

022
841

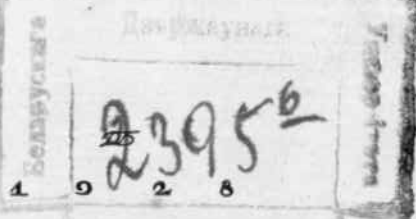
НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ
НАУЧНОЙ МЫСЛИ

— 5 —

Д Ж . Д Ж И Н С
А . Э Д Д И Н Г Т О Н

СОВРЕМЕННОЕ
РАЗВИТИЕ
КОСМИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ

668



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Х. 154
НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ

5

На отд. изд. 1954

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

152
441x

Депозитари

11425193

ДЖ. Г. ДЖИНС

А. ЭДДИНГТОН

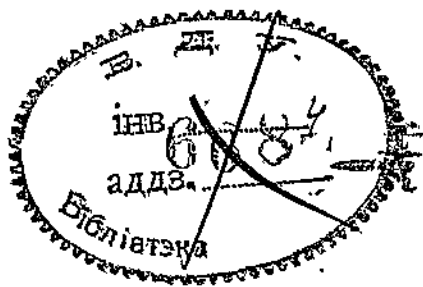
Пров. 1965

1523

СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
С. И. ВАВИЛОВА

Вид. гр. 624



1

9

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

О Т П Е Ч А Т А Н О
в Первой Образцовой
типографии Госиздата.
Москва, Пятницкая, 71.
Главл. 99743, Гиз, 23173.
Зак. 4529. Тираж 3.000.

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Развитие астрофизики за последние годы должно глубоко заинтересовать не только астронома, но всякого причастного к естествознанию и прежде всего физика. На основе результатов классической и новой физики астрономы пытаются создать исчерпывающую теорию звезды, ее внутреннего строения и поверхностных явлений. Физические законы, полученные в земных лабораторных условиях, применяются к явлениям гигантского масштаба, вопрос идет о возможности широкой экстраполяции результатов физики. Попытка дала, однако, только качественное согласие теории и астрономических наблюдений, физика звезды еще не стала частной задачей общей физики, в этой области обнаружились свои, новые и пока непонятные процессы, которые, возможно, потребуют изменения физических представлений. Астрофизики, естественно создают гипотезы, на первый взгляд причудливые, в которых пока много неясного, недоговоренного и недостоверного.

Две статьи этой брошюры, написанные вождами современной астрофизики, дают блестящие и увлекательные примеры таких гипотез. Факты настолько противоречивы и запутаны, что Эддингтон откровенно при-

знается, что он в них заблудился; более уверенно излагает свою гипотезу Джинс, по многим вопросам не согласующийся с Эддингтоном, однако за этой уверенностью кроется много неясностей которые нетрудно заметить. Спорными представляются и те выводы, которые касаются жизни, хотя заключительный абзац автора в значительной мере является риторическим окончанием блестящей публичной лекции.

Статья Джинса — лекция, читанная в Лондоне в 1926 году. Перевод ее был напечатан в журнале „Успехи физических наук“ за 1927 г. Статья Эддингтона — выдержки из большой специальной монографии автора „Внутреннее строение звезд“ (1926 г.). Общая теория Эддингтона популярно изложена в его новой книге „Звезды и атомы“, которая, надеемся, появится в русском переводе.

Статья Эддингтона касается значительно более узкого вопроса, чем лекция Джинса, но существенно дополняет последнюю, подчеркивая трудности задачи.

С. Вавилов

1. СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Джон Г. Джинс

До последнего времени астрономия занималась почти исключительно Солнцем, Луною и планетами; звезды были только невообразимо удаленными светящимися точками, представлявшими небольшой интерес. Теперь Урания вышла за пределы комочка пыли, который мы называем солнечной системой, и претендует на всю вселенную; интерес астронома сосредоточен почти исключительно на звездах. Астроном-динамик, например, потерял интерес к движениям планет и их спутников и изучает распределение и движения звезд в надежде, по крайней мере, обнаружить общий план строения и механизма вселенной; для него вселенная — единая динамическая система, образованная из неисчислимых частиц-звезд, каждая из которых притягивает другую, согласно закону всемирного тяготения.

Астроном-физик интересуется звездами с другой стороны. Для него каждая отдельная звезда — целая, физическая система. Это тигель, в котором материя подвергается действию температур и давлений, совершенно недоступных земному физическому. Исследуя излучение звезд,

астрофизик пытается разобраться в их физическом строении, открыть источник их энергии и понять механизм, посредством которого энергия переносится к поверхности звезд, разряжаясь затем в пространство в виде излучения. Таким путем есть надежда узнать о таких свойствах материи, которые недоступны земному физiku в силу ограниченности пределов физических условий, находящихся в его распоряжении. Я позволю себе сделать сравнение, верное, по крайней мере, в отношении масштаба: бактерии в дождевой капле могут узнать кое-что о свойствах воды, манипулируя частицами капли посредством своих ничтожных сил; но они могут также кое-чему научиться, наблюдая Ниагарский водопад, находящийся вне их власти. Объект астрофизика очень похож на Ниагару; конечная цель астрофизика — слить космическую физику с земной так, чтобы получилась всеобъемлющая наука. Только осуществив это, можно будет понять основные тенденции и факты физической вселенной.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРОВ

Только один метод пригоден для этой цели — изучение радиации различных звезд. Если исключить ненаучные домыслы, то можно сказать, что астрофизика родилась в 1863 г., когда Гэрггинс соединил спектроскоп с телескопом и нашел, что некоторые линии звездных спектров совпадают с линиями, которые в земных лабораториях испускаются известными химическими элементами. Прежние астроспектроскописты были убеждены, что они исследуют „химию звезд“, но теперь мы знаем, что на самом деле они начинали исследование фундаментальной проблемы физики звезд. Например, было

найденно, что спектр Сириуса дает очень сильные линии водорода и очень слабые линии кальция. В солнечном спектре относительная интенсивность этих линий находится в обратном отношении: линии кальция сильные, линии водорода слабые. Прежде заключали, что водород доминирует на Сириусе, а кальций на Солнце. Предполагая, что Сириус должен когда-нибудь обратиться в звезду, подобную нашему Солнцу, астрофизики заключали, что вещество должно постепенно превращаться из водорода в кальций и другие более сложные элементы. Таким образом, как будто бы подтверждалась старая гипотеза о том, что более сложные элементы образовались путем постепенной эволюции из простейших.

Действительное толкование этих старых наблюдений, как убедительно доказали исследования Шага, Р. Фоулера и Мильна, заключается просто в том, что на поверхности Сириуса царит такая температура, при которой водород особенно активно излучает и поглощает радиацию; на поверхности Солнца температура ниже, водород там относительно инертен, зато активны кальций, железо и пр. Как физик в лаборатории может получать различные спектры в одной и той же пустотной трубке, меняя способ и условия возбуждения, так и природа производит различные спектры от одного и того же звездного материала, при различных температурах.

Ясно, что это обстоятельство отнимает у звездных спектров всякое прямое значение для понимания эволюции. Спектры звезд говорят нам только о температуре, которая господствует в настоящее время на их поверхности. Если бы мы расположили звезды в порядке возрастов, то сравнение их спектров показало бы нам только;

что поверхности становятся горячее или холоднее; мы не получили бы никаких данных о химических изменениях в веществе звезд.

РАЗМЕРЫ ЗВЕЗД

Однако знание температуры поверхности звезд открывает дверь к дальнейшим ценным сведениям. Чем горячее поверхность, тем энергичнее она излучает тепло; зная температуру поверхности звезды, легко вычислить ее радиацию на 1 см^2 поверхности. Например, Солнце излучает приблизительно 90 000 калорий в минуту с 1 см^2 , что соответствует мощности машины в 8 лошадиных сил. Самые горячие звезды излучают, по всей вероятности, по крайней мере в 1 000 раз большую энергию с 1 см^2 , чем Солнце.

Таким путем можно оценить радиацию звезды на 1 см^2 ее поверхности. Мы можем также определить излучение со всей поверхности. Это сразу вычисляется по расстоянию и кажущейся яркости звезды. Простое деление дает величину поверхности звезды, а следовательно, радиус и объем. Вычисленные радиусы звезд колеблются в пределах от радиусов, в 300 раз превышающих солнечный (Бетельгейзе) до 0,03 солнечного радиуса (спутник Сириуса).

Хорошо известно, что диаметры некоторых звезд недавно были непосредственно определены интерферометром Майкельсона, причем измеренные величины почти полностью совпадают с радиусами, вычисленными указанным простым способом. Интерференционный метод применим только для самых больших звезд, но на другом крайнем конце шкалы на помощь пришла теория

относительности. В излучении спутника Сириуса наблюдалось смещение спектральных линий в красную сторону, предсказанное Эйнштейном как необходимое следствие теории относительности. Найденная величина смещения в точности согласуется с значением радиуса, вычисленным для звезды указанным способом. Об этих измерениях размеров Бетельгейзе и спутника Сириуса было написано много сенсационного, однако следует помнить, что хотя методы новы и представляют огромный интерес и важность, но результаты оказались в точности теми, которые всеми ожидалось; они практически неизбежны, как показывает простой арифметический расчет. В этом расчете есть только одно допущение: Он основан на предположении, что поверхности звезд излучают подобно поверхности Солнца. Если бы звезды были прозрачными телами, подобно планетарным туманностям или, наоборот, твердыми телами, вроде Луны, то сделанное предположение оказалось бы ошибочным, что и обнаружилось бы наблюдениями.

Изложенные наблюдения показали нам то существенно новое и положительное, что Бетельгейзе и спутник Сириуса не являются ни прозрачными, ни твердыми телами; но полными радиаторами, подобными Солнцу. Более того, три звезды, о которых идет речь, т. е. Бетельгейзе, Солнце и спутник Сириуса, различаются между собою в наибольшей возможной для звезд степени: они приблизительно представляют две крайности и середину в шкале звезд, при любом ее расположении. Отсюда естественно предположить, что все звезды — полные радиаторы как в отношении механизма излучения, так и подобия строения.

ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВНУТРИ ЗВЕЗД

Каков же механизм излучения? И что можно предварительно сказать о физическом состоянии звездной материи? В прежнее время спектроскописты, исходя из ошибочной аналогии с лабораторными опытами, предполагали, что нагретый газ всегда дает линейный спектр, а непрерывный спектр, подобный звездному, может излучаться только твердыми и жидкими телами. Теперь все поняли, что такой взгляд ошибочен; непрерывный спектр звезды указывает только, что она непрозрачна, и вопрос о строении звезды остается открытым.

Теперь общераспространенным является взгляд, что звезды состоят из материи, в значительной степени распавшейся вследствие высокой температуры на составляющие электроны и ядра, которые движутся почти независимо, подобно молекулам газа. В более мирных условиях электростатические притяжения быстро соединили бы блуждающие ядра и электроны в полные атомы и молекулы; но они бессильны в общем вихре летящих корпускул и перед дробящими ударами квантов радиации высокой частоты, соответствующей высокой температуре внутри звезды. Когда в 1917 г. я впервые высказал такой взгляд (Phil. Trans. 218, p. 209), я думал, что он совершенно нов, но впоследствии узнал, что еще в 1644 г. Декарт догадывался, что Солнце и неподвижные звезды созданы из материи, „которая обладает столь бурным движением, что, наталкиваясь на другие тела, она дробится на бесконечно малые частицы“. Мое предположение — не догадка, оно имеет неопровержимые научные основания. В 1907 г. Эмден опубли-

ковал расчеты* относительно внутреннего состояния Солнца и звезд. Он предполагал, что звезды являются массами газа, пребывающими в равновесии подобно нижним облакам земной атмосферы. Это случай так называемого „адиабатного“ равновесия, в котором предполагается наличие потоков, достаточных для постоянного перемешивания составляющих газов. Основываясь на этом предположении, Эмден нашел, что если бы Солнце состояло из воздуха или других двухатомных газов равного молекулярного веса, то температура в его центре должна бы достигать 455 миллионов градусов. Если бы Солнце состояло из водорода, или другого двухатомного газа с молекулярным весом 2, то центральная температура была бы 31,5 миллионов градусов. Эти температуры настолько высоки, что ни один атом или молекула выдержать их не могут. При 31,5 миллионах градусов квант тепловой радиации обладает энергией в $2,1 \cdot 10^{-8}$ эрга, достаточной для движения электрона в поле с противодействующей разностью потенциалов в 13 500 вольт. Однако даже при таких квантах, летающих вокруг, атомные ядра останутся целыми; для разложения ядер на составные электрические заряды нужны температуры, значительно превышающие температуры в центре звезд. Но электроны неизбежно должны вырваться из атомов среднего атомного веса, и ядра останутся совершенно или почти обнаженными.

Как первое грубое приближение мы можем рассматривать звездную материю, во всяком случае в горячих центральных областях, как смесь чистых ядер и электронов. От центра к периферии звезды температура падает,

* E m d e n, Gaskugeln, S. 96.

и мы встречаем все более сформированные атомы; наконец, вблизи поверхности атомы совершенно закончены, за исключением, может быть, одного или двух внешних электронов. На поверхности наиболее холодных звезд мы находим даже молекулы, например окись титана и гидрид магния, обнаруживающиеся в спектрах некоторых классов звезд.

Механизм недр звезды

Смесь свободных электронов и ядер или не вполне сформированных атомов должна вести себя подобно смеси одноатомных газов. В совершенно разложившемся водороде каждая молекула водорода порождает четыре движущихся единицы — два протона и два свободных электрона; эффективный молекулярный вес смеси будет 0,5. Соответствующая цифра для гелия — 1,33, для кальция — 1,90, для железа — 2,07, для свинца — 2,50; но атомы свинца не могут полностью разложиться при звездных температурах, поэтому значение эффективного молекулярного веса свинца в звездах будет несколько выше. Примем временно 2 как средний молекулярный вес звездной материи; тогда, по расчетам Эмдена (для водородных молекул), мы найдем для центральной температуры Солнца 31,5 миллионов градусов. В эту цифру нужно внести различные поправки; они имеют, однако, сравнительно небольшое значение, и первоначальное значение Эмдена в 31,5 миллионов градусов, вероятно, не очень далеко от действительной температуры в центре Солнца. Рассел недавно указал, что большинство звезд имеет температуру в центре, очень близкую к 32 миллионам градусов (Nature, август 8, 1925).

Одна из необходимых поправок, упущенная Эмденом при его расчете, — поправка на световое давление внутри звезд*. При 31,5 миллиона градусов световое давление достигает приблизительно 2500 миллионов атмосфер. Колоссальное в сравнении с земными давлениями, это световое давление составляет, однако, только около 5% газового давления разложившихся атомов и электронов в центре Солнца. Учесть это световое давление значило бы то же самое, что понизить принятый нами средний молекулярный вес на 5%, но ни в одном случае мы не знаем этого молекулярного веса с такой точностью. В исключительно больших звездах давление света приобретает несколько большее значение. Например, в центре звезды с массой, примерно, в 10 раз больше солнечной, световое давление составляет приблизительно половину газового давления. Для учета его действия в этом случае нам пришлось бы понизить принятый средний молекулярный вес приблизительно с 2 до 1. Во всяком случае мы получим верную картину строения звезд, если будем представлять себе, что тяготение слоев звездной материи к центру сдерживается непрерывным натиском некоторого числа атомных ядер или частично оголенных атомов с „молекулярным

* Я впервые обратил на это внимание в рецензии на книгу Эмдена (*Astroph. Journ.* 30, 72, 1909) и дал довольно точную цифру для отношения светового давления к обычному давлению газа внутри звезд в 1917 (*Phil. Trans.* 218, p. 209). За несколько месяцев до этого Эддингтон опубликовал расчеты, по которым это отношение было переоценено в несколько сот раз. При первой же возможности он исправил эту цифру (*Mon. Not. R. A. S.*, июнь 1917). Вместе с исправлением отпало и сенсационное следствие, что световое давление имеет доминирующее значение в динамике внутренних звезд.

весом", практически совпадающим с соответствующим весом полных атомов; вместе с ядрами и атомами тяготению противодействует огромное число свободных электронов с постоянным „молекулярным весом“ 0,00055 и значительно меньшее число „молекул радиации“, молекулярный вес коих чрезвычайно мал. Комбинированный натиск этих трех типов корпускул и охраняет звезду от сокращения под действием собственного тяготения.

Полагаю, что это — наиболее верная грубая картина строения звезды. Соответствующий образ механизма такого строения получится, если представить себе вместо ядер — α -частицы, вместо свободных электронов — β -частицы, а вместо радиации — γ -лучи (хотя в большинстве звезд главная часть излучения имеет длины волн X-лучей); точно так же, как в лаборатории β -лучи — более проникающие, чем α -лучи, а γ -лучи проникают больше, чем те и другие.

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ ВНУТРИ ЗВЕЗДЫ

В обычной кинетической теории газов теплопроводность рассматривается как результат действия молекул — носителей энергии. Каждая молекула обладает переносной способностью, точно пропорциональной ее тепловой энергии, ее скорости и длине свободного пути. Внутри звезд, как мы видели, есть три различных типа носителей: ядра (или атомы), свободные электроны и радиация. Относительную переносную способность этих трех типов носителей можно сравнить, перемножая энергию, скорость и длину свободного пути каждого носителя.

71429193

Ядра и свободные электроны имеют, конечно, вполне определенные длины свободных путей. То же можно сказать и в отношении радиации, если рассматривать ее как состоящую из дискретных квантов; в момент излучения кванта свободный путь начинается, в момент поглощения — кончается. Будем ли мы стоять на волновой или квантовой точке зрения, мы можем предполагать, что пучок радиации убывает в своей интенсивности соответственно множителю $e^{-k\rho x}$, проходя толщину x материи плотности ρ ; k здесь — коэффициент поглощения материи. Сравнивая это выражение с формулой кинетической теории $e^{-\frac{x}{\lambda}}$ определяющей убывание силы потока движущихся молекул, мы видим, что свободный путь радиации должен быть равным $\frac{1}{k\rho}$. Если воспользоваться этим значением свободного пути радиации и вычислить переносные способности вышеуказанным способом, то оказывается, что переносная способность как ядер, так и электронов незначительна в сравнении с радиацией. Энергия, переносимая ядрами и электронами, может быть много больше, однако расстояние, на которое энергия переносится, свободный путь ядер и электронов — значительно меньше, чем у радиации; скорость их также меньше, так как радиация переносит энергию со скоростью света. Отсюда вытекает, что практически весь перенос энергии изнутри звезды на поверхность осуществляется посредством радиации.

Этот общий принцип впервые был отчетливо выяснен Сэмпсоном в 1894 г. (Mem. R. A. S. 51, p. 123), но его фактическому применению мешал принятый им ошибочный закон излучения. Двенадцать лет спустя Шварц-

Д. Джинс. А. Эддингтон.

[17]

и н. л. д. независимо высказал ту же идею (Gött. Nachr., p. 41, 1906); он показал, что температура некоторого элемента внутри звезды должна определяться тем условием, что этот элемент получает столько же радиации, сколько излучает, и дал точные уравнения равновесия радиации; эти уравнения и служили основанием всех последующих рассмотрений задачи.

Конфигурация звезды в равновесии

Как следствие того, что радиация совершенно вытесняет материальных носителей при переносе энергии к поверхности звезды, строение последней полностью определяется значениями k — коэффициента поглощения внутри звезды. Если этот коэффициент всюду равен нулю, — звезда совершенно прозрачна и не может удерживать тепла; это — звезда нулевой температуры и, следовательно, бесконечного протяжения. Если, с другой стороны, k всюду бесконечно, — звезда совершенно не прозрачна; излучение собирается там, где оно зарождается, до тех пор, пока температура не станет бесконечной; это случай звезды с бесконечной температурой, но исчезающе малого радиуса. Практический интерес имеют, разумеется, промежуточные значения k ; указанные два крайних случая показывают только, что строение звезды зависит полностью от значения коэффициента поглощения. Все попытки исследовать строение звезд, прежде чем стал известным коэффициент k , могут рассматриваться только как спекуляции.

Первая попытка Эддингтона вычислить k теоретически в 1922 г. (Mon. Not. R. A. S. 83, p. 32) оказалась неуспешной и была оставлена. В следующем году

Краммерс (Phil. Mag. 46, p. 836) разработал ныне общепринятую теорию поглощения. Пользуясь коэффициентом поглощения, даваемым этой теорией, можно вполне определить строение звезды данной массы и с данной энергией. Таким способом я показал (Mon. Not. R. A. S. 85, p. p. 196 и 394), что звезда данной массы может оставаться в равновесии при любом радиусе, от нуля до бесконечности, причем различные радиусы соответствуют различной скорости образования энергии в звезде от нуля до бесконечности. Звезда меняет радиус соответственно скорости отдачи энергии, чему соответствуют поверхностная температура и спектральный тип. Если скорость образования энергии внезапно изменится, то звезда расширится или сожмется до радиуса и температуры, отвечающей новому значению скорости отдачи энергии. В противоположность обычному мнению, возрастание скорости образования энергии в звезде вызывает ее сжатие и повышение температуры; наоборот, ослабление скорости отдачи сопровождается расширением и охлаждением. Так, например, гигантские красные звезды, вроде Бетельгейзе, обязаны своим огромным размерам не излучению слишком большой энергии, а, наоборот, слишком малой. Действительно, сравнительно компактные звезды, каковы, например, звезда Пласкетта и V Puppis, излучают значительно больше в отношении к их массам. Общий теоретический принцип можно проверить исследованием звездных пар приблизительно одинаковой массы, каковы, например, две пары в нижеследующей таблице. Поверхностная температура выведена здесь непосредственно по наблюдаемым спектрам, а радиусы вычислены ранее объясненным способом.

Звезда	Масса (в сравнении с солнечной)	Образование энергии на г (эргов в секунду)	Наблюденная температура	Радиус (в сравнении с солнечным)
{ Солнце	1,00	1,9	5 750 °	1,00
{ α Центавра В . .	0,97	1,4	3 700 °	2,03
{ Прокцион	1,13	10,2	8 300 °	1,17
{ α Центавра А . .	1,14	2,3	5 000 °	1,56

Эволюция звезд

Скорость отдачи энергии, повидимому, не меняется резко в действительных звездах. Имеется медленное вековое убывание, связанное с медленным вековым убыванием звездной массы, происходящим вследствие непрерывного излучения. Например, 90 000 калорий радиации в минуту с 1 см² солнечной поверхности соответствуют потере массы в $4 \cdot 10^{-9}$ г; отсюда легко вычислить, что масса Солнца ежеминутно уменьшается на 250 миллионов тонн. Через миллионы миллионов лет такая растрата массы сказала бы в полном исчезновении гигантской массы Солнца. Для того, чтобы проследить изменения радиуса и температуры действительной звезды, мы должны изучить последовательные конфигурации, получающиеся в результате изменения массы и отдачи энергии. Таким образом я нашел (Mon. Not. R. A. S., январь 1925), что нормальная звезда сначала должна уменьшаться в размерах и становиться горячее, но затем, в конце концов, она расширится и охладится. Этот результат дает простое динамическое толкование последовательности „восходящих и нисхо-

дящих температур", указанной впервые Локайером и составляющей основное следствие теории звездной эволюции Рэсселя (1913), хотя наша интерпретация весьма отлична от теории Рэсселя.

АТОМНЫЙ ВЕС ЗВЕЗДНОЙ МАТЕРИИ

В простейшем случае, когда энергия образуется равномерно по всей массе звезды, поверхностная температура T звезды массы M и данной яркости (с данной отдачей энергии) определяется уравнением;

$$\text{Яркость звезды} = C \cdot \left(\frac{N^2}{A} \right)^{-0,8} T^{0,8\mu_{\text{eff}}}(M),$$

здесь C — известная постоянная, N и A — атомный номер и атомный вес звездных атомов, μ — эффективный молекулярный вес (около 2) разложившегося звездного вещества, T — температура поверхности звезды и $f(M)$ — функция, которую я вычислил и для которой составил таблицу; эта функция зависит только от массы звезды (Мон. Not. R. A. S. 85, p. 395).

Количество $\frac{N^2}{A}$ неизбежно в написанной формуле, так как коэффициент поглощения, определяющий все строение звезды, пропорционален $\frac{N^2}{A}$. Если бы максвелловский демон мог разделить каждое атомное ядро в веществе на две равные части, то N и A и также $\frac{N^2}{A}$ уменьшились бы вдвое, и вещество стало бы вдвое прозрачнее, чем раньше. Отсюда ясно, что большое скопление материи в форме массивных ядер значительно сильнее погло-

щает X -лучи, чем большое число малых ядер с той же общей массой. По этой причине физик и врач выбирают свинец как материал для защиты от X -лучей: тонна свинца значительно надежнее в отношении предохранения от нежелательных X -лучей, чем тонна дерева или железа. Если мы знаем силу рентгеновского аппарата и общий вес экранирующего материала вокруг него, то мы можем очень точно определить атомный вес материала, из которого сделан экран, измеряя количество X -радиации, проходящей через него.

Очень схожий метод может быть применен для определения атомного веса атомов, из которых составлена звезда. Звезда в действительности есть не что иное как гигантский рентгеновский аппарат. Мы знаем общую массу многих звезд и легко можем вычислить скорость образования в них X -лучей; эта скорость — просто отдача лучистой энергии в пространство. Если бы можно было запустить нашего максвелловского демона внутрь звезды и заставить его разрубить каждое атомное ядро пополам, оставляя массу звезды и отдачу радиации неизменными, он уменьшил бы коэффициент поглощения звезды вдвое. В результате — строение звезды изменилось бы; ее радиус увеличился бы вчетверо, а поверхностная энергия уменьшилась бы вдвое. Мы можем следить за успешностью работы демона, наблюдая изменения поверхностной температуры звезды. Таким образом, наблюдая поверхностную температуру любой звезды известной массы и яркости, возможно определить атомный вес атомов, из которых составлена звезда. Формула, данная выше, позволяет это сделать.

Я должен, пожалуй, мимоходом указать, что Эддингтон и другие подошли к этому вопросу с другого конца,

приписывая $\frac{N^2}{A}$ величины по догадке на основании наших сведений об элементах в атмосфере Солнца и звезд. Такой путь, однако, очень рискован. Звездный спектр не дает указаний на то, какие элементы следует выбирать как находящиеся внутри; по крайней мере, есть основания утверждать a priori, что элементы внутри звезды совершенно отличны от элементов на поверхности. Какую ошибку сделал бы наблюдатель на другом небесном теле, если бы он предположил, что на земле нет других химических элементов, кроме тех, которые есть в атмосфере!

Но, положим, мы рискнули и приписали такие значения $\frac{N^2}{A}$, все количества, входящие в формулу для яркости, известны, остается только вопрос, согласуются ли вычисленные яркости с наблюдаемыми непосредственно в телескоп? Не согласуются.

Ясно, что значение $\frac{N^2}{A}$ должно быть исправлено так, чтобы согласие получилось. Это и соответствует непосредственному определению $\frac{N^2}{A}$ по формуле яркости.

Сделав это для ряда звезд, я нашел (Mon. Not. R. A. S., июнь 1926), что выясняются два очень важных факта. Во-первых, большинство значений, определенных таким образом, оказывается большими, чем для урана, самого тяжелого элемента на земле. Во-вторых, различные значения $\frac{N^2}{A}$ систематически располагаются так, что наиболее молодые звезды дают наибольшие значения для $\frac{N^2}{A}$, по мере старения звезд числа уменьшаются.

Второй результат имеет обширные следствия. В противоположность взглядам прежних спектроскопистов, а также, повидимому, господствующему и теперь мнению, атомы звезды становятся тем проще, чем она старше; эволюция происходит от сложного к простому, а не от простого к сложному, как в биологии. В настоящее время нет прямых экспериментальных данных по этому вопросу, за исключением радиоактивности, где эволюция, несомненно, идет от сложного к простому; атомы с меньшим атомным весом непрерывно получаются как результат исчезновения тяжелых атомов.

Данные астрофизики, указывающие на развитие материи в том же направлении, заставляют предположить, что общая эволюция вещества во вселенной, может быть, протекает так же, являясь обобщением радиоактивных процессов на земле.

Полученные данные целиком основаны на теории Крамерса о поглощении X -лучей. Эта теория, как было найдено, очень хорошо согласуется с наблюдаемым в лабораториях поглощением радиации тех же, примерно, длин волн, как и внутри звезд. Теоретические основания были обстоятельно и критически рассмотрены Эддингтоном, Мильном и др., причем они не могли указать необходимости каких-либо существенных изменений. Однако, если данные из формулы Крамерса — единственные, то наши заключения основаны, хотя на прочном, но только одном основании. На самом деле есть множество других доводов, как сейчас увидим.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗВЕЗДЕ

Звезда неизбежно располагается так, что наибольшая концентрация материи получается в центре. Это первое

следствие закона обратных квадратов тяготения, хотя и закон поглощения имеет при этом некоторое значение. По формуле Крамерса для поглощения, распределение материи в звезде таково, что плотность в центре в 100 или более раз превышает среднюю плотность; по крайней мере 90 или 95 процентов общей массы звезды концентрировано в сфере половинного радиуса, т. е. в восьмой части объема. Но степень конденсации в центре очень нечувствительна к изменениям в формуле поглощения; любая рациональная формула будет также давать очень высокую конденсацию в центре. Строгое математическое рассмотрение этого обстоятельства (Mop. Not. R. A. S., июнь 1926, p. 561) заставляет исключить возможность конвекционных токов, перемешивающих внутренность звезды, как кипящая вода перемешивается в чайнике. Конвекция в чайнике происходит потому, что вода на дне имеет меньшую плотность, чем менее горячая вода наверху; конвекции нет в звезде, потому что накалившаяся материя около центра, несмотря на интенсивный жар, во много раз плотнее холодной материи на поверхности. Таким образом смесь материи внутри звезды не похожа на нижние слои атмосферы, где составляющие газы перемешиваются ветрами и бурями, но походит скорее на спокойную верхнюю атмосферу, в которой легкие элементы всплывают кверху, а наиболее тяжелые опускаются вниз под действием тяжести.

Эти соображения подсказывают сразу, что элементы, обнаруживающиеся по спектрам на внешних областях Солнца и звезд, являются только наиболее легкими в ряде элементов, существующих на звезде. Естественно, что Земля, образовавшаяся из внешних слоев Солнца,

содержит в себе те же химические элементы, как и этот внешний слой, но теперь ясно, что внутри должны быть более тяжелые элементы. Расчет, указывающий, что атомные числа звездной материи выше, чем у урана, не кажется более подозрительным и парадоксальным; он начинает казаться естественным и почти неизбежным.

Возникновение энергии звезды

Дальнейшее указание на то, что атомные веса звездных атомов больше, чем у какого-либо из известных земных атомов, может быть получено из рассмотрения отдачи энергии внутри звезды. Солнце излучает около 2 эргов в секунду на грамм массы; такое же количество энергии, с такою же скоростью должно возникать внутри. По наиболее достоверным нашим данным, Солнце порождало и излучало энергию в том же количестве несколько миллионов миллионов лет. Могло ли Солнце иметь такую способность к излучению, если бы оно состояло внутри из обычных земных элементов: кальция, железа, кремния и, пр.?

Первое же побуждение ответить: нет. Если бы Солнце было построено даже из чистого урана, его излучательная способность составляла бы только примерно половину наблюдаемой; этой энергии хватило бы лишь на ничтожную долю того, что мы считаем жизнью Солнца. Солнце из чистого радия излучало бы больше; чем нужно для данного момента, но жизнь такого Солнца была бы ограничена немногими тысячелетиями. Ни одна возможная комбинация земных элементов не может дать высокой радиации и устойчивости, которые мы наблюдаем на Солнце и звездах.

Мы должны, однако, помнить, что внутри звезд царят давления и температуры, недостижимые в наших лабораториях. Будут ли наши земные элементы вести себя совсем иначе в звездных условиях? Возможно, ли, например, что внутренность Солнца состоит из обычных земных элементов и огромная отдача энергии связана только с высокой температурой и давлением?

Общее рассмотрение астрономического материала значительно освещает этот вопрос. Мы находим сразу, что звезды, излучающие наиболее энергично (на единицу массы), не являются, вообще говоря, наиболее горячими и наиболее плотными. Некоторые из наиболее горячих и плотных звезд совершенно посрамлены в отношении радиации очень холодными звездами малой плотности, каковы Антарес и Бетельгейзе. Если расположить звезды в порядке величины излучения на единицу массы, то окажется, что они распределяются не в порядке температур или плотностей, но довольно точно в порядке возрастов; самые молодые звезды излучают наиболее энергично, независимо от их внутренней температуры и плотности; старшие звезды кажутся уставшими.

Эта общая тенденция показана в нижеследующей таблице (см. табл. на стр. 28).

Спрашивается, могут ли существовать в действительности столь высокие плотности в центре звезд? Ответ дан спутником Сириуса (Сириус В). Непосредственное наблюдение показало, что средняя плотность этой звезды около 53 000 и, следовательно, плотность в центре должна быть еще больше. Между прочим, как заметил Эддингтон, здесь мы имеем убедительное подтверждение нашего взгляда о том, что материя звезд состоит из атомов, разложившихся на главные составные

Звезда	Отдача энергии (эргов на грамм)	Центральная температура	Центральная плотность	Возраст
Звезда Плассета	1 000	500 000 000	Очень большая Большее 1 000	Меньше 10 ¹² лет
V Puppis	640	300 000 000		
Ангares	320	1 000 000	0,005	Меньше 10 ¹² лет
Капелла A	50	8 000 000	0,5	
Сириус	21	150 000 000	1 000	
Солнце	1,88	70 000 000	300	
α Центавра B	1,39	15 000 000	10	7.10 ¹² лет
Кригер 60 B	0,02	70 000 000	30 000	Очень старая
Сириус B	0,003	Неизвестна	Более 53 000	Неизвестен

части. Невозможно сжать материю, состоящую из целых атомов радиуса 10^{-8} см или более, до таких плотностей; это затруднение, однако, исчезает в отношении ничтожно малых ядер и электронов, размеры которых порядка 10^{-13} см.

Следует заметить, что многие данные таблицы являются только недостоверными догадками и не претендуют на большую точность. Многие астрономы предпочли бы другие цифры в этой таблице, однако я сомневаюсь, что найдется кто-нибудь, кто стал бы серьезно опровергать общее положение, что способность звезды генерировать энергию прежде всего зависит от ее возраста, а не от центральной температуры и плотности.

Разумеется, могут существовать исключения из общего правила. Крайним примером этого служат Земля и Солнце. Материя обоих одного и того же предельного возраста, однако они излучают весьма различные количества энергии на единицу массы. Это можно просто объяснить тем, что тяжелые атомы, определяющие энергию Солнца, опустились глубоко внутрь и потому не вошли в состав Земли и планет; такое же объяснение можно дать различной излучательной способности компонентов двойных систем. Эти исключения являются результатом особых условий в отдельных случаях; они не нарушают общего закона, что отдача звезды не определяется ее плотностью и температурой.

Таблица показывает, что закон хорошо подтверждается наблюдательной астрономией; его можно получить также теоретическим изучением действительного процесса образования энергии в звезде. Множество данных, в большинстве динамических, указывает, что звезды должны были

существовать миллионы миллионов лет. Вот пример: недавно образовавшиеся двойные звезды имеют круговые или почти круговые орбиты; это — следствие способа их образования. Всякое гравитационное возмущение на круговой орбите стремится сделать ее более эллиптической; поэтому, чем старше двойная звезда, тем эллиптичнее должна быть ее орбита. В действительности так и происходит. На основании данных о числе и массах звезд, странствующих квокруг в пространстве, можно определить, с какой скоростью должна возрастать эллиптичность орбит двойных звезд; отсюда, обратно, можно определить возрасты действительных звезд. Это чисто динамическая проблема. Ответ получается в миллионах миллионов лет.

Теперь можно определить количество радиации, излученной отдельными звездами в течение миллионов миллионов лет их существования. За исключением самых молодых звезд, общая масса излученной энергии оказывается значительно большей, чем масса звезды в настоящем состоянии. Масса звезды ко временей ее рождения получается сложением массы излученной энергии и остающейся массы звезды. Таким образом масса звезды при ее зарождении была много больше, чем теперь. Но в любой момент масса звезды состоит главным образом из массы материи, из которой звезда построена; мы видим поэтому, что большая часть вещества, находившегося в звезде сначала, перестала существовать как вещество; она уничтожилась и, превратившись в радиацию, улетела в пространство. Еще в 1904 г. (Nature, 70, p. 101) я высказал предположение, что энергия создается в результате уничтожения материи; теперь действительно приходится считать, что в этом заключается источник

энергии, излучаемой Солнцем и звездами. Электроны и протоны внутри звезды время от времени должны сталкиваться и взаимно уничтожать друг друга; соответствующая энергия испускается в виде излучения.

Энергия такого процесса колоссальна, она может сообщить обеим массам, принимающим участие в процессе, скорости, составляющие 0,866 скорости света. Другого способа, которым материя могла бы выделять энергию в таком же количестве, нет; например, обычное сжигание тонны угля дает энергию, достаточную для движения локомотива-экспресса в течение часа, а превращение тонны угля полностью в энергию сопровождалось бы выделением энергии, достаточной для отопления, освещения, механической работы и транспорта всей Великобритании в течение века.

Уничтожение каждого протона или атома сопровождается вспышками лучистой энергии, странствующими внутри звезды, пока в результате неисчислимых поглощений и испусканий энергия не дойдет до поверхности и не улетит в пространство. Такие вспышки лучистой энергии схожи с вспышками, производимыми радиоактивными материалами в сплитарископе, но они во много тысяч раз мощнее. Огромная энергия этих вспышек компенсируется до некоторой степени их редкостью. Например, на Солнце только один атом из 10^{17} уничтожается в течение часа. В 1 см^3 солнечной массы содержится приблизительно 10^{22} атомов, из них исчезает каждый час около 100 000. Таким образом энергия, возникающая в 1 см^3 солнечной массы, не очень велика: она равна приблизительно 9 400 эргов, или 0,00022 калории, в час. Мощность потока энергии с поверхности Солнца определяется тем, что вся энергия, образующаяся

в конусе глубиной в 695 000 км, должна выходить через отверстие этого конуса.

Таков в немногих словах механизм образования звездной энергии. Непосредственно за этим возникает вопрос, происходит ли образование энергии более бурно, сталкиваются ли электроны и протоны чаще внутри звезды в условиях огромных температур и плотностей?

На опыте известно, что обыкновенные радиоактивные процессы остаются безучастными и не усиливаются при тех высоких температурах, которые доступны в лаборатории; теория квантов объясняет это обстоятельство. Эйнштейн показал, что освобождение субатомной энергии может происходить только двумя путями: произвольно, или под влиянием внешней радиации. Легко вычислить температуру, при которой последний фактор может стать заметным. Квант радиации при этой температуре должен равняться энергии, освобождаемой при данном субатомном процессе. Таким образом температура, необходимая для разложения урана, оказывается равной приблизительно 120 000 миллионов градусов. Отсюда ясно, почему нагревание урана в лаборатории не может ускорить его распада. Такой же расчет показывает, что температура, погребная для ускорения скорости субатомного самоуничтожения материи, должна быть порядка 7 500 000 миллионов градусов. Можно заметить, что при более низких температурах, недостаточных для действительного уничтожения материи, могут все же ускоряться другие субатомные процессы. Это правильно в отношении мгновенной радиации звезды, но такие процессы не могут длительно влиять на радиацию. Все процессы, на которые влияет температура ниже 7,5 миллионов миллионов градусов, оставляют общее число

электронов и протонов в звезде неизменным. Между тем все данные астрономии говорят за то, что число электронов и протонов в звезде непрерывно убывает.

Эти соображения показывают, что относительно низкие температуры звезд, которые меньше миллиардов градусов, оказываются почти бездейственными в отношении образования звездной энергии; жар наиболее нагретых звезд не может оказывать на процесс уничтожения энергии большего влияния, чем тепло летнего дня на процесс разложения урана. Таким образом достаточно ясно, что уничтожение материи в звездах определяется не жаром, не холодом, не высокой или низкой плотностью, а просто течением времени.

Несмотря на это, Рэссель (*Nature*, авг. 8, 1925), а затем Эддингтон (*Nature*, май 1, 1926), соглашаясь, что конечный источник звездной радиации есть уничтожение материи, предполагают, что такое уничтожение может произойти, если температура обычной материи достигнет некоторого критического значения в 30—40 миллионов градусов. По Рэсселю, до этой критической температуры материя инертна, но, как только она достигнута, внезапно происходит беспрепятственное превращение материи в радиацию.

Помимо нарушения изложенных физических принципов, это предположение связано еще с таким затруднением: образование энергии, возникающее по этому предположению, происходит не только беспрепятственно, но оно и неограниченно; если оно началось, его нельзя остановить. По гипотезе Рэсселя и Эддингтона, материя становится термодинамически неустойчивой при звездных температурах, она приобретает свойства взрывчатого вещества в точке взрыва. Если звездная материя

достигла где-нибудь критической точки, то получающееся в результате уничтожение материи будет сопровождаться выделением такого тепла, что соседние слои материи также достигнут критической температуры и вся звезда почти мгновенно должна будет взорваться и перейти в радиацию. Мы не видели бы на небе постоянных светочей, но только последовательные появления новых звезд самого устрашающего типа по мере того, как различные звезды достигали бы критической точки и по очереди „лопались“. Несмотря на высокое положение, занимаемое в астрономической науке отцом и отчимом этой гипотезы, я считаю ее неприемлемой не только потому, что она противоречит общим принципам физики, но и потому, что против нее говорят звезды своим покойным видом.

Общее математическое рассмотрение проблемы устойчивости показывает, что звезда, построенная из материи, на отдачу энергии которой совершенно не влияют изменения температуры и плотности, будет динамически устойчива. Однако степень устойчивости невелика. Если свойства звездной материи таковы, что при повышении температуры увеличивается отдача энергии, то последний запас устойчивости исчезает. Всякое существенное влияние в этом направлении сделает звезду динамически неустойчивой.

Комбинируя этот чисто динамический результат с изложенными физическими принципами, мы приходим к выводу, что, по крайней мере, в первом приближении повышение температуры звездной материи не увеличивает отдачи энергии.

Звездная радиация должна возникать либо в материи земного типа, либо в материи иного типа, нам неизвест-

ного. Если принять, что высокая температура и плотность не могут ускорить отдачи радиации обычной материи, то звездная радиация должна возникать из материи неизвестного на земле типа. Должны существовать другие типы материи, и, хотя за последние годы физика и химия сильно сбились с дороги, однако можно утверждать, что эти новые типы могут быть только элементами с более высокими атомными весами; чем у урана. Теперь становится ясным значение расчетов, показавших, что звездные атомные веса в большинстве случаев больше, чем у урана.

Сопоставление и толкование результатов

Тремя различными путями мы пришли к заключению, что атомные веса звездных атомов должны в большинстве случаев превышать атомный вес урана: 1) непосредственным вычислением по формуле Крамерса; 2) из соображения, что атомы вблизи центра звезды должны быть значительно тяжелее, чем около поверхности; 3) на основании того, что атомы с атомным весом меньшим, чем у урана, не могут дать ни при каком нагревании и сжатии той интенсивной и длительной радиации, которая излучается звездами.

Оказалось, что атомные веса звездных атомов не только больше, чем у урана, но они систематически меняются от звезды к звезде. Коротко говоря, наиболее молодые звезды обнаруживают наибольшие атомные веса, и это наводит порядок в прежнем хаосе.

Мы предполагаем, что в первоначальной стадии материя состоит из смеси элементов с различными атомными весами. Наиболее тяжелые особенно легко про-

извольно самоуничтожаются, превращаясь в лучистую энергию; длительность их существования наиболее коротка. Эти элементы исчезают первыми по мере старения звезды; исчезновение их понижает средний атомный вес звезды и среднюю скорость отдачи радиации на единицу массы, так как тяжелые элементы — наиболее энергичные радиаторы. Так же, как на берегу наиболее твердые скалы дольше всего выдерживают разрушающий натиск моря, так на звезде наиболее легкие элементы дольше всего противостоят разрушающему действию времени. В конце концов на звезде остаются только самые легкие элементы, и она теряет излучающую способность. Наши земные элементы в столь малой степени способны к самопроизвольным превращениям, что их по праву можно назвать „постоянными“. Расчет показывает, что если бы эти элементы претерпевали заметное превращение за периоды, сравнимые с возрастом звезд (приблизительно 10^{13} лет), то самостоятельное образование тепла земной массой нагрело бы ее до такой степени, что она стала бы необитаемой для человека. Радиоактивные элементы, разумеется, — исключение; они, вероятно, являются последними пережитками первоначальной более бурной материи и, таким образом, являются мостом между постоянными элементами и недолговечными элементами звезд.

Интересно знать, превращаются ли тяжелые атомы в радиацию сразу или через последовательные стадии превращений? Астрономические данные определенно указывают, что наиболее массивные звезды содержат большее разнообразие атомов, чем наше Солнце, хотя вариации звездных масс шире, чем вариации атомных весов их атомов. Так как со временем эти звезды уменьша-

ются до массы Солнца, то процесс эволюции должен, очевидно, сопровождаться фактическим уничтожением атомов; недостаточно постулировать постепенное уменьшение атомного веса каждого атома до тех пор, пока он не станет постоянным. Радиоактивность показывает, что последний процесс может также происходить, но данные астрономии говорят за то, что это в лучшем случае — второстепенный процесс.

Число „постоянных“ атомов в массивной звезде, например Антарес или V Puppis, не может заметно уменьшиться в ближайшие 10^{18} лет, так что они все должны дожить до конечной стадии звезды с массой, составляющей, может быть, пятидесятую часть современной. Таким образом, приблизительно 98% современных масс этих звезд должны состоять из непостоянных атомов. Другими словами, современная масса таких звезд, как Антарес и V Puppis, должна на 98% состоять из атомов, осужденных на превращение в радиацию, и только на 2% из атомов, которые не могут перейти в излучение. Ясно, что первичная материя вселенной должна быть непостоянного типа; наши земные атомы — только остатки непревращаемого пепла. Подобно бактериям в дождевой капле, взрывающим на Ниагаре, мы видим, что наша физика и химия — только окраина обширной науки; за побережьем, исследованным в наших лабораториях, лежит океан, существование которого мы только начинаем подзревать.

Мы приходим, следовательно, к выводу, что наиболее молодые звезды состоят из вещества, которое практически целиком неизвестно на Земле и обладает атомным весом большим, чем у урана. Это вещество самопроизвольно может уничтожаться, причем освобождающаяся

энергия проявляется в виде радиации. Скорость отдачи энергии, определяемая по яркости наиболее молодых звезд, порядка 1 000 эргов на грамм в секунду. Полное уничтожение 1 г материи сопровождается выделением $9 \cdot 10^{20}$ эргов, следовательно, звездная материя должна обладать „периодом спадания“ в $9 \cdot 10^{17}$ секунд, или 30 000 миллионов лет. По мере того как звезда стареет и остается менее превращающаяся материя, период спадания соответственно удлиняется. Материя Солнца, излучающего 2 эрга на грамм в секунду, должна иметь период спадания в 15 000 000 миллионов лет. Эти периоды спадания определяют скорость эволюции и длительность жизни звезд. Грубо говоря, звезда живет столько же, сколько атомы, ее составляющие, а длительности жизни атомов являются постоянными природы.

Заметим, что периоды спадания звездных атомов длинны в сравнении с периодами обычного радиоактивного распада; это указывает, что радиоактивные элементы — только переходящие образования в эволюции материи.

КРИТИЧЕСКАЯ ЦЕНТРАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

А priori можно ожидать, что в группе звезд с приблизительно одинаковыми массами, например Солнце, Прокне и двух компонент α Центавра, скорость отдачи энергии будет очень различной, а следовательно, эти звезды могут иметь очень различные поверхностные и центральные температуры. Действительно, на первый взгляд, такие звезды могут иметь любые температуры от нуля до бесконечности. На самом деле, однако, поверхностные температуры четырех указанных звезд, а

также всех других звезд с той же массой, лежат в узких пределах от 3700 до 8300 градусов; их центральные температуры, вероятно, колеблются в пределах от 15 до 100 миллионов градусов. Для звезд с другими массами пределы иные и значительно шире для звезд с большими массами. Но звезды определенной массы всегда обнаруживают определенный верхний предел как поверхностной, так и центральной температуры. Эти пределы никогда не превосходятся, и большинство звезд с данной массой стремятся к ним. Наличие одного предела заставляет, разумеется, предполагать наличие другого и, видимо, предельная центральная температура более существенна. Звезды с массой, как у нашего Солнца, никогда не имеют центральных температур выше 80 миллионов градусов, и большинство имеют центральные температуры, не очень далекие от 80 миллионов градусов. Для звезд с массами, в 20 раз большими солнечной, соответствующий предел, вероятно, около 300 миллионов градусов; промежуточные пределы имеют звезды с промежуточными массами.

Это, разумеется, один из основных фактов астрофизики. Что он значит? Нормальный ход событий для звезды вроде V Puppis по мере потери массы и уменьшения радиации должен бы заключаться в постепенном сокращении размеров, сопровождающемся непрерывным возрастанием центральной температуры. Что останавливает это нормальное течение эволюции, как только центральная температура достигает 300 миллионов градусов?

Недавно я высказал предположение, что верхняя граница температуры для любой звезды соответствует просто той температуре, при которой ее центральные атомы теряют все или почти все электроны. Рассчитывается

это очень просто, но надо предположить, что атомы в центре звезды имеют высокие атомные веса, что согласуется с предыдущими соображениями. Например, температура в 300 миллионов градусов достаточна, чтобы оборвать последние электроны с атомов атомного веса 300 или больше. Уменьшение критической центральной температуры по мере старения и уменьшения массы звезды является с этой точки зрения прямым следствием уменьшения атомного веса звездного материала, происходящего по мере постепенного уничтожения наиболее тяжелых атомов.

Остается объяснить, почему эта температура составляет верхний предел, почему звезда не может стать еще горячее, после того как у её внутренних атомов оборваны последние электроны? Насколько я понимаю, есть только один возможный ответ. После того как с атома сорваны последние электроны, исчезает его способность к самоуничтожению и прекращается дальнейший рост отдачи радиации. С этого момента центральные атомы звезды действуют подобно регулятору паровой машины, управляя образованием энергии так, что центральная температура держится близкой к критической температуре. Если звезда начинает становиться горячее, центральные атомы все в большем числе теряют последние электроны и прекращают генерирование энергии. Тогда звезда начинает охлаждаться, но при этом атомы восстанавливаются и снова начинают производить энергию, нагревая звезду. Механизм дает совершенный термостат, и легко показать, что действие его устойчиво. По мере старения звезды более тяжелые атомы в центре превращаются в радиацию первыми и исчезают, их место занимает более легкими атомами; для обрыва всех элек-

тронов с этих атомов достаточна более низкая температура, поэтому центральная критическая температура звезды падает.

Интересное подтверждение этой гипотезы дают компоненты недавно образовавшихся двойных звезд. Они обладают скоростью отдачи на единицу массы, как у молодых звезд, но массы их соответствуют значительно более старым звездам. Ясно, что „регуляторное“ действие должно быть особенно деятельно в отношении ограничения отдачи этих звезд, так что они должны иметь центральные температуры, очень близко совпадающие с максимальной для их масс. В действительности так и есть.

Все данные, доступные до сего времени, указывают, что уничтожение материи — квантовое явление; возможно, что оно соответствует не чему иному как произвольному падению электрона на 0-квантовую орбиту. Таким образом объяснилось бы, почему голые ядра и свободные электроны не способны к уничтожению и почему, следовательно, атомы с оборванными электронами не превращаются в энергию.

ПРОНИКАЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Если земля дает только один конец цепи химических элементов, то где искать другой конец? Двигаясь по эволюционной лестнице, мы приходим к наиболее молодым звездам, содержащим элементы с повышающимся атомным весом. Минуя звезды, мы приходим к туманностям; здесь мы должны найти элементы с наивысшими атомными весами и материю с наибольшей излучательной способностью.

По внешнему виду туманности — крайне слабые объекты, их излучение видимой радиации на единицу массы приблизительно такое, как у Солнца. Есть, однако, существенное различие в радиации звезд и туманностей. В момент зарождения радиация должна обладать огромной проникающей способностью; одновременное уничтожение одного электрона и протона дает излучение с длиной волны только в $1,3 \cdot 10^{-13}$ см. Однако огромная проникающая способность этого излучения внутри звезды достаточна только для прохождения ее на расстояние в малую долю радиуса звезды; последующие поглощения и излучения смягчают эту радиацию вследствие особого рода обобщенного эффекта Комптона, и она выходит за поверхность звезды в виде обычного температурного излучения. Но плотность туманности настолько меньше, чем у звезд, что такая радиация, зародившись в туманности, проходит почти беспрепятственно в пространство. По дороге эта радиация может разрушить отдельные атомы, выбрасывая электроны со скоростями, соответствующими миллионам вольт, но большая часть проходит беспрепятственно, пока не встретит среду с большой поглощательной способностью. Таким образом нужно ожидать, что атмосферы звезд, Солнца и Земли и даже твердое тело Земли находятся под непрерывной бомбардировкой проникающей радиации, зарождающейся в туманности.

Такая радиация открыта в земной атмосфере Кольгэрстером, Милликеном и другими, которые нашли, что она вне-земного происхождения. Если она зарождается в звездах, то количество ее должно сильно зависеть от положения Солнца. Этого нет, поэтому радиация идет из туманностей или других космических масс, отличных от звезд. Совсем недавно (Nature, ок-

тябрь 9, 1926) Кольгэрстер и фон-Залис нашли, что интенсивность радиации изменяется в зависимости от положения космических масс,— радиация идет главным образом из областей около, Млечного Пути, в особенности из области Андромеды и Геркулеса.

Я вычислил, что общее количество проникающего излучения, получаемого на земле, примерно вдвое больше, чем можно было бы получить от одной туманности Андромеды (Nature, декабрь 12, 1925), если бы она состояла только из материи с тою же излучательной способностью, как у самых молодых звезд. Ясно, что порядок величины наблюдаемой радиации согласуется с этим расчетом; с другой стороны, эта радиация настолько сильна, что трудно представить другой источник ее происхождения. Проникающая способность ее, повидимому, значительно меньше, чем следовало бы ожидать от одновременного уничтожения электрона и протона, но я думаю, что это затруднение, если оно и существует, не непреодолимо. Совсем недавно Росселанд (Astr. Joun., май 1926) указал, что бомбардировка этой радиацией может быть причиной наблюдаемых широких линий звездных спектров. До этого (Nature, декабрь 12, 1925) я предположил, что так же объясняется свечение неправильных туманностей.

Есть соблазн пойти дальше в физику туманностей, попробовать понять свойства материи в ее первоначальных формах и заглянуть, может быть, в акт ее создания. Но это завело бы нас далеко в область догадок и спекуляций. До этих пор наша аргументация не зависела от догадок и домыслов. Там, где сначала, казалось, можно выбирать различные пути, при ближайшем рассмотрении все пути, за исключением единственного, оказывались

запрещенными или наблюдаемыми фактами или хорошо установленными принципами физики или динамики; никогда не приходилось выбирать. По этой причине полученные заключения, хотя и, несомненно, новые и, может быть, неожиданные, кажутся мне в основных чертах неизбежными. Я не вижу способа, как их можно избежать,

Жизнь и вселенная

Обзор результатов, полученных космической физикой, заставил нас предположить, что физика земных лабораторий, только окраина общей физики. Первичный физический процесс во вселенной — превращение материи в радиацию, о котором мы на земле ничего не знали приблизительно до 1904 г. Первичная материя вселенной состоит из чрезвычайно диссоциированных атомов — состояние вещества, о котором мы и не думали до 1917 г. Первичная радиация вселенной — не видимый свет, но радиация с короткими волнами и жесткостью, которая показалась бы невероятной в начале нашего века. Все наши знания о действительных основных физических условиях вселенной, в которой мы живем, есть результат работы последней четверти века.

Простое объяснение этого в том, что жизнь довольно естественно начинает исследование природы с изучения условий, непосредственно ее окружающих. Общие условия вселенной как целого — значительно более трудная задача для жизни на нашей планете, и к ней мы только приближаемся. Физические условия, в которых возможна жизнь, — только ничтожная доля шкалы физических условий вселенной как целого. Понятие жизни предполагает длительность во времени; не может быть жизни

там, где атомы меняют свой вид миллионы раз в секунду и ни одна пара атомов не может соединиться. Для жизни нужна также некоторая подвижность в пространстве. Эти два требования ограничивают небольшой интервал физических условий, в которых возможно жидкое состояние. Наш обзор показал, как малы эти границы сравнительно с тем, что происходит в целой вселенной. Первичная материя должна превращаться в излучение в течение миллионов миллионов лет, чтобы получилось исчезающе малое количество инертного пепла, на котором может существовать жизнь. Помимо того этот пепел не должен быть слишком горячим или холодным, иначе жизнь будет невозможной. Трудно вообразить жизнь какого-то высшего порядка, кроме как на планетах, согреваемых Солнцем. Если даже звезда проживет свои миллионы миллионов лет, то вероятность того, что она окажется Солнцем, окруженным планетами, составит, насколько мы можем вычислить ее, примерно одну стотысячную. Во всех отношениях пространства, времени, физических условий жизнь ограничена бытием только в ничтожно малом уголке вселенной.

Что же такое жизнь? Есть ли это последняя цель, к которой движется все, для которой миллионы миллионов лет превращается материя в необитаемых звездах и туманностях и могучая радиация посылается в пустынные пространства? Является ли все это только пышной подготовкой для жизни? Или она только случайный и совсем неважный побочный продукт естественных процессов, у которых свои более удивительные цели? Или — еще более скромная точка зрения, — не является ли жизнь своего рода болезнью, поражающей материю в старости, когда она потеряла высокую температуру и

способность порождать радиацию высокой частоты, при помощи коих молодая и более сильная материя сразу разрушила бы жизнь? Или, отбрасывая смирение, мы должны сказать, что жизнь — единственная реальность, которая сама творит, вместо того чтобы твориться гигантскими массами звезд и туманностей в необозримые промежутки астрономических сроков? Трудно даже перечислить те способы, которыми можно истолковать достигнутые результаты. Нет, однако, полагаю, ни одного способа их избежать.

II. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗД

А. Эддингтон

Гипотеза сжатия

§ 1. — Солнце излучает за год в пространство $1,19 \cdot 10^{41}$ эргов. Подсчет запасов тепловой энергии Солнца приводит к таким цифрам:

Лучистая энергия	$2,83 \cdot 10^{47}$ эргов
Энергия поступательного движения атомов и электронов	$26,9 \cdot 10^{47}$.
Энергия ионизации и атомов в возбужденном состоянии	$< 26,9 \cdot 10^{47}$.

Этого запаса при указанном расходе может хватить самое большее на 47 миллионов лет. Мы не думаем впрочем, что этот основной капитал расходуется, скорее он растет, чем убывает.

В настоящее время все соглашаются, что источник энергии звезд — субатомный. Уйти от такого заключения нельзя.

Но, изучив эту гипотезу детально, мы увидим, что она связана с рядом затруднений; поэтому нужно рассмотреть тщательно и другие возможности.

Прежде господствовала теория сжатия, предложенная Гельмгольцем и Кельвином. Предполагалось, что запасы энергии поддерживаются вследствие превращения гравитационной энергии в тепловую, соответственно постепенному сжатию звезды. Однако энергия, которую можно получить таким способом, совершенно недостаточна, если принять во внимание возраст, который теперь приписывается Солнцу. Может быть, будет не лишним заново рассчитать возраст Солнца по гипотезе сжатия, основываясь на двух заключениях, полученных в наше время: 1) вещество звезды находится в состоянии идеального газа и поэтому концентрировано в центре сильнее, чем предполагалось прежде; 2) мощность солнечного излучения в прошедшем не могла сильно изменяться, если только масса Солнца оставалась постоянной. Гравитационная энергия, освободившаяся при сжатии Солнца от бесконечно больших размеров до современных, равна:

$$\Omega = \frac{3}{2} G \frac{M^2}{R} = 5,66 \cdot 10^{48} \text{ эргов,}$$

где G — постоянная тяготения, M — масса, R — радиус Солнца. Как сказано выше, $2,97 \cdot 10^{48}$ эргов отсюда сохранились в форме кинетической энергии атомов и электронов и лучистой энергии. Недостающая до баланса энергия в $2,69 \cdot 10^{48}$ эргов запасена в виде энергии ионизации и возбуждения. Если не учитывать эту часть (вероятно существенную), то для Солнца возможно излучение с современной мощностью в течение 23 миллионов лет. Если допустить, что в прошлом излучение было слабее, то расчет дает почти удвоенный срок.

Если отсчитывать возраст Солнца начиная с того момента, когда оно достигло эффективной температуры

• в $3\,000^\circ$, то окажется, что оно светило в течение 15 или 19 миллионов лет (в зависимости от того, будем ли мы учитывать пониженную мощность излучения в прошлом или нет). Эти цифры довольно неопределенны, так как мы не приняли во внимание энергии ионизации, указанной выше. Во всяком случае 20 миллионов лет, вероятно,—достаточно правильная оценка возраста Солнца по гипотезе сжатия.

§ 2.—Биологические, геологические, физические и астрономические данные все согласно приводят к заключению, что такой возраст слишком мал и что шкала времени, предлагаемая гипотезой сжатия, так или иначе должна быть расширена. Наиболее прямые данные дает определение времени образования земных пород, содержащих радиоактивные минералы; это время находится по отношению количества урана к гелию или же по отношению урана к свинцу. Наиболее старым осадочным породам по этим данным приписывают возраст в 1 300 миллионов лет. Солнце должно быть много старше, и едва ли его возраст можно оценивать меньше, чем в 10^{10} лет.

Быстрота эволюции, требуемая гипотезой сжатия, станет особенно наглядной, если мы рассмотрим звезды-гиганты. Звезда с массой в 11,5 солнечных масс в течение 31 000 лет должна развиваться из спектрального типа M ($3\,000^\circ$) в тип G ($6\,000^\circ$), а в 72 000 лет из типа M в тип A ($10\,500^\circ$). Если учесть энергию ионизации, то скорость развития должна оказаться еще большей.

Переменные звезды Цефеиды дают прямое доказательство невозможности столь быстрой эволюции. Для δ Серпеi при такой эволюции, как показывает расчет, период должен бы убывать на $\frac{1}{26\,000}$, или на 17 секунд

в год. Эта звезда наблюдается с 1785 г., и такое значительное изменение периода не могло бы остаться незамеченным. Никакого изменения, превышающего $\frac{1}{150}$ требуемого гипотезой сжатия, однако, не наблюдалось.

§ 3. — В поисках других источников звездной энергии, помимо энергии сжатия, приходится прежде всего решить вопрос, скрыта ли энергия, которая будет излучена в дальнейшем, в звезде или она непрерывно подводится извне. Были предположения, что тепло доставляется ударами материи метеоров или некоторой тонкой радиацией, пронизающей пространства и захватываемой звездой. Против каждой такой гипотезы в отдельности можно представить очень серьезные возражения, но нет нужды рассматривать их подробно, так как они возникли благодаря непониманию характера задачи. *Любой источник энергии останется бесполезным, если он не передает энергию в глубокие недра звезды.*

Недостаточно объяснить внешнюю радиацию светила; — надо понять, каким образом поддерживается высокая внутренняя температура, при отсутствии которой звезда должна бы сжаться. Градиент температуры от поверхности к центру нельзя поддерживать, если энергия подводится с внешнего конца. Если бы, например, удары метеоров давали достаточно тепла для поддержания поверхности звезды при 5200° , то внутренняя температура постепенно опустилась бы до этого же уровня, и звезды не могли бы далее существовать с современной небольшой плотностью. В действительности эволюция звезды останется безучастной к происходящему на поверхности, а избыток тепла на поверхности уйдет в виде избыточной радиации.

Мимоходом упомянем предложение модифицировать законы излучения таким образом, чтобы радиация распространялась только в тех направлениях, где находится какое-нибудь тело, способное задерживать излучение. Таким образом достигалась бы экономия в потоке радиации, излучаемой звездой в пространство. Но внутри звезды такое предположение ничего не меняет, там во всех направлениях имеется материя, задерживающая излучение. Только внутренний поток регулирует расход энергии, и бесполезно маскировать внутренние растраты экономией на поверхности.

СУБАТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

§ 4.— Мы ограничены энергией, освобождающейся в недрах звезды, поэтому внешние источники исключаются, и едва ли возможно обойти заключение, что весь запас энергии на будущее траты уже скрыт в звезде. Однако энергию невозможно совершенно спрятать, она выдает себя в образе массы. Энергия и масса эквивалентны, массы же звезд нам известны.

Отсюда сразу получается верхняя граница для запаса энергии, которая может быть излучена, на все времена; звезда распыляет свою массу, блуждая в пространстве. Масса Солнца $1,985 \cdot 10^{33}$ г, что соответствует в единицах энергии $1,785 \cdot 10^{54}$ эргов. Таков полный запас. При современной мощности излучения его хватит на 15 миллиардов лет ($1,5 \cdot 10^{13}$). Если весь этот запас должен быть израсходован, то в последних стадиях своей жизни Солнце уменьшится по массе и будет излучать с меньшей мощностью. С другой стороны, если Солнце начало свое развитие в виде звезды с бесконечно боль-

шой массой, то его теперешний возраст должен быть не меньше 10^{13} , и вначале оно излучало с большей мощностью соответственно большей массе.

Эта шкала времени является предельной; хотя энергия и находится в звезде, мы не знаем, однако, какая доля ее может быть использована на излучение.

Этот запас энергии, за незначительными исключениями, сосредоточен в атомах и электронах и соответствует, как принято говорить, субатомной энергии. Процессы, благодаря которым эта субатомная энергия может быть освобождена, такие:

I. а. Превращение сложных элементов в более простые (радиоактивность).

б. Соединение простых элементов в сложные.

II. Взаимное уничтожение протонов и электронов.

Может показаться странным, что энергия предполагается освобождающейся как при возникновении, так и при разрушении сложных элементов, однако оба случая известны. Подобно химическим соединениям, ассоциация протонов и электронов в ядра иногда происходит эндотермически, иногда экзотермически. Разрушение сложных ядер с освобождением энергии знакомо по радиоактивным превращениям. Хорошо известный пример освобождения энергии при построении ядра — это образование гелия из водорода. Ядро гелия содержит 4 протона (водородных ядра), связанных вместе при помощи двух электронов, свободный электрический заряд при этом $+2e$, в согласии с атомным числом $Z=2$. Атомный вес 4,00 определяется массой протонов, масса электронов незначительна, так что каждый протон соответствует массе 1,000. Но масса изолированного протона в том виде, как он присутствует в атоме водорода, равна 1,008.

Эта разница установлена химическими определениями атомного веса водорода и гелия и наиболее убедительно измерениями Астона в массовом спектрографе. Таким образом при возникновении гелия из водорода теряется 0,8 процента массы, и соответствующая энергия должна была освободиться в процессе соединения. Несомненно, что тесное приближение электронов к протонам в ядре гелия уменьшает их взаимную электростатическую энергию в сравнении с той энергией, которая была при бесконечном удалении зарядов; эта потеря в энергии поля и обнаруживается по измерениям массы. После этой первой потери 0,008 массы при вхождении протонов в ядро гелия дальнейшее усложнение ядер не сопровождается столь значительными изменениями. Астон нашел другое отклонение от „правила целых чисел“ в атомном весе олова, но в сравнении с общей массой освобожденная энергия здесь относительно меньше*.

Таким образом, в процессе I b, повидимому, только не более 1% массы может освободиться в виде энергии. Если в этом процессе главный источник звездной энергии, то предельную шкалу времени надо разделить на 100, и жизнь Солнца (прошлая и будущая) ограничится $1,5 \cdot 10^{11}$ годами. При этом нет нужды беспокоиться о возможности больших изменений мощности радиации, так как масса изменяется не более

* В 1927 г. Астон опубликовал более точные данные, полученные с новым массовым спектрографом. Убыль массы на каждый протон, входящий в состав ядер, обнаруживается для всех элементов, причем сохраняет почти такую же величину, как и у гелия. Максимального значения убыль массы достигает у криптона.

Прим. переводчика.

чем на 1%. Но указанный предел достигим только в том случае, если бы Солнце первоначально состояло полностью из водорода. Для жизни в 10^{10} лет нужна первоначальная пропорция водорода в 7%. Трудно допустить по различным основаниям большую концентрацию даже в самых ранних звездах. Шкала времени, таким образом, сильно сжимается, но нельзя сказать, что она мала.

Насколько мы знаем, процесс I а дает значительно меньше энергии. Для поддержания звездной энергии посредством разложения элементов необходимо предположить элементы с такой сильной радиоактивностью, которая нам неизвестна по земным опытам.

Третий процесс разрушения протонов и электронов освобождает всю энергию, и таким образом достигается предельная шкала времени. В этой гипотезе предполагается, что при встрече протона и электрона при исключительных обстоятельствах они могут совпасть, их положительный и отрицательный заряды уничтожаются, и остается только энергия, ничем не сдерживаемая и распространяющаяся в пространстве в виде электромагнитных волн.

В случае такого источника энергии материя звезды будет постепенно исчезать. Звезда сжигает свою массу.

Мы вспомним две формы, которые может принять гипотеза субатомного источника энергии, — мягкую форму превращения элементов и радикальную форму разрушения материи. Вторая теория дает шкалу времени в 100 раз большую, чем первая. Помимо этого они приводят к двум существенно различным выводам относительно звездной эволюции. Во второй теории масса звезды существенно изменяется за время жизни, происходит

эволюция от тяжелых к легким, от ярких к слабым звездам. В первой теории масса практически остается постоянной, и нет данных для эволюции, если исключить только потерю или получение масс вследствие внешних причин. Это различие дает надежду сделать выбор между обеими теориями.

§ 5.—Первый вариант идеи о том, что масса обычной материи — признак присутствия энергии, которая может проявиться и в свободной форме, относится еще к 1881 г., когда Дж. Дж. Томсон показал, что электрическое поле заряженного тела обладает инерцией, или массой. Открытие электрона и стремление рассматривать его массу сосредоточенной в электрическом поле еще более укрепило убеждение в наличии больших количеств массы, соответствующей энергии поля, но может быть не входящих как постоянная часть в состав материи. Насколько продвинулось это воззрение около 1900 года, можно видеть на примере книги Лармора „Эфир и материя“ (приложение E).

Там описывается образование положительного и отрицательного электронов при вращении силовой трубки относительно внутренней оси; при этом осторожно указывается на возможность спадания стенок трубки, сопровождающегося уничтожением электронов и освобождением энергии. Вопрос о внутренней энергии материи стал более отчетливым и ясным в теории Эйнштейна, который указал на тождество массы и энергии. Масса и энергия только виды одного и того же, различно проявляющиеся в различных опытах, грамм и эрг так же можно превращать друг в друга, как ярд и метр. Таким образом внутренняя энергия строения любой данной массы становится известной, и, разумеется, возникают

догадки о том, может ли эта энергия освободиться и использоваться полностью или только частью.

Между тем наличие запаса энергии внутри атома стало явным более практически в процессах радиоактивности. Одно время ходили преувеличенные идеи о космическом значении этого, дотоле неизвестного, источника энергии. Казалось, что здесь — непосредственное решение затруднений в вопросе о возрасте Солнца и Земли. В некотором смысле возраст Земли растягивался таким образом до бесконечности. Один из доводов лорда Кельвина против большой шкалы времени, которую требовали геологи, заключался в указании на градиент температуры под поверхностью Земли. Кельвин определял тепловой поток изнутри Земли по температурному градиенту и теплопроводности поверхностных пород. Теперь мы знаем, что выходящее наружу тепло не превосходит того количества, которое можно приписать освобождению энергии в радиоактивных минералах, так что оно не может служить мерою скорости охлаждения Земли. Кельвин же считал его таковым и на этом основании отсчитывал назад эпоху расплавленного состояния земной коры. Этот прямой метод расчета более не приемлем.

Но мало пользы увеличивать возраст Земли, не расширяя одновременно возраста Солнца, а в этом случае радиоактивность помогает очень мало. Вычислено, что если бы Солнце нацело состояло из урана и его продуктов (в отношениях, соответствующих равновесию), то радиоактивность дала бы только половину фактической мощности солнечного излучения, другая половина должна происходить из неизвестных источников.

До тех пор, пока требовалось только как-нибудь расширить шкалу времени, не было и попыток формулиро-

вать какую-либо определенную теорию в применении к астрономическим задачам на основе идеи субатомной энергии. Некоторые предполагали существование на звездах элементов с большей радиоактивностью,—уран и радий с этой точки зрения только последние слабые остатки уже завершающегося процесса. Другие довольствовались просто знанием того, что на звездах имеются обширные запасы энергии, независимо от состава звезды; не было настойчивого стимула, требующего решения вопроса о способе освобождения этой энергии.

§ 6.—Я думаю, что чистый физик склонен рассматривать наши рассуждения о субатомной энергии как неосновательные домыслы; если это так, то он глубоко заблуждается относительно положения астронома. Здесь нет неограниченной фантазии, далекой от наблюдаемых фактов. У астронома очень много фактов, и он чувствует обязанность как-то комбинировать эти факты, чтобы навести порядок. Измерение мощности радиации звезды есть измерение скорости освобождения внутриатомной энергии; если бы эти два процесса не уравнивались хотя бы приблизительно, мы снова должны бы были вернуться к эволюции в пределах шкалы времени лорда Кельвина. Таким образом измерения мощности освобождения субатомной энергии обычное дело для астронома. Мы знаем теперь, с другой стороны, условия плотности и температуры, в которых находится материя в недрах звезд, освобождающая субатомную энергию. Разумеется позволительно привести эти факты в порядок и рассмотреть получаемые при этом законы и теории, не опасаясь быть обвиненным в пустых спекуляциях. Если бы критикующий нас физик обладал в своей лаборатории источниками энергии, мощность которых он

мог бы измерить и физическое состояние которых он мог бы вычислить, то он, конечно, не удержался бы от догадок о происходящих перед ним процессах.

К несчастным факты до сих пор не укладываются в удовлетворительную схему, и до сих пор мы ищем ключ. У меня нет никакой теории в дальнейшем, и общие результаты совершенно неопределенны, из них видно только, насколько запутанна и трудна задача.

Астрономические затруднения

§ 7.—Сравним следующие данные относительно Солнца и Капеллы: 1) Капелла освобождает 58 эргов на грамм в секунду, в то время как Солнце освобождает только 1,9 эрга. 2) Плотность Солнца в 620 раз превосходит плотность Капеллы. 3) Температура Солнца в соответствующих точках внутри светила в 4,3 раза превосходит температуру Капеллы. Два первых пункта—прямой результат наблюдения. Третий—теоретическое заключение, от которого трудно отказаться. Обыкновенно полагают, что скорость освобождения внутриатомной энергии, если только она зависит от температуры и плотности, должна возрастать с температурой и плотностью. Почему же Солнце излучает меньше, несмотря на кажущиеся более благоприятные условия?

Возможный ответ в том, что Солнце—более старая звезда, Капелла же черпает из более щедрого источника, уже исчерпанного на Солнце. Судя по мощности излучения, на Солнце осталось не более $\frac{1}{30}$ этого первоначального источника, так что если единственный способ освобождения энергии соответствует превращению водорода в высшие элементы, то весь водород на Солнце

практически должен быть израсходованным. Наиболее существенный пункт такого толкования, однако, в том, что для интерпретации астрономических данных помимо двух факторов, температуры и плотности, входит третий усложняющий фактор, т. е. оскудение запасов энергии.

Капелла состоит из двух звезд-компонент. В некоторую эпоху одна звезда分离лась, и две компоненты начали отдельное существование, находясь в одинаковой стадии израсходования энергии. Мощность излучения возрастает с возрастанием массы; поэтому более массивная компонента Капеллы излучила большую энергию на грамм, и, следовательно, запасы ее энергии израсходованы в большей степени. Мы знаем, однако, что более массивная компонента с меньшей температурой и плотностью и с более оскудевшими запасами энергии излучает больше энергии на грамм, чем меньшая компонента. Крайне нелепый парадокс!

Возможно еще следующее предположение. Запас энергии звезды практически неистощим, но он становится доступным только при некоторой критической температуре, около 40 миллионов градусов. Когда звезда находится в состоянии гиганта, утилизируются различные источники субатомной энергии, весьма мощные, но скоро истощаемые. При сжатии звезды, наконец, достигается центральная температура в 40 миллионов градусов, и тогда сразу открывается главный запас энергии, соответствующий, может быть, уничтожению протонов и электронов. Звезда в этой стадии начинает сжигать самое себя. В недрах звезды должно быть вполне определенное количество материала при температуре выше критической, чтобы доставлять необходимый запас освобождаемой

энергии; для уменьшения этого запаса достаточно относительно небольшого расширения звезды.

Однако серьезным возражением против существования критической температуры — в особенности столь низкой, как 40 миллионов градусов, — является отсутствие каких-либо физических данных об атомах, электронах и радиации, которые делали бы такое предположение сколько-нибудь вероятным. Радиация при такой температуре состоит из X-лучей самого обычного типа, и электроны обладают скоростями, легко получаемыми в лабораторных опытах. Только после самого тщательного исключения других возможных толкований можно обратиться к гипотезе столь революционного характера.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАТРУДНЕНИЯ

§ 8.— Если астрономические факты и служат надежным путеводителем при формулировании законов освождения субатомной энергии, то все же возникающие при этом теории следует, я полагаю, подвергнуть цензуре теоретической физики. Если мы будем знать наперед, какого рода теории физик сочтет неприемлемыми, то получится большая экономия времени при поисках в безнадежных направлениях. Однако собственное положение физика также связано с затруднениями и противоречиями, и очень сомнительно, способен ли он выполнить роль строгого цензора.

Затруднение в том, что с точки зрения физика температура звезд до абсурда мала. Он смотрит на звезды, как будто бы практически они находились при температуре абсолютного нуля, потому что в сравнении с энергией процессов в ядрах атома 40 миллионов градусов

столь малая величина, на которую едва ли стоит обращать внимание. Если субатомная энергия свободно проявляется на звездах, почему бы ей не обнаружиться на Земле?

В лабораторных условиях можно изучать электроны и ионы с энергией, значительно большей, чем энергия, соответствующая 40 миллионам градусов. Если важна концентрация энергии, то, конечно, звезда находится в преимущественном положении, однако концентрация, эквивалентная $1\frac{1}{2}$ миллионам градусов, достигнута в опытах Капицы и Андерсона. Следует заметить впрочем, что радиация, освобождающаяся при субатомных процессах, должна быть столь „жесткой“ и проникающей, что, если бы она и появлялась в лабораторных опытах, ее трудно было бы поймать и измерить.

Отсутствие процессов освобождения субатомной энергии внутри Земли можно бы объяснить относительной прочностью связи электронов в атомах. Однако в Земле должно быть и значительное количество свободных электронов, как это явствует из термоионного излучения металлов.

Различие температур в земных и звездных условиях, таким образом, повидимому, недостаточно для объяснения заметного влияния на превращение или уничтожение материи; это главная причина, по которой наши теории могут быть подвергнуты цензуре. Если, например, утверждать, что образование гелия из водорода не может заметно ускоряться при звездных температурах, то с этим процессом уже не приходится считаться как с источником энергии звезд.

Однако гелий, который в наших руках, где-то и когда-то должен был образоваться. Мы не будем убеж-

дать критика, утверждающего, что на звездах недостаточно жарко для такого процесса, мы попросим его только пойти и поискать места по жарче.

Возникновение гелия столь таинственно, что мы начинаем сомневаться во всех предсказаниях относительно условий, требующихся для этого. Сосредоточив внимание на температуре, нужной для „печенья“ атомов гелия, мы забыли пословицу: „Чтобы сделать рагу из зайца, сначала поймайте зайца“. Как может необходимый материал для построения гелия, 4 взаимно отталкивающихся протона и 2 электрона, собраться в одной точке, — это превосходит всякое воображение. В этом случае не поможет и идея о том, что здесь перед нами одна из проблем, в которой макроскопическая концепция пространства перестает быть верной, и что составные части гелия не должны быть в одном и том же месте (с макроскопической точки зрения), — они связаны соотношением близости более существенным, чем пространственные отношения.

Согласно обычному воззрению, можно ожидать освобождения субатомной энергии в значительных размерах только при огромных скоростях электронов; не совсем ясно, как должны действовать эти быстрые электроны, однако все же есть некоторые шансы, что при достаточной энергии электрона может случиться что-нибудь удивительное. При звездных температурах средняя скорость электронов мала в сравнении со скоростью β -лучей, поэтому там мало шансов для сюрпризов. По максвеллову закону распределения скоростей, должны существовать электроны, скорости которых значительно превосходят среднюю, но это не очень существенно. Можно рассчитать в отношении температурных скоростей

что на всем Солнце найдется только один электрон или ион, энергия которого будет $5 \cdot 10^{-7}$ эрга, у наиболее быстрых β -лучей энергия достигает однако $30 \cdot 10^{-7}$ эргов, у α -лучей — $130 \cdot 10^{-7}$ эргов. Поэтому, повидимому, на звездах нет ни одной частицы с энергией, достаточной для того, чтобы вызвать субатомные процессы, за исключением, разумеется, частиц, вылетающих при самих субатомных процессах.

§ 9.—Если внутри звезд благодаря циркуляции материи образуются местные электрические поля, то возможно, что электроны приобретут скорости, превосходящие температурные скорости и, таким образом, они станут более разрушительными.

В связи с этим нужно указать на замечание Ч. Т. Р. Вильсона. Обыкновенно максимальная энергия, приобретаемая частицей в электрическом поле, соответствует падению потенциала на его свободном пути. Если в нашей атмосфере движется медленная β -частица, то благодаря электрическому ускорению скорость ее будет возрастать до тех пор, пока она не встретится с атомом, ионизируя его; после резкого снижения скорость частицы снова начнет возрастать до следующей встречи и ионизации. Если вначале и имеется ускорение, то вместе со скоростью возрастает и частота встреч и ионизаций, торможение увеличивается, и достигается предельная скорость. Но для быстро движущихся частиц условия иные: ионизирующая способность возрастает со скоростью только до определенной точки, а затем падает. Если скорость частицы перейдет эту критическую точку, она может возрастать до бесконечности, в зависимости от большего или меньшего торможения. Вильсон предполагает, что такие частицы-сороходы должны появляться во время

гроз; если им удастся воспользоваться практически всей энергией, соответствующей падению потенциала (около 10^9 вольт), то энергия их должна превосходить все, что нам до сих пор известно. Например энергия, освобождающаяся при уничтожении протона и электрона, соответствует только $9 \cdot 10^8$ вольт.

Хотя неизвестно, может ли произойти что-либо в этом роде внутри звезд, однако этот вопрос заставляет задуматься. Если поля такого рода, как во время земных гроз, существуют в недрах звезды, то достаточно быстрый электрон будет двигаться все с уменьшающейся вероятностью его захвата по мере того, как скорость его будет возрастать под влиянием поля, длина его свободного пути сильно увеличится, и энергия будет безгранично возрастать. Трудно допустить существование местных полей большой силы в звездах, если принять во внимание высокую проводимость ионизованного вещества. Поскольку мы можем судить, электрон должен иметь очень большую начальную скорость, чтобы не потерять, а, наоборот, получить энергию. Числовые расчеты в этом отношении совсем неутешительны. Однако, если небольшое число очень быстрых электронов вызовет освобождение субатомной энергии, то этот процесс будет в свою очередь сопровождаться выделением других очень быстрых электронов, и при некоторых обстоятельствах действие не будет замедляться, а может быть возрождающимся, поддерживая и множа число частиц-сорокоходов. Если что-нибудь в этом роде происходит, то влияние температуры и плотности невозможно рассчитать, и, кроме того, должны быть приняты во внимание другие факторы, в особенности вращение, которое, повидимому, и может сопровождаться местными электрическими полями.

§ 10.— Мы видели, что для физика затруднительно допущение о том, что скорость освобождения энергии может заметным образом зависеть от температуры, так как звездные температуры слишком малы для этого. Однако астроном вынужден настаивать на такой зависимости по следующей причине. Если бы скорость освобождения энергии не зависела от плотности и температуры, то звезды были бы неустойчивыми, генерация энергии E не следовала бы за изменениями радиуса звезды вследствие сжатия или расширения. Излучаемая энергия L определяется массой и до некоторой степени радиусом. Предположим, что вследствие истощения источника энергии по причине небольших возмущений E стало меньше L , тогда энергия звезды уменьшится на величину $L - E$, и звезда должна будет сжаться.

Если E не зависит от плотности и температуры, а L возрастает приблизительно обратно пропорционально $\sqrt{R}$, то вследствие дефицита звезда должна продолжать сжиматься безгранично.

ИЗЛУЧЕНИЕ МАССЫ

§ 11.— Излучение должно сопровождаться уменьшением массы звезды. Чем больше жила и светила звезда, тем меньше должна быть ее масса. Теоретический расчет, сделанный на этом основании, приводит к такой таблице, связывающей массу звезды с ее возрастом (см. табл. на стр. 66).

Если звездная система — смесь звезд всяких возрастов, и каждая звезда проходит через все стадии, то число звезд в пределах масс каждой строки должно быть пропорциональным указанному во втором столбце возрасту, иначе числа второго столбца должны быть пропорцио-

Таблица 1

Масса (в солнечных массах)			Возраст (в миллиардах лет)
от ∞	до 35		38
" 35	" 10		65
" 10	" 3,7		214
" 3,7	" 1,73		930
" 1,73	" 0,92		5 210
" 0,92	" 0,53		36 300
" 0,53	" 0,31		281 000
" 0,31	" 0,18		2 190 000

нальными числу звезд, находящихся в данных пределах абсолютной яркости. Числа сверху таблицы слишком велики, так как очень немногие звезды начинают свою жизнь в виде огромных масс, во много раз превосходящих солнечную, но начиная с масс, приблизительно в 2 раза больших Солнца, мы должны ожидать согласия с функцией, указывающей распределение звезд по абсолютным величинам или яркостям. К сожалению мы имеем немного данных относительно наиболее слабых звезд с массами, меньшими 0,4 солнечной, но в интервале масс от 3,7 до 0,53 материал, даваемый наблюдениями, подтверждает приблизительную пропорциональность чисел второго столбца и относительно количества звезд в этих пределах. Сирс (Seares), Лейтен (Luyten), Мальмквист и другие астрономы согласны в том, что перед нами налицо возрастание числа более слабых звезд.

Огромное различие возрастов звезд гигантов и карликов особенно поражает в таблице. Мы видим, что звезда с массой 2 не может быть старше 10^{12} лет, какова бы ни была ее первоначальная масса, звезда же с массой 0,5 должна иметь по крайней мере $40 \cdot 10^{12}$ лет. В неко-

торых случаях необходимость такого резкого различия возрастов приводит к затруднениям. Например в таких компактных системах, каковы шаровые звездные кучи, едва ли можно ожидать смеси звезд с сильно различающимися возрастами. Поэтому интересно отметить, что в отношении них есть указания на нехватку более слабых звезд. Если это верно, то перед нами очень веское подтверждение гипотезы уменьшения звездных масс. Однако Шаплей указал мне, что такая система, как звездная куча в созвездии Быка, повидимому фатальна для теории излучения массы, ибо там встречаются вместе гиганты и карлики. С другой стороны, Герцшпрунг сообщил мне, что в звездной куче Быка, Презепы и других имеется определенный нижний предел для яркости звезд, т. е. отсутствуют слабые звезды. Естественно думать, что слабые звезды отсутствуют потому, что звездная куча существует еще недостаточное время, для того чтобы такие звезды могли появиться. Положение, следовательно, таково: с качественной стороны звездные кучи подтверждают теорию излучения массы очень убедительным образом, но с количественной стороны (наличие одновременно гигантов и карликов) перед нами резкое несогласие. Впрочем в той сырой стадии, в какой находится теория, качественное подтверждение, может быть, значит больше, чем количественные расхождения.

Фохт заметил, что если различные по массам компоненты двойной звезды излучают постепенно свои массы, то отношение масс компонент с течением времени, по мере старения системы, должно стремиться к единице. Более тяжелая звезда теряет относительно больше, чем легкая. Данные относительно 93 звезд, собранные Фохтом, повидимому, подтверждают это.

§ 12.— Многие авторы рассматривали возможность уменьшения масс вследствие вылета атомов из звезды в пространство. По Милльну (Milne), однако, потеря массы, вследствие вылета атомов с термическими скоростями, должна быть ничтожной для всех элементов. Повидимому есть возможность ухода атомов из хромосферы под действием интенсивного светового давления, но расчеты, произведенные в этом направлении, еще очень неопределенны.

Во всяком случае трудно думать, что потери массы вследствие ухода атомов могут вообще быть сравнимыми с потерями вследствие излучения. Радиация Солнца уносит массу в $6 \cdot 10^{-12}$ г с каждого квадратного сантиметра поверхности. Средняя плотность хромосферы кальция порядка 10^{-17} г на см^3 . Следовательно вся хромосфера должна непрерывно уходить со скоростью в 60 км/сек, для того чтобы уносить массу, равную массе излучения! Радиация Солнца эквивалентна вылету биллиона атомов кальция в секунду с каждого квадратного сантиметра поверхности.

Повидимому изменение массы звезды вследствие излучения далеко превосходит какие угодно убыли и приращения вследствие материальных факторов. Если так, то расчет длительности стадий эволюции массы звезд в таблице I может считаться вполне определенным. Как уже указано, остается, однако, серьезное затруднение в факте сосуществования гигантов и карликов в одной и той же звездной куче. Повидимому, я где-то ошибаюсь в современной путанице вопроса об эволюции звезд и источниках энергии, и я должен кончить признанием, что сам заблудился.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
<i>Предисловие переводчика</i>	5
<i>Дж. Г. Джинс. Современное развитие космической физики</i>	7
<i>А. С. Эддингтон. Источники энергии звезд</i>	47

.....
НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ
.....

..... ВЫШЛИ В СВЕТ
.....

1. А. Я. ХИНЧИН

ВЕЛИКАЯ ТЕОРЕМА ФЕРМА

2. К. ФУНК

ВИТАМИНЫ

Перевод под ред. М. Я. Серейского. С предисловием автора к русскому изданию

3—4. С. И. ВАВИЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ОСНОВАНИЯ ТЕОРИИ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

5. Дж. ДЖИНС — А. ЭДДИНГТОН.
СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ
КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.

Перевод С. И. Вавилова.

.....
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
.....

НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ

ПЕЧАТАЮТСЯ И ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ

В. ПАУЛИ

БЕЛКИ И КОЛЛОИДЫ

А. ЭДДИНГТОН

ЗВЕЗДЫ И АТОМЫ

О. МЕЙЕРГОФ

ТЕРМОДИНАМИКА
ЖИЗНЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ

С. Н. РЖЕВКИН

СЛУХ И РЕЧЬ В СВЕТЕ
СОВРЕМЕННЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

П. П. ЛАЗАРЕВ

УСПЕХИ ГЕОФИЗИКИ

А. ГИЛЛ

РАБОТА МЫШЦ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО