

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИСТОЧНИК ЗВЕЗДНОЙ ЭНЕРГИИ ¹⁾.

А. С. Эддингтон.

Обыкновенно считают, что гравитационная энергия, освобождающаяся при сокращении небесных тел, недостаточна для доставления того большого количества теплоты, которое отдается звездами путем излучения. Гипотеза Гельмгольца-Кельвина о сокращении приводит к слишком низким значениям для возраста солнца и солнечной системы. Пересмотр вычислений Кельвина в свете новейших исследований не внес значительного изменения в цифры; по теории сокращения, возраст солнца равен 46 миллионам лет, или 19 миллионам лет, если считать с того времени как температура его фотосферы достигла 3000°. Но эти числа слишком высоки, так как при вычислениях не принималась во внимание энергия, задержанная в солнце в виде энергии ионизации, что значительно понижает количество энергии, отдаваемой в виде излучения.

Физические и геологические методы приводят к заключению, что возраст земли гораздо больше — даже если вести счет не с самого начала ее существования в виде планеты. Возраст древних пород обычно оценивается из отношения количеств урана и свинца в 1200 миллионов лет; проф. Джоли (Joly) дает более низкие значения, но ни одно из них не настолько мало, чтобы спасти гипотезу сокращения. Эволюция системы земля-луна также требует расширения Кельвинского масштаба времени. Астрономия дает нам метод, основанный на изучении переменных звезд созвездия Цефея; если δ Цефея не имеет другого источника энергии кроме сокращения, то можно вычислить скорость изменения ее плотности и, следовательно, изменение периода ее пульсаций. Это вычисленное значение периода оказалось много меньше наблюдаемого; эволюция по крайней мере в стадии, проходимой переменными звездами Цефея, протекает со скоростью не большей, чем одна сотая скорости, вычисленной из гипотезы сокращения. Это рас-

¹⁾ Последняя из трех лекций в King's College (Лондонский университет), прочитанная 1 марта 1926 года. Nature (Suppl.) № 2948, p. 26, 1926.

суждение относится не только к теории пульсации, но также и к соперничающим с нею теориям, принимающим, что период света тесно связан с внутренностью звезды, независимо от того, будет ли это период колебания или вращения.

Очевидно нам нужен масштаб времени, который бы давал для возраста солнца по меньшей мере 10^{10} лет; во всяком случае мы не можем спустить наши требования ниже 10^9 лет. Следовательно, нам нужно искать более обильного источника энергии, который бы мог поддерживать температуру солнца и звезд в течение этого продолжительного периода. Мы сразу можем сузить арену наших поисков: пригодны только те источники энергии, которые освобождают теплоту глубоко внутри звезды. Трудность проблемы заключается в том, что мы должны позаботиться о достаточном количестве энергии не только для излучения с поверхности, но и для поддержания внутренней теплоты звезды, препятствующей спаданию ее гравитирующей массы. Для поддержания солнца в его современном состоянии разрежения необходимо, чтобы внутри его держался температурный градиент от 6000° на поверхности до $40\,000\,000^\circ$ в центре; если этот градиент не удержится, солнце начнет сокращаться и ускоренно эволюционировать. Ясно, что нельзя поддерживать температурный градиент, доставляя теплоту „с нижнего конца“. Если бы в этом году солнце встретило рой метеоритов, который бомбардировал бы его с энергией, достаточной для излучения в течение года, это не прибавило бы к жизни солнца ни одного года и даже ни одного дня; внутреннее регулирование температуры продолжалось бы без всяких изменений. Единственным результатом явилось бы то, что солнце в течение этого года давало бы нам излучение вдвое больше обыкновенного.

Так как мы не можем себе представить внешнего источника теплоты, способного проявиться в центре звезды, приходится окончательно отказаться от идеи, что звезда черпает энергию на своем пути. Отсюда следует, что звезды заключают внутри себя скрытую энергию, которой должно ей хватить на всю ее жизнь. Но энергия не может быть совершенно скрыта; она должна себя выдать, так как она обладает массой или сама представляет собой массу. Энергия в $9 \cdot 10^{20}$ эрг обладает массой в 1 грамм, и это должно составить часть массы звезды, определяемой астрономическими методами. Энергия в $1,8 \cdot 10^{54}$ эрг имеет массу в $2 \cdot 10^{33}$ г, что равняется массе солнца; следовательно, это есть сумма энергии, заключенной в солнце. Мы не знаем, какая часть этой энергии может превратиться в излучение; но если бы это превращение могло произойти целиком, количество энергии было бы достаточно для поддержания излучения солнца в том размере, как оно совершается в настоящее время, в течение 15 триллионов — $15 \cdot 10^{12}$ лет. Другими словами—теплота, ежегодно излучаемая солнцем, обладает

массой в 120 триллионов тонн; если бы эта потеря массы продолжалась с той же скоростью, вся масса была бы истрачена через 15 триллионов лет.

СУБАТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ.

Этот запас энергии хранится, за немногими исключениями, в виде энергии строения атомов и электронов, т.-е. субатомной энергии. Если принять, что Кельвиновский масштаб времени недостаточен, что наше отрицание внешних источников энергии обосновано, что общепринятый взгляд на сохранение массы и энергии справедлив, — то источник энергии должен быть субатомного происхождения, так как все другие исключаются. Большую часть запаса составляет энергия, связанная с строением электронов и протонов; она не может быть освобождена, пока они не уничтожены. Мы должны предположить, что при столкновении протона с электроном их электрические заряды взаимно нейтрализуют друг друга, и ничего не остается кроме всплеска в эфире, который распространяется в виде электромагнитной волны, уносящей энергию. Возможность такого случая обсуждается уже давно; я встретил первое указание на нее в книге Лармора (Larmor, „Aether and Matter“, 1900), где живо описано, как может получиться протон и электрон, если эфир разрезать по трубке и закрутить ее на определенный угол; там же осторожно высказано предположение, что когда-нибудь эта трубка может раскрутиться обратно. Другая возможность заключается в том, что малая, но, быть может, достаточная доля запаса энергии может быть освобождена менее катастрофическим процессом, а именно — превращением элементов. При образовании атома гелия из протонов и электронов исчезает 0,8% массы и, следовательно, 0,8% энергии. Если такая эволюция элементов происходит на звездах, освобождающаяся при этом энергия может быть именно тем источником, которого мы ищем.

Заключением, что заметная часть энергии протонов и электронов может быть освобождена без их разрушения, мы обязаны исследованиям Астона (Aston) с масс-спектрографом в 1920 году. Он доказал, что отклонения химических атомных весов от целых чисел объясняются тем, что элементы представляют собою смеси изотопов; веса индивидуальных атомов очень близко подходят к целым числам, если принять атомный вес кислорода $O=16$. Только для водорода было подтверждено маленькое, но многозначительное отклонение: его атомный вес равен 1,008, а не точно единице. Это показывает, что отдельный протон в водороде обладает массой 1,008; если же его привести в ближайшее соседство с электронами, как в ядре гелия или высших элементов, его масса уменьшается до 1,000. Разница несомненно представляет обычное уменьшение электростатической энергии при сближении положительных и отрицательных зарядов; по обычным

законам электромагнетизма исчезающая энергия (и масса) уносится в виде излучения. Если гелий образуется в звездах, освобождается количество лучистой энергии, которое может быть достаточно для поддержания их температуры; хотя масса излучается, но общее число протонов и электронов может остаться прежним. В 1920 г. проф. Перрэн (J. Perrin) и я считали эту гипотезу вероятной, но позднейшие размышления вызвали сомнение в ее правдоподобности.

Дальнейшие ступени эволюции высших элементов освобождают пропорционально гораздо меньшее количество энергии — не больше одного процента общего количества, и то лишь в том случае, если первоначальным материалом является водород. В большинстве работ по радиоактивной теории происхождения энергии звезд не было необходимости приписывать звездам определенное химическое строение, за исключением того условия, что водород в них не содержится в особо большой пропорции. Водород дает результаты, сильно отличающиеся от всех остальных элементов; вследствие этого, как это ни странно, отрывочные сведения, которыми мы располагаем относительно химического состава внутренних частей звезд, касаются этого важного вопроса. Я не думаю, чтобы мы могли допустить содержание свыше 10% водорода даже в самых молодых звездах; отсюда следует, что эволюция элементов заходит очень далеко уже в до-звездной стадии туманности. В этом случае превращение элементов может освободить не больше одной тысячной доли всей субатомной энергии, и продолжительность жизни солнца, прошлой и будущей, вычисляется в $1,5 \cdot 10^{10}$ лет, т.-е. как раз в обрез. Если мы хотим получить большую продолжительность его жизни, мы должны прибегнуть к гипотезе уничтожения протонов и электронов. Какая же из этих двух возможностей — превращение или уничтожение материи — доставляет главный запас звездной энергии?

До последнего времени проблема об источнике звездной энергии имела значение только в связи с масштабом времени, и не было настоящей необходимости выбора между масштабами в 10^{10} и 10^{13} лет. В 1916 году, когда я начал изучение вопросов, изложенных в двух предыдущих лекциях, более тесный контакт с этой проблемой казался неизбежным, так как нужно было сделать какое-нибудь допущение об относительном распределении источника энергии в различных частях звезды. Это распределение можно было вычислить из теории Кельвина; но эта теория уже устарела, и разработка проблемы на такой базе не представляла интереса. Прогресс стал возможным лишь тогда, когда удалось понять, что распределение источника энергии оказывает на результаты незначительное влияние, которое можно учесть лишь во втором приближении; к нему мы еще не были готовы. В начале 1924 г. проблема была остро поставлена: в противоположность принятой тогда теории эволюции было выдвинуто заклю-

чение, что карликовые звезды находятся до сих пор в состоянии идеального газа. Стало ясно, что всякая новая теория эволюции звезд должна быть тесно связана с законами субатомной энергии.

ПРОБЛЕМА ЭВОЛЮЦИИ.

Известно, что имеется известное статистическое распределение звезд — кривая в диаграмме величина (яркость) — спектральный тип звезды — вокруг которой стремятся сгруппироваться все звезды. Заслугой теории гигантских и карликовых звезд было то, что она указала на эту кривую как на путь эволюции средней звезды. Всякое произвольное изменение скорости освобождения субатомной энергии вызвало бы перемещение звезды в другую точку на кривой, и законы субатомной энергии определяли поэтому только скорость перемещения, т.-е. масштаб времени, но не определяли пути. Новое заключение делает это объяснение статистического распределения неприемлемым. Произвольное изменение в освобождении субатомной энергии заставит карликовые звезды сойти с пути эволюции; поэтому такие произвольные изменения должны быть исключены, т.-е. если мы хотим понять статистическое распределение звезд, мы должны считаться с законами, управляющими освобождением субатомной энергии.

В частности, тесная зависимость, которую мы нашли между яркостью и массой звезд, исключает возможность эволюции слабых звезд из ярких, если только мы не допустим значительного изменения массы в течение жизни звезды. Не только в теории гигантских и карликовых звезд, но также и в предшествовавшей ей теории, эволюция от ярких звезд типов *B* и *A* к малым звездам типа *M* вдоль карликовой серии являлась основным допущением. Чтобы избежать полного крушения этих идей, мы должны допустить существенное уменьшение массы и, следовательно, уничтожение материи. С этой точки зрения, имеющей практическое значение для астрономов, гипотеза уничтожения материи является наиболее консервативной; это не значит, что она непременно истинна, но этим оправдывается ее вполне серьезное обсуждение.

Возможно, что звезда может изменять свою массу не только вследствие излучения, но и другими путями; во всяком случае эти изменения, по всей вероятности, гораздо меньше. С достаточной долей уверенности мы можем поставить верхний предел нарастанию массы звезды от привлечения диффузной материи из пространства; оно гораздо меньше потери путем излучения. Потеря звездами материи также должна быть гораздо меньше. По моим вычислениям хромосфера солнца должна была бы двигаться наружу с постоянной скоростью 100 км в сек для того, чтобы унести такую массу, какая уносится с солнца излучением. Само собой разумеется, что такой материальный

поток можно было бы обнаружить по эффекту Доплера. Поэтому я думаю, что скорость потери массы звездой можно считать равной ее радиации; следовательно, это величина известная (независимо от наших взглядов на субатомную энергию), и весь вопрос заключается в том, достаточна ли продолжительность жизни звезды для того, чтобы эта потеря являлась определяющим фактором в эволюции звезд. Если считать продолжительностью жизни звезды тот период, в течение которого потеря превышает 1%, протоны и электроны должны исчезать.

Я думаю, что большинство физиков рассматривает вопрос о субатомной энергии как поле для голой спекуляции. Но астрономам дело представляется иначе. Если мы примем, что звезда эволюционирует гораздо медленнее, чем это принимает гипотеза сокращения, так что количество испускаемой звездой энергии практически равно освобождающейся в ней энергии, измерение выхода субатомной энергии сводится к одному из обычных астрономических измерений — измерению температуры и яркости звезды. Конечно, астроном не удовлетворяется одними такими измерениями в течение неограниченного времени; он пытается привести их определенным образом в связь, найти их зависимость от внутренней температуры и плотности или от возраста звезды. Если бы физик имел в своей лаборатории неизвестные источники энергии, количество которой он мог бы измерить и физические условия выделения которой он мог бы определить, он наверное не проявил бы такой нерешительности в рассуждении о причинах и законах этих явлений. Астрономическое изучение субатомной энергии является не менее непосредственным, чем в этом случае; хотя наши попытки сопоставить результаты наблюдений в определенном порядке до сих пор безуспешны, проблема сама по себе не более спекулятивна, чем всякая индукция из опытных данных.

Истощаемость источника энергии.

Рассмотрим теперь некоторые трудности, представляющиеся при сопоставлении результатов наблюдения.

Солнце освобождает 2 эрга на грамм в секунду, тогда как звезда Капелла освобождает 58 эрг на $\frac{1}{2}$ сек.

Плотность солнца в 620 раз больше, а внутренняя температура в 3,7 раза выше, чем у Капеллы.

Если плотность и температура вообще оказывают какое-нибудь действие на освобождение субатомной энергии, они должны, конечно, его ускорять. В особенности повышение плотности сближает между собой участников всякого процесса. Однако солнце, несмотря на большую плотность и температуру, выделяет меньше энергии, чем Капелла. Я думаю, единственное объяснение этого заключается в том

что солнце начинает изнашиваться; его высокая плотность и температура должна поддерживать недостаточный приток энергии. Солнце, очевидно,— стареющая звезда. Таким образом мы должны считаться с важным фактором—истощением притока энергии.

Рассмотрим теперь оба компонента Капеллы: звезда разделена на две части; согласно с законом зависимости массы от яркости, более тяжелый компонент выделил излучением больше эрг на грамм, чем более легкий компонент. Следовательно, он истратил большую часть своего запаса. Однако звезда с большей массой, более истощенная, при меньшей плотности и низшей температуре, все еще освобождает больше эрг на грамм, чем вторая звезда с меньшей массой.

Можно предположить, если разделение звезд произошло в течение последних 100 000 лет, что компоненты до сих пор еще не достигли устойчивого состояния; в таком случае было бы несправедливо приравнивать освобождение субатомной энергии к наблюдаемому излучению. Но случай Капеллы является типичным для спектроскопических двойных звезд ¹⁾ вообще, а они так многочисленны, что не могут быть все такого недавнего происхождения. Однако у большинства затмевающихся переменных звезд слабый компонент является более холодным, и этим можно объяснить их более слабое выделение энергии. У этих звезд компоненты находятся на очень малом расстоянии один от другого, иногда почти соприкасаются, и они, вероятно, образовались недавно. Как раз те звезды, которым можно было бы простить их исключительное поведение (в виду их недавнего образования), не нуждаются в прощении.

Джинс (Jeans) предположил, что при разделении звезды более тяжелый компонент присваивает центральную часть первоначальной звезды, где сконцентрированы тяжелые элементы, содержащие более активные источники энергии. На это можно выставить два возражения. Во-первых, поскольку это можно вычислить, диффузия неспособна произвести сколько-нибудь значительное разделение легких элементов от тяжелых в течение жизни гигантской звезды. Во-вторых, вращение звезды вызывает вращательные потоки, которые в достаточной степени размешивают материал звезды. Последнее заключение основывается на теореме Цейпеля (von Zeipel), которую Джинс раскритиковал; но я убежден, что Цейпель прав. Поэтому вероятно, что при разделении звезды первоначальное строение обоих компонентов одинаково.

Что касается второго возражения, некоторые сомнения могут возникнуть относительно достаточности размешивания: возможно, что вращательные потоки распределятся слоями. В вязкой жидкости

¹⁾ Только у карликовых двойных звезд нет заметной разницы внутренних температур у двух компонентов.

вихревое движение имеет тенденцию разбиться на слои, так что звезда может разделиться на два или три сферических слоя с хорошим размешиванием в пределах каждого слоя и с плохим размешиванием материала, находящегося в различных слоях. Но все же я не думаю, чтобы общее размешивание прекратилось совершенно. Диффузия, с которой оно должно бороться, происходит чрезвычайно медленно; должно пройти не меньше 10^{13} лет, пока самые тяжелые элементы отделятся от самых легких. Возраст Капеллы при ее разделении не мог быть много больше 10^{11} лет. Кроме того, хотя тяжелые элементы имеют тенденцию опускаться к центру в малых звездах, в звездах большой массы, как Капелла, очевидно, существует обратная тенденция. Согласно физической теории, самые тяжелые атомы имеют наибольшие коэффициенты поглощения и испытывают наибольшее давление радиации. Взаимодействие гравитационного и электрического поля с давлением радиации приводит к интересным результатам: в Капелле тяжелые элементы вместе с водородом и гелием должны течь к поверхности, а остальные легкие элементы — к центру.

Главный ряд.

Обратимся теперь к звездам главного ряда, простирающегося от типов *O* и *B* вниз вдоль прежней карликовой серии до типа *M*. Громадное большинство звезд принадлежит к этому ряду, так что, по всей вероятности, он соответствует большей части жизни звезды. Стадия гигантской звезды, очевидно, временная остановка, в течение которой расходуются очень активный, но вскоре истощающийся приток энергии; затем звезда переходит в главный ряд, где она остается, пока не истощается главный запас ее энергии. В этой стадии и происходит (если оно вообще возможно) освобождение энергии вследствие разрушения протонов и электронов, так как звезда не может передвигаться по главному ряду, если она не испытывает существенной потери массы. Можно было бы ожидать, что звезды будут оставаться в этой стадии до конца своей жизни, так как не видно причины, почему протоны и электроны должны утомиться от взаимного разрушения; однако, очевидно, в звездах имеется или образуется со временем более прочный материал, так что, по крайней мере, в некоторых звездах, остается несгоревший остаток, который затем подвергается более жестокому испытанию в стадии „белых карликовых“ звезд.

В главном ряду мы встречаемся с такой простотой законов субатомной энергии, которая, быть может, представляет еще больше затруднений, чем рассмотренные выше осложнения. Как указал Рёссель (H. N. Russell), в этой стадии все звезды имеют практически одинаковую внутреннюю температуру. Я считаю ее равной 40 миллионам градусов; Рёссель принимает несколько меньшее значение.

Хорошее постоянство внутренней температуры прекрасно иллюстрируется диаграммой, опубликованной Рёсселем (*Nature*, August 8, 1925, vol. 116, p. 209) для значительного числа индивидуальных звезд. К его замечаниям по этому поводу можно добавить следующее. Трудно учесть ошибки наблюдения для каждой звезды и установить, какое значение следует придать отдельным расхождениям. Поэтому мы предлагаем обратную проблему:—принимая постоянную внутреннюю температуру для звезд главного ряда в $40\,000\,000^\circ$, мы находим отношение между яркостью и спектральным типом, сравниваем его с отношением, даваемым общей статистикой звезд.

Масса	Болометр. величина	Видимая величина	Эффективн. темпер.	Тип
0,182	11,91	14,5	2 550	< Md
0,258	10,25	11,6	3 210	K9
0,512	7,26	7,6	4 540	Ko
0,746	5,93	6,1	5 160	G4
1,00	4,47	4,5	6 290	F8
1,58	2,43	2,5	8 250	A8
2,56	0,52	0,9	10 520	Ao
4,53	-1,38	-0,6	13 260	B7
11,46	-3,86	-4	17 460	B2
37,67	-6,44	-4,3	22 500	Oe
90,63	-8,12	-6	26 200	O

Из массы звезды, помещенной в первом столбце, и принятой температуры для внутренней части звезды можно вывести по теории радиации болометрическую величину и эффективную температуру¹⁾. В последнем столбце спектральные типы указаны в соответствии с эффективными температурами, что является, как мне кажется, наиболее общепринятым критерием. Сравнивая в этой таблице третий и пятый столбцы, мы получаем зависимость между величиной и спектральным типом, которая выражается кривой, совпадающей с большой точностью с центральной линией главного ряда, построенной на основании статистических данных. Не приписывая слишком большого значения точности совпадения, мы все же должны вывести заключение об удивительном постоянстве температуры в этой фазе эволюции.

¹⁾ В первых трех строках таблицы в вычисленную болометрическую величину внесены небольшие поправки с целью приближения их к эмпирической кривой, выражающей зависимость массы от яркости. (Эта поправка выведена из данных, не зависящих от проводимого здесь сравнения спектрального типа с яркостью звезды.)

Требует ли звезда притока энергии в 680 эрг/г в сек как у *Pupis*, в 2 эрг/г в сек как солнце или в $0,08 \text{ эрг/г}$ в сек как *Krueger 60*; для того чтобы звезда получила эту энергию, внутренняя температура ее должна равняться $40\,000\,000^\circ$. Очевидно при этой критической температуре приток энергии совершается по мере необходимости, *ad libitum*. Можем ли мы предположить, что при $40\,000\,000^\circ$ энергия свободно выделяется из материи, подобно тому, как при 100° пар выделяется из воды? Я думаю, что физики очень затруднились бы примирить такое необыкновенное поведение с каким бы то ни было общепризнанным принципом, однако астрономические наблюдения заставляют настаивать на этом представлении.

СВЕРХ-УСТОЙЧИВОСТЬ.

Здесь мы встречаемся с новым затруднением, зависящим от „сверх-устойчивости“. Представим себе вертикальный цилиндр с поршнем, содержащий нагретый газ. Чтобы увеличить сходство этой модели с звездой, мы должны предположить, что теплота непрерывно поступает в камеру цилиндра, и равное количество ее уходит наружу через стенки. Поршень будет оставаться в устойчивом равновесии на подушке нагретого газа, и, если его слегка сместить, он вернется к своему положению равновесия после нескольких колебаний. Предположим теперь, что поршень приводит в движение клапан, допускающий в камеру добавочное количество теплоты при движении поршня вниз и прекращающий приток тепла при движении поршня вверх. Если не обращать внимания на уходящее наружу тепло, мы увидим, что камера выигрывает теплоту при сжатии и теряет ее при разрежении точно так же, как цилиндр любого теплового двигателя. Следовательно, легкое перемещение поршня пустит машину в ход, и поршень начнет двигаться вверх и вниз с возрастающей амплитудой. Я называю состояние, в котором находится такая „паровая машина“— „сверх-устойчивым“. Это—не неустойчивость (стремление удалиться от состояния равновесия), а стремление вернуться к равновесию, проявляемое с такой стремительностью, что возникающие колебания усиливаются вместо того, чтобы затухать. Теперь мы увидим, что если критическая температура достигнута, колебания звезды приводят в движение клапан точно таким же образом: если звезда сжимается, она становится более горячей; большая часть ее нагревается выше критической температуры, и освобождается больше субатомной энергии. Если она расширяется, центральная часть ее охлаждается ниже критической температуры, и приток тепла прекращается. Следовательно, звезда начинает себя вести, как паровая машина. Если мощность машины невелика, она не может преодолеть рассеивающих сил, и звезда остается устойчивой; но, по крайней мере, неяркие звезды,

занимающие нормально небольшую область вблизи центра выше критической температуры, перейдут в сверх-устойчивое состояние. Нам известны звезды — переменные звезды Цефея, — которые по этой причине или по какой-либо другой являются сверх-устойчивыми и вследствие этого пульсируют, но они необычны, и все они либо гигантские звезды, либо расположены в начале главного ряда; это как раз не те звезды, которые должны были бы подходить под эту теорию.

Я уже говорил, что трудность, представляемая сверх-устойчивостью, является возражением против слишком поспешного принятия критической температуры в $40\,000\,000^\circ$, но и вообще сверх-устойчивость является трудностью. Проллив между Сциллой неустойчивости и Харибдой сверх-устойчивости становится так узок, что трудно указать какой-нибудь закон субатомной энергии, который безопасно провел бы звезду между ними. В виде попытки я готов разрубить узел затруднений, введя еще одно усложнение. Я предполагаю, что изменение температуры или плотности не вызывает немедленного изменения скорости освобождения энергии; получается запаздывание в несколько месяцев или, может быть, сотен лет, так что изменения короткого периода вообще не сказываются. Это могло бы иметь место, если бы температура и плотность влияли на скорость образования саморазрушающегося вещества, которое затем самопроизвольно начинало бы выделять свою энергию со скоростью, не зависящей от температуры и плотности ¹⁾.

Как мы видели, нам встретилось уже немало затруднений. Я имею смелость предполагать, что мы из них как-нибудь выпутаемся, но подобное утверждение не особенно убедительно. Я думаю, что хорошая теория должна была бы когда-нибудь предсказать правильные результаты с первого же раза, а не неизменно ошибаться, а затем приносить свои извинения, вводя новые усложнения. Дело выглядит так, как будто мы не имеем еще в руках правильного ключа для общего синтеза проблемы субатомной энергии, и я не собираюсь защищать одну какую-нибудь теорию предпочтительно перед другими. Мы здесь будем, однако, продолжать собирание немногих фактов, которые можно извлечь из астрономических наблюдений.

¹⁾ Если бы уничтожение материи объяснялось тем, что свободные электроны натапливаются на протоны ядра и разрушают их прямым ударом, скорость этого процесса была бы пропорциональна $\rho T^{-\frac{1}{2}}$ (и зависела бы от химического состава, если протоны в некоторых ядрах лучше защищены, чем в других). Так как этот закон не подтверждается наблюдением, мы заключаем, что разрушение выполняется не свободными, а связанными или ядерными электронами. Отсюда возникает идея об образовании элементов со склонностью к самоуничтожению.

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ.

Рассматривая устойчивость звезды, мы можем показать, что скорость освобождения энергии увеличивается с ростом температуры или плотности или той и другой одновременно. Пусть скорость освобождения субатомной энергии будет E , а скорость излучения из звезды — L . В стационарном состоянии $E=L$. Теперь предположим, что E падает ниже L ; звезда сокращается (как и по гипотезе Кельвина, который принимал $E=0$). Обыкновенно принимается, что L растет с уменьшением радиуса, а это еще увеличивает дефицит. Следует дальнейшее сокращение, с дальнейшим ростом L , и звезда постепенно спадается. Чтобы спасти звезду, мы должны предположить, что повышение температуры и плотности при сокращении вызывает увеличение E ; E становится больше, чем L , и снова возвращает звезду к состоянию равновесия. Угрожающая неустойчивость не катастрофична, так как спадание звезды занимало бы время, сравнимое с Кельвиновским масштабом времени; но мы, конечно, должны принять меры против такого спадания, так как мы не приняли Кельвиновского масштаба времени.

В теориях Джинса предполагается, что освобождение субатомной энергии не зависит от температуры и плотности (по аналогии с обычной радиоактивностью). Этот взгляд высказывался и Нернстом. Я принужден был его отбросить с самого начала моих исследований над равновесием излучения, так как он не позволяет привести в равновесие E и L для различных звезд. Для того чтобы изменить L в 3 или 4 раза требуются колоссальные изменения плотности, и, как было указано в последнем параграфе, регулировка L совершается, по всей вероятности, в обратном направлении. Существенным является, чтобы регулировка производилась изменением E . Правда, теоретическая физика не соглашается с тем, что звездные температуры могут заметно изменять субатомные процессы; но трудности, выдвигаемые теоретической физикой, очевидно, нужно преодолеть. Так, например, возражали, что температура звезд недостаточно высока для превращения водорода в гелий, и этим вычеркивали возможный источник энергии. Но гелий существует, и если критики полагают, что звезды недостаточно горячи для того, чтобы гелий мог там образоваться, пусть они укажут более горячее место.

Предположение о том, что E не зависит от температуры и плотности, дает жесткое правило, в которое, повидимому, не удастся уложить астрономические данные. Оно требует, чтобы энергия (на грамм), освобождаемая и излучаемая любой звездой, зависела только от возраста звезды. Неясно, от какой нулевой точки нужно начать отсчитывать возраст. Во всяком случае, изучение звездных групп одинакового возраста, каковы Pleiadae, Hyadae, Praesepе и др. не подтверждает этой гипотезы.

Доказательства уменьшения массы.

Рассмотрим теперь подробнее теорию, утверждающую, что масса звезды испытывает значительные изменения в течение ее эволюции. Как мы уже указывали, эта теория основывается на гипотезе, допускающей уничтожение электронов и протонов, так как трансмутация элементов сама по себе неспособна доставить количество энергии, достаточное для принятой продолжительности жизни звезды. Эволюция вниз по главному ряду становится невозможной, если не допустить возможность изменения массы; звезда должна была бы эволюционировать очень быстро, пока она не дошла бы до главного ряда, далее оставаться неизменной в течение большей части своей жизни и затем перейти в стадию белого карлика. Это значит, что эволюция перестала бы играть значительную роль в астрофизике. Тот факт, что звезды, покидающие главный ряд (белые карлики), имеют обыкновенно меньшую массу, чем звезды, приближающиеся к главному ряду (гиганты), является аргументом в пользу значительного изменения массы в этой стадии.

Статистика гигантских звезд также поддерживает этот взгляд. Если предположить, что самое диффузное состояние звезды является наиболее ранним, можно найти среднюю массу звезды сейчас же или вскоре после ее рождения из статистики гигантских звезд типов *K* и *M*. Определяя массу из яркости, мы находим, что 90% этих молодых звезд обладают массами, превышающими массу солнца в 2,4 до 5,5 раз; средняя же масса звезд вообще меньше массы солнца. Это заставляет предположить, что большая часть звезд потеряла значительную часть их первоначальной массы. Этот результат хорошо согласуется с заключением, выведенным в первой лекции, о том, что массы звезд соответствуют критическому состоянию, где давление радиации начинает брать верх. Если принять среднюю массу для всех звезд равной от $\frac{1}{3}$ до целой массы солнца, получаем, что давление радиации колеблется от 0,007 до 0,05 всего давления. Это значение, очевидно, слишком мало. Но мы должны были бы взять первоначальные массы до наступления всяких потерь; если это сделать, то массы, превосходящие в 2,4—5,5 раз массу солнца, приводят к относительному давлению радиации 0,17—0,35, что является вполне подходящим по порядку величины.

Отсюда я заключаю, что обыкновенно звезды рождаются с массой, превышающей массу солнца не меньше, чем в 2 раза. На это можно было бы возразить, что мы не наблюдаем диффузных звезд меньшей массы, потому что они очень быстро конденсируются. Но почему? Они не истощают своего запаса энергии так быстро и могли бы эволюционировать более медленно.

ЗВЕЗДЫ ОДНОГО ВОЗРАСТА В ЗВЕЗДНЫХ КУЧАХ.

Однако у противников нашего взгляда есть, пожалуй, не менее сильный аргумент, который мы сейчас попробуем объяснить. Прежде всего приведем таблицу, показывающую время, нужное для того, чтобы звезда могла изменить свою массу или яркость на определенную величину. Это можно сделать, потому что $dM/dt = -L/c^2$, где масса излучаемых L эргов равняется L/c^2 грамм. Так как L может быть представлено функцией M , на основании закона, связывающего массу с яркостью звезды, уравнение может быть интегрировано¹⁾, и M можно представить в виде функций от t .

Масса (масса солнца = 1)	Абсолютная болометрич. величина	Продолжительность стадии
∞ до 35	< -5	$0,038 \times 10^{12}$ лет
35 „ 10	-5 до $2\frac{1}{2}$	0,065
10 „ 3,7	$-2\frac{1}{2}$ „ 0	0,214
3,7 „ 1,73	0 „ $2\frac{1}{2}$	0,93
1,73 „ 0,92	$2\frac{1}{2}$ „ 5	5,21
0,92 „ 0,53	5 „ $7\frac{1}{2}$	36,3
0,53 „ 0,31	$7\frac{1}{2}$ „ 10	281
0,31 „ 0,78	10 „ $12\frac{1}{2}$	2190

Эта таблица применима прежде всего к главному ряду, где внутренняя температура остается постоянной, но ею можно пользоваться также с достаточным приближением и для гигантских звезд. Мы видим, что, как бы ни была велика первоначальная масса, через триллион лет не может остаться масса большая, чем 2 (масса солнца = 1). Следовательно, если звездная куча содержит звезды с массой большей, чем 2, т.-е. с яркостью большей, чем $\frac{1}{2}$, возраст звездной кучи не может превосходить триллион лет. Посмотревши на нижнюю часть таблицы, мы видим, однако, что триллиона лет совершенно недостаточно для эволюции более ярких звезд. Поэтому, если звездная куча содержит, кроме других, звезды 5^m до 7^m величины, последние должны были родиться с такою же массой и яркостью, какими они обладают в настоящее время. Многие звездные кучи включают одновременно яркие и слабые звезды, и наше рассуждение показывает, что в этом случае слабые звезды не могли проделать заметную эволюцию. Если мы должны отрицать эволюцию карликовых звезд в кучах, можем ли мы допустить эволюцию карликовых звезд вообще? Во всяком случае

¹⁾ Monthly Notices, Roy. Astr. Soc. 84, стр. 328.

получается такое впечатление, как будто мы должны отказаться от мысли, что звезды не могут рождаться с массами меньшими, чем 2.

Тем не менее, хотя наблюдения над звездными кучами как будто и противоречат нашему заключению, нас несколько обнадеживает то, что они это делают как бы нехотя. (Природа так редко обращает внимание на наши предсказания относительно субатомной энергии, что даже неохотное отрицание с ее стороны дает нам основание гордиться.) Я узнал от Герцшпрунга (Hertzsprung), что движущиеся звездные кучи как, например, Hyades, Pleiades и Praesere содержат гораздо меньше слабых карликов, чем им полагается. В них нет почти ни одной звезды меньшей яркости, чем $+7^m$. В сферических кучах отношение числа карликов к гигантам как будто тоже гораздо меньше, чем обычно в системе Млечного Пути. Поэтому, может быть, в нашем рассуждении о трудности сосуществования ярких и слабых звезд в системах одного возраста, кроется зерно истины, хотя мы, конечно, еще не нашли для него правильной формулировки.

В системе Млечного Пути, где, как предполагают, мы имеем дело со звездами самого различного возраста, число звезд, находящихся в каждой стадии, должно быть пропорционально продолжительности этой стадии. Следовательно, числа в последнем столбце нашей таблицы должны были бы быть пропорциональны числу звезд соответствующей величины. Однако это предсказание оправдывается только при массах, меньших 2. Числа, соответствующие верхней части таблицы, должны быть значительно уменьшены, так как большая часть звезд имеет первоначальную массу между 2 и 5. Распределение яркостей, предсказанное этим путем, хорошо подтверждается статистикой наблюдений.

Другое испытание, дающее некоторую поддержку теории эволюции с потерей массы, было произведено Фогтом (Vogt). Из таблицы легко видеть, что если первоначальные массы двух звезд очень отличны, с течением времени их массы приближаются к равенству. Поэтому у двойных звезд мы должны ожидать большого расхождения масс обоих компонентов только в ранних стадиях эволюции, у более поздних спектральных типов отношение масс должно приближаться к единице. Это как будто подтверждается.

Пожалуй можно было бы надеяться, что допущение потери массы, воздействующей на динамику системы двойной звезды, поможет разрешить некоторые до сих пор неразрешенные проблемы, относящиеся к их разделению и эксцентricитету. Такие исследования были произведены Джинсом и Смартом (Smart); результаты получились неблагоприятные, и новая теория совершенно не пролила света на эти упорные проблемы. Из всех остальных дискуссий по этому вопросу я также не мог извлечь ничего особенно благоприятного или неблагоприятного для этой теории.

ЭФФЕКТ КОМПТОНА.

В качестве иллюстрации тесной связи между успехами чистой физики и астрономии, отметим, что открытие эффекта Комптона разрешило одну действительную трудность, относящуюся к субатомным источникам звездной энергии. По теории квантов излучение, получающееся при образовании гелия из водорода, должно иметь длину волны 0,00041 единиц Онгстрёма, а уничтожение протона и электрона должно вызывать излучение в 0,000013 Å. Каков механизм превращения этого излучения высокой частоты в обычные формы тепловой энергии звезды? Обычные коэффициенты поглощения отпадают, так как они пропорциональны кубу длины волны. Последний из приведенных квантов, вероятно, прошел бы звезду насквозь — и ушел бы в конец мира, не найдя ничего, что могло бы его поглотить и обратить в теплоту. Он мог бы рассеиваться много раз, так как коэффициент рассеяния электронами, хотя и уменьшается с уменьшением длины волны, все же не спадает так быстро. Однако пока считалось, что длина волны не изменяется при рассеянии, это не помогало разрешить затруднение. Теперь теория эффекта Комптона говорит нам, что длина волны возрастает на $0,024 (1 - \cos \theta)$ Å при каждом акте рассеяния. Таким образом, как бы ни была мала первоначальная длина волны, первое рассеяние сводит излучение к обыкновенному γ -излучению. Большая часть энергии переходит к электрону, который отскакивает с огромным запасом энергии; без всякого затруднения можно себе представить, как энергия излучения деградирует в обычную молекулярную теплоту.

ПРОНИЦАЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.

Вопрос о происхождении проникающего излучения, находимого в земной атмосфере, представляет значительный интерес в связи с субатомной энергией. Несколько лет тому назад этой проблеме был дан астрономический оттенок опытами Кольгёрстера (Kohlhörster), который старался показать, что излучение движется сверху, и поэтому, очевидно, приходит в нашу атмосферу извне. Он нашел также, что интенсивность излучения зависит от высоты Млечного Пути, так что излучение достигало максимума, когда большая часть звезд была прямо над нами. Высота солнца не изменяла излучения, что показывало, что солнце не является его источником. Проникающая способность была, очевидно, много больше всех известных γ -лучей, и казалось ясным, что это излучение могло происходить от какого-нибудь мощного субатомного источника, вроде превращения водорода или уничтожения материи. Совсем недавно Милликэн (Millikan) сообщил результаты обширного и тщательного исследования этого излучения. Он твердо уверен, что оно исходит от вне-земных источников; он находит, что

проникающая способность его соответствует кванту энергии, освобождающейся при образовании гелия из водорода.

Будучи незнаком с техническими подробностями и с трудностями экспериментов, я не могу стать на сторону Кольгёрстера и Милликана или их противников. Раньше мне казалось, что проникающая способность настолько велика, что это позволяет решить вопрос об источнике излучения. Она указывала на такую концентрацию энергии, которая может получиться только при мощных субатомных процессах; казалось, во всяком случае, менее сенсационным допустить их в глубинах пространства, чем на нашей планете. Но я был несколько поколеблен вычислениями Вильсона (C. T. R. Wilson), относящимися к электронам, вырывающимся во время грозы. Он показал, что эти электроны могут приобретать энергию, достаточную для получения такого излучения без всяких субатомных процессов. Этим путем, однако, трудно объяснить нисходящее направление проникающего излучения.

Если физики в конце концов согласятся с вне-земным происхождением этого излучения, какое значение это может иметь для рассматриваемых нами проблем? Главное заключение, которое отсюда можно вывести — это то, что субатомные процессы могут происходить при сравнительно низких температурах, не достигающих $100\,000^\circ$. Вся действительно горячая материя во вселенной заперта за стенами достаточно толстыми, чтобы остановить и рассеять наиболее проникающее излучение; источник излучения достигнуть до нас не может. Выбор должен быть сделан между фотосферой звезд и материей туманностей в пространстве. Последний источник более вероятен. Если только звезды не являются более мощными источниками энергии, чем солнце, проникающее излучение от звезд должно относиться к проникающему излучению от солнца приблизительно так же, как свет звезд относится к солнечному свету; опыты показывают, что от солнца не исходит сколько-нибудь значительная часть проникающего излучения, тем более ничтожным должно быть излучение от звезд. Диффузные и темные туманности и материя, рассеянная в межзвездном пространстве, должно быть, обладают массой, приблизительно равной общей массе звезд; кроме того, здесь нет экранирования, так что все исходящее от них излучение способно достигнуть до нас.

Если это верно, мы должны вывести еще одно важное заключение: субатомные процессы могут происходить при чрезвычайно малой плотности. С точки зрения астронома я должен приветствовать эти заключения. Нам было бы очень трудно объяснить присутствие гелия и других элементов в туманностях и более тяжелых элементов в спектрах молодых звезд, если высшие элементы не образуются уже в дозвездной стадии при низкой температуре и плотности. Однако физик при этих словах, пожалуй, покачает головой. Как могут протоны и электроны встречаться и уничтожать друг друга в среде настолько

разреженной, что пробег свободного пути занимает несколько лет? Как соединяются 4 протона и 2 электрона и образуют ядро гелия? Может быть лучше, что последний случай настолько мало вероятен при всех условиях температуры и плотности, что нам остается предположить его возможность в туманностях. Мы напомним также, что эти заключения подтверждаются наблюдениями (так трудно приводимыми в связь с теорией), что вообще диффузные звезды низкой температуры особенно обильно выделяют субатомную энергию.

Я хотел бы закончить этот курс лекций, приведя их к какому-нибудь эффектному заключению. Но, быть может, больше соответствует условиям научного прогресса более скромный конец, бросающий слабый луч в темноту, которая отмечает границы современного знания. Я не извиняюсь за слабость моего заключения, так как это не заключение. Я хотел бы чувствовать в себе уверенность, что это хотя бы начало.
