

Проф. **Б.И.ЛУЧКОВ,**  
МИФИ, г. Москва

# Элементарная астрофизика и космология

ДЛЯ ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ

Учебный план курса

№ газеты	Лекция
17	<b>Лекция 1.</b> Наш космический дом: Солнце, планеты, Земля
18	<b>Лекция 2.</b> Энергетика звёзд. Галактики, скопления галактик
19	<b>Лекция 3.</b> Эволюция звёзд – от газовых туманностей до вспышек Сверхновых <b>Контрольная работа № 1</b> (срок выполнения – до 15 ноября 2005 г.)
20	<b>Лекция 4.</b> Образование элементов (таблица Менделеева)
21	<b>Лекция 5.</b> Иные миры (экзопланеты, проблема <i>SETI</i> )
22	<b>Лекция 6.</b> Космологические модели. Вселенная Большого взрыва <b>Контрольная работа № 2</b> (срок выполнения – до 15 декабря 2005 г.)
23	<b>Лекция 7.</b> Эхо из прошлого – реликтовое излучение. Стандартная модель Вселенной
24	<b>Лекция 8.</b> Нерешённые проблемы: чёрные дыры, тёмная материя, тёмная энергия, антропный принцип, барионная асимметрия мира

**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.

## ЛЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГЕТИКА ЗВЁЗД. ГАЛАКТИКИ, СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

Послушайте!  
Ведь если звёзды зажигают –  
Значит, это кому-нибудь нужно?  
*В.Маяковский*

Великие астрономы прошлого не задумывались, за счёт чего светят звёзды. Вопрос исторически «созрел», только когда был открыт закон сохранения и превращения энергии, к середине XIX в., после введения *Юлиусом Майером*, *Германом Гельмгольцем* и *Джеймсом Джоулем* – двумя дипломированными медиками и одним пивоваром (но все они были выдающимися физиками), – этого универсального закона природы. Было осознано, что физические явления не происхо-

дят «задаром». Для каждого требуется свой источник энергии, и понять природу явления – значит найти его энергетический источник. Обратимся к Солнцу, чьи характеристики (размер, масса, температура, светимость) хорошо известны.

### 1. Источники солнечной энергии

За счёт чего нагреваются до высоких температур солнечные недра и миллиарды лет испускается огромный световой поток? Первыми откликнулись авторы великого открытия.

*Ю.Майер*, первооткрыватель закона сохранения энергии в механических и тепловых процессах, считал, что Солнце и звёзды разогреваются в результате падения на них комет. В его время такая гипотеза была возможной, но позднее, когда стала точно известна частота столкновений комет с Солнцем, этот источник оказался слишком незначительным для объяснения солнечной светимости.

*Г.Гельмгольц* и *У.Томсон* предполагали, что звёзды разогреваются и излучают вследствие постоянного

Приносим извинения читателям: в № 17/05 неверно указаны название курса, а также срок выполнения контрольной работы № 2 – она должна быть после лекции 6. – *Ред.*

гравитационного сжатия. Эта очевидная модель встретила, однако, с серьёзной трудностью, видной на примере Солнца. Энергия, выделившаяся в результате сжатия первичного облака до радиуса Солнца, очевидно равна гравитационному потенциалу  $V = GM_C^2/R_C$ , где  $G$  – константа гравитации,  $M_C$  и  $R_C$  – соответственно масса и радиус Солнца. Так как светимость  $L$  – величина постоянная (как утверждает геология), можно определить «гравитационное время» Солнца:  $t_{\text{гр}} = V/L = 30$  млн лет, что намного меньше его истинного возраста (4,7 млрд лет), определённого методом радиоактивного анализа (см. ниже раздел «Возраст Солнца»). Выходит, одного гравитационного источника недостаточно. Его роль очень важна при начальном разогреве облака, что можно показать с помощью теоремы вириала (для замкнутой системы):

$$E_p + 2E_k = 0, \quad (1)$$

где  $E_p$ ,  $E_k$  – потенциальная и кинетическая энергии звезды. Полагая для простоты, что звезда состоит из водородной плазмы и что  $E_k = \frac{3}{2}kT \cdot 2N$ ,  $N = M_C/m_p$  ( $k$  – константа Больцмана,  $m_p$  – масса протона),  $E_p = \frac{GM_C^2}{R_C}$ , из (1) находим температуру

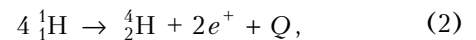
$T = 4 \cdot 10^6$  К, что близко к средней температуре Солнца. Из теоремы (1) следует и другой важный факт: излучая, звезда сжимается и в результате ещё больше нагревается, что соответствует ожидаемой эволюции. И всё же, кроме гравитационного источника, ответственного за первичный разогрев, должен существовать основной механизм, «включающийся» при высокой температуре, который и обеспечивает долгую жизнь звёзд.

*А. Эддингтон* и *Д. Джинс*, каждый по-своему, искали главный источник: первый – в реакциях аннигиляции вещества, в которых масса превращается в энергию (в соответствии с соотношением  $E = mc^2$ ), второй – в реакциях радиоактивного распада. Аннигиляционный источник даёт звезде огромный запас энергии, снимая, таким образом, противоречие с возрастом. Однако реакции аннигиляции, которые позднее были открыты, происходят между частицами и античастицами, а солнечная плазма, состоящая только из частиц (протоны, электроны), аннигилировать «не имеет права». И всё же Эддингтон угадал главное – температурную зависимость источника звёздной энергии – и по праву считается идейным отцом звёздного термоядерного синтеза. Что касается «распадного» механизма, то скоро стало ясно, что он недостаточен. За счёт энергии, выделяемой в радиоактивных распадах, внутренние части планет нагреваются до тысяч градусов (пример – расплавленное ядро Земли), эта энергия – явно не звёздного масштаба с их «адскими топками» ( $10^6$ – $10^9$  К).

Молодой *Л. Д. Ландау* в 1937 г. предложил идею аккреционного источника: каждая звезда имеет плотную нейтронную сердцевину, падение вещества (аккреция) на которую является эффективной тепловой машиной, преобразующей в энергию ~30% массы. Его статья в журнале «*Nature*» вызвала огромный интерес. Аккреционный механизм снимал все трудности звёздной энергетики, но всё же оказался экзотическим и уступил место более простому термоядерному источнику. В жизни учёного, который был арестован (нередкое событие для 30-х гг.), статья сыграла важную роль – она спасла Ландау жизнь.

Ни одна из предложенных гипотез не справилась с задачей. Но верная идея термоядерного источника, высказанная в 1929 г., подхваченная и развитая многими физиками (*Г. Гамов*, *Э. Теллер*, *К. Вейцзеккер* и др.), нашла окончательное выражение в блестящих работах *Х. Бете*.

**Термоядерные реакции.** Первым указанием на реакции синтеза, в которых выделяется энергия, было то, что масса четырёх ядер водорода  $4\text{H}$  больше суммы масс ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$  и двух позитронов  $e^+$ , так что возможен процесс (согласно законам сохранения энергии и электрического заряда):

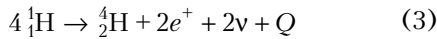


где  $Q = 4m_p - m_{\text{He}} - 2m_e = 26,8$  МэВ – выделяющаяся энергия,  $m_p$ ,  $m_{\text{He}}$ ,  $m_e$  – массы протона, гелия и позитрона. Удельное энерговыделение (калорийность) процесса (2) очень высокое – почти на порядок больше, чем в реакции деления урана в атомном реакторе. По сравнению с органическим (нефть, газ) ядерное водородное топливо калорийнее в миллионы раз. Только, чтобы «зажечь» его, нужна очень высокая температура (~ $10^7$  К), которая заставляет ядра водорода (протоны) быстро двигаться и сближаться до расстояний действия ядерных сил. Отсюда название реакций – термоядерные. Энергия выделяется за счёт перестройки ядер: вместо свободных протонов образуются ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов, и часть их массы (около 1%) высвобождается в виде кинетической энергии продуктов реакции.

Как осуществить реакцию (2)? Радиус действия ядерных сил очень мал ( $2 \cdot 10^{-13}$  см), и вероятность нахождения четырёх протонов в столь малом объёме ничтожна даже в центрах звёзд. Сближаться до столь малых расстояний, преодолевая кулоновское отталкивание, частицы могут лишь попарно за счёт своей большой кинетической энергии. Стало понятным, почему главный источник «включается» при высокой температуре, а при низкой «работает» только гравитационный. Решение нашёл *Х. Бете*. В работах 1938–1939 гг. он (с соавторами) предложил два термоядерных цикла – протон-протонный (*pp*) и углеродно-

азотный (CN) – и загадка источника звёздной энергии была решена.

**pp-Цикл.** Основная ветвь pp-цикла состоит из трёх последовательных реакций (рис. 1). Первая реакция – образование дейтона (тяжёлого изотопа водорода)  ${}^2\text{H}$  при столкновении двух протонов – главное и самое трудное звено. Она идёт с малой вероятностью: каждый протон вступает в эту реакцию в среднем за  $10^{10}$  лет. Только благодаря их огромному числу ( $10^{57}$ ) «узкое место» цикла преодолевается. Но как только возник дейтон, вторая и третья реакции идут без особых затруднений (за времена 10 с и  $10^6$  лет соответственно). Подводя итог, для чего надо избавиться от промежуточных частиц ( ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$ ), получаем:



(энергия гамма-квантов входит в  $Q$ ). Процесс (3) – это тот же процесс (2), но исправленный на закон сохранения лептонного заряда: лептоны всегда рождаются парами (электрон–антинейтрино, позитрон–нейтрино). Так как масса нейтрино крайне мала (менее  $1\ \text{эВ}/c^2$ ),  $Q$  не изменяется. В физическом плане добавление  $\nu$  крайне важно – Солнце должно испускать не только световой, но и нейтринный потоки.

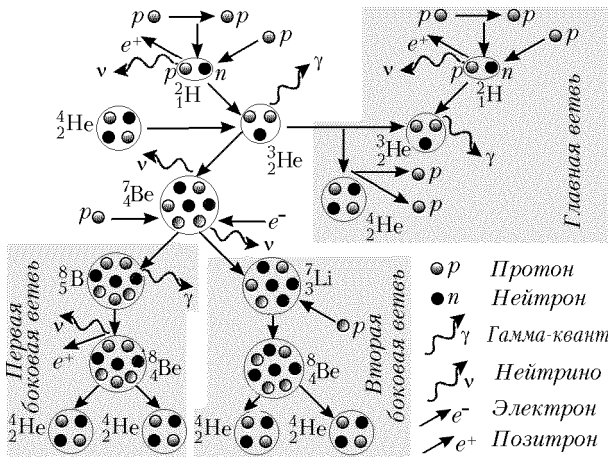


Рис. 1. Схема протон-протонного (pp-) цикла

Кроме главной ветви pp-цикла есть две побочные, вероятность которых в сотни раз меньше. В этих реакциях образуются изотопы лития ( ${}^7_3\text{Li}$ ), бериллия ( ${}^8_4\text{Be}$ ), бора ( ${}^8_5\text{B}$ ). Нейтрино в побочных ветвях более энергичные, особенно от распада  ${}^8_5\text{B}$  (до 14 МэВ). Нейтрино практически не взаимодействуют с веществом и уносят из звезды свою энергию, что приводит к меньшей величине  $Q$ .

**CN-Цикл.** Процесс (3) можно реализовать также на ядрах C, N, O посредством реакций синтеза и радиоактивного распада (рис. 2). Ядро  ${}^{12}_6\text{C}$ , с которого начинается и которым заканчивается цикл, служит катализатором.

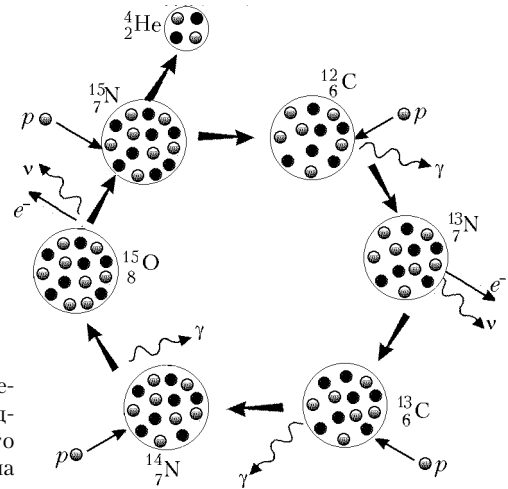


Рис. 2. Схема углеродно-азотного (CN-) цикла

Итог CN-цикла – тот же процесс (3), но с другим энергетическим спектром нейтрино. Реакции CN-цикла идут при более высоких температурах, чем реакции pp-цикла. Разные звезды «выбирают» наиболее удобный для них термоядерный путь. Так, на Солнце 95% энергии вырабатывает pp-цикл и только 5% – CN-цикл. В более массивном и горячем Сириусе (голубой гигант) CN-цикл даёт все 100% звёздной энергии.

В 1967 г. Х.Бете получил Нобелевскую премию «за вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, относящиеся к источникам энергии звезд».

**Доказательство термоядерного источника.** Получены веские свидетельства в пользу звёздного «термояда». Он нашёл применение (и тем самым подтверждение) в расчётах звёздных моделей. Принимая во внимание гидростатическую и тепловую устойчивость звёзд, а также уравнения переноса энергии, оказалось возможным заглянуть в звёздные недра. Созданы модели звёзд всех классов – от молодых, как Солнце, живущих за счёт «горения» водорода, до старых, перешедших на гелиевое, углеродное и более тяжёлое ядерное горючее (красные гиганты) и даже исчерпавших все топливные запасы (белые карлики, нейтронные звёзды).

**Стандартная модель (СМ) Солнца.** Согласно СМ, Солнце состоит из трёх зон, отличающихся температурой, плотностью и процессом переноса энергии (рис. 3). Центральная зона (ядро в пределах  $0,25 R_C$ ) – наиболее плотная и нагретая часть звезды ( $150\ \text{г}/\text{см}^3$ ,

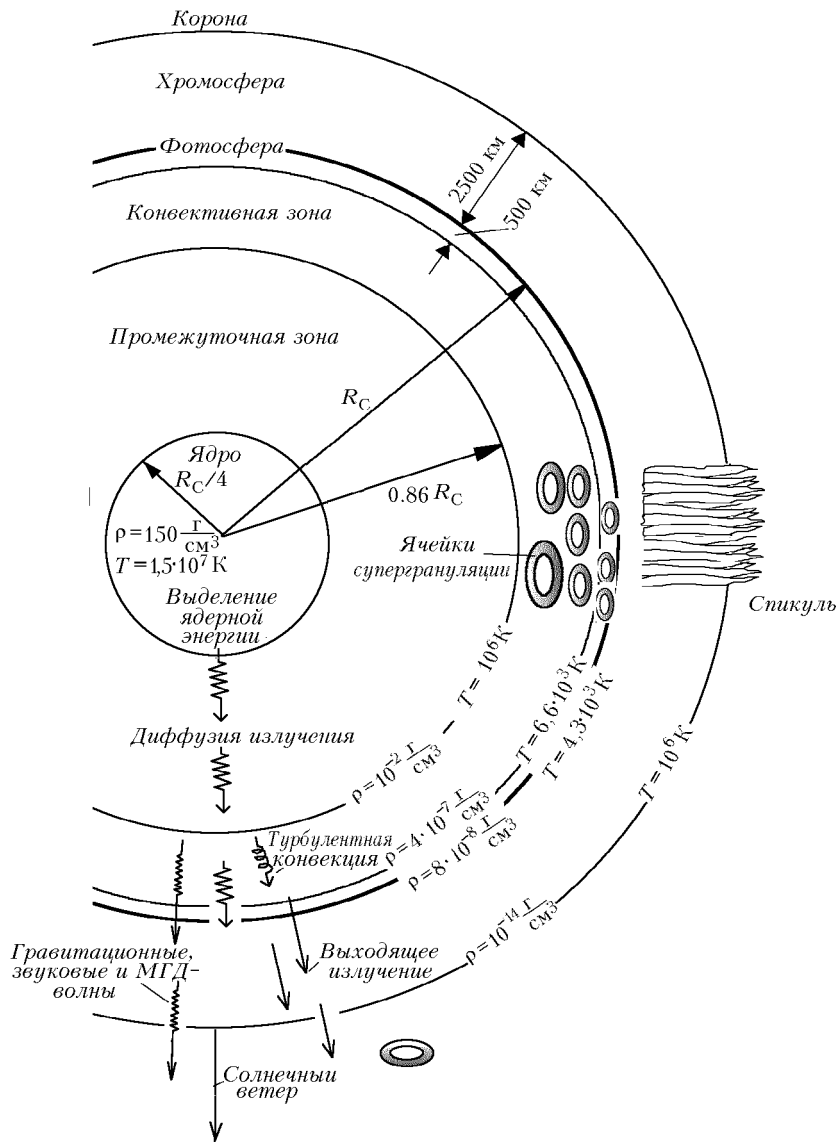


Рис. 3. Строение Солнца согласно Стандартной Модели

$15 \cdot 10^7$  К). Передача тепла от центра к границе зоны происходит за счёт слабой конвекции. Это зона термоядерного реактора, где в реакциях  $pp$ - и  $CN$ -циклов выделяется энергия, передающаяся затем через всю звезду и излучаемая в виде светового потока. Температура постепенно убывает по радиусу, в результате чего уже в следующей зоне, промежуточной (статической радиационной), температура падает до  $10^6$  К, что недостаточно для ядерного горения. Тепло в этой зоне передаётся за счёт процесса многократного поглощения и излучения атомами рентгеновских квантов. Происходит медленная (миллионы лет) диффузия теплового потока, когда он, остывая, доходит до внешней границы радиационной зоны, которая находится на радиусе  $\sim 0,86R_C$ . Здесь механизм передачи энергии меняется в пользу более эффективного конвективного переноса. Это – конвективная зона с бурлящей горячей плазмой, вырывающейся

на фотосферу. По СМ, Солнце имеет сильную концентрацию к центру массы и температуры. Химический состав одинаков всюду за исключением центральной зоны, где доля гелия выше.

СМ даёт внутреннее строение Солнца с высокой точностью, несмотря на упрощения: звезда считается сферически симметричной, без вращения и магнитного поля. В результате получают радиальные профили плотности, температуры и состава, знание которых позволяет вычислить внешние проявления светила. Оптическая светимость, масса, радиус закладываются в расчёт как граничные условия. Новое, что вытекает из модели, – поток солнечных нейтрино. Его измерение – прямая проверка истинности термоядерного источника.

**Солнечные нейтрино.** Солнце находится от нас на расстоянии  $R = 1$  а.е., являясь единственной звездой, стационарный поток нейтрино от которой доступен измерению. Поток нейтрино от других звёзд крайне малы (из-за фактора  $1/r^2$ ). Поток солнечных нейтрино легко оценить. На каждую порцию  $Q = 26,8$  МэВ солнечного излучения, выражаемого светимостью  $L$ , приходятся два нейтрино. Поток

на Земле составит  $I_\nu = \frac{2L}{4\pi R^2 Q} = 7 \cdot 10^{10}$   $\nu / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$ .

Точный расчёт потока и энергетического спектра нейтрино учитывает профили температуры и плотности, даваемые СМ. Знание энергий нейтрино очень важно, т.к. эффективность их регистрации зависит от энергии и больше для нейтрино высоких энергий (более 1 МэВ).

30 лет измерений в нескольких уникальных экспериментах достоверно установили поток солнечных нейтрино и доказали термоядерную природу звёздной энергии. Но, как часто бывает в крупных экспериментах, было обнаружено новое явление – измеренный поток оказался заметно меньше, чем давали расчёты по СМ. Возникла «проблема нейтринного дефицита». Почему



детектор на Земле регистрирует меньший поток, чем испускаемый в центре Солнца?

**Проблема солнечных нейтрино.** К настоящему времени выполнены четыре эксперимента по солнечным нейтрино: пионерский эксперимент *Homestake* (Р. Дэвис, США), а также *Kamiokande* (Япония), *SAGE* (Россия–США) и *Gallex* (Италия–Германия). Ведутся эксперименты на детекторах *Superkamiokande* (Япония) и *Sudbury* (Канада–США) (рис. 4). Каждый уникален и очень сложен, проводится в глубокой шахте или туннеле под горой, чтобы уменьшить фон от космических лучей, и продолжается годами. Детектор нейтрино представляет собой многотонную установку, насыщенную высокочувствительными датчиками. Требуется высокая степень очистки вещества от радиоактивных примесей. Например, в детекторе *Superkamiokande* – огромном баке (высота 45 м, диаметр 35 м) с 50 тыс. т сверхчистой воды – используется 13 тыс. первоклассных ФЭУ (марки Хамамацу), чтобы уловить слабую вспышку света, испущенную электроном после взаимодействия с нейтрино. Для регистрации использовались радиохимический метод (*Homestake*, *SAGE*, *Gallex*) и метод черенковских вспышек в воде, вызываемых продуктами нейтринных реакций (*Kamiokande*, *Superkamiokande*, *Sudbury*). Черенковские детекторы, обладающие высоким энергетическим разрешением и способностью определять направление прихода нейтрино, оказались наиболее значимыми. Радиохимические детекторы (особенно *SAGE*, *Gallex*, в которых используется галлий–германиевая реакция) позволили расширить диапазон регистрации нейтрино вплоть до низких энергий, возникающих в *pp*-реакции.

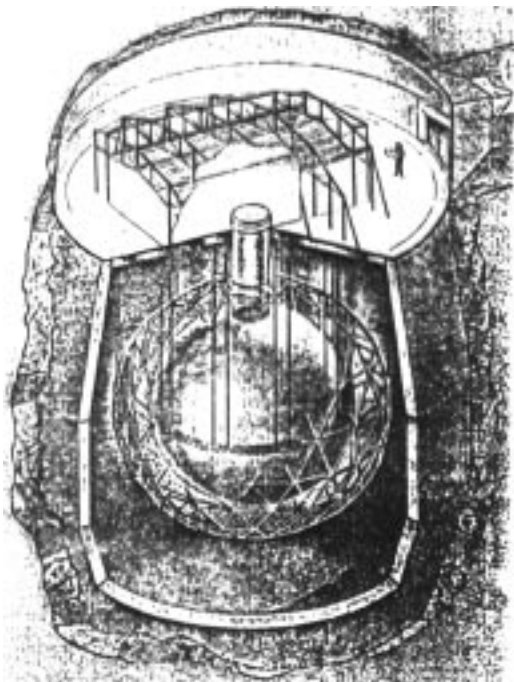


Рис. 4. Детектор солнечных нейтрино *Sudbury*

Измеренные потоки оказались в 1,5–3 раза меньше, чем рассчитанные по СМ. Сейчас «проблема дефицита» решена: причина – в новом свойстве частицы – осцилляции «нейтринных ароматов». Удивительно, что это свойство было предсказано давно, ещё до начала опытов с солнечными нейтрино, но научная общественность долго не могла поверить в «сложный» вариант, отдавая предпочтение более «простым», оказавшимся несостоятельными.

**Осцилляции нейтрино.** Нейтрино бывает трёх типов («ароматов»): *e*-нейтрино ( $\nu_e$ ), мю-нейтрино ( $\nu_\mu$ ) и тау-нейтрино ( $\nu_\tau$ ). Их названия и отличие друг от друга связано с тем, что они рождаются только в паре с соответствующей частицей. Возможно, они отличаются ещё и массой, но масса точно не известна ни для одного «аромата». Установлено, что массы всех нейтрино очень малы. Так, масса электронного нейтрино меньше  $10^{-5} m_e$ .

Если «аромат» – не строго сохраняющаяся величина (скажем, сохраняется на 99,9%), то наблюдаемые нейтрино трёх типов не могут быть чистыми состояниями по «аромату» и должны самопроизвольно переходить из одного типа в другой. Такой спонтанный переход нейтринных «ароматов» и называется *осциллирующей нейтрино*. Нейтринные осцилляции были предсказаны замечательным физиком *Бруно Понткорво* из Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна). Он (с соавторами из ОИЯИ) рассмотрел модель нейтринных осцилляций и, когда появились первые данные о солнечных нейтрино, предложил объяснить наблюдаемый дефицит влиянием осцилляций.

Дело выглядит так. На Солнце в термоядерных циклах рождаются  $\nu_e$ , возникающие в паре с позитроном. На пути от Солнца к Земле они испытывают осцилляции и частично становятся  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$ . А последние в проводимых экспериментах не регистрируются из-за того, что должны с вероятностью 99,9% превращаться в мюон или тау-лептон – частицы, намного тяжелее электрона. Для такого превращения им просто не хватает энергии, которая остаётся той же, какая была у  $\nu_e$ . Они становятся невидимыми для детектора и вызывают кажущееся уменьшение нейтринного потока. Понадобилось 30 лет измерений, чтобы разгадать это.

В настоящее время на установке вблизи местечка *Sudbury* (Канада) работает черенковский детектор на тяжёлой воде, особенность которого заключается в том, что он может регистрировать отдельно потоки нейтрино разных «ароматов». Тяжёлый водород ( ${}^2_1\text{H}$ ) может вступать в реакцию с  $\nu_e$ , и такая реакция является индикатором потока только электронных нейтрино. Но есть ещё реакция упругого рассеяния  $\nu_e$ , в которой участвуют все три нейтринных «аромата». Результаты показали, что суммарный поток всех «ароматов» больше парциального потока  $\nu_e$ . «Невидимые»

$v_\mu$  и  $v_\tau$  обнаружили себя, что и доказало нейтринные осцилляции и подтвердило СМ Солнца.

Термоядерные реакции в звёздах разнообразны и многочисленны. Сменяя друг друга по исчерпанию в центральной «топке» звезды одного типа ядерного горючего, они вызывают изменение как внутренних свойств (температуры, плотности, передачи тепла) звезды, так и её внешних проявлений (спектрального класса, радиуса, светимости). Происходит постоянная, хотя и очень медленная, эволюция.

**Эволюционный путь Солнца.** Солнце – молодая звезда на начальном этапе своей эволюции. Запасов водорода хватит, чтобы «безбедно» жить за счёт термоядерного горения в течение 100 млрд лет. Но через 10 млрд лет внешний вид светила изменится: Солнце распухнет, сменит окраску – станет красным гигантом. Светило примет грозный вид, словно чем-то будет недоволено. Но «гневаться» оно может только потому, что водорода в центре останется совсем немного и придётся запускать периферийные запасы. Зона горения расширится, в результате чего увеличится радиус и светимость.

Поток солнечного излучения, неизменный долгие годы (что благоприятствовало жизни), будет неуклонно возрастать. Условия на Земле станут невыносимыми – как на Венере. Человечеству, чтобы выжить, надо будет перебираться по крайней мере на Сатурн и его спутники, где климат окажется более сносным. Сильно возрастёт и активность Солнца. На смену умеренным вспышкам наших дней придут мощные вспышки-катаклизмы с тяжёлыми последствиями.

Солнце не станет Сверхновой, но даже «мирный» финал красного гиганта сулит далеко не мирную жизнь. Сброшенные слои звезды пронесутся по Солнечной системе раскалённым смерчем. Спасут ли нас тогда магнитосферный и атмосферный щиты? Самое лучшее – заранее покинуть наш «дом» и поселиться, если позволят средства, на подходящую планету ближайшей звезды. Возможно, рано заглядывать так далеко в будущее: реальная угроза возникнет только через миллиарды лет. Удивительно, но уже сейчас появляются проекты спасения Земли! В журнале «*Astrophysics and Space Science*» появилась статья с планом смещения земной орбиты дальше от Солнца. Для этой цели предлагается использовать один из объектов Пояса Койпера (см. лекцию 1, раздел «Периферия Солнечной системы»). Если толкнуть его направленным взрывом внутрь Солнечной системы так, чтобы он стал проходить близко от нас, то своим притяжением он начнёт смещать Землю, раз за разом увеличивая её орбиту. При правильном манёвре астероид будет проходить мимо Земли с периодом примерно 6000 лет и за положенный срок (миллиард лет) переведёт земную орбиту на безопасное расстояние. Земля плавно отойдёт от разгорающегося светила, так что освещённость и климат планеты не изменятся.

Неясно, правда, что станет с Луной, как изменится вращение Земли, но это всё «мелкие детали». Проект смелый и пока не очень актуальный.

Основной вывод, к которому приводят СМ и эволюционный путь Солнца: наше светило – достаточно мирная звезда. Её медленная эволюция даёт возможность приспособиться к изменениям и выбрать наилучшую стратегию выживания.

## 2. Параметры Солнечной системы

Энергия, вырабатываемая Солнцем, питает всю Солнечную систему. Возникнув из общего газопылевого облака, все тела этой системы имеют одинаковые химический и изотопный составы. Планеты, астероиды, кометы его сохранили. Солнце же, в результате реакций термоядерного синтеза, существенно переработало. На основе этого был проведён интересный компьютерный эксперимент.

**Изотопный состав углерода и азота.** В реакциях и распадах CN-цикла участвуют изотопы углерода и азота. Хотя эти реакции протекают в центре Солнца, из-за перемешивания вещества изменённый состав С и N должен появиться на солнечной поверхности. Его определяют по измерениям линий углерода и азота в солнечном спектре. Эксперимент заключался в том, что, зная темпы реакций CN-цикла (из ядерно-физических данных), провели модельный расчёт в условиях центральной зоны Солнца. В качестве начального был взят земной состав (весовые отношения изотопов):

$$^{14}\text{N}/^{12}\text{C} = 3; \quad ^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 90; \quad ^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 270. \quad (4)$$

«Включив» реакции CN-цикла на условные 100 млн лет, получили новые соотношения:

$$^{14}\text{N}/^{12}\text{C} = 20; \quad ^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 4; \quad ^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 3000, \quad (5)$$

которые прекрасно совпали с наблюдаемым солнечным составом. Термоядерный источник наглядно проявил себя.

**Возраст Солнца.** Возраст Солнца можно определить по распаду радиоактивных ядер, но не солнечного вещества (оно до сих пор недоступно), а лунных пород и состава метеоритов. Здесь опять используется предположение, что Солнечная система возникла одновременно со светилом.

Радиоактивный распад происходит по простому закону:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

где  $N_0$  – начальное число ядер,  $N(t)$  – их количество через время  $t$ ,  $\lambda$  – постоянная распада, не зависящая от внешних условий. Радиоактивный распад – уникальные часы, не требующие завода и питания. Они не спешат и не отстают. К тому же природа создала большое разнообразие таких «часов» – на разные вре-

менные шкалы и условия отсчёта.

Самый простой способ – определить начальное  $N_0$  и конечное  $N(t)$  числа ядер в изучаемом образце и, зная постоянную распада, вычислить время  $t$ . Можно поступать по-другому: находить не число оставшихся радиоактивных ядер, а количество накопленных (радиогенных) ядер. Для Солнца были использованы оба метода. Возраст Солнца определяли по самым древним породам. Оказалось, на Земле древние породы не сохранились из-за постоянной тектонической и сейсмической активности. Более древними оказались образцы, доставленные с Луны. Но самый точный результат был получен по анализу метеоритов, которые лучше всех сохранили первичный состав.

Надёжные измерения дал уран-свинцовый метод, который по временной шкале наиболее соответствовал измеряемому возрасту. Рассматривались цепочки распадов, начинающиеся с изотопов урана  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  и заканчивающиеся стабильными изотопами свинца. Первый (среднее время жизни  $t = 6,5$  млрд лет) даёт цепочку, приводящую к  $^{206}\text{Pb}$ , второй ( $t = 1$  млрд лет) – к  $^{207}\text{Pb}$ . Как эталон сравнения брался нерадиогенный  $^{204}\text{Pb}$ , который был в породах изначально. Измеренные количества трёх изотопов свинца для разных метеоритов (железистых, хондритов и др.) определили время накопления  $t_{\text{мет}} = 4,55$  млрд лет.

Для окончательного результата надо ввести небольшую поправку. Время  $t_{\text{мет}}$  – это время накопления свинца в твёрдых минералах. Не исключено, что какое-то время вещество, вошедшее в состав метеоритов, находилось в жидком или газообразном состоянии. Для измерения этого интервала (время затвердевания  $t_{\text{ТВ}}$ ) были использованы «часы с короткой шкалой» (по изотопам йода  $^{129}\text{I}$  и плутония  $^{244}\text{Pu}$ ). Время затвердевания оказалось сравнительно недолгим ( $t_{\text{ТВ}} = 100$  млн лет), а полный возраст Солнечной системы стал

$$t_C = t_{\text{мет}} + t_{\text{ТВ}} = (4,7 \pm 0,1) \text{ млрд лет.} \quad (7)$$

Измеренный возраст Солнца – самой высокой «пробы», т.к. получен таким надёжным способом, как радиоактивный распад. Это один из главных результатов космохронологии, науки о временных вехах нашего мира. Другой важный результат – возраст Галактики, равный  $t_G = 15$  млрд лет, – тоже измерен радиоактивными «часами» по ядрам уран-ториевой шкалы, однако не столь надёжен, т.к. получен при ряде модельных предположений. Из сравнения  $t_G$  и  $t_C$  видно, что к моменту рождения Солнца Галактике уже было 10 млрд лет – достаточный срок для эволюции и взрыва массивных звёзд, которые насытили межзвёздный газ обилием химических элементов.

### 3. Галактики

Галактика – следующая, более высокая ступень структуры вещества, созданная гравитацией. Наша Га-

лактика – Млечный Путь – была открыта английским астрономом *В.Гершелем*, создававшим в XVIII в. самые большие телескопы и работавшим на них. Он увидел, что туманная («молочная») полоса, протянувшаяся через всё небо, на самом деле представляет собой совокупность далёких звёзд, к которой относится и наше Солнце. Гершель получил первое представление о строении и размерах Галактики – звёзд, газа, пыли, удерживаемых вместе гравитационными силами. Млечный Путь – большая спиральная галактика ( $10^{12}$  звёзд) с четырьмя спиральными рукавами, выходящими из центральной области, где находится ядро Галактики (по последним данным – массивная чёрная дыра массой  $\sim 10^6 M_C$ ). Большинство звёзд сосредоточено в тонком диске (радиус : толщина = 100 : 1), заметно утолщённом в центре, где находится молодая часть галактического населения, участвующая в общем вращении периодом 200 млн лет. Старая популяция (звёзды малых масс, шаровые звёздные скопления) заполняет обширную область – гало Галактики, – по форме напоминающую сплюснутый эллипсоид с заметной концентрацией объектов к центру. На рис. 5 Галактика показана так, как она может быть видна со стороны другой далёкой цивилизации.

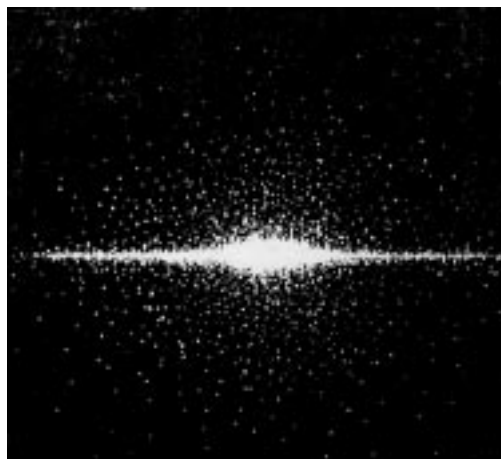


Рис. 5. Галактика Млечный Путь в профиль. Видны дисковая (молодая) и квазисферическая (старая) популяции звёзд

Галактики под действием гравитации, как и звёзды, группируются в скопления (кластеры). Млечный Путь и 19 близких галактик (Большое и Малое Магеллановы Облака, туманность Андромеды и др.) образуют Местный кластер. Он, в свою очередь, входит в состав большого Сверхскопления (более тысячи галактик размером  $\sim 30$  Мпк), центр которого – активная галактика Дева-А. Местный кластер расположен на краю Сверхскопления.

Более крупных единиц, чем сверхскопление, не обнаружено. Вселенная состоит из скоплений и сверхскоплений галактик, а также пустого пространства между

ними, напоминая большой водоём, в котором взвешены «комки» вещества разных форм и размеров. «Водоём» не так уж сильно насыщен веществом – расстояния между «комками» много больше их размеров.

*Вопросы и задания для самоконтроля*

1. Какую роль в жизни звезды играет гравитационный источник энергии?
2. Почему главный (термоядерный) источник звездной энергии «включается» при температурах в несколько миллионов градусов?
3. Где, в каких телах проявляется «распадный» источник энергии?
4. Почему термоядерная реакция протекает при высоких температурах?
5. За счёт какого термоядерного цикла «живёт» Солнце?
6. Как передаётся энергия от центра Солнца в ста-

тической и конвективной зонах?

7. Поток каких частиц, кроме оптических фотонов, испускает Солнце?

8. Чем вызван дефицит солнечных нейтрино?

9. Когда произойдёт переход Солнца в стадию красного гиганта? Насколько опасен этот переход?

10. Каким образом был определён возраст Солнца?

*Литература*

*Кочаров Г.Е.* Актуальные вопросы физики Солнца: Энциклопедия «Современное естествознание». Т. 4. – М.: Изд. дом «Магистр-Пресс», 2000.

*Лучков Б.И.* Солнце – термоядерный реактор. – М.: МИФИ, 2001.

*Петрукович А.* Луна и грош, или История гелиевой энергетики. – Наука и жизнь, 2004, № 8.