-распад – спонтанное испускание ядром пары электрон–антинейтрино (β^- -распад) или позитрон–нейтрино (β^+ -распад).

Возбуждённое состояние ядра – нахождение ядра на одном из дискретных уровней с энергией возбуждения от кило- до мегаэлектронвольт.

Килопарсек (кпк) – расстояние, равное $3 \cdot 10^{21}$ см = $2,6 \cdot 10^3$ св. лет.

Кулоновский барьер – отталкивающий потенциал, препятствующий сближению ядер при их столкновении, уменьшает вероятность ядерной реакции.

Лептоны – элементарные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии; есть 6 лептонов (электрон, мюон, таун с зарядами $-e$ и 3 нейтрино, «приписанных» к ним) и 6 антилептонов (3 с зарядами $+e$, 3 антинейтрино); всё это точечные частицы.

Магические ядра (маги) – ядра с заполненными оболочками протонов (нейтронов), магические числа – 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (184, расчёт для нейтронов); маги обладают большой устойчивостью и распространённостью.

Нуклеосинтез – процесс объединения нуклонов (протонов, нейтронов) в ядра, происходит в звёздах при высоких температурах.

ОТО – общая теория относительности, современная теория гравитации, подтверждённая экспериментом.

Сверхновая (СН) – взрыв звезды в результате гравитационного коллапса, наступающего после истощения её термоядерных запасов; СН – вспышка СН в двойной звёздной системе.

Сечение – эффективная площадь ядра (частицы), попадание в которую вызывает изучаемую реакцию, выражается в барнах (б), $1 \text{ б} = 10^{-24}$ см².

Экзорекция – ядерная реакция с выделением энергии, энергетический источник в звёздных и земных реакторах.

Эндореакция – ядерная реакция, для протекания которой нужно затратить энергию; используется для получения новых (более тяжёлых) частиц и ядер; инструмент современной «алхимии».