

индийскими физиками (русский перевод ИЛ, 1958), тротильный эквивалент наиболее мощных «водородных бомб», испытанных в период 1952—1956 гг., оценен ориентировочно в 10—15 млн. *т*¹).

1954—1958 гг. В июле 1954 г. в СССР введена в эксплуатацию первая в мире атомная электростанция на 5000 *квт*. В 1957—1958 гг. построены первые атомные электростанции: в США (в Шиппингпорте), в Англии (в Колдер-Холле) и Франции (в Маркуле). В СССР принята программа строительства больших атомных электростанций мощностью в несколько сот тысяч *квт* и менее мощных экспериментальных станций разного типа. В осуществление этой программы в Воронежской области и на Урале сооружаются мощные атомные электростанции. В 1958 г. пущена первая очередь атомной электростанции в Сибири на 100 000 *квт*.

В январе 1955 г. в США осуществлен рейс подводной лодки с атомным двигателем.

В августе 1955 г. на Первую международную конференцию (в Женеве) по мирному использованию атомной энергии представлено более 1000 научных докладов.

В 1958 г. в Женеве состоялась Вторая международная конференция по мирному использованию атомной энергии.

В 1957—1959 гг. в СССР построен мощный ледокол с атомным двигателем.

§ 121. Ядерные реакции в звездах

Замечательно, что для понимания космических событий — рождения, развития и угасания звезд — из всего многообразия физических и химических процессов наиболее важным оказалось изучение ядерных превращений, т. е. явлений, происходящих с наимельчайшими частицами вещества. В истории жизни звезд многое еще остается неясным, но главное, что длительное время оставалось загадкой, — происхождение звездной и, в частности, солнечной энергии — теперь, хотя в общих чертах, может считаться раскрытым. Источником звездной энергии служат термоядерные реакции.

Спектроскопическое исследование звезд позволяет по распределению энергии в спектре сделать заключение об их поверхностной температуре. По современным данным температуры поверхностей различных звезд заключены в пределах 2000—50 000°.

Изучение движения двойных звезд позволяет определить массы звезд. Они оказываются близкими к величине 10^{27} *т*. С помощью интерферометрических измерений и других косвенных методов можно оценивать размеры звезд. Имеются звезды, радиусы которых в сотни раз превышают радиус Солнца (звезда Бетельгейзе, альфа Геркулеса), и звезды с радиусами, составляющими только сотые доли солнечного (спутник Сириуса и др.).

¹) При каждом экспериментальном взрыве термоядерной бомбы с тротильным эквивалентом 10 млн. *т* выделяемая энергия ($\sim 10^{10}$ *квт-ч*) превышает энергию всех взрывов вместе взятых, проведенных во всех войнах за всю историю человечества.

Если известны масса и размеры звезды, то можно вычислить ее среднюю плотность. По поверхностной температуре, массе, средней плотности и размерам звезд вычисляют их внутреннюю температуру. В результате вычислений для центральной температуры получаются величины порядка десятков миллионов градусов (например, для Солнца порядка 13 миллионов градусов).

Гравитационные силы создают огромные давления в центральных частях звезд, достигающие десятков миллиардов атмосфер. При температуре 20 миллионов градусов только одно световое давление в центре звезд составляет 400 миллионов атмосфер; действительно, световое давление равновесного излучения равно $\frac{1}{3}$ плотности излучения, которая согласно закону Стефана — Больцмана пропорциональна четвертой степени температуры (т. I, § 90, 1959; в предыдущих изданиях § 94; т. III, § 41):

$$p = \frac{1}{3} aT^4,$$

где $a = 7,57 \cdot 10^{-15}$ эрг/см³·град⁴; отсюда при $T = 2 \cdot 10^7$ градусов $p = 4,04 \cdot 10^{14}$ эрг/см² = $4,12 \cdot 10^8$ кг/см².

По химическому составу звезды, подобные Солнцу, более чем наполовину состоят из водорода и почти на 40% из гелия; масса всех остальных элементов в них составляет около 10%. Несмотря на газообразное состояние, плотность вещества в центре Солнца в 40—50 раз превышает нормальную плотность воды (средняя плотность Солнца 1,4 г/см³).

Вследствие высокой температуры атомы всех элементов во внутренних областях звезд полностью ионизированы. Вещество здесь вследствие огромного давления находится в вырожденном состоянии (подобно электронному газу в металлах) и состоит из протонов, α -частиц, небольшого процента ядер других элементов, преобладающего количества электронов и γ -фотонов.

Имеются звезды, значительно уступающие по своим размерам Солнцу; их называют «белыми карликами». Центральная температура в таких звездах несравненно ниже центральной температуры Солнца, а давление, создаваемое гравитационными силами, остается огромным. Поэтому плотность вещества в них чрезвычайно велика. Одна из звезд в созвездии Кассиопеи (белый карлик Кейнера) при большой массе по своим размерам в 125 раз меньше Земли; плотность вещества в центре этой звезды в 36 миллионов раз превышает плотность воды (1 см³ имеет массу 36 000 т).

Звезды-гиганты имеют центральную температуру, много превышающую солнечную (температура же поверхности у них меньше солнечной); эти звезды находятся в другой стадии развития, для которой характерна малая плотность вещества. Недавно открытая сверхгигантская звезда VV Цефея, радиус которой более чем в 2000 раз превосходит радиус Солнца (объем в 12 млрд. раз больше

солнечного), имеет среднюю плотность в 250 тысяч раз меньше плотности воздуха над уровнем моря.

В непрерывном хаотическом движении ядра и электроны внутри звезд остаются примерно на одном гравитационном уровне, в то время как фотоны постепенно проникают через толщу звезды на ее поверхность, причем вследствие бесчисленных актов эффекта Комптона частота их уменьшается и они выходят наружу в виде света, соответствующего поверхностной температуре.

Присутствие внутри звезд огромных количеств радиации, несомненно, играет основную роль в установлении равновесного состояния звездной материи. В центре большинства звезд давление радиации составляет около 10% газового давления ядер и электронов. Давление радиации является фактором, определяющим массы звезд. Последние редко отличаются намного от величины $10^{27} m$. Вычисления Эддингтона показывают, что если масса какой-либо звезды превышает в несколько раз массу Солнца, давление радиации начинает преобладать над газовым давлением и такая звезда при наличии даже слабого вращения становится неустойчивой. С этой точки зрения масса звезд должна быть более или менее «стандартной», что и соответствует наблюдениям.

Энергия, излучаемая звездами каждую секунду, очень велика. Излучение Солнца на среднем расстоянии Земли от Солнца ($1,495 \cdot 10^8$ км) составляет $1,90$ кал на 1 см² в минуту. Сферическая поверхность с радиусом, равным среднему расстоянию Земли от Солнца, имеет площадь $2,8 \cdot 10^{27}$ см². Следовательно, ежесекундно Солнце излучает энергию, равную $1,9 \cdot \frac{1}{60} \cdot 2,8 \cdot 10^{27}$ кал = $9 \cdot 10^{22}$ ккал = $= 3,74 \cdot 10^{33}$ эрг. Радиус Солнца $695\,000$ км, а площадь поверхности Солнца $6,1 \cdot 10^{18}$ м². Отсюда мощность солнечного излучения с каждого квадратного метра поверхности Солнца получается равной $1,47 \cdot 10^4$ ккал/сек, что составляет почти $62\,000$ квт (больше полумиллиона стоваттных лампочек на каждый квадратный метр).

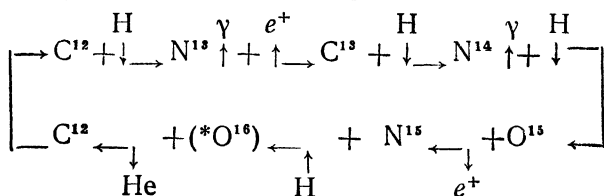
Если отнести энергию, излучаемую Солнцем, к его массе ($1,985 \cdot 10^{33}$ г), то в среднем излучение Солнца составляет $1,8$ эрг/г·сек. Вычисления показывают, что в центре Солнца интенсивность излучения приблизительно в 30 раз превосходит интенсивность излучения поверхности Солнца и составляет около 50 эрг/г·сек.

Исходя из закона пропорциональности массы и энергии, легко вычислить, что Солнце теряет вследствие излучения более $4\,000\,000 m$ своей массы в 1 сек ($130 \cdot 10^{12} m$ в год). Солнце же по своей излучательной способности стоит далеко не на первом месте. Имеются звезды, которые излучают в тысячи и даже в сотни тысяч раз больше энергии, чем Солнце (например, звезда Денеб в созвездии Лебедя в 10 тыс. раз ярче Солнца; звезда S в созвездии Золотой Рыбки, видимая только в телескоп в южном полушарии, в 400 тысяч раз ярче Солнца).

Старые взгляды на происхождение энергии излучения Солнца и звезд за счет их постепенного сжатия не могли объяснить наблюдаемую интенсивность излучения. Нельзя объяснить также происхождение звездной энергии обычными радиоактивными процессами, так как при существующей интенсивности звездного излучения любой запас радиоактивных веществ был бы полностью израсходован в несоизмеримо меньшее время, чем среднее время жизни звезды.

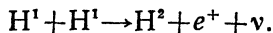
Единственным приемлемым объяснением происхождения звездной энергии является предположение, что энергия, излучаемая звездами, освобождается при ядерных реакциях. До конца 30-х годов это предположение оставалось недоказанным, так как еще не были накоплены сведения, необходимые для более или менее точного расчета выхода продуктов термоядерных реакций, а без такого расчета нельзя было установить, как изменяется в зависимости от температуры количество излучаемой при этих реакциях энергии. В 1939—1941 гг. Бете, а в последующие годы и другие авторы произвели вычисление хода всевозможных ядерных реакций, которые могут осуществляться при звездных температурах и при существующей в звездах концентрации различных элементов. Эти исследования позволили сделать достаточно обоснованное заключение, что *источником звездной энергии является синтез гелия из водорода*, который, однако, может осуществляться в результате различных ядерных реакций — так называемого цикла Бете и протон-протонного цикла. В *цикле Бете* важную роль играют ядра углерода и азота; но количество углерода и азота практически не изменяется, подобно тому как не изменяется масса катализатора (т. е. вещества, ускоряющего реакцию) в обычных химических процессах.

Цикл Бете можно считать начинающимся с проникновения протона в ядро C^{12} (радиационного захвата протона указанным ядром), что приводит к образованию неустойчивого ядра N^{13} , превращающегося с выбросом позитрона в ядро изотопа углерода C^{13} . Ядро C^{13} радиационно захватывает второй протон и превращается в ядро азота N^{14} , которое захватывает третий протон, вследствие чего возникает ядро неустойчивого изотопа кислорода O^{15} . Вторично, в цикле происходит выброс позитрона: ядро O^{15} превращается в ядро мало распространенного в природе, но устойчивого изотопа азота N^{15} . Проникновение четвертого протона в ядро N^{15} вызывает выброс из составного ядра альфа-частицы, причем образуется исходное ядро цикла C^{12} . Эту последовательность реакций можно записать так:

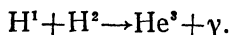


Таким образом, углеродо-азотный цикл Бете приводит к синтезу ядра гелия из четырех протонов при двух β -превращениях. Вероятность захвата протонов ядрами углерода и азота невелика, и поэтому каждый цикл завершается в среднем один раз за 6 миллионов лет.

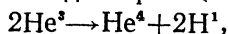
Протон-протонный (*pp*) цикл идет без таких «катализаторов», каким являются углерод и азот в цикле Бете. Первичной реакцией в *pp*-цикле является прямое взаимодействие протонов с образованием дейтона:



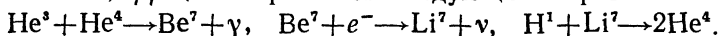
Во второй стадии *pp*-цикла происходит превращение дейтона в He^3 :



Далее возможны несколько вариантов процессов, приводящих к образованию He^4 . При сравнительно низких температурах и малых концентрациях He^4 преобладает реакция



а начиная с некоторой граничной температуры, зависящей от содержания гелия, *pp*-цикл протекает следующим образом:



При еще более высоких температурах *pp*-цикл может осуществляться несколько иным способом, отличным от указанных здесь.

Отметим, что для протекания цикла Бете нужны более высокие температуры, чем для *pp*-цикла. Поэтому при температурах ниже $15 \cdot 10^8$ °К преобладает *pp*-цикл, а при более высоких температурах — цикл Бете. По современным представлениям главным источником энергии Солнца является *pp*-цикл.

Кроме рассмотренных здесь циклов для звезд-гигантов с очень высокими центральными температурами возможным источником энергии служат другие ядерные реакции (так называемые гелиевый и неоновый циклы).

Поскольку ускорение термоядерной реакции вызывает сильное повышение температуры, что в свою очередь ускоряет реакцию, то не всегда в звездах обеспечивается стационарное течение реакций. В какие-то этапы развития ядерных процессов могут создаться условия, вызывающие в звездах самоускорение ядерных реакций, и тогда происходит взрывное увеличение объема звезды, причем газовая оболочка звезды расширяется со скоростью нескольких тысяч километров в секунду, и на более или менее длительное время происходит резкое увеличение яркости звезды. Такие явления мы наблюдаем как внезапную вспышку новых звезд. В среднем почти еженедельно в нашей звездной системе наблюдается «вспышка новой звезды».