

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД ¹⁾.

А. Эддингтон.

Декабря 13-го 1920 года впервые был измерен угловой диаметр звезды при помощи аппарата, изобретенного проф. А. А. Майкельсоном (Michelson).

До сих пор все звезды казались только светлыми точками, и не было способа отличить звезду от геометрической точки. Но в этот знаменательный вечер 20-футовый интерферометр, построенный на обсерватории горы Вильсон, был направлен на звезду Бетельгейзе, и измерение обнаружило, что эта звезда имеет диск диаметром в $\frac{1}{20}$ -ую дуговой секунды,—это соответствует кажущимся размерам двухкопеечной монеты, помещенной на расстоянии 80 км. Нам известно приблизительное расстояние Бетельгейзе (к сожалению, оно не может быть определено с той же точностью, как расстояние многих других звезд), так что по этой кажущейся величине мы можем приблизительно вычислить действительные размеры звезды. Диаметр Бетельгейзе не меньше 300 миллионов километров. Орбита Земли целиком поместилась бы внутри нее.

Итак, среди звезд встречаются не только индивидуумы сравнительно малого размера, подобного солнечному,—некоторые звезды поистине гиганты в сравнении с Солнцем. Мы можем прибавить еще одну ступень к астрономической таблице умножения—миллион земель составляет одно Солнце, десять миллионов Солнц составляют одну Бетельгейзе. Это сравнение относится к объемам, а не к количеству материи. Мы оставляем пока открытым вопрос, надобно ли для того, чтобы получить такого великана, взять материал десяти миллионов Солнц и соединить его воедино, или же нужно взять материал Солнца и разделить его в десять миллионов раз. Несомненно, последний ответ ближе к истине. Я допускаю, что Бетельгейзе содержит больше вещества, чем Солнце (быть может, в 50 раз больше), но громадные размеры ее обуславливаются, главным образом, разреженным состоянием

¹⁾ Лекция, прочитанная в Английском Королевском Институте 23-го февраля 1923 г. Приложение к „Nature“ от 12-го мая 1923 г.

этого вещества. Она напоминает громадный аэростат малой плотности, значительно меньшей плотности воздуха, тогда как материал Солнца сжат до плотности большей, чем вода.

Принадлежит ли звезда к числу этих подобных аэростату тел, или плотность ее подобна солнечной — это зависит от стадии ее развития. Естественнo думать, что звезды постепенно конденсируются из разреженного вещества, так что они становятся все плотнее и плотнее по мере того, как развивается история их жизни. В настоящее время мы можем наблюдать на небе образчики звезд любой стадии развития. Большинство звезд, видимых невооруженным глазом, находятся в раннем, разреженном состоянии; это объясняется не тем, что молодые звезды более многочисленны, а тем, что большие размеры делают их более яркими и более заметными. То, что я хочу рассказать о внутренности звезд, преимущественно касается молодых, разреженных звезд — так называемых звезд-гигантов. Причины этого заключаются в том, что свойства вещества в состоянии идеального газа известны нам гораздо лучше, чем его свойства в конденсированном состоянии. Хотя трудности, встречающиеся при рассмотрении плотных звезд, подобных Солнцу, не являются непреодолимыми, естественно, что наибольших результатов мы достигли в более легкой проблеме гигантских звезд.

В Н У Т Р Е Н Н И Е Т Е М П Е Р А Т У Р Ы.

Мы наблюдаем физические условия только на поверхности звезд, и на первый взгляд может показаться невозможным узнать что-либо об условиях внутри них. Рассмотрим, например, вопрос о температуре. Природа получаемого нами от Бетельгейзе света указывает на температуру в 3.000°C , — температура не чрезмерно высокая даже по сравнению с нашим земным опытом. Но это относится, конечно, к прилежащему к поверхности слою, из которого исходит наблюдаемый нами свет, это температура поверхности печи, не дающая возможности оценить чудовищную температуру внутри нее.

Я не буду пытаться подробно объяснить, каким образом удастся нам вычислить внутреннюю температуру, но я смогу, быть может, показать, что существует путь, по которому можно идти при помощи соответствующих математических методов.

Упругость является хорошо известным свойством газов. — всякий знаком с нею благодаря практическому применению ее в пневматическом тормозе. Упругость, или давление газа обуславливается его теплом, другими словами — энергией движения его молекул, движущихся во всех направлениях и непрерывно стремящихся рассеяться.

Чем больше тепла, тем больше давление. Но в каждой точке внутри звезды достигается известное состояние равновесия; с одной стороны, мы имеем вес всех верхних слоев, которые давят вниз и

стремятся сжать газ внутри звезды; с другой стороны, мы имеем упругость этого внутреннего газа, стремящегося расшириться и отодвинуть верхние слои. Ввиду того, что не происходит ни того, ни другого, и звезда сотнями лет остается практически неизменной, мы должны заключить, что обе эти тенденции как раз уравнивают друг друга.

В каждой точке упругость, а стало быть, и теплота, должна быть как раз такой величины, какая потребна для поддержания веса верхних слоев. Это и есть та главная путеводная нить, которой мы пользуемся для определения количества тепла на различных глубинах внутри звезды.

Внутренняя температура различна у различных звезд, но обыкновенно она достигает в центре от 2 до 20 миллионов градусов. Не думайте, что это настолько высокая температура, что к ней не применимы обычные представления. Эту температуру нужно понимать буквально. Температура есть способ описания скорости движения мельчайших, элементарных частиц материи. При обыкновенных температурах средняя скорость атомов гелия приблизительно $1\frac{1}{2}$ км в секунду; при 4 миллионов градусов она равна 150 км в секунду. Эта скорость велика, но не так уж велика, чтобы волновать нас. Сэр Эрнест Резерфорд описывает атомы гелия, движущиеся со скоростью 150.000 км в секунду. Я не могу соперничать с ним. Мои коллеги физики обыкновенно бывают разочарованы неторопливостью движения атомов в звездах.

МАТЕРИАЛЬНОЕ И ЭФИРНОЕ ТЕПЛО.

Мы должны представить себе типичную звезду-гиганта как массу материи, средняя плотность которой соответствует приблизительно плотности воздуха и размеры которой, по крайней мере, в тысячу раз больше солнечных. Атомы, из которых она состоит, несутся по всем направлениям со скоростью до 150 км в секунду, непрерывно сталкиваясь и изменяя свои пути. Каждый атом непрерывно увлекается вниз притяжением всей массы и столь же непрерывно вновь выталкивается благодаря столкновениям с нижними атомами. Энергия этого атомного движения представляет собою большой запас тепла, но это только часть всего содержащегося в звезде запаса. Звезда содержит еще запас тепла другого рода — эфирное тепло, или эфирные волны, подобные тем, которые переносят солнечное тепло через 150 миллионов километров пустого пространства. Эти волны тоже носятся по всем направлениям внутри звезды. Они заключены как бы в клетке, образованной материей, которая дает им возможность лишь медленно просачиваться во внешнее пространство. Стремящаяся на свободу эфирная волна улавливается и поглощается атомом, выбрасывается им затем в новом направлении и переходит от атома к атому. Сотнями лет может она блуждать в этом лабиринте, пока случайно она не окажется

на поверхности звезды. Освобожденная, она может неопределенно долгое время путешествовать в пространстве, пока, наконец, она не достигнет какого-нибудь отдаленного мира, быть может, проникнет в глаз астронома и сообщит ему, что звезда светит.

Обладание этим двойным запасом тепла является особенностью, не встречающейся ни в одном горячем теле из числа ближе известных нам. Это — новая фаза материи, недостижимая в лабораторных опытах, хотя, к счастью, ее теория столь проста, что не может быть существенных сомнений касательно ее свойств. Правда, в придачу к теплу, заключающемуся в движении молекул, раскаленный до-красна кусок железа тоже содержит в себе немного этого эфирного тепла, но оно составляет меньше, чем биллионную часть общего количества. Эфирная часть приобретает значение лишь в гигантских звездах. Раскаленный до-красна металл излучает эфирное тепло, но не содержит в себе сколько-нибудь значительного запаса его; он превращает в него тепло материальное по мере потребности в этой форме тепла. Звезда отказывается от этого способа работы без резерва; и, хотя она непрерывно презращает запасы тепла из одной формы в другую, она все же всегда держит наготове запас на тысячу лет и излучает лишь утечку этого запаса эфирного тепла. Прежние теории не отдавали себе отчета в этом обстоятельстве; предполагалось, что существуют непрерывные конвекционные токи, выносящие горячую материю из внутренних областей, которая заменяет собою излучавшую и остывшую материю с поверхности. В настоящее время стало ясным, что трудность находится, пожалуй, в другом направлении, — каким способом звезда удерживает запас волн эфира, почему они не ускользают из нее быстрее того, что мы наблюдаем в действительности? Эта перемена взгляда вызвала необходимость в изменении прежних теорий Лэна (Lane) и других и в общем значительно упростила проблему.

В горячих телах, с которыми мы имеем дело в лабораториях, тепло находится почти целиком в материальной форме, эфирная же часть его совершенно незначительна; в звездах-гигантах тепло поделено между двумя его формами в приблизительно-равных количествах.

Можем ли мы вообразить себе третье состояние, в котором тепло почти целиком было бы эфирным, а материальная часть его незначительной? Вообразить себе это мы можем, без сомнения; но интересно и, я думаю, знаменательно то, что мы не встречаем этого состояния в природе.

Д А В Л Е Н И Е С В Е Т А .

Вы слышали о давлении света, — о том что свет действительно обладает массой и весом и моментом (количеством движения) и оказывает некоторое весьма слабое давление на всякий предмет, преграждающий ему дорогу. Лучи света, или волны эфира, подобны ветру и притом обычно

чрезвычайно слабому ветру; но интенсивная эфирная энергия внутри звезды вызывает сильный ветер. Этот ветер раздувает звезду. Он поддерживает до известной степени вес верхних слоев и уменьшает тем самым долю тяжести, поддерживаемую упругостью газов. Конечно, это обстоятельство должно быть принято во внимание при наших вычислениях внутренних температур, — что понизит их в сравнении с предположениями старой теории. Подобно тому, как эфир и материя делятся между собою тепловой энергией, так эфирный ветер и упругость материи делятся своей ношей, весом верхних слоев. Мы имеем возможность подсчитать, в каком соотношении они распределяют между собою эту тяжесть. В первом приближении одно и то же соотношение имеет место во всей внутренности звезды и зависит только от общей ее массы, но не зависит ни от плотности, ни даже от химического состава вещества. Больше того, чтобы выполнить это вычисление, не нужно никаких астрономических познаний; все входящие в формулу постоянные были определены физиком в его лаборатории. Нам нужно знать молекулярный вес вещества, но я расскажу вам в дальнейшем, как можно определить его, несмотря на нашу неосведомленность об элементах, могущих быть во внутренности звезды; это является одним из преимуществ того, что мы имеем дело с весьма высокими температурами.

Вообразим себе физика на планете, небо которой закрыто облаками, и пусть этот физик, не слышавший никогда о звездах, начнет производить эти вычисления для газовых шаров различного размера. Пусть он начнет с шара, содержащего 10 г, затем 100 г, 1.000 г и так далее, так что n -ый шар содержит 10^n г. Они будут быстро возрастать по величине: № 1 имеет приблизительно вес письма, № 5 — человека, № 8 — дирижабля, № 10 — океанского парохода; для дальнейших номеров трудно подыскать сравнения. В следующей таблице приведена часть результатов нашего физика:

№ шара.	Давление эфира.	Давление материи.
30	0,00000016	0,99999984
31	0,000016	0,999984
32	0,0016	0,9984
33	0,106	0,894
34	0,570	0,430
35	0,850	0,150
36	0,951	0,049
37	0,984	0,016
38	0,9951	0,0049
39	0,9984	0,0016
40	0,99951	0,00049

Понятно, почему я опускаю остальную часть таблицы; она состоит из длинных рядов нулей и девяток. Лишь для 33-го, 34-го и 35-го шара таблица становится интересной, затем она вновь начинает заполняться нулями и девятками. Борьба между эфиром и материей за преимущественное влияние на состояние шаров слишком неравна, чтобы быть интересной; лишь с 33-го по 35-ый номер можно ожидать чего-нибудь более любопытного.

Отстраним теперь завесу из облаков, которая окутывала нашего физика, и позволим ему взглянуть на небо. Он найдет на нем тысячи миллионов газовых шаров, и масса каждого из них лежит между массами 33-го и 35-го шара нашей таблицы. Самая легкая из известных нам звезд чуть легче 33-го шара, самая тяжелая — чуть больше 35-го. Громадное большинство лежит между 33 и 35 номерами, как раз там, где эфирное давление начинает становиться важным фактором положения.

Весьма знаменательно, что материя мироздания первоначально сгустилась в единицы приблизительно постоянной массы. Звезды весьма значительно отличаются друг от друга своей яркостью, плотностью, температурой и т. д., но все они содержат приблизительно одинаковое количество материи. За малыми исключениями, масса их заключена между половинной и упятеренной массой Солнца. Я думаю, что мы больше не можем серьезно сомневаться в основной причине этого факта, хотя детали объяснения могут представлять трудности.

Тяготение есть сила, которая конденсирует материю; не встречай она противодействия, она стягивала бы воедино все большие и большие количества материи и создавала бы шары чудовищных размеров. Напротив, эфирное давление является главной разъединяющей силой (ей содействует, конечно, центробежная сила вращения звезд), ее функция — препятствовать собиранию больших масс. Но, как мы видели, противодействие становится серьезным только тогда, когда масса достигнет уже величины 33-го шара. Если это противодействие действительно проявляется, то оно прекратит дальнейшее приращение массы еще до того, как она сравняется с 35-ым шаром, ибо к этому времени эфирное давление фактически совершенно сведет на нет своего более пассивного партнера (материальное давление). Нам нет надобности точно знать, как велико должно быть противодействие, чтобы воспрепятствовать приращению массы, ибо противодействие, раз оно уже стало заметным, весьма быстро растет и быстро достигает любой потребной величины. По всей вселенной звезды свидетельствуют нам, что вызываемое тяготением возрастание масс продолжается как раз до того момента, пока его не останавливает появление достаточно мощных противодействующих сил.

Стадии возрастающей и убывающей температуры.

В 1870 г. Гомер Лэн (Homer Lane) показал, что по мере сжатия газобразной звезды ее температура повышается. Бетельгейзе является типичной представительницей первой стадии, когда температура уже повысилась как раз настолько, чтобы звезда стала светить. Звезда будет продолжать сжиматься и становиться горячее, свет ее будет изменяться от красного к желтому, потом к белому. Но это, очевидно, не может продолжаться без конца. Когда конденсация продвинется достаточно далеко, материя станет слишком плотной, чтобы следовать законам идеальных газов. Тогда начинают господствовать другие законы. Повышение температуры становится менее быстрым, прекращается, и, наконец, температура падает. Можно высчитать, что наибольшая температура достигается при плотности, равной приблизительно от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{3}$ плотности воды. Солнце плотнее воды, стало быть, оно уже миновало вершину и находится в стадии падения температуры. Пока продолжается падение температуры, яркость звезды едва ли меняется. Вычисления показывают, что увеличение приходящегося на квадратный метр поверхности количества излучаемого света и тепла и уменьшение площади поверхности взаимно компенсируются, так что общее излучение остается почти постоянным. Но на нисходящей части пути как падение температуры, так и уменьшение поверхности,—оба понижают количество света, быстро спадающего между последовательными стадиями, или типами, на которые мы разбиваем историю звезды. Это вполне согласуется с наблюдениями.

Через любой температурный уровень звезда проходит дважды—один раз на восходящем, другой раз на нисходящем пути. Мы привыкли классифицировать звезды, главным образом, по их поверхностной температуре, потому что преимущественно от нее зависит спектральная характеристика света, его цветность и проявляющийся в нем химический состав. Но эта классификация смешивает воедино звезды ранней, восходящей стадии со звездами поздней, нисходящей стадии. Например, звезда вроде Бетельгейзе, только начинающая свое развитие, причисляется к одному классу с плотной красной звездой, которая пробежала свой путь и достигла второй молодости. Обе они являются красными звездами низкой температуры, и этого было достаточно для первых попыток классификации. Сэр Норман Локьер (Norman Lockyer) всегда энергично утверждал существование восходящей и нисходящей серий; но в этом он был почти одинок среди спектроскопистов. Ему не удалось фактически провести различие между восходящими и нисходящими звездами, хотя иногда он был весьма близок к правильному критерию. Этим различием мы обязаны Рёсселю (Russell) и Герцшпрунгу (Hertzsprung). Они открыли его не при помощи спектроскопии, а благодаря измерениям абсолютной яркости звезд: большая яркость

восходящих звезд, обусловленная большими размерами их, резко отличается от нисходящих звезд, по крайней мере, в группах с низкой температурой. При самых высоких температурах обе серии сливаются между собою.

Различение, распутывание этих двух серий и познание истинной последовательности эволюции звезд является, вероятно, самым революционным и чреватым последствиями из новых открытий звездной физики. Оно начало вытеснять прежние воззрения около 1914 г. Примечательно, что это открытие было сделано на основании наблюдений, относящихся к области классической астрономии, а не к тому, что обычно называется астрофизикой. Данным для него послужили параллаксы, собственные движения, орбиты двойных звезд и т. п.

Спектроскописты ошиблись в вопросе о последовательности эволюции, и указание правильной дороги выпало на долю соперничающей с ними отрасли астрономии. Но спектроскописты ступевались не надолго. Адамс (Adams) и Кольшюттер (Kolschütter) нашли легкий спектроскопический способ для различения восходящих и нисходящих звезд. Хотя основная наша теперешняя задача заключается в исследовании внутренности звезды, мы, быть может, все-таки на мгновение подыдемся на поверхность, чтобы рассмотреть ту разницу поверхностных условий на разреженной и на конденсированной звездах, которая позволяет спектроскописту отличать их друг от друга.

П О В Е Р Х Н О С Т Ь У С Л О В И Я .

На состояние внешних слоев звезды влияют, повидимому, только два фактора: 1) интенсивность пересекающего эти слои потока лучистой энергии и 2) интенсивность удерживающего их на звезде гравитационного притяжения.

Первый фактор определяется эффективной температурой, так что мы имеем два переменных фактора — температуру и тяготение. Спектр, вероятно, изменяется соответственно изменениям определяемых этими факторами условий. Мы не должны рассчитывать, что удастся точно расположить спектры в одной последовательности; они могут изменяться по двум направлениям.

Обычная классификация зависит по преимуществу от температурного фактора; мы можем назвать ее продольной последовательностью. Новый метод Адамса стремится главным образом распутать поперечную последовательность, соответствующую по преимуществу фактору тяготения. Можно сказать, что его метод является, собственно говоря, способом, позволяющим определять значение тяготения на поверхности звезды, хотя пока нет еще возможности выразить эти значения в числах. Ясно, что, благодаря большему расстоянию поверх-

ности от центра, тяготение будет в стадии разреженной меньше, чем в стадии плотной.

Уменьшение тяготения сказывается уменьшением плотности при соответствующих температурах. Это обуславливает значительное изменение состояния газа, а именно его ионизацию. При умеренно высоких температурах атомы начинают терять по одному или по несколько из их более слабо связанных электронов, этот процесс называется ионизацией. Малая плотность облегчает ионизацию, большая плотность затрудняет ее. Теорию ионизации в атмосферах звезд разработал главным образом Мег Нэд Саха (Megh Nad Saha), который получил много интересных результатов. Здесь нам достаточно отметить только то, что ионизированные атомы возбуждают особые спектры, которые долгое время считались отличными от спектров нейтральных атомов. Малая плотность атмосферы разреженных звезд должна усиливать принадлежащие ионизированным атомам «искровые» (enhanced) линии по сравнению с «дугowymi» линиями, обуславливаемыми нейтральными атомами. Вообще говоря, разница не особенно велика, но атомы некоторых элементов, для которых условия носят критический характер, особенно чувствительны к изменениям плотности. Это и есть тот критерий, который Адамс и Кольшюттер нашли эмпирически, и при помощи которого очень легко различать восходящую и нисходящую серии. В ограниченной степени он позволяет также различать большие и меньшие звезды одной и той же серии.

Хотя звезды начинают светить, достигнув температуры около 3.000° , и возвращаются к этой температуре в конце своего светящегося состояния, не все из них взбираются по лестнице температур до одной и той же высоты. Более массивные звезды взбираются выше более легких. До известной степени мы можем вычислить высоту, до которой они дойдут; но я боюсь, что в настоящее время цифры весьма неточны, хотя есть надежда исправить их в непродолжительном времени. Поверхностная температура Солнца в настоящее время около 5.900° ; я не думаю, чтобы оно когда-нибудь было горячее 6.600° , ибо оно не обладает достаточной массой, чтобы подняться дальше. Сириус, в $2\frac{1}{2}$ раза массивнее Солнца, достиг 11.000° и в настоящий момент находится практически на максимуме, едва только успев повернуться назад. Известны еще более горячие звезды, вроде звезды Ригель, — они должны быть еще более массивными.

На другом конце шкалы звезда с массой, меньшей $\frac{1}{7}$ массы Солнца, не была бы в состоянии достигнуть 3.000° и вряд ли могла бы светить. Во всяком случае такие малые массы должны образовываться очень редко, причины чего были уже указаны ранее в этой лекции. Хорошо известен тот факт, что горячие звезды в среднем массивнее, чем звезды более холодные, мы видим, что это объясняется устраниением меньших звезд при повышении температурного уровня.

АТОМЫ И ЭЛЕКТРОНЫ.

Внутренность звезды мы до сих пор описывали, как водоворот атомов и воли эфира. Теперь мы должны ввести еще третий род обитателей, присоединяющихся к пляске. Звезда заключает в себе огромное число свободных электронов — несвязанных единиц отрицательного электричества. Электроны, более многочисленные, чем атомы, носятся с быстротой, во стократ большей — соответственно их малой массе, которая составляет лишь $\frac{1}{1850}$ часть массы водородного атома. Эти электроны происходят из атомов, вырываясь из них при имеющих здесь место высоких температурах. Атом сравнивают с миниатюрной солнечной системой; сложное центральное ядро, несущее положительный заряд, соответствует Солнцу, а вокруг него, на сравнительно больших расстояниях, обращается по круговым и эллиптическим орбитам ряд электронов, соответствующих планетам. Для каждого элемента мы знаем число спутников-электронов: у натрия 11, у железа 26, у олова 50, у урана 92. Наша собственная солнечная система с 8 планетами соответствует атому кислорода. Термодинамическая теория, которой мы обязаны главным образом Нернсту, позволяет примерно подсчитать, какое число из этих спутников отрывается от атома при заданных температуре и плотности; оказывается, что в типичной звезде большая доля их должна быть в свободном состоянии.

Это условие приносит с собою решение основной нашей трудности, касающейся молекулярного веса вещества звезды. Чтобы произвести вычисления, касающиеся состояния звезды, мы должны знать этот вес; но на первый взгляд может показаться безнадежным определить молекулярный вес, не зная, из каких элементов состоит основная масса вещества. Но представьте себе сначала, что температура столь высока, что все электроны-спутники вырвались из атома. Атом натрия разложится тогда на 12 частиц, а именно на 11 электронов и на 1 изувеченный атом; его атомный вес 23 разделится между 12 независимыми частицами, так что средний атомный вес каждой из них будет $\frac{23}{12} = 1.92$. Возьмите затем железо; его атомный вес 56 разделен между 27 частицами, среднее — 2,07. Для олова будем иметь 119, деленных на 51; среднее — 2,34. Для урана 238 разделено на 93, среднее 2,56. Выбор элемента несущественен, средний вес колечных частиц (который и разумеется нами под молекулярным весом) всегда лежит около 2. Если бы звезды были чуть теплее, чем они в самом деле, то наша задача чрезвычайно облегчилась бы. К сожалению, они недостаточно горячи, чтобы вызвать полное расщепление, и стадия расщепления зависит от фактической температуры звезды, что вносит значительное осложнение. Обыкновенно отщеплена по меньшей мере половина электронов, и молекулярный вес нужно считать лежащим

между 3 и 4. Я надеюсь, что теория этой диссоциации электронов усовершенствуется, ибо в настоящее время она является главным препятствием для быстрого развития теории строения звезд. Большое облегчение знать, что молекулярный вес заключается между 3 и 4; но мы достигли такой стадии, когда для дальнейших успехов молекулярный вес для каждой звезды необходимо знать с гораздо большей точностью.

Яркость и масса.

Мы описываем физика на окутанной облаками планете, который по лабораторным данным способен был предсказать величину тех масс, в которые должна собраться материя мироздания. Поставим ему теперь более тяжелую задачу. Мы сообщаем ему, что мы наблюдали эти газообразные массы, и, выбрав одну из них, равную, предположим, его 35-му шару, мы просим его предсказать, как ярко она станет светить. Я упомянул уже, что звезда сохраняет практически неизменную яркость все то время, пока она является идеальным газом возрастающей температуры; стало быть, физику не нужно сообщать никаких данных, помимо точной массы. Прибегая к прежнему способу, мы вообразим себе ряд ламп яркостью в 10 свечей, в 100 свечей, в 1.000 и так далее. Задача физика состоит в том, чтобы указать ту лампу в этом ряду, которая приблизительно соответствует звезде. Я считаю, что в настоящее время у него есть возможность выполнить свою задачу и указать (правильно) на 31-ю лампу. Но для этой цели ему не достаточно только знать все, касающееся тепла, запасенного во внутренности звезды, ибо яркость звезды зависит от быстроты утечки эфирных волн. Это приводит нас к новой теме — задерживающей силе атомов материи, которые сдерживают лучистый поток.

Другое название этой задерживающей силы есть непрозрачность. Вещество, которое сильно препятствует прохождению световых и тепловых волн, называется непрозрачным. Повышение температуры к центру звезды заставляет тепло течь к поверхности, к низшим температурным уровням; непрозрачность материи препятствует этому течению. Борьба этих двух факторов определяет собою количество вытекающего света и тепла. Мы вычислили внутреннее распределение температур, так что мы знаем все, касающееся первого фактора; так как мы, кроме того, сможем определить величину внешнего потока, то это должно выяснить значение второго фактора — непрозрачности. Внешний поток может быть наблюдаем потому, что он представляет собою излучаемые звездой свет и тепло.

Одним из затруднений астрономии является то обстоятельство, что наши сведения о звездах носят весьма разрозненный характер.

Для одной звезды мы знаем очень точно ее массу, но не знаем ее абсолютной яркости; для другой мы знаем яркость, но не знаем массы, для третьей мы можем точно узнать плотность, но ничего больше. Для Сириуса, Прокциона и α Центавра наши сведения довольно полны и точны, но ни один из них не является звездой-гигантом, находящейся в состоянии идеального газа, и поэтому они бесполезны для наших теперешних рассуждений. Однако в течение последнего года нам посчастливилось получить полные и весьма точные сведения об одной гигантской звезде, Капелле. Это является еще одним благодарным для астрономии результатом интерференционного способа проф. Майкельсона. Масса более яркой компоненты Капеллы (являющейся двойной звездой) в 4,2 раза больше массы Солнца, ее яркость в 160 раз больше солнечной. Эти данные мы можем описанным мною путем использовать для определения непрозрачности, коэффициента поглощения Капеллы; она оказывается равной 150 единицам в системе *C. G. S.* Чтобы иллюстрировать значение этой цифры, проникнем в Капеллу и найдем такую область, в которой плотность равняется плотности привычной нам земной атмосферы; слой этого газа, толщиной только в 6 дюймов, образует собою почти непрозрачный экран. Лишь $1/20$ часть падающей на одну из его сторон лучистой энергии пройдет к противоположной стороне, все остальное поглотится газом.

Поглощение рентгеновских лучей в звездах.

Сначала кажется поразительным, что 6 дюймов газа могут столь успешно преграждать путь эфирным волнам, но подобное явление можно было ожидать на основании общих данных физики. Мы наделяем эфирные волны различными названиями, смотря по длине их волны. Самые длинные из них являются волнами Герца, которыми пользуется радиотелеграфия; затем идут невидимые тепловые волны, потом световые волны, затем фотографические, или ультрафиолетовые, волны. За ними идут рентгеновские, или X-лучи, и, наконец, самые короткие, γ -лучи, излучаемые радиоактивными веществами.

В каком месте этого ряда нужно поместить эфирные волны внутренней звезды? Это зависит исключительно от температуры, и при звездных температурах эфирные волны представляют собою X-лучи—точнее, они являются очень «мягкими» X-лучами. Но X-лучи, и в особенности мягкие X-лучи, сильно поглощаются всеми телами. Непрозрачность, найденная нами для Капеллы, одного порядка величины с измеряемой в лаборатории непрозрачностью земных тел по отношению к X-лучам. В следующей таблице приведены некоторые из лабораторных результатов в сравнении с астрономическим значением для Капеллы:

Длина волны ($\text{\AA}$).	Коэффициент поглощения (непрозрачность)			
	Алюминия.	Железа.	Серебра.	Капеллы.
0,5	2	14	10	...
0,95	11	80	72	...
1,1	21	125	86	...
1,3	31	205	152	...
2,3	136	...	...	...
10	...	...	...	150

Мы исследовали поглощение X-лучей в звезде параллельно с лабораторным исследованием того же вопроса. В одном отношении физик обладает большим преимуществом — он может менять материал, с которым он экспериментирует, тогда как мы должны ограничиваться материалом, составляющим звезду, каков бы он ни был. Но, как вы видите по таблице, физик интересуется также и тем, как меняется поглощение для различных длин волн. В этом вопросе мы можем следовать за ним и даже перегнать его, ибо некоторые практические затруднения ограничивают физика узкой областью волн, тогда как мы можем исследовать область, в которой длина волны меняется по меньшей мере в отношении 10 к 1, пользуясь для этого звездами различных температур. Правда, наши результаты пока еще не очень точны: у нас есть только одна звезда, Капелла, для которой возможно действительно хорошее определение, но для других звезд можно определить приблизительные значения. Земные результаты указывают на чрезвычайно быстрое изменение поглощения при малых изменениях длины волны (как это явствует из таблицы); напротив, астрономические результаты приводят к почти постоянному коэффициенту поглощения. Мы еще не можем определенно установить, возрастает ли он, или уменьшается с увеличением длины волны; во всяком случае здесь нет ничего подобного быстрым изменениям, приведенным в предшествующей таблице. Это глубокое разногласие между астрономическими и лабораторными результатами заставляет нас внимательнее исследовать теорию поглощения в звезде. Мы увидим, что для этого разногласия имеется основательная причина.

Мы воспользовались преимуществом по сравнению с нашим физиком, окутанным облаками, в том отношении, что предварительно взглянули на настоящую звезду. Мы не собираемся позволить это ему. Для определения поглощения ему нельзя пользоваться астрономическими наблюдениями, он должен суметь предсказать астрономическое

значение, исходя либо из чистой теории, либо из земных опытов. Это исследование особенно интересно потому, что оно сразу приводит нас к тем проблемам, которые в настоящее время наиболее увлекают физиков. Мы начали с исследования внутренности звезды, в ближайшем будущем мы окажемся во внутренности атома.

В настоящее время признано, что, когда эфирные волны падают на атом, они не поглощаются им непрерывно. Атом спокойно ожидает удобного случая и затем внезапно проглатывает сразу целую порцию. Волны связаны в пачки, которые называются квантами, и атому остается выбор только между двумя возможностями — поглотить либо целую порцию, либо ничего. Обыкновенно порция слишком велика для того, чтобы атом мог ее переварить, но атом не останавливается для обсуждения этого вопроса — он падает жертвой собственной жадности, короче, он лопається. Один из его спутников-электронов выскакивает с большою скоростью, унося с собою избыточную энергию, которую атом не был в состоянии удержать. Атомы не могли бы непрерывно лопаться неопределенно долгое время, если бы не имел место противоположный процесс восстановления. Извергнутые ими электроны движутся, встречаются другие атомы, через некоторое время лопнувший атом встречается при подходящих условиях со свободным электроном и заставляет его остаться и заполнить брешь. Теперь атом восстановлен и готов к следующей порции, как только тому представится случай.

Вследствие этого между поглощением X-лучей в лаборатории и в звезде существует большое различие. В наших лабораториях атомы питаются очень скудно; только в малых количествах можем мы изготовлять пучки X-лучей, которые составляют их пищу. Задолго до того, как атому вторично представится случай для еды, он уже восстановлен и готов к нему. Но в звездах интенсивность X-лучей чудовищна; атомы пресыщены и не могут воспользоваться многочисленными удобными случаями. Потребление пищи голодным охотником ограничивается его ловкостью; потребление зажиточного рантье ограничивается емкостью его желудка. Лабораторные эксперименты определяют ловкость атома в деле добывания пропитания; звездные эксперименты определяют время, потребное атому для того, чтобы оправиться после приема пищи и быть готовым к следующему. Вот почему в этих двух случаях поглощение повинуются различным законам.

ЗАХВАТ ЭЛЕКТРОНОВ.

Чтобы предсказать звездный коэффициент абсорбции, мы должны сосредоточить свое внимание на скорости восстановления лопнувших атомов. Атом бродит повсюду, извещая о свободной вакансии для электрона, а многочисленные свободные электроны празднично по-

сятся вокруг. Многие из электронов приблизятся, рассмотрят представляющуюся должность и вновь удалятся. Каким образом атом может заманить к себе электрон? Я укажу вам решение этого вопроса, которое я склонен считать сравнительно вероятным, хотя мало кто согласен со мною. Мы можем сравнить электрон с блуждающей кометой, вступающей извне в солнечную систему, при чем мы должны, однако, иметь в виду, что планеты (электроны-спутники) отталкивают пришельца, а Солнце (положительное ядро) притягивает его. Динамика учит нас, что если не происходит фактического столкновения, то пришлец вряд ли будет когда-либо поймач, вернее, что, внеся некоторый беспорядок, он вновь удалится в бесконечность. Есть исключения, например, когда Солнце и Юпитер сочетают свои силы для того, чтобы изловить комету; но эти исключения будут очень редкими в тех условиях, которые соответствуют атому. В некоторых случаях сам пришлец увлечет за собою одну из планет, компенсируя себя этим за те случаи, когда сам он оказывается пойманным.

Что касается восстановления атома, то, вероятно, в среднем результате польза от вторжения равняется вреду.

Так как более деликатные способы убеждения не помогают, то атому, как кажется, не остается ничего другого, как обеспечить себя электронами при помощи грубой силы. Поэтому я считаю, что захват электрона происходит обыкновенно благодаря тому, что электрон налетает на положительное ядро атома. Это ядро обладает чрезвычайно сложной структурой; так, например, железо состоит из 86 отдельных зарядов, находящихся в некотором состоянии равновесия. Если электрон по случайности влетит на полном ходу в эту тесную толпу, то он взволнует ее и потеряет при этом свою энергию; конечно, он опять отскочит, но с меньшей скоростью, недостаточной для того, чтобы удалиться из сферы притяжения атома¹⁾.

Мы приходим к тому, что это единственный способ, согласный с законами динамики, при помощи которого атом может завладеть электронами, необходимыми для его восстановления. Поэтому я пришел к заключению, что ловушкой для электронов в действительности является не что иное, как положительное ядро — центральная область атома, которая, как известно, имеет радиус около 10^{-12} см. Нужно помнить, что ядро притягивает электроны и затащит в ловушку много

¹⁾ В момент столкновения кинетическая энергия несравненно больше кинетической энергии до проникновения в сферу притяжения; стало быть, относительно весьма малое изменение кинетической энергии при столкновении может лишить электрон его первоначальной энергии. Не вполне упругий характер столкновения является динамическим следствием сложной структуры ядра. Столкновение двух простых зарядов можно бы считать вполне упругим, если бы только не то, что это обстоятельство должно, повидному, навсегда воспрепятствовать атому водорода вернуть себе свой электрон.

таких электронов, которые первоначально вовсе не направлялись его первоначальной энергией.

Эта теория подвергалась критике главным образом на том основании, что она вполне согласуется с законами динамики. На первый взгляд это может не показаться серьезным возражением, но мы так привыкли к тому, что поведение атомов нарушает классические законы, что всякая теория, не нарушающая эти законы, может быть встречена недоверием. Соглашаясь, что в таинственной области внутри атома есть место для неведомых возможностей, мы все-таки должны отметить, что данная проблема относится к тому разряду исследований, в котором физики применяют обычные законы динамики и притом зачастую с большим успехом. Она рассматривает движение свободного электрона, еще не входящего в состав какой-либо постоянной квантированной системы. Эта проблема встречается в теории электрической проводимости металлов, в явлениях термоионных и в рассеянии α - и β -частиц. В этих проблемах физики обыкновенно предполагают (справедливо ли или нет), что выполняются классические законы динамики, и мы только последовали их (хорошему или дурному) примеру. В частности, в опытах Рёзерфорда над рассеянием, классические законы действия силы оказались справедливыми почти вплоть до самой поверхности ядра. Повидимому, существуют достаточно обоснованные мотивы в пользу того, чтобы к нашей звездной проблеме приступать тем же путем, хотя я и согласен, что в дело могут вмешаться непредвиденные обстоятельства¹⁾.

Существенным мотивом в нашу пользу является то обстоятельство, что эта теория действительно дает для коэффициента абсорбции значение, согласующееся с астрономическими наблюдениями. Так, для Капеллы вычисленное значение равняется 110, тогда как наблюдаемое значение — 150. Есть некоторые сомнительные факторы, которые могут изменить результат в 2, а может быть, и в 3 раза; мы не придаем значения точному совпадению. Но на основании этой гипотезы оказывается возможным предсказать с точностью до одной звездной величины яркость тех звезд, масса которых известна, как, например, Капеллы. Это вполне решает задачу, поставленную нами физику на окутанной облаками планете. Можно прибавить, что эта теория дает также объяснение тому факту, что в гигантских звездах абсорбция почти не

¹⁾ Тогда как быстро движущиеся частицы несомненно проникают в атом указанным нами путем, некоторые считают, что медленные электроны (каковы, например, электроны в звездах) поворачиваются обратно уже на поверхности атома. Это воззрение, повидимому, зародилось в то время, когда положительный заряд атома считался большой сферой, одинакового протяжения с атомом, и представляется несовместимым с современными взглядами. Оно неизвестно распространенным ныне теориям электрической проводимости. Если даже представить себе, что нейтральный атом мог бы столь успешно ограждать себя от электронов, то сильно положительный атом в звезде все же вряд ли может избежать вторжения.

зависит от длины волны; но это является результатом более элементарным, который становится очевидным, как только мы уясним себе, что наша проблема связана с вопросом о быстроте восстановления атомов; много других теорий об условиях восстановления тоже привели бы к тому же самому выводу.

Источник звездной энергии.

Запас эфирного тепла и запас материального тепла можно сравнить с аккумуляторами силовой станции. Пока мы не обнаружили еще динамо-машин, аккумуляторы исчерпались бы за несколько тысячелетий, если бы они не заряжались вновь. Где тот источник энергии, который поддерживает (а в период возрастания температуры увеличивает) этот внутренний запас? В настоящее время мы считаем, что этим источником является субатомная энергия. Одна из теорий полагает, что внутри звезды из более простых элементов постепенно созидаются элементы более сложные и что этот процесс сопровождается выделением энергии. Более радикальное воззрение состоит в том, что материя нацело уничтожается и освобождает при этом всю свою энергию строения. Если остановиться на первой теории, то наиболее ярким из известных нам фактов является образование гелия из водорода. Мы не умеем изготовлять гелий из водорода, но мы знаем, что он действительно изготовляется; мы знаем также, что 0,8% массы исчезает за время этого процесса, — это должно соответствовать массе той энергии — эфирных волн, — которая выделяется за время превращения. Эфирные волны очень легки на вес, и количество энергии, могущее быть полученным из этого источника, колоссально. Если 5% звезды состоит из водорода, который превращается в гелий на первой ступени образования легких элементов, то это обеспечивает количество энергии, достаточное для всех разумных требований.

Быть может, мы склонны были бы ожидать, что самые молодые звезды состоят почти целиком из водорода, ибо мало вероятно, чтобы эволюция тяжелых элементов началась до того, как внутренность стала достаточно горячей для того, чтобы стимулировать этот процесс. Но здесь возникает одно затруднение. Астрономические соображения не допускают возможности, чтобы даже самые ранние звезды содержали водорода больше, чем в весьма умеренной пропорции. Я указывал на то обстоятельство, что наши вычисления фактически не зависят от химического состава звезды, но при этом нужно ввести одно ограничение — необходимо, чтобы звезда не состояла из водорода. Водород приводит к результатам, значительно отличающимся от случая всех остальных 91 элементов.

Если допустить, что водород является составной частью звезды, то это в большинстве случаев уничтожит общее совпадение теории с на-

блюдением; больше того, удовлетворительность этого совпадения мы можем уяснить себе именно тем, что обратим внимание на исчезновение этого совпадения в случае замены обычных элементов водородом. Потому я считаю, что процесс созидания элементов из электронов и протонов должен был начаться еще до того, как была достигнута стадия звезды. Это один из любопытных разрозненных фактов, на который мы натолкнулись при исследовании внутренней звезды,— мы в праве отрицать возможность того, чтобы звезда состояла по преимуществу из водорода, хотя любой из остальных 91 элементов может присутствовать в любом количестве. Еще более любопытно, что как раз водород является тем элементом, из которого мы склонны были бы построить звезду, так что, повидимому, случайное отрицание попадает в цель.

Примесь водорода уменьшает пропорцию эфирной энергии и эфирного давления и тем самым дает тяготению возможность собирать большие массы. Образование встречающихся иногда звезд исключительно большой массы (от 20 до 80 раз превышающих массу Солнца) может обуславливаться случайным преобладанием водорода в этой области, где они возникли,— это значит, что материя находилась в более примитивной стадии эволюции элементов.

Нам не следует придавать большое значение вопросу о том, привели ли нас наши попытки исследовать внутренность звезды к чему-то близкому к конечной истине. Я думаю, что нам удалось выяснить несколько основных факторов проблемы и убедиться, как много замешано в ней различных тенденций. Уже достигнутые частичные результаты достаточно хорошо соответствуют наблюдениям, для того, чтобы вдохновить нас к бодрой мысли, что мы с правильного конца начали распутывать клубок затруднений. Нигде не наталкивались мы на трудности, могущие показаться неопреодолимыми. Несомненно, что, с точки зрения математической физики, газообразная материя при очень высоких температурах является самым простым видом вещества. Разобраться в всем происходящем, например, в материале, из которого сделан стол, представляет собою поистине трудную задачу, решение которой, пожалуй, превышает надежды современной науки; но нам не кажется слишком оптимистической надежда на то, что в не слишком отдаленном будущем мы в состоянии будем разобраться в такой простой вещи, какой является звезда.

Перевел *И. Тамм.*