

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1984/5

А.В.Харитонов
ЭНЕРГЕТИКА
СОЛНЦА
И ЗВЕЗД



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

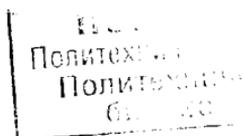
5/1984

Издается ежемесячно с 1971 г.

А. В. Харитонов,
доктор физико-математических наук

ЭНЕРГЕТИКА СОЛНЦА И ЗВЕЗД

в приложении этого номера:
НОВОСТИ АСТРОНОМИИ



Издательство «Знание» Москва 1984

ББК 22.632
X 20

S 35 ⁶¹
404

Харитонов А. В.

X 20 Энергетика Солнца и звезд.—М.: Знание, 1984.—
64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер.
«Космонавтика, астрономия»; № 5).
11 к.

Энергетические источники в астрофизических объектах определяют их эволюцию и управляют различными процессами, обуславливающими многообразие наблюдательных свойств этих объектов. В брошюре излагаются современные представления об энергетике Солнца и звезд, что имеет непосредственное значение для нашего существования на Земле, зависящего во многих степенях от солнечной энергии.

1705040000

ББК 22.632
524

84-630/8

© Издательство «Знание», 1984 г.

ВВЕДЕНИЕ

Вряд ли кому-нибудь в настоящее время неизвестны слово «энергия» и то физическое понятие, которое определяется этим термином. Также, надо полагать, известно и понятие мощности — энергоснабжения (или энергопотребления) в единицу времени.

Современный читатель привык к гигантским мощностям. Волжская ГЭС им. В. И. Ленина мощностью 2,1 млн. кВт, бывшая лет 20 назад самой крупной в мире, уже давно уступила свое первенство станциям Ангарского и Енисейского каскадов. Напомним читателю, что мощность Братской ГЭС составляет 4,5 млн. кВт, Красноярской — 6,0 млн. кВт, Саяно-Шушенской — 6,4 млн. кВт.

Огромные мощности достигнуты и на многочисленных тепловых и атомных электростанциях, причем нередко в единичных агрегатах. Например, в 1974 г. на Троицкой электростанции был пущен энергоблок мощностью в 500 тыс. кВт, в последующие же годы в Экибастузе, Запорожье и Углегорске были пущены агрегаты мощностью по 800 тыс. кВт. Первая очередь Экибастузской ТЭЦ достигла 2 млн. кВт, и, как сообщалось, на базе дешевых углей там строится пять станций общей мощностью около 20 млн. кВт.

Однако гигантские мощности современных электростанций (существующих, строящихся и проектируемых) покажутся совершенно мизерными, если мы будем их сравнивать с мощностью, например, Солнца, звезд или тем более галактик. Процессы энергоснабжения на Солнце и звездах мы рассмотрим в следующем параграфе, а сейчас для иллюстрации сказанного приведем табл. 1.

Указанные в табл. 1 мощности (не только квазаров и галактик, но даже и Солнца — рядовой звезды) так

Таблица 1

Светимость некоторых астрономических объектов

| Объект | Светимость | | |
|--|----------------------|----------------------|-------------------------|
| | эрг/с | кВт | В ед. светимости Солнца |
| Солнце | $3,82 \cdot 10^{33}$ | $3,82 \cdot 10^{23}$ | 1 |
| Звезда-гигант (Капелла) | $5 \cdot 10^{35}$ | $5 \cdot 10^{25}$ | 140 |
| Звезда-сверхгигант (Ригель) | $2 \cdot 10^{38}$ | $2 \cdot 10^{28}$ | $5 \cdot 10^4$ |
| Наша Галактика | 10^{44} | 10^{34} | $2 \cdot 10^{10}$ |
| Галактика в Андромеде | 10^{45} | 10^{35} | 10^{11} |
| Квазар | 10^{46} | 10^{36} | 10^{12} |
| Наиболее мощные квазары во время вспышек | 10^{48} | 10^{38} | 10^{14} |

велики, что их трудно себе представить в наглядной форме. С другой стороны, от подавляющего большинства этих объектов (кроме Солнца, разумеется) до астронома доходит исключительно мало световой энергии (вследствие гигантских расстояний). Так, наиболее близкий квазар 3С 273 (т. е. объект № 273 в 3-м Кембриджском каталоге радиисточников) находится на расстоянии в 2 млрд. св. лет и представляется нам звездочкой примерно 13-й величины, т. е. примерно в 1500 раз более слабой, чем самые слабые звезды, еще видимые невооруженным глазом. Просто удивляешься мощи человеческого разума, умеющего извлекать богатую информацию из световых потоков, порой в тысячи раз еще более слабых!

СВЕТИМОСТЬ СОЛНЦА

Каким же образом стало известно, сколько энергии излучает Солнце?

На протяжении почти полутора столетий астрономы и геофизики затратили много усилий для того, чтобы определить *солнечную постоянную*. Так называется полное количество энергии солнечного излучения всех длин волн, падающее на площадку в 1 см^2 , поставленную перпендикулярно солнечным лучам вне земной атмосферы и на среднем расстоянии Земли от Солнца. Определение солнечной постоянной кажется довольно простой задачей. Но это только на первый взгляд. В действительности

сти же исследователь сталкивается с двумя серьезными трудностями.

Прежде всего необходимо создать такой приемник излучения, который с одинаковой чувствительностью воспринимал бы все цвета видимого света, а также ультрафиолетовые и инфракрасные лучи — одним словом, весь спектр электромагнитных волн. Напомним читателю, что видимый свет, ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, гамма-лучи, инфракрасное излучение и радиоволны в определенном смысле имеют одинаковую природу. Отличие их друг от друга обусловлено лишь частотой колебаний электромагнитного поля или длиной волны. В табл. 2 указаны длины волн λ различных областей спектра электромагнитного излучения, а также частоты ν в герцах и энергии квантов $h\nu$ в электронвольтах).

Таблица 2

Основные характеристики электромагнитного излучения
в разных диапазонах

| Название области спектра | Длина волны, (λ) , нм | Частота (ν) , Гц | Энергия кванта $(h\nu)$, эВ (приближенно) |
|---|-------------------------------|---|--|
| Гамма-диапазон | $< 0,01$ | $> 3 \cdot 10^{19}$ | $> 10^5$ |
| Рентгеновская | $0,01-10$ | $3 \cdot 10^{19}-3 \cdot 10^{16}$ | 10^5-10^2 |
| Ультрафиолетовая | $10-400$ | $3 \cdot 10^{16}-0,75 \cdot 10^{15}$ | 10^2-3 |
| Ультрафиолетовая (доходящее до поверхности Земли излучение) | $300-400$ | $1 \cdot 10^{15}-0,75 \cdot 10^{15}$ | $4-3$ |
| Видимая | $400-750$ | $7 \cdot 5 \cdot 10^{14}-4 \cdot 10^{14}$ | $3-1,7$ |
| Инфракрасная | $0,75-100$ мкм | $4 \cdot 10^{14}-3 \cdot 10^{12}$ | $1,7-$ $1,2 \cdot 10^{-2}$ |
| Микроволновая | $0,1$ мм— 10 см | $3 \cdot 10^{12}-3 \cdot 10^9$ | $10^{-2}-10^{-5}$ |
| Радиодиапазон | > 10 см | $< 3 \cdot 10^9$ | $< 10^{-5}$ |

Как показывает табл. 2, видимая область, имея протяженность немного менее октавы¹, составляет весьма небольшую часть всего спектра электромагнитного излучения, простирающегося от гамма-лучей с длиной волны

¹ Октава — интервал спектра, на протяжении которого частота и, следовательно, длина волны меняются в 2 раза.

в тысячные доли нанометра до метровых радиоволн, более чем на 46 октав. Солнце излучает практически во всем этом гигантском диапазоне длин волн, и в солнечной постоянной должна учитываться, как уже сказано, энергия всего спектра. Наиболее подходящими для этой цели являются тепловые приемники, например, термоэлементы и болометры, в которых измеряемое излучение превращается в тепло, а показания прибора зависят от количества этого тепла, т. е. в конечном счете — от мощности падающего излучения, но не от его спектрального состава.

Остроумно устроен компенсационный пиргелиометр Ангстрема, изобретенный в 1895 г. и получивший (с не-принципиальными усовершенствованиями) широкое распространение. Представьте себе две рядом стоящие одинаковые пластинки (из манганина). Обе они покрыты платиновой чернью или специальным черным лаком. Одна из них освещается и нагревается солнечными лучами, а другая закрыта шторкой. Через затененную пластинку пропускается электрический ток такой силы (регулируется реостатом), чтобы ее температура была равна температуре освещенной пластинки. Мощность тока, необходимая для *компенсации* солнечного нагрева (отсюда и название прибора — компенсационный пиргелиометр) является мерой мощности падающего излучения.

Достоинство пиргелиометра Ангстрема в его простоте, надежности и хорошей воспроизводимости показаний. Именно поэтому он уже более 85 лет применяется в разных странах. Тем не менее измерения с ним нуждаются во внесении некоторых небольших, но трудноопределяемых поправок. Прежде всего никакое чернение (в том числе сажей, платиновой чернью и т. д.) не обеспечивает полного поглощения падающих лучей. Какая-то доля их (порядка 1,5—2%) отражается, причем эта доля может меняться с длиной волны. В связи с этим в последние два десятилетия разработаны полостные приборы. Схема одного из них (пиргелиометр ПАКРАД-3, серийно выпускаемый фирмой «Лаборатория Эппли», США), приведена на рис. 1.

В верхнюю приемную полость 1, образованную цилиндром 2, конусом 3 с двойными стенками и усеченным конусом 4, солнечные лучи попадают через прецизионную диафрагму 5. Термобатарей 6 позволяет определить повышение температуры в верхней конструкции

по сравнению с аналогичными точками нижней, устроенной в точности так же, как и верхняя (только конус в ней развернут на 180° для компактности). Мощность поглощаемого излучения равна мощности тока, который необходимо пропустить по обмотке 7, чтобы при закрытой диафрагме 5 вызвать равное повышение температуры.

Поскольку солнечные лучи могут выйти из полости 1 только после нескольких отражений, полость, зачерненная изнутри таким же лаком, что и пластинки пиргелиометра Ангстрема, обладает большим коэффициентом поглощения. Он составляет 0,997—0,998, а в отдельных случаях доходит до 0,9995. В этом преимущество полостных приборов, получающих широкое распространение.

Вторая трудность определения солнечной постоянной порождается земной атмосферой. Последняя ослабляет любое излучение, причем ослабление сильно зависит от длины волны. Синие и фиолетовые лучи ослабляются значительно больше, чем красные, и еще сильнее ослабляются ультрафиолетовые. Излучение с длиной волны меньше 300 нм вообще полностью задерживается земной атмосферой, как и большая часть инфракрасных лучей. К тому же оптические свойства атмосферы крайне непостоянны даже при ясной безоблачной погоде.

Из-за того что лучи разных длин волн ослабляются атмосферой по-разному, коэффициент прозрачности нельзя найти, проводя наблюдения в «белом свете» на приборах типа пиргелиометров, которые регистрируют неразложенное в спектр излучение всех длин волн. Совершенно необходим спектрометрический прибор. Наблюдения на нем позволят определить значения коэффициента прозрачности атмосферы по отдельности для ряда длин волн. Только после этого можно вычислить по ним поправку за атмосферу к показаниям пиргелиометра.

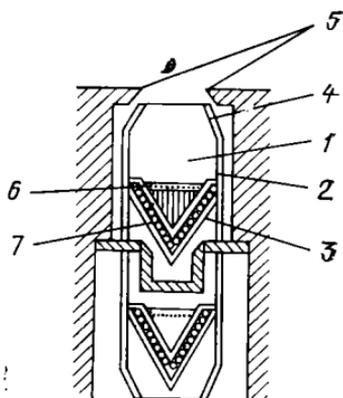


Рис. 1. Схема полостного пиргелиометра ПАКРАД

Все это очень осложняет определение солнечной постоянной с поверхности Земли. Не удивительно, что наблюдения, сделанные, например, в прошлом столетии, имели низкую точность, и у разных авторов получались значения, различающиеся в 2 раза и более.

Методически самыми лучшими среди наземных определений по праву считаются работы, начатые в 1900 г. и продолжавшиеся в течение нескольких десятилетий под руководством Ч. Аббота. Они показывали результаты, имевшие разброс 2—3% около среднего значения. Сам Аббот интерпретировал этот разброс как реальные изменения солнечного излучения. Однако впоследствии более рафинированный анализ этих же самых наблюдений показал, что разброс порожден ошибками, связанными прежде всего с недостаточным учетом нестациональностей земной атмосферы.

Между тем для метеорологии и ряда других наук о Земле, а также для астрофизики (в частности, физики планет) необходимы как более точное знание этой величины, так и решение вопроса о том, является ли солнечная постоянная действительно постоянной, т. е. происходят ли и в каких пределах возможные колебания солнечного излучения.

Наиболее кардинальное решение проблемы дает использование искусственных спутников Земли. Спутники, предназначенные как раз для измерения солнечной постоянной, регулярно «работают» последние 10—12 лет. Вынос приборов за пределы атмосферы (конечно, наряду с усовершенствованием самих приборов) позволяет определять потоки солнечного излучения с невиданной ранее точностью — абсолютное значение до 0,3%, а возможные колебания до 0,001% от среднего значения. Тем не менее, несмотря на достигнутую точность, проблема колебаний солнечной постоянной до конца не решена. Установлено только, что их амплитуда (если они существуют) не более 0,1—0,2%. Не вдаваясь дальше в дискуссию о стабильности солнечного излучения, отметим, что с точностью до 1% солнечная постоянная составляет 137 мВт/см^2 , или $1,96 \text{ кал} \cdot (\text{см}^2 \text{мин})^{-1}$.

Зная величину солнечной постоянной, мы можем получить интересные данные. Рассмотрим некоторый участок земной поверхности и примем, что угол падения солнечных лучей на него равен 60° (высота Солнца над горизонтом 30°). В этом случае, довольно типичном для

условий средних широт, до поверхности Земли дойдет примерно 65% от полного потока излучения Солнца, остальное будет задержано атмосферой. Освещенность земной поверхности нужно еще уменьшить вдвое из-за наклонного падения лучей. Легко подсчитать, что при этих условиях на участок размером 5×10 км (равный площади среднего города) от Солнца поступает мощность в 22 млн. кВт, т. е. больше, чем будет давать весь комплекс 5 электростанций, строящихся в Экибастузе.

Далее, зная радиус земного шара, равный $6,371 \cdot 10^8$ см, легко найти площадь «поперечного сечения» Земли ($1,275 \cdot 10^{18}$ см²) и подсчитать, что мощность солнечного излучения, падающего на всю освещенную Солнцем половину земной поверхности, составляет огромную величину — около $1,7 \cdot 10^{14}$ кВт. Чтобы представить ее более наглядно, достаточно сказать, что солнечной энергии, падающей на дневную полусферу Земли, достаточно, чтобы за 1 с растопить глыбу льда объемом $0,56$ км³ (длиной и шириной 1 км и высотой 560 м) или за 4 ч нагреть от 0 до 100°С и вслед за тем испарить столько воды, сколько ее имеется в Ладожском озере (908 км³). Наконец, за 26 сут Солнце посылает на Землю энергии больше, чем ее содержится во всех разведанных и прогнозируемых запасах угля, нефти и газа и других видов ископаемых топлив. Эти запасы оцениваются в $13 \cdot 10^{12}$ т так называемого условного топлива (т. е. топлива с теплотворной способностью 7000 кал/г, или $29,3 \cdot 10^6$ Дж/кг).

Энергетика всех явлений погоды, всех природных процессов, происходящих в земных атмосфере и гидросфере, таких, как ветер, испарение океанов, перенос влаги облаками, осадки, ручьи и реки и океанические течения, движение ледников — все это в основном преобразованная энергия солнечного излучения, упавшего на Землю. Развитие биосферы определяется теплом и светом, поэтому некоторые виды топлив, а также вся наша пища, по образному выражению К. А. Тимирязева, «есть консерв солнечных лучей».

Приведем еще одну цифру. Среднее расстояние Земли от Солнца (или большая полуось земной орбиты) составляет $149,6 \cdot 10^6$ км. Отсюда полная светимость Солнца равна $3,82 \cdot 10^{23}$ кВт, или $3,82 \cdot 10^{33}$ эрг/с; эта величина почти на 17 порядков превосходит мощность

крупнейших технических энергоустановок, таких, как наши крупнейшие гидро- и тепловые электростанции.

ИСТОЧНИКИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ. НЕМНОГО ИСТОРИИ

Об источниках солнечной энергии ученые задумывались давно, и ими было выдвинуто много разных гипотез. Дольше других просуществовала гипотеза энерговыделения за счет сжатия Солнца. Высказанная в 1853 г. Г. Гельмгольцем, она подробно излагалась в книгах по астрономии еще в начале нашего столетия и казалась наилучшей, так как физика просто не знала других более мощных источников энергии. Но при сколько-нибудь детальной разработке обнаружилась и ее несостоятельность: за счет сжатия от размеров, превосходящих Солнечную систему, и до теперешнего объема Солнце могло бы светить 10 млн., от силы 20 млн. лет² Между тем целая совокупность геологических, палеонтологических и других данных свидетельствует, что возраст Земли и Солнечной системы не менее 4—5 млрд. лет.

На возрасте Земли следует остановиться немного подробнее. Читатель, вероятно, знает о радиоактивном распаде. В природных условиях это самопроизвольное превращение ядер одних элементов в ядра других, причем часто продукты распада сами являются радиоактивными, они распадаются, в свою очередь, и т. д. Наблюдаются целые цепочки радиоактивных превращений, и элементы, участвующие в такой цепочке, т. е. генетически связанные между собой, образуют так называемый

² Полная энергия E_G , выделяющаяся при гравитационном сжатии диффузного облака от бесконечно больших размеров до размеров с радиусом R , может быть оценена по формуле $E_G = GM^2/R$, где $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ дин · см²/г² — постоянная тяготения, а M — масса. Подставив сюда массу Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г) и его радиус ($6,96 \cdot 10^{10}$ см), легко сосчитать, что полное энерговыделение при сжатии Солнца до теперешних размеров составит $4 \cdot 10^{48}$ эрг. При расходовании же ее солнечными темпами, т. е. при $4 \cdot 10^{33}$ эрг/с, этой энергии могло бы хватить на 10^{15} с = $3 \cdot 10^7$ лет (поскольку в году $3,15 \cdot 10^7$ с). Это верхний (явно завышенный) предел для продолжительности жизни «сжимающегося Солнца».

Но энерговыделение за счет гравитационного сжатия играет первостепенную роль при образовании звезд из диффузного вещества как источник первоначального разогрева облака (об этом чуть позже).

радиоактивный ряд, заканчивающийся стабильным, уже нераспадающимся, изотопом. Например, изотоп урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ после ряда превращений дает стабильный изотоп свинца ${}_{82}\text{Pb}^{206}$, а изотоп ${}_{92}\text{U}^{235}$ порождает ${}_{82}\text{Pb}^{207}$, тоже стабильный.

Здесь и далее числа справа вверху у символа химического элемента означают атомные веса, точнее, атомные массы. Они равны полному числу нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) в ядре. Числа же слева внизу указывают порядковые номера в периодической системе Менделеева. Напомним, что порядковый номер равен числу протонов в ядре, иначе — заряду ядра в единицах элементарного заряда (заряду протона или электрона). Число электронов в нейтральном атоме, естественно, равно его порядковому номеру.

Важнейшая характеристика радиоактивных превращений — это период полураспада, т. е. время, в течение которого исходное количество радиоактивного изотопа уменьшится вдвое или, иначе говоря, время, за которое распадается половина атомов образца. Периоды полураспада хорошо известны на основании физических измерений, их значения у различных изотопов разных элементов заключены в весьма широких пределах: по порядку величины от долей секунды до 10^{15} лет (нас здесь интересуют долгоживущие изотопы).

Вернемся теперь к определению возраста. Выберем в горной породе, возраст которой нас интересует, какой-либо минерал (обозначим его через M_1), содержащий свинец, но совсем не содержащий урана. Найдем затем в этом минерале относительное содержание изотопов свинца Pb^{204} , Pb^{206} и Pb^{207} . Поскольку эти изотопы стабильны, изотопный состав свинца в минерале M_1 сохраняется со времени образования минерала. Урана в этом минерале не было с самого начала, иначе благодаря большому периоду полураспада он частично сохранился бы до наших дней.

Выберем теперь в той же породе другой минерал M_2 , в котором присутствуют как свинец, так и уран. Изотопный состав свинца будет иным: будет большее содержание Pb^{207} и Pb^{206} по сравнению с количеством Pb^{204} , который не входит в радиоактивные ряды. По величине избытков Pb^{207} и Pb^{206} и зная периоды полураспада U^{235} и U^{238} (соответственно $7,13 \cdot 10^8$ и $4,51 \cdot 10^9$ лет) можно найти возраст породы, т. е. момент, когда она

стала квазиизолированной и ее химический состав перестал изменяться за счет обмена с окружающей средой. Разумеется, здесь описана только схема; для обеспечения большей надежности обычно рассматривают несколько разных радиоактивных рядов. А помимо уран-свинцового, существуют также калий-аргоновый, рубидий-стронциевый и другие методы.

Самые древние среди изученных горных пород на Земле имеют возраст 3,8—3,9 млрд. лет. Возраст наиболее старых лунных пород, доставленных советскими автоматическими станциями и американскими экспедициями «Аполлон», оценивается в 4,5—4,6 млрд. лет. Такой же возраст свойствен и наиболее старым метеоритам.

Все перечисленное дает основание считать, что Солнечная система образовалась около 4,6 млрд. лет назад. Сам процесс образования Солнца и планет протекал относительно быстро, за 100—200 млн. лет. По современным космогоническим представлениям, развитым в последние два десятилетия и основанным на многочисленных наблюдениях и надежных расчетах, именно такое время требуется для образования молодой звезды из протозвездного облака.

Около 3 млрд. лет назад (по другим данным — 2 млрд. лет) на Земле возникла примитивная жизнь. Такой возраст — от 2,6 до 3,5 млрд. лет — имеют остатки бактерий и синезеленых водорослей, находимые в породах, сформировавшихся в архейскую эру. Возникновение и последующее развитие жизни свидетельствует о том, что за все это время в 2—3 млрд. лет излучение Солнца и освещенность им Земли *существенным образом* не менялась. Поэтому для понимания физики Солнца нужно было найти такой источник энергии, который обеспечил бы его свечение в течение миллиардов лет.

Выдающийся английский астроном А. Эддингтон, столетие со дня рождения которого недавно отмечалось астрономической общественностью, еще в 1916 г. понял, что источник энергии Солнца нужно искать на «субатомном уровне». В своих работах по теории внутреннего строения звезд, основные идеи которых широко используются в этой теории до сих пор, он указывал на возможность «превращения материи в энергию», но никаких конкретных путей этого превращения описать не мог — физики тогда их просто не знали.

Для иллюстрации последнего интересно процитировать главу XXVI «Астрономии» Рессела, Дэгана и Стюарта, русский перевод которой вышел в свет в 1935 г.: «В связи с вопросом о поддержании солнечной радиации указывалось, что ни один из известных источников потенциальной энергии не смог бы восполнить громадную потерю тепла излучением в течение всего геологического периода и что это тепло должно получаться путем непрерывного преобразования громадных запасов энергии, еще нам не известных и, вероятно, скрытых в ядре атома. Это заключение можно распространить на все звезды, поскольку Солнце, по-видимому, является типичной звездой».

А вот что писал в то время другой выдающийся астроном, советский ученый В. Г. Фесенков (1899—1972), комментируя работы Эддингтона в дополнении к названной книге Рессела, Дэгана и Стюарта: «...непонятно, каким образом атомные ядра более или менее сложной структуры могут уничтожаться, давая при этом интенсивную вспышку энергии. Подобный процесс никогда не наблюдался физиками, не может быть обоснован теоретически и, являясь непонятным, не может облегчить понимание внутреннего строения звезды и ее эволюции. «Уничтожение» материи в звездах есть таким образом чисто астрофизическая абстракция, изобретенная только для того...», чтобы объяснить продолжительность существования звезд.

Но именно эта абстракция, на непонятность которой указывал В. Г. Фесенков, порождаяемая проблемой источников энергии Солнца и звезд, и стимулировала возникновение и развитие теории термоядерных реакций. Успех был достигнут в 1938—1939 гг., за 6 лет до взрыва первых урановых и за 15 лет до взрыва первых водородных бомб. Именно в это время немецкий физик-теоретик Г. Бете, эмигрировавший в США после прихода фашистов к власти в Германии, рассчитал наиболее вероятные ядерные реакции, идущие в недрах Солнца и звезд.

Решение проблемы источников солнечной и звездной энергии — великолепный и поучительный пример того, насколько важно развитие фундаментальных научных направлений, в которых отдельные проблемы какое-то время (иногда довольно долго) могут быть весьма далеки от сиюминутных потребностей практики. Значение

познания термоядерной реакции трудно переоценить. Сама же *идея ее, идея* о соединении легких ядер и выделении при этом огромной энергии, возникла при решении далекой от практических нужд проблемы источников энергии звезд и Солнца.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В недрах Солнца происходит превращение, вернее, объединение ядер водорода, протонов, в ядра гелия, или α -частицы. Процесс этот достаточно многоступенчатый, и о том, какими путями он может происходить, будет рассказано несколько позже. Сейчас же рассмотрим это превращение с энергетической точки зрения.

Прежде всего сделаем некоторое отступление и напомним формулу Эйнштейна $E=mc^2$. Выведенная теоретически, она великолепно выдержала проверку в экспериментах и на практике и является одной из фундаментальных формул в физике. Формула эта показывает связь между полной массой m и полной энергией E тела или системы и позволяет выражать энергию в единицах массы и наоборот (c — скорость света в вакууме). У нее глубокий не только физический, но и философский смысл, так как она количественно описывает превращение одних форм материи в другие.

Одна из форм материи — это вещество, различные тела, с которыми мы имеем дело в жизни и в научных изысканиях. Проникая все глубже в структуру вещества, мы переходим к молекулам, атомам и элементарным частицам. Для всех элементарных частиц имеются античастицы. Античастица электрона — позитрон, из наблюдений известны антипротон, антинейтрон и т. д. У частицы и античастицы одинаковые массы, но противоположные заряды, направления магнитных моментов по отношению к спину и т. д., в общем, частицу и античастицу можно рассматривать как предмет и его «зеркальное отражение».

Сталкиваясь, частица и античастица аннигилируют, т. е. перестают существовать как зеркально-симметричная пара. В отдельных случаях (например, при столкновении протона и антипротона) могут возникать другие частицы (π -мезоны). А в часто наблюдаемой аннигиляции электрона и позитрона возникают два (изредка больше) кванта электромагнитного излучения в гамма-

диапазоне. Особо «жесткие» кванты могут возникать и при протон-антипротонных столкновениях. И в обоих случаях аннигиляции — электрона и позитрона, протона и антипротона — происходит превращение частиц *вещества*, т. е. например, электрона и позитрона, в другую форму материи — *электромагнитное поле*.

Энергия возникших гамма-квантов (а значит, их частота и длина волны) определяется формулой Эйнштейна. Наблюдаются и обратные превращения: мощный гамма-квант порождает электронно-позитронную пару, тут вещество возникает из другой формы материи.

Формуле Эйнштейна можно дать и такое толкование. Имея дело с одной формой материи — веществом, мы количественно характеризуем объекты посредством понятия массы. Имея же дело с электромагнитным полем (в частности, с излучением), мы для количественной характеристики берем энергию. Одна форма материи может превращаться в другую, поэтому и излучение можно измерять единицами массы, и количество вещества — единицами энергии. Можно сказать, и многие физики именно так и пишут, что вещество превращается просто в энергию, как в другую, отличающуюся от вещества объективную реальность. Связь между ними и дается формулой Эйнштейна. И мы в дальнейшем тоже будем придерживаться этой формулировки.

Формула Эйнштейна учитывает все виды энергии. Мы уже говорили о массе покоя тела m_0 . Если же телу сообщить скорость v и, следовательно, кинетическую энергию $E_k = m_0 v^2 / 2$, то это приведет к возрастанию его массы приблизительно на $\Delta m = E_k / c^2$ (точные формулы учитывают зависимость E_k от Δm).

Вернемся, однако, теперь к недрам Солнца. Масса протона (масса покоя) равна $1,67265 \cdot 10^{-24}$ г, или 1,00728 а. е. м. (Для удобства, чтобы не иметь дела с громоздкими числами, в атомной физике введена атомная единица массы 1 а. е. м. = $1,66057 \cdot 10^{-24}$ г.) Масса α -частицы, в которую превращаются, соединяясь, четыре протона, равна 4,00149 а. е. м. При каждом акте образования одной α -частицы $0,02763$ а. е. м. = $4,588 \cdot 10^{-26}$ г превращается в энергию, причем выделяется $4,588 \times 10^{-26} \text{ г} \cdot 9 \cdot 10^{20} \text{ см}^2/\text{с}^2 = 4,129 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} = 25,8 \text{ МэВ}$. Дефект массы, отнесенный к одному протону, вступающему в реакцию образования α -частицы, составляет $0,00691$ а. е. м. = $0,1148 \cdot 10^{-25}$ г, или $0,00686 \approx 0,7\%$ от массы про-

тона. Можно легко рассчитать, что превращение в гелий всего лишь 1 г водорода даст $0,00686 \text{ г} \cdot 9 \cdot 10^{20} \text{ см}^2/\text{с} = 6,17 \cdot 10^{18} \text{ эрг} = 6,17 \cdot 10^{11} \text{ Дж} = 1,48 \cdot 10^{11} \text{ кал}$ (поскольку 1 кал = 4,1854 Дж).

Сравним это с теплотворной способностью некоторых видов обычного топлива. Донецкий антрацит дает 7200 кал/г, бензин и керосин — 11 000 кал/г, совершенно сухие дрова — 4400 кал/г. Легко видеть, что превращение в гелий 1 г водорода дает столько же энергии, сколько сжигание 20 т лучшего каменного угля.

Светимость Солнца составляет $3,82 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$. Для ее обеспечения нужно, чтобы каждую секунду в гелий превращалось $(3,82 \cdot 10^{33}) / (6,17 \cdot 10^{18}) = 6,19 \cdot 10^{14} \text{ г} \approx 600 \text{ млн. т}$ водорода. Это, конечно, громадное количество по земным меркам, но совсем незначительное по астрономическим. Посмотрим, например, на сколько лет при таком расходе водорода хватит солнечного водорода, причем не всего, а, скажем, 10% от его полного количества. Масса Солнца $2 \cdot 10^{33} \text{ г}$, водород в нем по массе около 70%, отсюда

$$\frac{2,10^{33} \cdot 0,7 \cdot 0,1}{6,19 \cdot 10^{14}} = 2,26 \cdot 10^{17} \text{ с} = 7 \text{ млрд. лет.}$$

ПРОЦЕССЫ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ НА СОЛНЦЕ

Температура на видимой поверхности Солнца близка к 6000 К, т. е. поверхность Солнца почти на 2000 К горячее положительного (более нагретого) кратера вольтовой дуги. Все вещества на Солнце, даже наиболее тугоплавкие, находятся в газообразном и даже частично ионизованном состоянии. Справедливо утверждение, что Солнце — гигантский плазменный шар. В табл. 3 приведены его основные параметры и для сравнения — аналогичные параметры Земли.

Таблица 3

Сравнительные параметры Солнца и Земли

| Параметры | Солнце | Земля | Отношение |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| Масса | $1,989 \cdot 10^{33} \text{ г}$ | $5,976 \cdot 10^{27}$ | 333 000 |
| Радиус | $6,960 \cdot 10^{10} \text{ см}$ | $6,371 \cdot 10^8 \text{ см}$ | 109 |
| Объем | $1,412 \cdot 10^{33} \text{ см}^3$ | $1,083 \cdot 10^{27} \text{ см}^3$ | 1 304 000 |
| Средняя плотность | $1,409 \text{ г/см}^3$ | $5,518 \text{ г/см}^3$ | 0,26 |

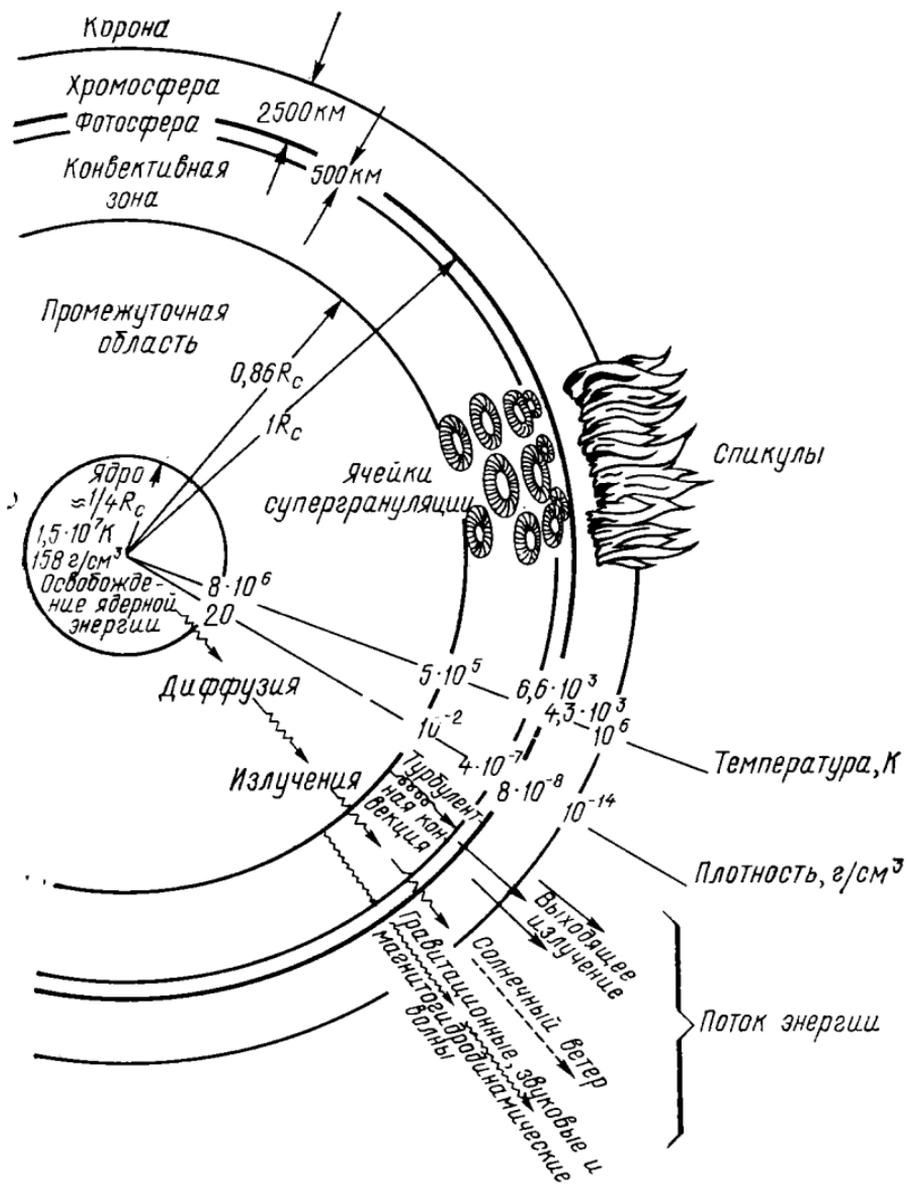


Рис. 2. Схематический разрез Солнца

Физические условия на Солнце сильно меняются с глубиной, растут температура, давление и плотность. Рассмотрим рис. 2, где дан схематический разрез Солнца по современным представлениям. Давление вблизи центра достигает 400 млрд. атм. Оно создается всемирным тяготением: каждая частица притягивает к себе каждую другую частицу и притягивается сама. Иными словами, давление обусловлено весом (в солнечных условиях) вышележащих слоев.

Силы тяготения стремятся сжать Солнце. Им противодействуют упругость газа вместе с давлением излучения, идущего из недр, — эти силы стремятся расширить Солнце. Тяготение, с одной стороны, а упругость газа или газовое давление плюс давление излучения, с другой, уравнивают друг друга. Солнце и большинство звезд находятся, как говорят, в состоянии гидростатического равновесия, причем это равновесие имеет место во всех слоях от поверхности до центра. Если бы его не было, то звезды и Солнце просто не могли бы существовать как стационарные образования. Эта простая идея, выдвинутая А. Эддингтоном, является одной из основных для составления уравнений, по которым рассчитываются модели Солнца и звезд. Такие модели представляют собой совокупность физических параметров звездного вещества (температура, давление, плотность и т. п.) на разных глубинах (модели рассчитываются в виде таблиц или графиков).

Итак, давление в звезде и Солнце чудовищно сжимает газ (плазму). Плотность вблизи центра Солнца составляет около 160 г/см^3 : газ в 20 раз более плотный, чем железо! Сжатие газа до такой плотности возможно только благодаря тому, что вещество в солнечных недрах почти полностью ионизовано. «Голые» ядра, лишённые электронных оболочек, занимают несравненно меньший объем: по порядку величины линейные размеры ядра равны 10^{-12} — 10^{-13} см, тогда как размеры атома — 10^{-8} см, т. е. в десятки тысяч раз больше (объем атома, следовательно, больше в 10^{12} — 10^{15} раз!).

Интересно, что, несмотря на высокую плотность, вещество в недрах Солнца обладает свойствами идеального газа. Это обусловлено опять-таки ионизацией: средние расстояния между частицами, даже в наиболее плотной центральной зоне Солнца, остаются много больше размеров самих частиц («голых» ядер и электронов).

Большое газовое давление может иметь место только при достаточно высокой температуре газа, т. е. когда частицы, составляющие газ, обладают достаточно большими тепловыми скоростями, а значит, и импульсами, которые в совокупности и создают упругость газа, препятствующую его еще большему сжатию. По современным данным, температура в центре Солнца составляет около 14 млн. К.

Центральная зона Солнца представляет особый интерес. Простираясь примерно на $1/4$ солнечного радиуса и имея, следовательно, $1/64$ полного объема Солнца, она вследствие большой плотности содержит $1/2$ солнечной массы. Именно здесь, в области наиболее высоких температур и давления, идут термоядерные реакции и происходит энерговыделение.

Превращение водорода в гелий может осуществляться двумя путями. Один из них называется протон-протонной реакцией и состоит из следующих этапов (рис. 3).

1. Сначала сталкиваются два протона. В результате реакции образуется дейтрон — ядро тяжелого изотопа водорода (дейтерия), а также позитрон и нейтрино. Дейтрон состоит из протона и нейтрона, и поэтому для образования дейтрона необходимо, чтобы один из сталкивающихся протонов при столкновении превратился в нейтрон (позитрон в этом случае уносит «лишний» положительный заряд). К этому обстоятельству мы еще вернемся позже, так как оно определяет темп реакции и энерговыделения.

2. Затем дейтрон сталкивается с протоном, образуя ядро легкого изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$. Далее цепочка разветвляется, поскольку с ядром ${}^3_2\text{He}$ могут произойти такие события:

За. Два ядра ${}^3_2\text{He}$ сталкиваются и дают одно ядро ${}^4_2\text{He}$ с отщеплением двух протонов. Это главная ветвь, здесь участвует большая часть ядер ${}^3_2\text{He}$. Но есть и другие возможности.

Зб. Ядро ${}^3_2\text{He}$ сталкивается с «нормальной» α -частицей и дает ядро бериллия ${}^7_4\text{Be}$. Далее, это ядро, захватив протон, превращается в изотоп бора ${}^8_5\text{B}$. Ядро бора подвержено β -распаду. Испустив позитрон, который уносит «лишний» положительный заряд, оно превращается в весьма неустойчивое ядро изотопа бериллия ${}^8_4\text{Be}$. Это последнее весьма быстро распадается на две α -частицы.

Зв. Третья ветвь начинается после первого акта вто-

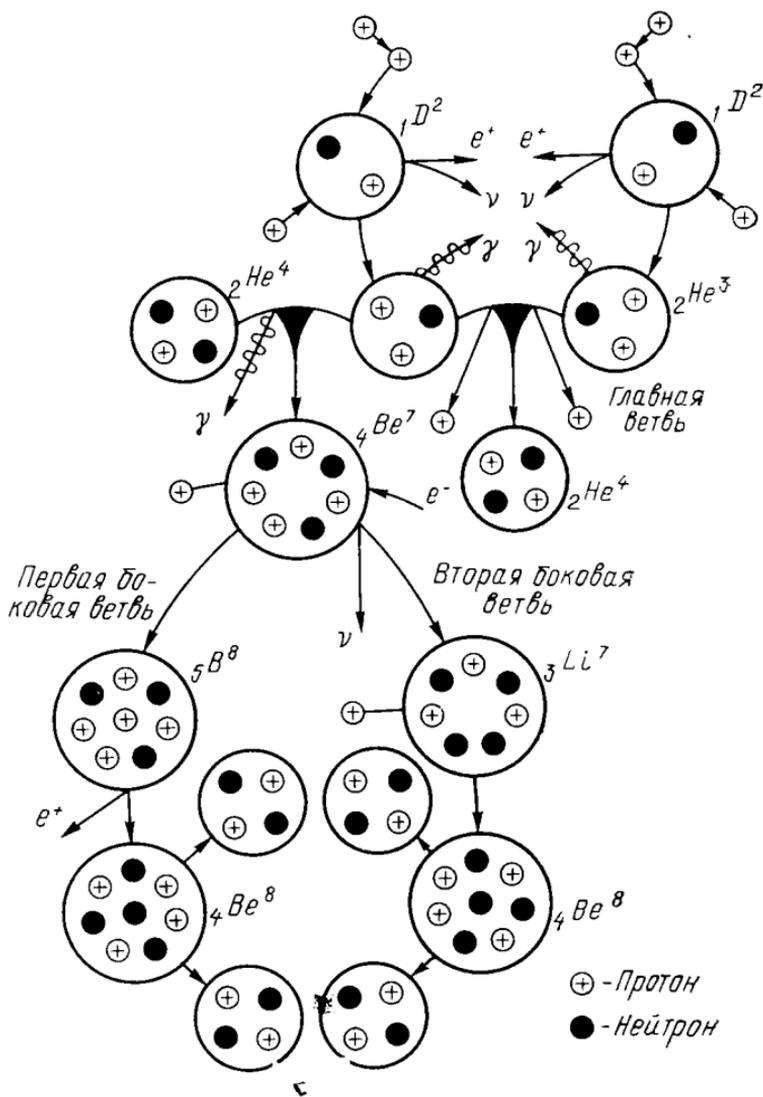


Рис. 3. Схема протон-протонной термоядерной реакции

рой (36). Ядро бериллия ${}^7\text{Be}$ захватывает не протон, а электрон, который «нейтронизует» один из протонов, и ядро ${}^7\text{Be}$ превращается в ядро лития ${}^7\text{Li}$. Ядро лития, сталкиваясь с протоном, дает неустойчивое ядро ${}^8\text{Be}$, которое, как и в конце второй ветви, образует две α -частицы.

Итог всех трех ветвей — четыре протона оказываются связанными в одну α -частицу. При этом выделяется энергии около $26 \text{ МэВ} \approx 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ эрг}$, большая часть — в виде гамма-квантов, а также в виде кинетической энергии взаимодействующих частиц (примерно 5% уносится нейтрино).

Другой путь превращения водорода в гелий — это так называемый углеродно-азотный цикл. Исходным (катализатором) является ядро углерода ${}^6\text{C}^{12}$. На протяжении цикла оно три раза сталкивается с протонами и, захватывая их, превращается в более тяжелые ядра: изотоп азота ${}^7\text{N}^{13}$, нормальный азот ${}^7\text{N}^{14}$, изотоп азота ${}^7\text{N}^{15}$. Ядро последнего, столкнувшись с четвертым протоном, дает исходное ядро углерода ${}^6\text{C}^{12}$ и α -частицу — ${}^4\text{He}^4$ (рис. 4).

Помимо последовательных присоединений протонов, на протяжении цикла происходят β -распады. Так, ядро изотопа азота ${}^7\text{N}^{13}$ не сразу присоединяет протон, превращаясь в ядро ${}^7\text{N}^{14}$. Сначала ядро ${}^7\text{N}^{13}$, испустив позитрон и нейтрино, образует ядро изотопа углерода ${}^6\text{C}^{13}$, а уже то, столкнувшись с протоном и присоединив его, дает ядро нормального азота. Аналогично, ядро нормального азота ${}^7\text{N}^{14}$ не сразу превращается в ${}^7\text{N}^{15}$. Захватив протон, ядро ${}^7\text{N}^{14}$ дает сначала ядро радиоактивного изотопа кислорода ${}^8\text{O}^{15}$, которое после β -распада и становится ядром изотопа азота ${}^7\text{N}^{15}$. Отметим, что количество атомов углерода остается неизменным (углерод является катализатором), а в итоге четыре протона объединяются в одну α -частицу. Как и в протон-протонной реакции, выделяются гамма-кванты, но с несколько меньшей суммарной энергией, так как больше энергии приходится на долю нейтрино.

Светимость Солнца, как уже не раз говорилось, очень велика, но удельное энерговыделение на Солнце равно всего 2 эрг/с на 1 г массы. Это много меньше, чем у любого технического устройства, много меньше, чем, например, у человеческого организма (составляющего у людей среднего веса и возраста при оптимальных условиях около $1,2 \cdot 10^4 \text{ эрг/с}$ на 1 г). Естественно, возникают вопросы: почему при наличии огромного запаса водородного топлива процесс энерговыделения на Солнце идет медленно и почему его темпы не возрастают со временем?

Но прежде чем ответить на них, сделаем небольшое

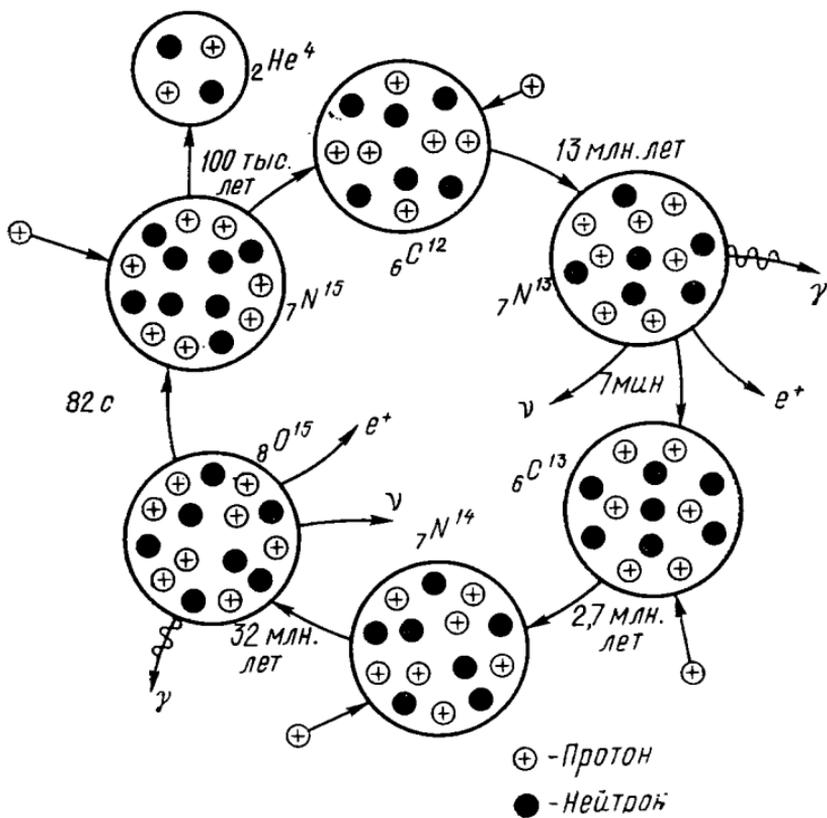


Рис. 4. Схема термоядерных реакций углеродно-азотного цикла

отступление. Физике известны четыре вида фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами.

Сильные взаимодействия. В обычном стабильном веществе они не вызывают никаких процессов, но порождают силы, удерживающие протоны и нейтроны в атомных ядрах. Сильные взаимодействия обуславливают также ядерные реакции, происходящие при столкновении ядер между собой — различные расщепления и слияния ядер. Сильные взаимодействия не зависят от зарядов частиц и одинаково действуют между протонами и нейтронами.

Электромагнитные взаимодействия между заряженными частицами. Они достаточно хорошо известны. Они

обуславливают, в частности, связь электронов с ядрами в атоме.

Слабые взаимодействия. Они обуславливают некоторые превращения, происходящие с элементарными частицами, свободными или связанными в ядре. К ним относится уже упоминавшийся β -распад, например превращение нейтрона в протон с испусканием электрона и нейтрино.

Гравитационные взаимодействия, которые известны каждому³.

При сильных взаимодействиях процессы протекают за время порядка 10^{-24} с, при электромагнитных — 10^{-21} с, при слабых — 10^{-10} с. Наиболее «слабыми» являются гравитационные взаимодействия. Например, притяжение двух протонов в 10^{36} раз слабее электростатического отталкивания между ними. Весьма важным свойством перечисленных сил является их радиус действия. Так, сильные взаимодействия проявляются только на расстояниях, сравнимых с размерами ядра: их радиус действия около 10^{-13} см. На таком расстоянии силы притяжения более чем в 100 раз превосходят силы электростатического отталкивания между протонами, входящими в состав ядра (именно поэтому и возможно существование ядер, содержащих до 100 протонов). Зато по мере увеличения расстояния силы взаимодействия уменьшаются очень быстро и на длине всего в несколько радиусов действия сравниваются с электромагнитными, а затем становятся совершенно несущественными. Радиус слабых взаимодействий еще меньше, надежно измерить его не удастся, он оценивается в 10^{-15} см.

В противоположность этим двум силам, электромагнитные и гравитационные взаимодействия практически не ограничены расстоянием; их сила убывает как r^{-2} (r — расстояние). Поэтому мы постоянно и сталкиваемся с проявлением, например, силы тяготения: несмотря на ее относительную слабость, здесь возможно суммирование воздействий от всего множества частиц, со-

³ Отметим для полноты картины, что усилия теоретиков направлены на создание единой теории взаимодействий. Первый большой успех на этом пути достигнут около 16 лет назад, когда удалось обнаружить глубокую связь между слабыми и электромагнитными взаимодействиями и построить их единую теорию. Это сделали независимо друг от друга американский физик С. Вайнберг и пакистанский А. Салам в 1967—1968 гг.

ставляющих макроскопическое тело, и «выход» силы тяготения в масштабы макромира.

Теперь легко понять, почему в Солнечной системе термоядерные реакции могут идти только в недрах Солнца, где температура достаточно высока. Ведь протоны (и ядра), имея заряд одного знака, отталкиваются друг от друга согласно закону Кулона. А при низких температурах скорости теплового движения протонов и ядер малы, мала их кинетическая энергия, и ее просто не хватает, чтобы, преодолев силы кулоновского отталкивания, протоны и ядра могли сблизиться на расстояние, достаточное для «включения» ядерных сил ($\sim 10^{-13}$ см). Чтобы приблизиться к ядру на расстояние $\sim 10^{-13}$ см, другими словами, чтобы преодолеть кулоновский потенциальный барьер, протону нужно иметь энергию порядка 10^6 эВ. Между тем даже при температуре 10^7 К средняя энергия тепловых движений протонов оказывается порядка 10^3 эВ.

Выручают два обстоятельства. Во-первых, существует так называемый туннельный эффект — специфически квантовое явление, связанное с наличием у частиц волновых свойств. Потенциальный барьер ядра благодаря этому эффекту могут с некоторой вероятностью преодолеть и те протоны, энергия которых значительно ниже энергии, необходимой для прохождения потенциального барьера «напролом». Тем не менее и туннельный эффект могут использовать далеко не все протоны, а лишь наиболее «быстрые», с энергией примерно в $2 \cdot 10^4$ эВ. Второе благоприятное обстоятельство — это то, что всегда имеются частицы, скорости и энергии которых значительно больше средних. Относительная доля таких частиц весьма мала: так, при температуре солнечных недр доля протонов с энергией в $2 \cdot 10^4$ эВ составляет $\sim 10^{-8}$.

Все это является одной из причин того, что ядерные реакции на Солнце идут очень медленно. Подавляющая часть столкновений протонов и ядер не приводит к их слиянию — не хватает энергии.

Но почему же, спросит читатель, за миллиарды лет существования Солнца его недра не разогрелись до более высокой температуры, чем 14 млн. К? Ведь по мере разогрева число высокоэнергичных частиц, способных преодолеть кулоновские барьеры ядер, растет значительно быстрее, чем средняя энергия частиц. А именно

они ответственны за темпы ядерной реакции и обуславливают весьма сильную температурную зависимость энерговыделения: пропорционально 5-й степени температуры в протон-протонной реакции и пропорционально 15-й степени в углеродно-азотном цикле. Почему не возникает лавинообразный процесс, когда разогрев приводит к интенсификации ядерных реакций, последнее — к еще большему разогреву и дальнейшей интенсификации реакций и т. д.?

Дело в том, что вещество солнечных недр (и всего Солнца в целом) подчиняется известным газовым законам. Об этом вкратце уже говорилось при описании условий в недрах Солнца. Наиболее общее выражение газовых законов дается уравнением Клапейрона, связывающим для данной массы газа, содержащей n частиц, его давление p , объем V и температуру T : $pV = nkT$, где $k = 1,380662 \cdot 10^{-16}$ эрг/К — так называемая постоянная Больцмана.

Любой же слой или область в недрах Солнца находится, как мы знаем, в гидростатическом равновесии: вес вышележащих слоев уравнивается упругостью газа и лучевым давлением. Ядерные реакции могли бы пойти интенсивнее в каком-нибудь объеме, если бы температура в этом объеме почему-либо повысилась. Но ведь повышение температуры означает, что увеличились скорости и импульсы тепловых движений частиц, т. е. возросла упругость газа. А поскольку вес вышележащих слоев не изменился, с необходимостью должно произойти расширение массы газа в рассматриваемом объеме, чтобы его упругость осталась прежней и не нарушилось механическое равновесие. Расширение же (опять в виде уравнения Клапейрона) немедленно приводит к понижению температуры, снижению интенсивности ядерных реакций и восстановлению прежних условий. Газовые законы обеспечивают саморегулирование температуры и других параметров в недрах Солнца.

Кроме температуры, скорость ядерных реакций зависит от так называемого сечения реакций, а также от процентного содержания реагирующих частиц, причем сечение ядерной реакции характеризует скорость ее при фиксированных условиях. Для иллюстрации обратимся ко второму звену протон-протонного цикла, которое является весьма быстрым. Протонов в солнечном веществе полное изобилие, и буквально в течение нескольких се-

кунд после образования дейтрона среди сталкивающихся с ним частиц окажется протон с энергией, достаточной для преодоления кулоновского барьера и образования ядра ${}^2\text{He}^3$. Жизнь ядер ${}^2\text{He}^3$ будет более продолжительной, концентрация их очень мала, и поэтому может пройти несколько миллионов лет, прежде чем ядро ${}^2\text{He}^3$ встретит себе партнера с нужной энергией и сможет с ним объединиться. (Напомним, что кулоновский барьер у каждого из них вдвое больше, чем у протонов и дейтронов.)

Самым медленным звеном протон-протонной реакции является первое — образование дейтрона при столкновении двух протонов. При этом один из них должен превратиться в нейтрон, испустив позитрон и нейтрино. Данный процесс относится к β -распаду, т. е. находится в ведении слабых взаимодействий. β -распад осуществляется легко и быстро, если масса покоя первоначальной частицы или ядра больше суммы масс покоя образующихся частиц. Кинетическая энергия последних уносит избыток массы первоначальной частицы. Примером может служить β -превращение нейтрона (масса 1,008665 а. е. м.) в протон (масса 1,007276 а. е. м.) и электрон (масса 0,000549 а. е. м.) с испусканием антинейтрино. В природе в свободном виде, т. е. не связанные в ядре, нейтроны не существуют при обычных условиях, так как быстро распадаются описанным образом (период полураспада нейтрона 12,8 мин).

Обратный же процесс — превращение протона в нейтрон — в обычных условиях не происходит: протон в свободном состоянии может существовать практически неограниченное время. На Солнце это превращение происходит *вынужденно*, будучи инициировано возможностью перехода двух протонов в систему с меньшей энергией.

В самом деле, ведь сумма масс двух протонов — 2,01455 а. е. м., сумма масс нейтрона и протона — 2,01594 а. е. м., а масса дейтрона — 2,01354 а. е. м. Дефект массы, равный в энергетическом выражении около 2,2 МэВ, получающийся за счет работы ядерных сил (сильное взаимодействие), покрывает превышение массы нейтрона над массой протона и рождающегося позитрона и приводит, кроме того, к выделению энергии. С законом сохранения здесь все в порядке, но вероятность описанного процесса очень мала, а поэтому мало

и ее сечение. Характерное время реакции оказывается порядка 10^{10} лет. Примерно столько времени может в среднем жить протон, прежде чем произойдет такое столкновение, когда он войдет в состав дейтрона.

Вернемся опять к рис. 2. Как уже говорилось, выделение энергии при ядерных реакциях происходит в основном в форме гамма-квантов, а около 4—5% ее уносится нейтрино. Нейтрино совершенно свободно проходят сквозь всю толщу Солнца, их энергия не влияет на его температуру и светимость, т. е. на мощность электромагнитного излучения. В противоположность нейтрино электромагнитное излучение, зародившись в недрах Солнца, встречает мощное сопротивление своему продвижению наружу, так как солнечное вещество в высшей степени непрозрачно.

Непрозрачность солнечного вещества создается многими факторами. Во-первых, происходит рассеяние квантов излучения на свободных электронах. Последних очень много, поскольку наиболее распространенные элементы — водород и гелий — полностью ионизованы, а другие элементы (например, железо) ионизованы в значительной мере: у них осталась только часть электронов — именно те, которые находятся на самых внутренних оболочках.

Второй источник непрозрачности связан с свободно-свободными переходами. Как известно, излучение и поглощение кванта происходит при изменении энергии электрона: например, при переходе его в атоме с одной орбиты на другую или, образно говоря, с одного уровня на другой. Но оказывается, что не только находящийся в атоме электрон, но и электрон, пролетающий мимо положительного иона, может поглощать и испускать излучение, при этом соответственно меняется скорость относительного движения (а следовательно, и энергии) этих частиц. Ускорившись после поглощения кванта, электрон может отдать часть энергии, замедлившись возле другого иона, и т. д.

Третий источник непрозрачности — это рекомбинации протонов с электронами и последующие ионизации. Электрон, столкнувшись с протоном, может быть им захвачен, образуется (рекомбинируется) нейтральный атом водорода, при этом испускается квант. Рекомбинированный атом живет очень недолго, он тут же поглощает квант и ионизуется, а электрон оказывается

вновь оторванным. В отличие от свободно-свободных переходов переходы электрона при рекомбинациях и ионизациях называются свободно-связанными и связанно-свободными.

Наконец, значительный вклад в непрозрачность вносят ионы тяжелых элементов. При температуре солнечных недр у них остались электроны на самых близких к ядру орбитах, которые могут быть оторваны от ядра при поглощении достаточно энергичного («жесткого») кванта и т. д., имеем разнородность связанно-свободных и свободно-связанных переходов. Несмотря на относительно малое содержание тяжелых элементов (2%), их роль в создании непрозрачности солнечного вещества оказывается довольно большой.

Эти процессы не влияют на выработку энергии, но сильно затрудняют ее выход из солнечных недр. Подсчитано, что длина свободного пробега кванта в недрах Солнца составляет всего 6 см. Поясним это. Пусть первоначально квант движется вдоль радиуса Солнца наружу. Пролетев всего около 6 см, он претерпит рассеяние или поглощение с последующим переизлучением. Но переизлучение одинаково вероятно во всех направлениях. Квант изменит направление своего движения, и в результате диффузия квантов из центральной области Солнца к наружным слоям осуществляется медленно. Во всяком случае та порция энергии, которая возникает в ядре Солнца в настоящий момент, лишь примерно через 1 млн. лет дойдет до фотосферы и высветится в мировое пространство. Для сравнения напомним, что, вырвавшись «на свободу», свет всего только за 8 мин 19 с проходит среднее расстояние от Солнца до Земли (149,6 млн. км), в 215 раз превышающее солнечный радиус.

Несмотря на такие трудности распространения излучения в недрах Солнца, именно излучение играет главную роль в переносе энергии из центральной зоны наружу. Теплопроводность не играет никакой роли, а конвекция⁴ возникает лишь во внешних слоях, начиная с уровня 0,85—0,86 R_c от центра (где R_c — радиус Солнца). К этому уровню температура снижается до

⁴ Явление конвекции читателю, вероятно, хорошо знакомо. Конвективные потоки возникают, например, в нагреваемой снизу кастрюле с водой или другой жидкостью.

500 тыс. К. В отличие от центральных слоев, где практически все атомы водорода и гелия постоянно пребывают в ионизованном состоянии, ненадолго рекомбинируя и тут же оказываясь снова ионизованными, здесь имеется определенная доля нейтральных атомов, которая растет к наружным слоям. Она сильно увеличивает число связанно-свободных и свободно-связанных переходов и, как следствие, увеличивает непрозрачность солнечного вещества. Поступающая из недр Солнца энергия уже не успевает переноситься дальше только в форме электромагнитного излучения, вступает новый процесс переноса энергии — конвекция.

Наружный слой Солнца, из которого кванты уже могут свободно выходить во внешнее пространство, называется фотосферой, именно фотосфера и является той ослепительно яркой поверхностью, которая определяет видимые размеры Солнца. На хороших снимках фотосферы можно видеть, что она имеет как бы зернистую структуру — многочисленные гранулы, т. е. небольшие области, более яркие, чем межгранульное пространство, и живущие в среднем около 5 мин, потом исчезающие и вновь возникающие где-то рядом с прежними местами. Они обусловлены не чем иным, как выходом конвективных потоков в фотосферу, т. е. поднимающихся из подфотосферной зоны горячих масс газа (внешние слои Солнца как бы кипят).

Отметим еще одно интересное обстоятельство. При термоядерных реакциях в недрах Солнца энергия выделяется в основном в виде гамма-лучей. Между тем выходящее из фотосферы излучение имеет максимум энергии, приходящийся на видимую область. На интервал от 3,3 до 4,0 мкм приходится 98% энергии солнечного излучения, а на всю область длин волн короче 0,3 мкм — чуть больше 1%. Это вызвано тем, что при своем продвижении наружу, при многочисленных поглощениях и переизлучениях, кванты «дробятся», излучение становится более мягким.

Чтобы понять механизм «дробления» квантов, рассмотрим схему уровней водородного атома (рис. 5). Для ионизации атома, у которого электрон находится на самом нижнем (основном) уровне, нужен квант с энергией, не меньшей потенциала ионизации (13,6 эВ); соответствующая длина волны равна 91,2 нм. Допустим, что атом поглощает квант высокой энергии, тогда

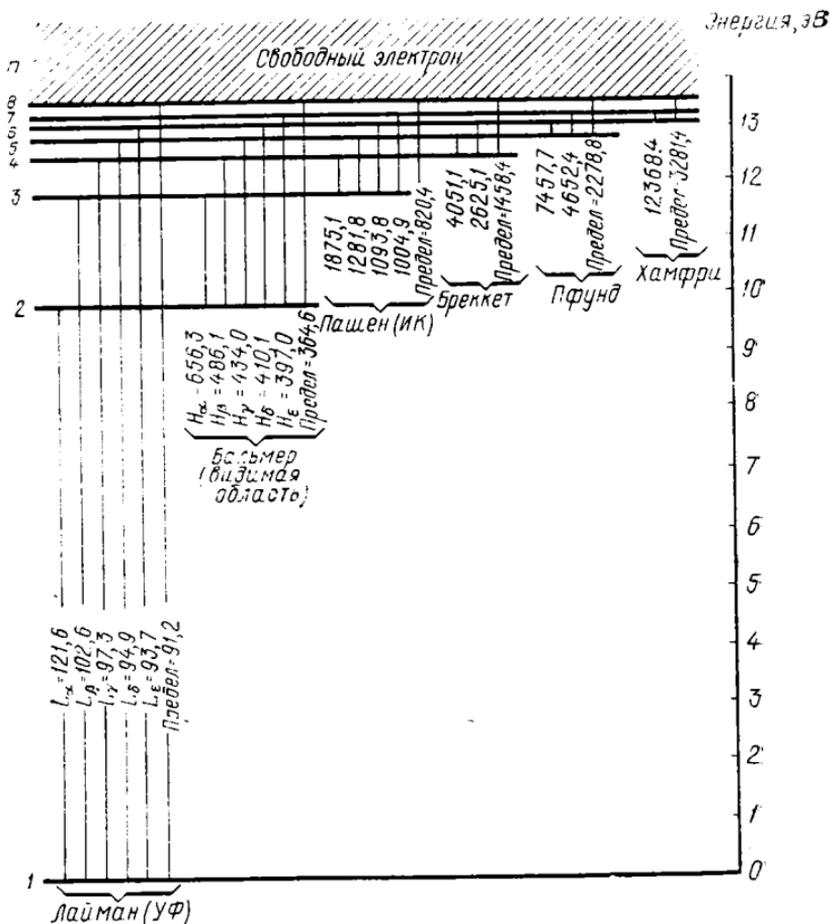


Рис. 5. Схема уровней возбуждения в атоме водорода и переходах между ними, дающих линии серий Лаймана, Бальмера и т. д.

13,6 эВ из этой энергии идет на отрыв электрона, а остальная часть превращается в кинетическую энергию оторванного электрона.

Встретив протон, электрон может быть им захвачен, причем захват не обязательно произойдет на нижний уровень. Электрон после захвата может оказаться на любом верхнем уровне и потом перейти на основной. Вместо «большого» кванта, поглощенного при ионизации, будет испущено два или даже большее число меньших, в зависимости от того, перескочит ли электрон

сразу на основной уровень или будет каскадом переходить через промежуточные, возможностей тут довольно много.

Из фотосферы выходит подавляющее количество ($\sim 99,98\%$) солнечного излучения. Вышележащие слои: хромосфера и корона, исключительно интересны в физическом отношении, но они требуют специального рассмотрения, и мы их здесь рассматривать не будем, так как их вклад в общий поток излучения Солнца небольшой. Не будем также затрагивать и проблему солнечной активности (об этом можно прочесть в литературе, приведенной в конце брошюры).

МИР ЗВЕЗД

Рассмотренные процессы, протекающие внутри Солнца, типичны для недр многих звезд. Солнце является типичной звездой, средней по большинству параметров (массе, светимости, возрасту и т. д.). Изучение многообразия звезд помогает лучше понять физику Солнца и особенно его происхождение и эволюцию. В то же время явления и процессы, протекающие на Солнце, доступны нам для несравненно более детального исследования, чем происходящие на звездах, и поэтому наблюдения Солнца чрезвычайно полезны для физики звезд.

Видимый блеск звезды определяется двумя факторами: ее истинной светимостью и расстоянием. Для характеристики истинной светимости пользуются понятием «абсолютная звездная величина», которая равна блеску звезды, если бы та находилась от нас на расстоянии в 10 пк. В табл. 4 приводятся видимые и абсолютные звездные величины нескольких хорошо известных звезд.

Таблица 4

Видимая и абсолютная звездные величины некоторых звезд

| Звезда | Видимая величина | Абсолютная величина |
|----------|------------------|---------------------|
| Вега | 0,04 | 0,5 |
| Ригель | 0,11 | -7,0 |
| Полярная | 2,3 | -4,6 |
| Сириус | -1,45 | 1,41 |
| Процион | 0,37 | 2,64 |
| Тау Кита | 3,50 | 5,2 |
| Солнце | -26,74 | 4,83 |

С расстояния 10 пк Ригель засиял бы примерно в 10 раз ярче Венеры ($-4,2^m$), Полярная была бы, как Венера при максимальном блеске, ярчайшей сейчас Сириус стал бы довольно заурадной звездой первой величины, а Солнце же оказалось бы вблизи предела видимости невооруженным глазом.

Основные сведения о физических условиях и химическом составе звезд дает изучение их спектров. Вид спектра звезды определяется в первую очередь ее температурой, а во вторую — давлением и плотностью ее фотосферы (далее следует учитывать такие параметры, как магнитное поле, аномалии химического состава, осевое вращение и т. д.). У наиболее холодных красных звезд, класса М, температура фотосферы составляет около 3000 К, к ним относятся Бетельгейзе (α Ориона) и Антарес (α Скорпиона). В их фотосферах могут существовать простейшие молекулы, и широкие полосы поглощения молекул, в первую очередь окиси титана, являются наиболее характерными деталями спектров этих звезд. Наряду с молекулярными полосами в спектрах много линий металлов, присутствуют линии ионизованного кальция К и Н (длины волн соответственно 393,4 и 396,8 нм).

По мере повышения температуры число молекул уменьшается, и молекулярные полосы исчезают. Солнце принадлежит к спектральному классу G. В его спектре огромное количество линий (их зарегистрировано около 30 000), принадлежащих нейтральным и ионизованным металлам. Самые сильные — это линии H и K ионизованного кальция. Весьма сильны также (но значительно слабее H и K) линии бальмеровской серии водорода, которые в классах M и K практически не заметны. Но ведь водород является наиболее обильным элементом на Солнце и в фотосферах подавляющего большинства звезд, в том числе и холодных (классов M и K). Между тем в спектрах звезд класса G, K и M водородные линии не являются доминирующими. Почему?

Для этого вернемся к рис. 5, показывающему схему уровней возбуждения атома водорода. При относительно невысоких температурах большая часть атомов водорода не возбуждена, их электроны находятся на основном уровне. Линии же серии Лаймана, возникающие при переходах с основного уровня, все лежат в далекой ультрафиолетовой (УФ) области и не наблюдаются с

поверхности Земли (вследствие поглощения атмосферой). На втором же уровне, не говоря о более высоких, находится совершенно ничтожная доля атомов водорода (для солнечной фотосферы эта доля равна $4,2 \cdot 10^{-9}$). А линии H и K возникают при переходе электрона с основного (нижнего) уровня иона кальция. Поэтому, хотя вообще атомов кальция на Солнце в 500 000 раз меньше, чем водорода, *поглощающих* ионов кальция оказывается больше, чем атомов водорода, возбужденных до второго уровня. Этим и объясняется большая интенсивность линий H и K.

С дальнейшим ростом температуры линии металлов становятся все менее интенсивными, так как все большее число их атомов оказывается ионизованным. Интенсивность водородных линий увеличивается. Линии H и K еще сильны в спектре звезд класса F (например, у Проциона), но уже слабее водородных, которые становятся преобладающими у звезд этого класса и следующего за ним класса A, где их интенсивность максимальна (Вега, Сириус).

Еще более высокая температура звезд последующих классов, B и O, обуславливает практически полное исчезновение в их спектрах линий нейтральных и однократно ионизованных металлов: атомы железа, магния и т. д. претерпевают вторую ионизацию. Дважды ионизованным оказывается и кальций, поэтому совсем исчезают линии H и K.

Зато появляются линии гелия. В спектрах более холодных звезд их нет по той же причине, по которой в классах K и G слабы линии водорода: наблюдаемые (с поверхности Земли) линии гелия возникают при переходах с достаточно высоких уровней возбуждения. А при низких температурах возбужденных атомов гелия, по сути дела, нет. Однако главной отличительной чертой является уменьшение интенсивности водородных линий с ростом температуры при $T > 12$ тыс. К. Хотя относительная населенность второго уровня продолжает увеличиваться, но уже возникает сильная ионизация, которая тоже растет с температурой. У самых горячих звезд водородные линии слабы, интенсивны линии нейтрального и ионизованного гелия, присутствуют линии трижды ионизованных кремния и углерода, дважды ионизованного азота и т. д.

Таким образом, имеется следующая последовательность спектральных классов: O (температура звезд 30—50 тыс. К), B (15—30 тыс. К), A (10—12 тыс. К), F (7—8 тыс. К), G (5—6 тыс. К), K (4000 К), M (2000—3000 К). Детальная классификация предусматривает подклассы вида A0, A1, A2 и т. д.

Здесь все время говорилось о силе или об интенсивности линий поглощения. Сила линий характеризуется тем количеством энергии, которое они изымают из спектра. Существует понятие «эквивалентная ширина линии» — протяженность участка непрерывного спектра с интенсивностью, которую он имел бы, если бы линия поглощения отсутствовала, и содержащий столько энергии, сколько ее изымает линия (рис. 6).

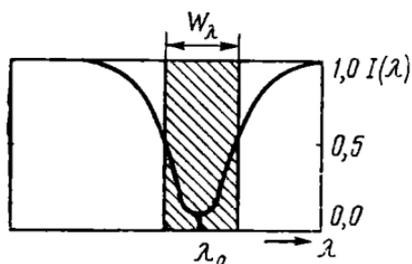


Рис. 6. Фотометрический профиль линии поглощения и ее эквивалентная ширина

Эквивалентная ширина синей водородной линии (обозначаемой $H\gamma$) составляет 1,91 нм, то у звезды Денеб (того же подкласса) эта линия, будучи самой сильной в спектре, имеет эквивалентную ширину всего лишь 0,29 нм. Оказывается, эквивалентные ширины линий при данной температуре зависят от светимости звезды, т. е. внутри одного и того же спектрального класса — от радиуса. Чем меньше радиус и, следовательно, чем больше плотность в фотосфере звезды, тем большими будут эквивалентные ширины линий, и наоборот. Звезда σ Андромеды — карлик, а Денеб (α Лебеда) по сравнению с ней (и с Солнцем) — гигант. Таким образом, изучение спектров вместе с некоторыми другими методами позволяет определять не только температуры, но и светимости звезд, характеризуемые их абсолютными величинами.

Сопоставим теперь спектральные классы и абсолют-

Спектральные классы как раз и устанавливаются на основании относительной интенсивности линий разных элементов (например, у звезд класса A водородные линии сильнее всех остальных).

Однако если у звезды σ Андромеды (класса A, а точнее, подкласса A2) эквивалентная ширина синей водородной линии (обозначаемой $H\gamma$) составляет 1,91 нм,

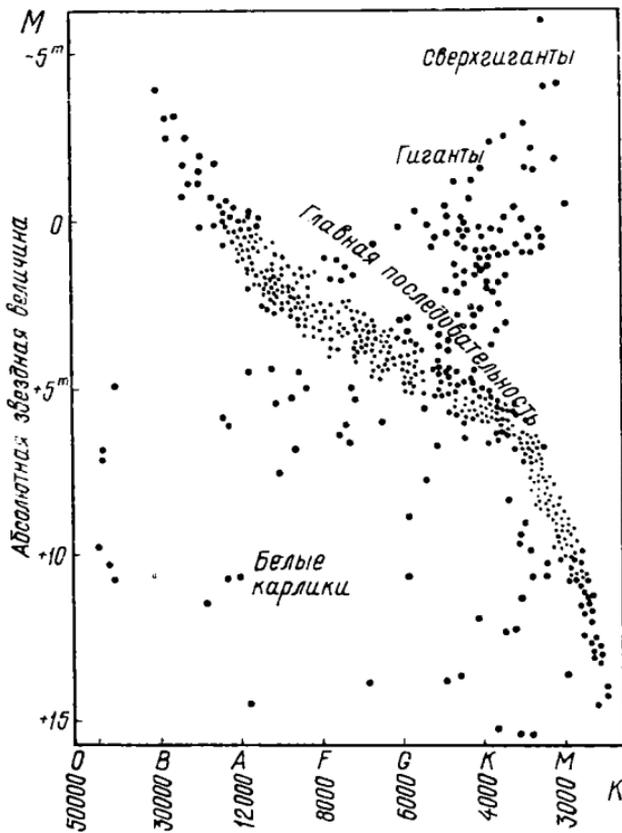


Рис. 7. Диаграмма Герцшпрунга—Рессела (спектр — абсолютная звездная величина)

ные величины звезд. Спектральные классы будем откладывать по оси абсцисс, а абсолютные величины (обозначаются через M) — по оси ординат. Получим диаграмму, изображенную на рис. 7. Она называется диаграммой Герцшпрунга—Рессела (сокращенно диаграммой Г—Р). Большинство точек располагается на ней вдоль «криволинейной» диагонали, идущей из левого верхнего в правый нижний угол — так называемой главной последовательности. Лет 35 назад было введено понятие класса светимости применительно к разным группам звезд на диаграмме Г—Р. Римской цифрой V, поставленной после обозначения спектрального подкласса, от-

мечаются звезды главной последовательности (например, Солнце классифицируется как G2V), цифрой IV — субгиганты, III — гиганты. Сверхгиганты максимальной светимости обозначаются Ia, несколько более слабые — Ib и т. д.

Диаграмма Г—Р, вообще говоря, не может служить аргументом в пользу большего или меньшего обилия звезд на тех или иных последовательностях диаграммы. В самом деле, различие в светимостях, например, у белых карликов и у сверхгигантов Ia, а также у звезд, находящихся на противоположных концах главной последовательности, достигает 20^m , т. е. в 100 миллионов раз. Естественно, звезды большей светимости обнаруживаются и доступны изучению с больших расстояний, чем слабые звезды. Тем не менее имеются убедительные свидетельства в пользу того, что большинство звезд относится к главной последовательности. И объясняется это обстоятельство в конечном счете различными источниками звездной энергии, связанными с различием внутреннего строения и химического состава звезд, меняющимися в процессе их эволюции.

НЕСКОЛЬКО СЛОВ О МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ И ЗВЕЗДНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Исключительной мировоззренческой важности вопрос о происхождении и эволюции Солнца и звезд волнует любознательное человечество многие сотни лет. Отсылая читателя за историей этой проблемы и интересными подробностями к книгам рекомендуемой литературы, отметим здесь лишь самые основные моменты.

1. По современным представлениям процесс звездообразования идет в Галактике непрерывно с момента ее возникновения и до наших дней (возраст Галактики оценивается в 15—20 млрд. лет).

2. Звезды образуются группами из гигантских, первоначально весьма холодных облаков межзвездного диффузного вещества. Основную часть его (приблизительно 99% по массе) составляет газ в атомарном, молекулярном, а местами — в ионизованном состоянии (1% массы приходится на межзвездную пыль). Полная масса газа в Галактике оценивается в $4 \cdot 10^9$ солнечных масс, что составляет приблизительно 2% от всей массы Галактики. Из этого количества примерно половина, т. е. около $2 \cdot 10^9 M_{\odot}$ (где M_{\odot} — масса Солнца), приходится

на атомарный водород. Другая половина газа — это водород в молекулярном состоянии, гелий (около 30%) и другие элементы (химический состав межзвездной среды близок к солнечному). Кроме водородной молекулы H_2 , в межзвездной среде открыто более полусотни других молекул, в том числе воды H_2O , гидроксила OH , окиси углерода CO и т. д., а также довольно сложных, состоящих из восьми, девяти и более атомов, причем многие из них в нескольких изотопных комбинациях.

3. Свойства межзвездной среды таковы, что она вынуждена под действием так называемых гравитационной и тепловой неустойчивостей приобретать облачную структуру: вещество собирается в облака с характерными размерами от одного до нескольких парсеков и массой в несколько солнечных. Концентрация вещества составляет около 10 атомов водорода в 1 см^3 облаков, а в межоблачном пространстве значительно меньше — $0,2—0,02 \text{ см}^{-3}$.

4. Если поблизости от такого облака находится звезда, то освещенное ею облако становится видимым. В телескоп и на фотографиях такие облака видны как светлые протяженные образования неправильной формы (называются они туманностями).

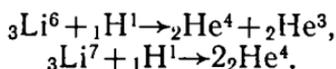
5. Туманности известны давно, с прошлого столетия, но лишь совсем недавно выяснилось, что многие из туманностей входят в состав гигантских холодных газопылевых комплексов, не наблюдаемых в видимых лучах. Галактическое магнитное поле способствует тому, что некоторые из облаков, образовавшихся в межзвездной среде вследствие ее гравитационной и тепловой неустойчивостей, продолжают свой рост, к ним «притекает» вещество из больших объемов, а сами они превращаются в упомянутые гигантские газопылевые комплексы размером до 100 пк и массой в десятки, а иногда и сотни тысяч солнечных масс. Газ в этих комплексах находится большей частью в молекулярном состоянии, температура их низка, составляя по порядку величины десятков кельвинов.

6. Под действием самогравитации комплекс сжимается, плотность его растет, и концентрация достигает $10^3—10^4$ атомов и молекул водорода в 1 см^3 . В дальнейшем комплекс распадается на отдельные сгустки, которые продолжают сжиматься, концентрация атомов и молекул все более возрастает.

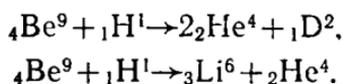
7. Потенциальная энергия гравитирующей сжимающейся массы превращается в тепло. В начальный период сжатия оно свободно уходит в виде излучения в далекой инфракрасной области. Но наступает момент, когда облако уплотняется настолько, что становится непрозрачным к собственному излучению. Начинается разогрев его центральной части. В ней сначала частично испаряется пыль, потом начинается диссоциация молекул на атомы, потом ионизация атомов, в результате чего вещество в центре сжимающегося облака переходит в плазменное состояние. Облако диффузной материи превращается в протозвезду. Протозвезды могут наблюдаться в виде источников инфракрасного излучения и относительно холодных красных звезд. Отметим, что наблюдения последнего десятилетия, сделанные в радио- и инфракрасном диапазонах, подвели солидную наблюдательную базу под излагаемую схему образования звезд.

8. Можно оценить время, которое необходимо для сжатия облака в протозвезду. В зависимости от массы сжимающейся протозвезды оно сказывается в пределах от сотни тысяч лет у наиболее массивных до нескольких сотен миллионов лет у протозвезд с массой меньше солнечной. Выделяющаяся гравитационная энергия может быть оценена по формуле в сноске 2. Половина ее излучается в пространство, а половина идет на нагревание протозвезды (в том числе на изменение состояния вещества в ней: диссоциацию молекул, ионизацию атомов и т. д.).

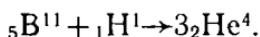
9. Сжатие протозвезды и разогрев ее ядра продолжают, и когда температура в центральной зоне достигнет ~ 1 млн. К, в ней начинаются ядерные реакции. Первые из них — это ядерное горение легких элементов: лития, бериллия и бора. Природный литий состоит из смеси двух изотопов ${}_3\text{Li}^6$ и ${}_3\text{Li}^7$, которые, сталкиваясь с протонами, могут участвовать в реакции деления:



Бериллий может участвовать в двух реакциях



Бор участвует в реакции



Потенциальные кулоновские барьеры у ядер Li, Be и B относительно невелики, а главное — у названных реакций большие сечения. Они заключены в пределах от 10^{-3} барна⁵ у первой реакции до $6 \cdot 10^{-1}$ барна у последней, что на много порядков превышает сечение, например, первого звена протон-протонной реакции, составляющее 10^{-23} барна. Большое сечение реакций компенсирует то обстоятельство, что при температурах около 1—1,5 млн. К лишь очень небольшая доля протонов имеет кинетическую энергию, достаточную для проникновения через потенциальный барьер.

Реакции с Li, Be и B начинаются первыми и идут достаточно интенсивно в начальный период образования звезды (вернее, в период превращения протозвезды в звезду). Но распространенность легких элементов невелика, и в отличие от углерода и азота в углеродно-азотном цикле они безвозвратно расходуются в перечисленных реакциях (довольно быстро выгорая за время порядка немногих тысяч лет).

Ядерные реакции с участием легких элементов не приостанавливают гравитационное сжатие протозвезды, хотя вместе с ее уплотнением и увеличением ее непрозрачности и замедляют его. Наконец, когда температура протозвездного ядра достигает примерно 9—10 млн. К, «включаются» водородные реакции. Около этого момента протозвезда приходит в равновесное состояние. Температура и плотность внутренних слоев становятся такими, что сила их упругости может противодействовать весу наружных слоев. Гравитационное сжатие прекращается, устанавливается равновесие. Температура ядра в течение длительного времени будет поддерживаться водородными реакциями, причем будет иметь место самостабилизация параметров, о которой говорилось при описании солнечных недр.

Объекты, представляющие собой последнюю стадию жизни протозвезды и самую начальную эпоху жизни звезды, когда в них идут реакции с участием легких

⁵ Барн = 10^{-24} см² — специальная единица для выражения поперечного сечения ядерных процессов. Выбор ее значения связан с тем, что геометрическое сечение атомных ядер по порядку величины составляет 10^{-24} см².

элементов и не установилось еще гидростатическое равновесие, изображаются на диаграмме Г—Р точками правее главной последовательности (на диаграммах Г—Р, обычно приводимых в популярных книгах, таких точек практически нет, так как названные объекты довольно трудно наблюдать.)

После начала водородных реакций и установления равновесного состояния звезда попадает на главную последовательность, причем появление новорожденных звезд происходит по всей длине главной последовательности в зависимости от их массы. От массы в первую очередь зависит, какую конкретно температуру будет иметь звездное ядро в момент установления равновесия. Чем больше масса сжимающегося облака, протозвезды и затем звезды, тем большее гравитационное давление возникает в ее центральных областях и тем большая температура нужна, чтобы газовое давление могло противодействовать весу внешних слоев.

Если светимости звезд различаются в очень широких пределах, то массы звезд хотя тоже различаются, но значительно меньше. Отношение масс наиболее и наименее массивных представителей звездного населения не достигает и трех порядков. Существует для звезд фундаментальное соотношение масса—светимость. Оно находится из наблюдений, а также выводится теоретически в теории внутреннего строения звезд. Оказывается, светимость звезды пропорциональна массе в четвертой степени (в отдельных интервалах светимостей — в третьей). Качественно эта зависимость объясняется так. Масса в значительной мере определяет температуру ядра: в общем случае при большей массе звезды ее ядру приходится выдерживать больший вес вышележащих слоев, поэтому нужна более высокая температура, чтобы упругость газа могла противостоять этому большому весу.

Дальше можно рассуждать так. Излучение звезды тепловое, и его генерация согласно закону Стефана—Больцмана пропорциональна четвертой степени температуры. Но в уже сформировавшихся звездах, за исключением «переломных моментов» их жизни, имеет место равенство генерируемой энергии и испускаемой; лучистая энергия не накапливается в звезде, и ее испускается не больше, чем генерируется (об этом свидетельствует высокое постоянство блеска звезд на протяжении

весьма длительных промежутков времени). И хотя, как мы уже видели при рассмотрении процессов на Солнце, лучистая энергия, выделившаяся в недрах звезды, лишь очень медленно диффундирует к ее поверхности, в приведенном рассуждении можно усмотреть объяснение зависимости светимости звезды от массы в четвертой степени.

Таким образом, от температуры недр зависит и температура поверхностных слоев, откуда выходит наблюдаемое излучение (но эта зависимость различна у звезд разных последовательностей на диаграмме Г—Р, т. е. на разных этапах эволюции звезды).

Другой подход для объяснения зависимости светимости от массы может быть таким. Более высокая температура недр приводит к большей прозрачности звездного вещества, так как атомы тяжелых элементов оказываются ионизованными в большей степени. Излучение свободнее выходит из «тела» звезды и для поддержания равновесия (вспомним уравнение Клапейрона) необходима и более эффективная выработка энергии. Малейшее понижение температуры из-за оттока лучистой энергии приводит к немедленному сжатию, разогреву и усилению энерговыделения⁶.

Массивные протозвезды, у которых $M \approx 10-15 M_{\odot}$, становятся весьма горячими звездами класса В. Самые массивные, $M \approx 30-50 M_{\odot}$, порождают наиболее горячие звезды (класса О). У тех и других основное энерговыделение обеспечивает углеродно-азотный цикл. Температура их ядер составляет 30—35 млн. К. У звезд солнечной массы энерговыделение обеспечивается протон-протонной реакцией, вклад от углеродно-азотного цикла составляет несколько процентов. У звезд меньшей массы идет только протон-протонная реакция, энерговыделение, а значит, и светимость, малы. А у звезд с самой малой массой (менее $0,3 M_{\odot}$) температура недр недо-

⁶ Подчеркнем, что главное здесь — это сохранение равновесных условий, а например, не тип термоядерных реакций и их температурная зависимость. И. С. Шкловский прямо пишет: «...скорость ядерных реакций как бы «подстраивается» к распределению температуры внутри звезды. Как это ни звучит парадоксально, величина светимости звезды не зависит от ядерных реакций, происходящих в ее недрах. Значение ядерных реакций состоит в том, что они как бы поддерживают установившийся температурный режим на том уровне, который определяется структурой звезды, обеспечивая светимость звезд в течение «космогонических» интервалов времени».

статочна даже для осуществления полного объема протон-протонной реакции. Образования ${}^2\text{He}^4$ не происходит, реакция заканчивается образованием ${}^2\text{He}^3$, дальше у частиц не хватает энергии, чтобы преодолеть кулоновские барьеры ${}^2\text{He}^3$ и ${}^2\text{He}^4$.

Водорода в молодой звезде много. Его ядерное горение энергетически очень выгодно. Оно дает наибольший удельный выход энергии. Поэтому стадия горения водорода весьма длительна.

Вернемся к соотношению масса—светимость. Запас водорода пропорционален массе, а темп его расхода на горение, определяющий светимость, пропорционален массе в четвертой степени. Поэтому периоды, на которые хватает водорода (иначе, времена жизни звезды на главной последовательности), различны у звезд разных масс: у массивных они существенно меньше. Эти периоды (табл. 5) рассчитаны методами теории внутреннего строения и эволюции для звезд, имеющих солнечный химический состав: тяжелых элементов — 2%, гелия — 30% по массе, остальное — водород. В случае другого химического состава значения t изменятся, но не будут слишком сильно отличаться от приведенных. Общая картина сохранится: например, при содержании тяжелых элементов в 1% и гелия в 10% указанные в табл. 5 периоды увеличатся в 1,5—3 раза.

Постепенно содержание водорода в ядре звезды уменьшается, и, наконец, водород выгорает совсем. Лишенное источников энергии ядро сжимается, температура его значительно повышается. А водород продолжает гореть вокруг ядра в тонком шаровом слое. Слой этот медленно продвигается к поверхности звезды, а «мертвое» с точки зрения энерговыделения гелиевое ядро растет. Температура его постепенно повышается в силу действия газовых законов: по мере увеличения размеров ядра с большим молекулярным весом (гелий) возрастает центральное давление, а значит, температура и плотность.

В конце концов, когда температура ядра становится по порядку величины равной 100 млн. К, начинается тройная гелиевая реакция (или тройной альфа-процесс), при которой сначала сталкиваются две α -частицы и образуют ядро изотопа бериллия: ${}^2\text{He}^4 + {}^2\text{He}^4 \rightarrow {}^4\text{Be}^8$. Этот изотоп неустойчив, большинство ядер ${}^4\text{Be}^8$ тут же (за время порядка 10—15 с) снова распадаются на две α -

Приближенная продолжительность жизни звезд
различной массы
на главной последовательности
и в стадии красного гиганта

| Масса звезды M_c | Время пребывания на главной последовательности, годы | Время пребывания в состоянии крас- ного гиганта, годы |
|--------------------|--|--|
| 64 | $2,5 \cdot 10^6$ | $5 \cdot 10^1$ |
| 32 | $4 \cdot 10^6$ | $1,5 \cdot 10^4$ |
| 16 | $8 \cdot 10^6$ | * |
| 15 | $1 \cdot 10^7$ | $2 \cdot 10^6$ |
| 10 | $2 \cdot 10^7$ | $4 \cdot 10^6$ |
| 6 | $6 \cdot 10^7$ | * |
| 5 | $7 \cdot 10^7$ | $2 \cdot 10^7$ |
| 3 | $2 \cdot 10^8$ | $7 \cdot 10^7$ |
| 1,5 | $1,5 \cdot 10^9$ | $4 \cdot 10^8$ |
| 1,25 | $3 \cdot 10^9$ | * |
| 1,0 | $7 \cdot 10^9$ | $4 \cdot 10^9$ |
| 0,75 | $2 \cdot 10^{10}$ | * |
| 0,5 | $1,2 \cdot 10^{11}$ | * |

* Расчеты не проводились.

частицы. Но при высоких температурах за время жизни ядра ${}^4\text{Be}^8$ к нему может подлететь третья α -частица с энергией, достаточной для преодоления кулоновского барьера, в результате чего образуется ядро углерода: ${}^4\text{Be}^8 + {}^4\text{He}^4 \rightarrow {}^6\text{C}^{12}$.

Еще до начала гелиевой реакции, после возникновения слоистого водородного источника, внешние слои звезды сильно расширяются, радиус звездной фотосферы увеличивается в десятки раз, а поверхностная температура падает. Звезда становится красным гигантом, а соответствующая ей точка на диаграмме Г—Р с главной последовательности перемещается вверх. Само перемещение, точнее — перестройка звезды, происходит довольно быстро, поэтому на диаграмме Г—Р между главной последовательностью и областью гигантов имеется «пустота».

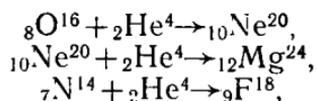
Слоистый водородный источник и гелиевая реакция характерны для энергетики красных гигантов. Это достаточно длительный период жизни звезды, но меньший, чем пребывание ее на главной последовательности.

По удельному энергovyделению гелиевая реакция примерно в 10 раз менее выгодна, чем водородные. В табл. 5 были приведены рассчитанные времена жизни звезд разной массы в стадии красного гиганта. Видно, что для всех значений массы стадия красного гиганта короче времени пребывания звезды на главной последовательности, причем различие увеличивается для больших масс.

Выгорание гелия в ядре приводит к очередному этапу его сжатия и к повышению температуры. Это «включает» некоторые другие реакции, при которых синтезируются элементы, более тяжелые, чем углерод. Например, при температуре 100 млн. К, т. е. практически одновременно с тройной гелиевой реакцией, может происходить образование кислорода: ${}_6\text{C}^{13} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_8\text{O}^{16} + n$. Эта реакция порождает свободные нейтроны, которые могут быть легко захвачены любым ядром. Ведь кулоновский барьер на нейтрон не действует, и захват может произойти до того, как нейтрон распадается на протон и электрон.

Захватив нейтрон, ядро какого-либо элемента превращается в более тяжелый изотоп того же элемента. Но может произойти β -распад — превращение одного из нейтронов этого изотопа в протон (и испускание электрона). Тем самым образуется ядро соседнего с первоначальным элемента в таблице Менделеева, атомный номер его на единицу больше.

Последовательный захват нейтронов, а также последовательное присоединение α -частиц, скажем, по схеме



приводит к образованию всех элементов начала таблицы Менделеева до железа включительно. В ядре железа имеет место наиболее плотная «упаковка» частиц (нейтронов и протонов). Считается поэтому, что железо является конечным продуктом длинной цепочки ядерных превращений, происходящих в звезде на протяжении ее эволюции. Синтез элементов тяжелее железа путем подобных присоединений является реакцией эндотермической, т. е. требует большей энергии, чем ее выделяется при синтезе. (Проблема их образования не выяснена.

Предполагают, что они синтезируются при взрывах Сверхновых, но детали процесса не ясны.)

Интересно оценить дефект массы и энерговыделение при образовании ядра железа из 56 протонов путем цепочки последовательных ядерных реакций синтеза. Масса атома железа составляет 55,847 а. е. м., масса 26 электронов — $26 \times 0,000548 = 0,014$ а. е. м., масса ядра железа — 55,833 а. е. м. и, наконец, масса 56 протонов — $56 \times 1,00728 = 56,408$ а. е. м. Таким образом, дефект массы равен 0,575 а. е. м., что обеспечивает энергетический выход около 523 МэВ. Более 67% этой энергии (351 МэВ) выделяется в самом первом звене: образование из 56 протонов 14 α -частиц (это еще одна иллюстрация энергетической выгоды реакции превращения водорода в гелий).

Необходимо сказать несколько слов о белых карликах. Это звезды, относящиеся к спектральным классам В—F, но имеющие светимость в тысячи и даже в десятки тысяч раз меньшую (на $8-12^m$), чем звезды главной последовательности тех же классов. По наблюдениям белых карликов, входящих в состав двойных и притом близких систем, их массы определяются достаточно уверенно. Они оказываются одного порядка с массой Солнца. Например, у спутника Сириуса (Сириуса В) масса 1,06 M_{\odot} , у спутника Прокциона (Прокциона В) — 0,63 M_{\odot} , у спутника звезды 40 Эридана (40 Эридана В) — 0,44 M_{\odot} .

Их абсолютная звездная величина устанавливается также надежно: звезды близкие, параллакс относительно большой. Из наблюдаемых высокой температуры и низкой светимости с необходимостью следуют небольшие размеры этих звезд — порядка размеров земного шара. В свою очередь, при упомянутых массах это приводит к выводу об исключительно высокой плотности вещества в них. Средние параметры белых карликов имеют следующие значения: масса 0,6 M_{\odot} , радиус 0,013 R_{\odot} , средняя плотность $4 \cdot 10^5$ г/см³ (центральная плотность еще в 5—10 раз выше).

Низкая светимость этих звезд указывает на то, что в них не происходит термоядерных реакций. Иначе при большой плотности вещества интенсивность их протекания и происходящее при этом энерговыделение были бы чрезвычайно большими и светимость этих звезд во много раз превосходила бы наблюдаемую. Отсюда сле-

дует, что водород да, по-видимому, и гелий уже выгорели в их центральных областях⁷. Белые карлики представляют собой конечную стадию эволюции звезд не слишком большой массы.

Отсылая интересующихся к рекомендуемой литературе, отметим два момента.

1. Число белых карликов в Галактике оценивается в 10^{10} , что составляет примерно 10% числа всех входящих в нее звезд.

2. Ядерные реакции в белых карликах если и происходят, то играют незначительную роль. Свечение же белых карликов обусловлено расходом запаса тепловой энергии. Этот запас по порядку величины оценивается в 10^{48} эрг. При светимости, на 7—8^m меньшей, чем у Солнца, он может обеспечить свечение в течение сотен миллионов лет.

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ И ПУЛЬСАРЫ. ВСПЫШКИ СВЕРХНОВЫХ

Описанный в предыдущем параграфе эволюционный путь, конечной стадией которого является белый карлик, постепенно остывающий и превращающийся в черный (т. е. неизлучающий) карлик, справедлив для звезд относительно небольшой массы, не более $1,2 M_{\odot}$. В то же время через стадию главной последовательности с превращением в красных гигантов проходят звезды любой массы, в том числе и превосходящей солнечную в 10—20 раз и более. Но после стадии красного гиганта они эволюционируют иначе, чем маломассивные звезды. Конец их эволюции исключительно интересен, в том числе и с точки зрения освобождения энергии и интенсивности ее излучения.

Надежные теоретические данные показывают, что если звезда имеет остаточную массу $1,2—2,5 M_{\odot}$ и в ее недрах после исчерпания ядерного горючего прекратилось энерговыделение за счет ядерных реакций, то такая звезда будет катастрофически сжиматься до совершенно ничтожных размеров (порядка 10—20 км). Плотность вещества при этом на несколько порядков пре-

⁷ Водород сохранился только во внешних слоях — в атмосферах этих звезд. Об этом свидетельствуют спектральные наблюдения. Поэтому в принципе ядерные реакции могут идти в очень тонком шаровом слое.

высит плотность белых карликов и достигнет вблизи центра чудовищных значений — 10^{14} — 10^{15} г/см³.

В самых поверхностных слоях таких образований плотность составляет 10^4 — 10^6 г/см³, т. е. она там такая же, как у белых карликов. Вещество состоит из ядер и электронного газа. Среди ядер весьма много ядер железа, так как они являются конечным продуктом реакции синтеза с выделением энергии, происходивших в звезде на предыдущих этапах ее жизни. С глубиной давление и плотность быстро растут. При плотностях 10^{11} г/см³ (а эта плотность достигается уже на глубине порядка 100 м) электроны вдавливаются внутрь ядер, а там они объединяются с протонами, превращая их в нейтроны. Меняется состав ядерного компонента вещества: преобладают ядра с большой массой, но относительно малым зарядом, т. е. номером в периодической системе, другими словами, такие ядра, где много нейтронов и сравнительно мало протонов (например, цирконий и т. п.).

При еще больших плотностях, превосходящих $4,3 \cdot 10^{11}$ г/см³, ядра разрушаются. Они как бы раздавливаются и образуют нейтронный газ. Если в обычных условиях свободный нейтрон неустойчив и довольно быстро распадается на протон и электрон, то здесь, при громадных плотностях, такие распады не происходят — им припятствуют большие плотность и давление. Впрочем, небольшая примесь протонов и электронов в недрах такого образования имеется, но тех и других, по видимому, не более чем по 4% общего числа частиц.

Таким образом, если масса проэволюционировавшей звезды достаточно велика, то после истощения ядерного горючего звезда сжимается в чрезвычайно компактную конфигурацию радиусом около 10 км, в которой основная часть вещества находится в виде нейтронного газа.

Существование таких нейтронных звезд было предсказано теоретически Л. Д. Ландау еще в 30-е годы. Наблюдательное открытие их было исключительно эффективным и совершенно неожиданным, оно было сделано при выполнении совсем других работ. Читатель, безусловно, знает о пульсарах, первый из которых был обнаружен в 1967 г. аспиранткой Кавендишской лаборатории Кембриджского университета Дж. Белл. Не останавливаясь на истории открытия и замечательных свойствах пульсаров (эти источники неоднократно опи-

сывались в брошюрах данной серии), кратко отметим лишь самые важные обстоятельства, непосредственно относящиеся к нашей теме.

1. Исключительно строгая периодичность импульсов — пожалуй, наиболее интересная и важная особенность пульсаров.

2. Эта периодичность, как сразу стало ясно, может быть объяснена только осевым вращением пульсара при условии, что он излучает не изотропно, а направленно: импульсы наблюдаются тогда, когда диаграмма направленности излучения проходит через Землю — аналогия с маяками.

3. Периоды пульсаров, как показывают наблюдения, заключены от немногих миллисекунд до нескольких секунд. Долгое время самым короткопериодическим считался пульсар, находящийся вблизи центра Крабовидной туманности («Краба»), его период равен 33 мс. Но в конце 1982 г. был открыт пульсар, период которого меньше в 20 раз и составляет 1,56 мс. Наиболее же длинный период у пульсаров равен 4,8 с.

Совершенно очевидно, что с такими малыми периодами могут вращаться лишь относительно небольшие тела с радиусами порядка десятков километров (иначе экваториальная скорость превысит скорость света).

4. Вся совокупность наблюдательных данных свидетельствует о том, что пульсары — это не что иное, как быстро вращающиеся нейтронные звезды.

5. Такое заключение легко объясняет характерные особенности пульсаров, прежде всего быстрое вращение и соответствующую ей быструю периодичность. Представим себе, что Солнце, имеющее радиус $7 \cdot 10^5$ км (см. табл. 3), сожмется до размеров нейтронной звезды радиусом 14 км. При этом в силу закона сохранения момента количества движения произведение момента инерции на угловую скорость должно оставаться постоянным. Момент инерции шара равномерной плотности пропорционален квадрату его радиуса. В рассматриваемом примере радиус уменьшается в $5 \cdot 10^4$ раза, а момент инерции — в $2,5 \cdot 10^9$ раза. Следовательно, угловая скорость должна возрасти в 2,5 млрд. раз!

Сейчас период вращения Солнца близок к 30 сут = $2,6 \cdot 10^6$ с. Солнце, сколлапсировавшее в нейтронную звезду, если не учитывать потери, имело бы период около 1 мс. Учет неравномерной плотности Солнца, а так-

же неизбежные потери момента количества движения при коллапсе, конечно, увеличат этот расчетный период. Однако имеется приличный «запас прочности», тем более что многие звезды, как показывают наблюдения, вращаются значительно быстрее Солнца.

6. Аналогично сохранению момента количества движения должен сохраняться магнитный поток. Следовательно, напряженность магнитного поля на поверхности звезды должна меняться обратно пропорционально квадрату ее радиуса. Напряженность в несколько эрстед на поверхности обычных звезд (а наблюдаются «магнитные» звезды с полями, достигающими до нескольких тысяч эрстед) при коллапсе может возрасти до 10^{12} Э.

7. Естественно считать, что каким бы ни был механизм электромагнитного излучения пульсара (нейтронной звезды), он будет связан с ее магнитным полем, которое может иметь исключительно большую напряженность. Предложено несколько конкретных механизмов генерации излучения, но ни один из них не стал общепринятым. Ряд механизмов предполагает генерацию излучения вблизи магнитных полюсов и распространение его в направлении силовых линий. Это естественно объясняет существование диаграммы направленности, несовпадение же магнитной оси с осью вращения столь же естественно объясняет периодическое повторение импульсов.

Сейчас известно более 340 пульсаров. Большинство из них излучает только в радиодиапазоне, причем максимальная мощность сосредоточена на частотах между 100 и 500 МГц. Средняя мощность излучения для большинства пульсаров характеризуется величинами 10^{25} — 10^{28} эрг/с. Это не очень много и соответствует радиосветимости спокойного Солнца. Интересно другое — указанные потоки излучаются с очень небольших площадей, ведь радиусы пульсаров (нейтронных звезд) составляют немногие десятки километров. Даже если считать, что источник излучения лежит над поверхностью нейтронной звезды, где-нибудь в магнитосфере и имеет диаметр 300 км, или одну световую миллисекунду (т. е. величину, соизмеримую с периодом наиболее быстрых пульсаров и временем нарастания интенсивности импульсов у наиболее медленных пульсаров), то и в этом случае получаются исключительно большие интенсивности — 10^4 — 10^7 эрг·(с·см²·Гц·сп)⁻¹.

Для сравнения укажем, что интенсивность излучения центра солнечного диска вблизи максимума распределения энергии в его спектре (длина волны около 750 нм) равна $5,5 \cdot 10^{-5}$ эрг·(с·см²·Гц·ср)⁻¹, а на частоте 300 МГц, т. е. вблизи максимума излучения пульсаров, интенсивность солнечного излучения всего $3 \cdot 10^{-14}$ эрг·(с·см²·ср)⁻¹. Упомянем, что полная светимость пульсара в «Крабе» много больше вышеприведенных значений, доходя до $\sim 10^{38}$ эрг/с, но этот пульсар — исключение.

Все пульсары постепенно увеличивают свой период. Скорости увеличения различаются в очень широких пределах, и обычно их выражают в 10^{-15} с за 1 с. В этих единицах пульсар в Крабовидной туманности увеличивает свой период со скоростью 422 (или 0,0133 мс в год) — это самое быстрое изменение периода среди всех известных пульсаров. У пульсаров, наиболее медленно меняющих свой период, соответствующие скорости составляют 0,001—0,01 с за 1 с.

Замедление вращения пульсаров, по-видимому, является основным источником энергии их излучения. Однако каков механизм превращения кинетической энергии в электромагнитные волны, еще не выяснено.

Считается также, что пульсары могут ускорять заряженные частицы (в частности, электроны) до весьма высоких энергий. Один из обсуждаемых в литературе механизмов их ускорения называется «эффект пращи» (рис. 8). Он представляет собой ускорение заряженных частиц вращающимся вместе с пульсаром магнитным полем. Часть силовых линий этого поля, проходящих вблизи магнитных полюсов, не замкнута, они уходят в бесконечность. Двигаясь вдоль таких линий (а поперек при большой напряженности поля они двигаться не могут), электроны и получают большую скорость из-за вращения пульсара и поля.

Особое внимание астрономов привлекает Крабовидная туманность и находящийся в ней пульсар. Туманность исследована в огромном спектральном диапазоне — от радиоволн до гамма-лучей (13 порядков или 43 октавы). Ее светимость составляет 10^{38} эрг/с, из которых примерно 12% приходится на радиодиапазон. Доказано (и здесь огромный научный вклад внес И. С. Шкловский), что свечение этой туманности в непрерывном спектре представляет собой магнитно-тормозное из-

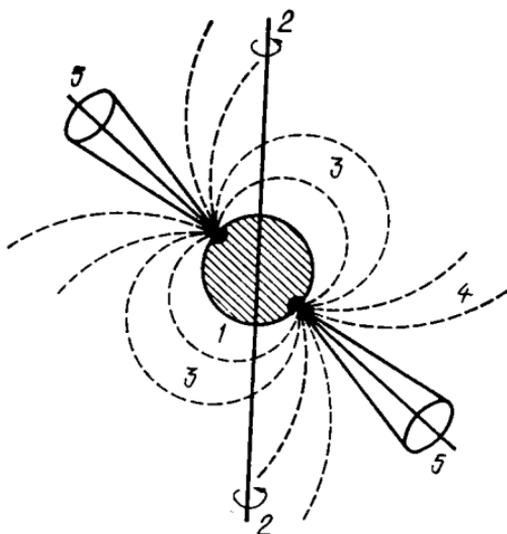


Рис. 8. Схема пульсара: 1 — нейтронная звезда; 2 — ось ее вращения; 3 — силовые линии магнитного поля; 4 — незамкнутые силовые линии (уходят в бесконечность); 5 — конусы вокруг магнитной оси, внутри которых выходит излучение

лучение релятивистских⁸ электронов в магнитном поле, благодаря так называемому синхротронному механизму.

Как выяснилось в последние десятилетия, этот механизм генерации излучения весьма широко распространен во Вселенной, поэтому следует рассмотреть его здесь несколько подробнее.

Если электрический заряд движется с ускорением, то он излучает электромагнитные волны. Это в полной мере относится и к электронам как носителям заряда. Далее, в магнитном поле электрон может свободно двигаться только вдоль силовых линий, при движении поперек его траектория искривляется. Допустим теперь, что электрон влетает в магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Поле будет действовать на него с так называемой силой Лоренца, которая направлена перпендикулярно движению электрона и вместе с тем перпендикулярно полю (рис. 9). Под действием этой силы

⁸ Релятивистскими называются частицы, имеющие скорость, близкую к скорости света. Кинетическая энергия их равна или превосходит полную энергию покоя m_0c^2 .

прямолинейная вне поля траектория электрона превращается в окружность, радиус которой пропорционален скорости электрона и обратно пропорционален напряженности поля. В общем случае, когда электрон имеет составляющую скорость вдоль поля, его траектория будет представлять винтовую линию, как бы навивающуюся на направление поля.

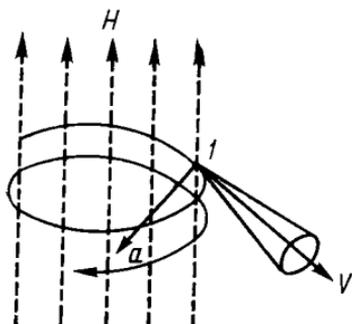


Рис. 9. Схема синхротронного механизма излучения. Электрон движется в магнитном поле по спирали. Пролетая точку 1, он имеет мгновенную скорость v и ускорение a . Синхротронное излучение распространяется внутри конуса, описанного вокруг мгновенного направления конуса

Движение по окружности или по винтовой линии означает, что у электрона есть ускорение. Следовательно, он должен излучать. Теория, согласующаяся с опытом, показывает, что излучение будет иметь непрерывный спектр, при этом частота излучения максимальной интенсивности будет пропорциональна напряженности поля и квадрату энергии электрона. В Крабовидной туманности наименее энергичные электроны, с энергиями 10^7 — 10^9 эВ, порождают радиоволны, электроны с энергиями 10^{11} — 10^{12} эВ ответственны за видимый свет, а электроны, обладающие еще большими энергиями, при торможении дают рентгеновские и гамма-кванты.

Считая, что масса пульсара в «Крабе» равна солнечной, и, зная период, можно оценить кинетическую энергию вращения. Она составляет $5 \cdot 10^{48}$ эрг/с. Изменение периода в 0,0133 мс в год соответствует потере энергии в 10^{38} эрг/с — как раз светимости Крабовидной туманности. Пульсар подпитывает энергией туманность.

Целая система наблюдательных данных и теоретических соображений говорит о том, что превращение эволюционировавшей звезды в нейтронную связано с гигантскими, совершенно ни с чем не сравнимыми взрывами, которые изредка наблюдаются как вспышки Сверхновых. Эти взрывы грандиозны даже по астрономическим масштабам, при которых, как читатель уже

убедился, постоянно приходится иметь дело с огромными числами.

Взрывы Сверхновых — довольно редкие явления. Но иногда они происходят и в нашей Галактике, в летописях разных народов сохранились свидетельства о них. «Звезды-гости», как их называли, имели такой большой блеск, что их порой можно было видеть днем. Но эти явления происходили в дотелескопическую эпоху. Последнюю вспышку Сверхновой в нашей Галактике наблюдал И. Кеплер в 1604 г. Все современные наблюдения выполнены над Сверхновыми, вспыхивающими в других галактиках.

При этом в максимуме блеска мощность излучения Сверхновой оказывается сравнимой с суммарной мощностью миллиардов звезд той галактики, где она вспыхнула. Так, Сверхновая 1885а была лишь на $1,9^m$ слабее гигантской галактики М 31 в Андромеде, к которой она принадлежала. А галактика М 31 относится к числу особо крупных, она превосходит по светимости и массе нашу Галактику, хотя и наша является гигантской. Сверхновая же 1972с превосходила на 4^m блеск своей галактики NGC 5253.

В последние десятилетия выяснилось, что на месте взрыва остается туманность (или группа туманностей), обладающая совершенно необычными для большинства туманностей особенностями. Эти туманности получили название остатков Сверхновых и первой, относительно которой было выяснено ее взрывное происхождение, была Крабовидная туманность. Она находится в том месте, где в 1054 г. вспыхнула необычайно яркая «звезда-гостья». Расстояние до Крабовидной туманности известно — оно составляет около 1700 пк. Следовательно, с учетом межзвездного поглощения света абсолютная величина Сверхновой была около —18 .

За последние два-три десятилетия в Галактике найдено и исследовано несколько десятков остатков Сверхновых. Кроме «Краба», это системы тонковолокнистых туманностей в созвездиях Лебедя, Кассиопеи, Близнецов, Парусов, Кормы и др. Наиболее интересные особенности, отличающие эти туманности от обычных газопылевых облаков, следующие.

1. Расширение с большой скоростью. В «Крабе» скорость расширения равна 1200 км/с, у некоторых других

остатков Сверхновых она доходит до 5000 и даже до 5500 км/с.

2. Наличие мощного радиоизлучения в широком диапазоне частот. Спектр его имеет весьма характерный вид, показывающий, что радиоизлучение имеет синхротронную природу (излучение релятивистских электронов в магнитном поле).

3. Во многих случаях остатки Сверхновых являются источниками рентгеновского излучения. В «Крабе» и нескольких других (близких) остатках Сверхновых выявлен тепловой компонент рентгеновских лучей. (Выявление осуществляется по наблюдаемому распределению энергии в спектре.) Это свидетельствует о существовании гигантского облака горячей плазмы, локализованного вокруг места взрыва. Температура плазмы у разных облаков составляет от 2 млн. К до 60 млн. К.

4. На фотографиях выявляется характерная структура — отдельные волокна или их системы, а радионаблюдения с высоким разрешением, как правило, показывают расширяющуюся с высокой скоростью оболочку.

5. В нескольких остатках Сверхновых («Краб», Паруса X и др.) обнаружены пульсары. Учитывая, что пульсар можно видеть только при благоприятной ориентации его оси, вследствие чего не все существующие пульсары могут быть наблюдаемы, обнаружение пульсаров в некоторых остатках Сверхновых является серьезным свидетельством генетической связи нейтронных звезд и звезд, вспыхнувших как Сверхновые. Для пульсара в «Крабе» эта связь устанавливается более непосредственно: его возраст, находимый по периоду и скорости роста периода, а также возраст самой Крабовидной туманности, определяемый по ее видимому расширению и теперешним размерам (оба оказываются около 900 лет), равны времени, прошедшему после вспышки 1054 г.).

Сверхновые, образно выражаясь, несут «большую нагрузку» в современной астрофизике и даже в других далеких от нее разделах естествознания. В частности, это касается следующих моментов.

1. Взрыв Сверхновой порождает мощную ударную волну в межзвездной среде. Распространяясь на десятки и сотни парсек, она «нагревает» перед собой вещество, в результате чего увеличивается его плотность. Всту-

пая в пределы газопылевого комплекса, такая волна может ускорить процесс звездообразования.

2. Со Сверхновыми связывается образование ядер тяжелее железа. Детали процесса не разработаны, главную роль, по-видимому, играют высокие температуры и давление в момент взрыва.

3. Происхождение по крайней мере части космических лучей (протонов, ядер различных элементов и электронов, движущихся в галактическом пространстве с огромными кинетическими энергиями) также обусловлено вспышками Сверхновых.

4. Наконец, Сверхновые «небезразличны» и для жизни на Земле. Близкая вспышка (на расстоянии порядка 10 пк) вызвала бы заметное увеличение (в несколько раз) естественного радиационного фона. А это может привести к серьезным генетическим последствиям для некоторых видов животных. В 1957 г. И. С. Шкловский и В. И. Красовский высказали гипотезу, что вымирание динозавров и других крупных рептилий в конце мелового периода как раз и было вызвано близкой вспышкой Сверхновой.

В силу изложенного Сверхновые привлекают пристальное внимание астрономов, этим явлениям, как и остаткам взрывов, посвящена обширная литература.

Вернемся опять к взрыву Сверхновой и его энергетическому аспекту. За все время вспышки (длительностью около года) в виде света и на других диапазонах электромагнитного излучения испускается порядка 10^{50} эрг. Солнце испускает такое количество энергии лишь за ~ 1 млрд. лет своей жизни. Наблюдения показывают, что значительные массы газа (от 0,3 до 1,0 M_{\odot}) выбрасываются во время взрыва в разные стороны с гигантскими скоростями. Скорости выброса составляют от 7000 до 15 000 км/с. Этот газ, пополняясь за счет межзвездной среды и постепенно затормаживаясь ею, и порождает наблюдаемые остатки Сверхновых. Кинетическая энергия выбрасываемых масс — порядка 10^{50} — 10^{51} эрг.

Значительной энергией, порядка 10^{48} эрг, обладают релятивистские электроны, обеспечивающие свечение туманности на всем протяжении ее спектра.

С учетом всего этого полная энергия взрыва Сверхновой оценивается в 10^{52} эрг. Отметим, что Сверхновые бывают двух типов. К типу I относятся взрывы мало-

массивных звезд массой не более 1,1—1,2 M_{\odot} . Эволюция таких звезд идет медленно — это абсолютно очень старые звезды⁹. К типу II относятся взрывы массивных звезд массой 10—15 M_{\odot} . Их эволюция шла быстро, поэтому их можно назвать относительно старыми (т. е. уже сильно проэволюционировавшими), но абсолютно молодыми, имеющими возраст 10^7 — 10^8 лет. Важно, что оба типа Сверхновых прошли большой эволюционный путь.

По мнению многих ученых, вполне возможно, что энергетика взрыва Сверхновой или по крайней мере большая ее часть определяется гравитационной энергией, выделяющейся при сжатии звезды до размеров нейтронной. Вспомним для приближенной оценки формулу, приведенную в сноске 2. Если R мало, то энерговыделение огромно. Пусть, например, масса, равная солнечной, сожмется в шар радиусом 10 км. Это даст $(6,67 \cdot 10^{-8} \times 4 \cdot 10^{66}) / 10^6 \approx 2 \cdot 10^{53}$ эрг, а такой энергии хватит с избытком.

Сам взрыв Сверхновой схематически представляется таким. В центральной зоне звезды прекращаются все ядерные реакции — образуется железная сердцевина. Давление внешних слоев сжимает ее, внешние слои падают к центру — выделяется гравитационная энергия, которая переходит в тепло (температура, давление и плотность растут). Наконец, внутренняя сердцевина достигает размеров и плотности нейтронной звезды. Сжатие прекращается, остановленное силами упругости нейтронного газа. Но образуется сильная ударная волна, которая срывает внешние слои, что и наблюдается нами как вспышка Сверхновой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели энерговыделение на разных стадиях эволюции звезд:

гравитационное сжатие и первоначальный разогрев. В случае массы Солнца энерговыделение на этом этапе составляет по порядку величины 10^{48} эрг;

звезда главной последовательности. Спектральный

⁹ Свидетельством того, что ими не могут быть молодые, но маломассивные звезды, являются вспышки Сверхновых типа I в эллиптических галактиках, где вообще нет молодых звезд.

класс и темп эволюции здесь определяются массой: идет реакция превращения водорода в гелий. У звезды солнечной массы полный запас энергии, которым «располагает» эта реакция, порядка $(7-8) \cdot 10^{51}$ эрг. Значительная часть его расходуется на стадии главной последовательности, часть остается на стадию красного гиганта;

красный гигант. Расходуется остаток водорода («слоевой источник»); горение гелия и образование ряда элементов вплоть до железа.

После истощения ядерного горючего и образования железного ядра звезда эволюционирует по одному из следующих путей.

А. Звезды малой массы спокойно, т. е. с небольшой скоростью, сбрасывают раздувшуюся оболочку, которая превращается в так называемую планетарную туманность. Она расширяется и за время порядка 10^4-10^5 лет рассеивается в пространстве. Оставшееся ядро звезды с массой не более $1,2 M_{\odot}$ превращается в белый карлик, который довольно долго, за сотни миллионов лет, может, постепенно остывая, светить за счет запаса тепловой энергии.

Б. Если к моменту истощения ядерного горючего масса звезды окажется больше $1,2 M_{\odot}$, но меньше $2,5-3 M_{\odot}$, образуется нейтронная звезда. Кинетическая энергия ее вращения будет поддерживать ее излучение (вернее, излучение пульсара) в течение порядка 10^7 лет.

В. Есть еще третья возможность — превращение массивной проэволюционировавшей звезды в черную дыру. Но в этой брошюре мы не будем касаться ни свойств черных дыр, ни рентгеновских источников, связываемых с нейтронными звездами и черными дырами. Однако отметим следующее в связи с наблюдениями в рентгеновском диапазоне.

1. На орбитальной рентгеновской обсерватории «Эйнштейн» (работала в 1978—1981 гг.) было обнаружено и измерено рентгеновское излучение нормальных звезд практически всех спектральных классов. Рентгеновская светимость звезд классов O и B составляет примерно 10^{-7} от их полной светимости, достигая $10^{32}-10^{33}$ эрг/с у наиболее горячих. У звезд класса A она на 4—5 порядков меньше, а затем несколько увеличивается у звезд класса F. У звезд классов G—M рентгеновская светимость варьирует в пределах $10^{27}-10^{29}$ эрг/с.

2. Наблюдения в рентгеновской и в жесткой ультрафиолетовой областях показали, что в Галактике имеются весьма протяженные облака разреженного (с концентрацией частиц 10^{-3} см $^{-3}$), но весьма горячего газа. Образование этих облаков связывают с нагревом межзвездной среды при взрывах Сверхновых. Другими словами, это остатки (или, точнее, последствия) достаточно старых взрывов, так как туманности уже рассеялись, а нагрев межзвездной среды распространился на области порядка 10 пк.

3. В скоплениях галактик, наблюдаемых в созвездиях Девы, Центавра, Персея и др., обнаружен межгалактический газ. Спектр его рентгеновского излучения показывает, что излучение имеет обычное тепловое происхождение. Температура межгалактического газа в скоплениях галактик достигает 10^8 К, рентгеновская светимость — порядка 10^{43} — 10^{44} эрг/с, концентрация протонов $(1-4) \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$. Несмотря на низкую плотность, масса этого межгалактического газа может быть (вследствие колоссального объема) весьма большой, достигая 10^{13} M_{\odot} и даже более. (Но при этом она остается все-таки меньше суммарной массы галактик этого скопления.) Как происходит нагрев межгалактического газа, пока не совсем ясно. Есть попытки объяснить его за счет движений галактик внутри скопления: галактики передают часть своей кинетической энергии газу, который их окружает, внутри которого они движутся.

4. Обнаружено, что все квазары излучают в рентгеновском диапазоне. Эти объекты являются, по-видимому, самыми мощными и в то же время компактными генераторами энергии. При светимости порядка 10^{46} эрг/с и даже до 10^{47} эрг/с (т. е. в 100 раз больше, чем светимость всей нашей Галактики) квазары имеют размеры порядка «световых суток» или в крайнем случае «световых недель». Это ненамного больше размеров Солнечной системы.

Рентгеновское излучение квазаров составляет значительную долю их общего излучения, а у некоторых — даже большую часть, причем есть квазары, рентгеновская светимость которых в 1000 раз превосходит полную светимость нашей Галактики.

5. Еще при самых первых рентгеновских наблюдениях в 1962 г. было обнаружено фоновое излучение. Последующие наблюдения показали, что с точностью до

1% (такова точность наблюдений) этот фон изотропен, т. е. его интенсивность не зависит от направления, рентгеновская яркость любого участка неба равна яркости любого другого. Происхождение этого фона неясно. Есть попытки объяснить его суммарным излучением очень далеких квазаров. Частично в «мягкой» области он может быть связан с излучением слабых, неразрешаемых в рентгеновский телескоп карликовых звезд.

Как видно из этого краткого изложения, в рентгеновской астрономии — весьма молодой области древнейшей науки — сделано много замечательных открытий. Но природа неисчерпаема — эти открытия породили немало интересных задач для новых исследований. А на очереди развитие гамма-астрономии, которая тоже обещает исключительно интересные сведения о Вселенной, в которой мы живем.

Наконец, в заключение перечислим некоторые другие виды энергии, присутствующие в Галактике.

Кинетическая энергия собственных, так называемых пекулярных, движений звезд. Солнце, например, движется со скоростью около 20 км/с по направлению к созвездью Лиры. Кинетическая энергия этого движения $4 \cdot 10^{45}$ эрг.

Кинетическая энергия движения звезд вокруг центра Галактики. В окрестностях Солнца скорость его составляет около 250 км/с, отсюда энергия движения Солнца около $6 \cdot 10^{47}$ эрг.

Кинетическая энергия солнечного и звездного ветра — потока заряженных частиц, движущихся от Солнца и звезд. Наиболее хорошо изучен солнечный ветер — многочисленные измерения с космических аппаратов дали для окрестностей Земли следующие его параметры: поток от 10^8 до 10^{10} ионов/см²·с (при среднем $3 \cdot 10^8$ ионов/см²·с), скорость 200—900 км/с (при среднем 300 км/с). Отсюда можно найти, что в среднем вся «ветровая» мощность Солнца по порядку величины составляет 10^{26} — 10^{27} эрг/с, т. е. меньше 10^{-6} полной светимости Солнца.

Наличие звездного ветра установлено у звезд всех спектральных классов. Особенно он интенсивен у наиболее горячих звезд, обладающих весьма высокой светимостью. Они теряют массу со скоростью 10^{-7} — 10^{-6} , даже до $10^{-5} M_{\odot}$ в год, т. е. 10^{19} — 10^{21} г/с, а скорость движения частиц доходит до 3000 км/с. Легко подсчи-

тать, что «ветровая» мощность этих звезд по порядку величины может составлять 10^{36} эрг/с, т. е. приблизительно 1% их светимости, а у отдельных звезд и еще больше.

Энергия более или менее регулярного магнитного поля в Галактике. Напряженность его оценивается в 10^{-5} — 10^{-6} Э, плотность энергии 10^{-12} эрг/см³, и, следовательно, полная энергия равна порядка 10^{54} эрг.

Энергия космических лучей. На внешней границе земной атмосферы через 1 см² каждую 1 с проходит одна релятивистская частица. Приходят они изотропно, и считается, что они заполняют весь объем Галактики и удерживаются в ней магнитным полем. Плотность их энергии оценивается в 10^{-12} эрг/см³, а общий ее запас такой же, как у галактического магнитного поля, — 10^{54} эрг.

В связи с космическими лучами интересны два момента. Во-первых, в составе космических лучей изредка наблюдаются частицы сверхвысоких энергий — 10^{20} и даже 10^{21} эВ. К таким частицам уже приложимы мерки макромира: 10^{21} эВ = $1,6 \cdot 10^9$ эрг = 160 Дж. Такую же энергию имеет свинцовая картечина радиусом 2,2 мм (масса 0,5 г), вылетающая из ружья со скоростью 800 м/с. Во-вторых, плотность электромагнитного излучения в Галактике имеет тот же порядок величины, что и космических лучей — 10^{-12} эрг/см³.

Исследования великого многообразия различных объектов во Вселенной, т. е. то, чем занимается современная астрономия, имеет очень большое общенаучное значение, так как здесь материя часто находится в совершенно необычных, недостижимых на Земле условиях. Астрономия сталкивается с величайшими контрастами, с предельно большими и предельно малыми значениями разных физических величин, при этом выявляются такие свойства материи, о которых мы, может быть, и не знали бы без астрономических наблюдений. И энергетика небесных тел, как читатель, наверное, убедился, тоже характеризуется огромными числами. Это интересно и само по себе, и в связи с глобальной задачей настоящего времени — поисками технических источников энергии, в частности, с непосредственным использованием солнечного излучения в технических целях.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. М., Энергоиздат, 1981.

Вильковиский Э. Я. Загадки квазаров. Алма-Ата, Наука, 1980.

Гинзбург В. Л., Птушкин В. С. Астрофизика космических лучей. М., Знание, 1982.

Горбачкий В. Г. Космические взрывы. М., Наука, 1979.

Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. Происхождение галактик и звезд. М., Наука, 1983.

Дж. Силк. Большой взрыв. М., 1982.

Каплан С. А. Физика звезд. М., Наука, 1977.

Климишин И. А. Астрономия наших дней. М., Наука, 1980.

Лада Ч. Дж. Выбросы энергии из молодых звезд. — Успехи физических наук, 1983, т. 140, вып. 3, с. 503—520.

Никольский Г. М. Невидимое Солнце. М., Знание, 1980.

Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. М., Наука, 1983.

Псковский Ю. П. Новые и сверхновые звезды. М., Наука, 1974.

Северный А. Б., Степанян Н. Н. Солнечные вспышки. М., Знание, 1976.

Холопов П. Н. Молодые и возникающие звездные скопления. М., Знание, 1982.

Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. М., Наука, 1980.

Шкловский И. С. Звезды. Их рождение, жизнь и смерть. М., Наука, 1977.

Шкловский И. С. Проблемы современной астрофизики. М., Наука, 1982.

НОВОСТИ АСТРОНОМИИ

ЧТО ЖЕ ТАКОЕ CG 195+04?

Интерес ученых к источнику гамма-излучения CG 195+04 понятен: он второй по мощности на небе после Крабовидной туманности. Однако были не известны ни его природа, ни расстояние и даже то, принадлежит ли он Галактике или находится за ее пределами. Чтобы выяснить это, надо было отождествить источник с каким-либо оптическим объектом. Но для этого требовалось уточнить координаты источника, что можно было сделать, предварительно отождествив его с источником в радио- или другом диапазоне. Отсутствие известных (в разных каталогах) радиоисточников вблизи CG 195+04 (это обозначение соответствует каталогу IC3 COS B) привело Г. Бигнани, П. Каравео и Р. Лэмба к поиску его двойника в рентгеновском диапазоне. Проанализировав данные, полученные с помощью орбитальной обсерватории «Эйнштейн», они отождествили его сначала с рентгеновским источником 1E 0630+178 (*Astrophys. J. Letts*, 1983, т. 272, № 1), а затем со слабым оптическим объектом, имеющим 23-ю звездную величину. По другому и, видимо, более верному пути пошли У. Сибер и Р. Шликейсер, предпринявшие поиск слабых радиоисточников в районе CG 195+04 и отождествившие с ним один из найденных ими радиоисточников, который для более точного определения координат затем обследовался с помощью 5-километрового радиотелескопа в Кембридже. В конечном счете этот радионисточник был отождествлен с оптическим объектом 19-й звездной величины. Кульминационный момент настал, когда А. Моффат, М. Скара и Р. Таффс провели спектроскопические наблюдения оптического объекта и обнаружили, что он представляет собой квазар с красным смещением $z = 1,187 \pm 0,014$ (*Astrophys. J. Letts*, 1983, т. 271, № 2). Это уже третий квазар, отождествляемый с источником гамма-излучения (правда, в отличие от квазара 3C 273, отождествленного с CG 289+64, реальность связи квазара QS 0241+622 с источником CG 135+01 вызывает сомнения). Однако отождествленный с CG 195+04 квазар QS 0630+180 обладает весьма своеобразным свойством: наибольшая часть его излучения приходится на гамма-диапазон. Было даже предложено проклассифицировать его как гамма-активный квазар подобно тому, как квазары разделяют на радиоактивные и радиоспокойные. Но суть в том, что механизм гамма-излучения квазара QS 0630+180 совершенно необычен: оно производится при взаимодействии релятивистских протонов (а не релятивистских электронов) с газовым окружением центрального энергетического источника. И поэтому QS 0630+180 можно назвать протонным квазаром, поскольку концентрация этих частиц в областях генерации гамма-излучения должна на 10 порядков величины превышать концентрацию релятивистских протонов вблизи Солнечной системы. Таким образом, если отождествление CG 195+04 действительно реально, это не только приводит к изменению наших представлений о гамма-источниках (которые в основном считались галактического происхождения), но и о самих квазарах.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Неожиданное открытие сделали в самой начальной стадии функционирования нидерландского спутника IRAS, когда его инфракрасный телескоп в калибровочных целях был наведен на всем известную звезду Вега. Вокруг этой одной из самых ярких звезд на небе обнаружилось холодное облако твердых частиц, размеры которых, по крайней мере, составляют 1 мм, т. е. в 1000 раз должны превышать диаметр типичной межзвездной пылинки. Однако это лишь нижний предел, и предполагают, что вокруг Веги, находящейся от нас на расстоянии 26 св. лет, имеются и более крупные тела размером с астероид. Тем самым получено первое свидетельство в пользу существования твердых тел вблизи других звезд. Если облако частиц около Веги действительно имеет в своем составе тела размером с астероид и меньше, то оценка массы всего облака может достигать 0,001 массы Солнца, или 300 масс Земли, что близко к оценкам массы Солнечной системы (без Солнца). Во всяком случае, как показали наблюдения, диаметр облака вокруг Веги составляет 170 а. е., т. е. в 2 раза превышает размер орбиты Плутона. В связи с чем высказывается предположение (Sky and Telescope, 1984, т. 64, № 1), что инфракрасный телескоп спутника IRAS зарегистрировал протопланетную систему, из которой со временем вокруг Веги должны сформироваться планеты. Это предположение вполне реально, поскольку Вега довольно молода: она моложе Солнца в 5 раз, а именно в этом возрасте у Солнца стала образовываться Солнечная система. Кроме того, случай Веги оказался не единичным, поскольку совсем недавно подобное протопланетное облако аппарата спутника IRAS зарегистрировала и у звезды Фомальгаута, также имеющей возраст около 1 млрд. лет. И, наконец, появилось сообщение, что некое дискообразное пылевое облако обнаружено и у звезды HZ Тау, сформировавшейся всего «каких-то» 100 тыс. лет назад.

ТАИНСТВЕННЫЕ ГРОЗЫ НА САТУРНЕ

В течение недели, когда около Сатурна пролетали «Вояжер-1» и «Вояжер-2», их аппаратура регистрировала довольно необычные радиосигналы. Они возникали эпизодически, продолжались около 7 ч и вновь пропадали примерно на 3 ч. Радиосигналы представляли собой отдельные импульсы в диапазоне частот 20 кГц — 40 МГц. Сначала предположили, что их источник находится где-то в системе колец Сатурна, поскольку все излучение на частотах ниже 1 МГц должно было поглощаться ионосферой планеты, а кроме того, радиосигналы исчезали каждые 10 ч 10 мин, т. е. за время, меньшее периода вращения Сатурна. Однако по своему характеру радиосигналы очень напоминали излучение от грозовых разрядов на Земле. А о том, что грозы на Земле не уникальны, было известно еще с тех пор, как советские аппараты «Венера» обнаружили их на одноименной планете. Правда, грозовые явления еще можно было бы как-то соотносить с атмосферой Сатурна, но ведь обнаруженные сигналы, казалось, исходили из колец, где схожее с грозой явление попросту невозможно. Все разрешилось после того, как М. Кейсер, Дж. Коннерней и М. Десч пересмотрели еще раз данные, полученные «Вояжерами». Оказалось, что источник радиосигналов в самом деле можно локализовать в долгоживущем атмо-

сферном грозовом «фронте», находящемся к северу от экватора планеты и простирающемся примерно на 60 тыс. км. Причем на ночной стороне планеты разряды сопровождались радиоизлучением на гораздо более низких частотах. Но почему гроза на Сатурне столь ограничена в пространстве и столь длительна по времени (правда, «Вояжер-2» зарегистрировал, что она все же ослабевает)? Остались и другие проблемы, и чтобы их разрешить сейчас осуществляется попытка зарегистрировать радиоэхо грозы на Сатурне прямо с Земли (Sky and Telescope, 1983, т. 66, № 1).

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| Светимость Солнца | 4 |
| Источники солнечной энергии. Немного истории | 10 |
| Термоядерные реакции. Общие замечания | 14 |
| Процессы энерговыделения на Солнце | 16 |
| Мир звезд | 31 |
| Несколько слов о межзвездной среде и звездной эволюции | 36 |
| Нейтронные звезды и пульсары. Вспышки Сверхновых | 46 |
| Заключение | 56 |
| Рекомендуемая литература | 61 |
| НОВОСТИ АСТРОНОМИИ | 62 |

Андрей Владимирович Харитонов

ЭНЕРГЕГИКА СОЛНЦА И ЗВЕЗД

Главный отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *Е. Ю. Ермаков*

Мл. редактор *Г. И. Валуженич*

Обложка художника *Ю. В. Меньшова*

Худож. редактор *М. А. Гусева*

Техн. редактор *Н. В. Лбова*

Корректор *Н. Д. Мелешкина*

ИБ № 6483

Сдано в набор 17.02.84. Подписано к печати 06.04.84. Т. 03875. Формат бумаги 84×108^{1/32}. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,50. Тираж 27 870 экз. Заказ 323. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 844205. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3.



СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ