1929 г. Т. IX. ВЫП. 1.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ [1]

Р. Милликэн и Г. Кэмерон, Пасадена.

1. Введение. В наших предыдущих сообщениях [2] была дана кривая высокой „разрешающей способности", выражающая зависимость ионизирующей способности космических лучей от глубины. Там же мы показали, что эта кривая свидетельствует о существовании в спектре космических лучей двух резких полос, отделенных друг от друга примерно тремя октавами. Коэффициент поглощения для полосы с бо́льшей длиной волны, которая и играет главную роль при ионизации атмосферы, равен приблизительно $\mu = 0{,}35$, тогда как коротковолная полоса состоит из излучения двух длин волн с $\mu = 0{,}08$ и $\mu = 0{,}04$, причем второе, примерно, вдвое интенсивнее первого.

Эти результаты были получены из эмпирического анализа кривой ионизации, вне связи с какой бы то ни было теорией. Они представляют собою тот общий тип решения, которого требует сама кривая. Отсюда сразу же следует одно важное обстоятельство: приходится отказаться от сделанного нами в свое время предположения о возникновении космических лучей при столкновении быстро летящих (со скоростями

[1] Phys. Rev., October 1928

[2] Милликэн и Кэмерон, Nature, 7 янв. 1928 г.; Science, 13 апр. 1928, *401*; Phys. Rev., *31*, 921, 1928. Разложение кривой на три резкие спектральные полосы было представлено Физическому кружку Калифорнийского института 16 февр. 1928 г. Доказательство того, что эти полосы возникают при образовании атомов, было публично изложено 16 марта на собрании Ассоциации калифорнийского института и напечатано 17 марта в протоколах Ассоциации.

до 216 000 000 V) электронов с атомными ядрами. Действительно, при такого рода процессах возникали бы лучи с непрерывным, а не полосатым спектром. Таким образом существование полос в спектре космических лучей, о котором свидетельствует наша кривая, показывает, что эти лучи возникают в каком-то акте внутриядерного характера или в акте перехода от одного резко определенного значения энергии к другому, сопровождающемся излучением подобно квантовому перескоку.

2. Общее значение полосатого спектра космических лучей. После того, как мы произвели вышеуказанный эмпирический анализ, подготовили его изложение в том виде, как оно появилось в июньском номере Physical Review и сообщили полученные результаты (16 февраля 1928 г.) на собрании физического семинара Norman Bridge Laboratory[1] — совершенно не основываясь при этом на каких бы то ни было предположениях или допущениях о причинах наблюденных явлений — мы занялись вопросом об отыскании возможного теоретического объяснения для появления полос и связанных с ним энергий.

Известно, что если справедлива специальная теория относительно Эйнштейна, в пользу чего говорит блестящее подтверждение предсказанных ею результатов, из которых ни один не был признан ошибочным, то всякое излучение энергии системой атомов должно сопровождаться потерей этой системой эквивалентного количества массы. Выражением этого факта служит общеизвестное и постоянно употребляемое уравнение Эйнштейна (1905) $Mc^2 = E$, где M есть масса в граммах, c — скорость света в *см/сек* и E — энергия в эргах. Благодаря последним очень точным исследованиям Астона[2], а также благодаря прежним определениям атомных весов, мы довольно точно знаем массы всех атомов и можем поэтому вычислить энергии, выделяю-

[1] Физическая Лаборатория при Калифорнийском технологическом институте, находящаяся в заведывании Р. Милликэна. *Ред.*

[2] F. Aston. Proc. Roy. Soc., *A 115*, 487, 1927.

щиеся при различного рода атомных превращениях. От энергии можно с помощью уравнения Эйнштейна перейти к частоте, а затем, через посредство формулы Дирака [1], — к проникающей способности, получающейся при таком преобразовании излучения. Эти расчеты показывают, что единственными процессами, при которых могут возникнуть лучи с громадными наблюденными нами проникающими способностями, — являются акты образования гелия, кислорода, кремния и железа из водорода (в случае двух последних элементов — также и из гелия).

Дополнительной возможностью здесь могло бы явиться полное уничтожение водорода, т. е. соединение его протона с электроном. Однако против этого говорят два довода. Во-первых, в наблюденной кривой ионизации для такого излучения не оказывается места, так как оно было бы в 4—5 раз более проникающим, чем самое жесткое из всех вышеупомянутых наблюденных излучений. Следовательно, если бы такое излучение существовало, то вызванная им ионизация входила бы в те 2,4 иона, которые дают „нулевую точку" электроскопа. Но эти 2,4 иона представляют собой только 0,1 полной ионизации на верхушке кривой, равной 21 иону (это значение соответствует ионизации на глубине 1 *м* под поверхностью озера Джем). Таким образом наше гипотетическое излучение не может сколько-нибудь заметно влиять на кривую ионизации выше значения 2,4; в нижней же части кривой оно может обладать лишь слабой интенсивностью по сравнению с более мягкими наблюденными лучами. Во-вторых, такое гипотетическое излучение было бы монохроматичным и ни в коем случае не могло бы обладать той полосатой структурой, которая наблюдается у космических лучей. Независимо от того, происходит ли в действительности процесс уничтожения атома водорода посредством соединения его ядра с электроном, или нет, его можно исключить из числа возможных причин возникновения наблюдаемых космических лучей. Как будет подробнее показано ниже, ни

[1] P. A. M. Dirac. Proc. Roy. Soc., A *111*, 423, 1926.

при одном из остальных атомных превращений не исчезает достаточного для образования космических лучей количества массы, кроме указанных процессов образования атомов.

3. Энергия, выделяющаяся в процессах разложения атомов. Радиоактивность. Легко показать, что ни одно из радиоактивных превращений не может повести к возникновению космических лучей. Действительно, уравнение Эйнштейна говорит, что при таких превращениях могут возникнуть лучи лишь значительно менее проникающие. Об этом факте непосредственно свидетельствует кривая Астона, воспроизведенная здесь (рис. 1). В радиоактивном процессе, т. е. в процессе распадения, продуктами распада являются либо α-частица и атом с массой на 4 единицы меньшей, чем масса первоначального атома, либо β-частица и атом практически такой же массы, как и первоначальный. В последнем случае, как и в случае одновременного излучения β-и γ-лучей, не происходит сколько-нибудь заметного изменения массы. Единственным заметным источником энергии при радиоактивных превращениях может служить изменение массы, связанное с выбрасыванием α-луча. Случай радиоактивности калия и рубидия, которые испускают только β-лучи, не противоречит этому общему правилу, так как все до сих пор известные методы приводили к выводу, что при этих превращениях не происходит заметного изменения массы и энергии.

Можно с большой уверенностью сказать, что значения массы протона в атомах всех элементов лежат близко к плавной кривой Астона, показанной на рис. 1. Отсюда сразу следует, что ни один атом, с атомным весом меньше 80, не может испускать α-лучей. В самом деле, эта кривая примерно около 80 имеет минимум; следовательно акт выбрасывания α-частицы атомом легче 80 должен повлечь за собой увеличение общей массы, т. е., иначе говоря, он не может вызвать излучения энергии. Другими словами, процесс распада атомов с атомным весом меньше 80, идущий путем выбрасывания α-частиц или протонов, должен быть процессом эндотермическим, а не экзотермическим,

т. е. он не может происходить самопроизвольно. Этот факт опровергает то часто высказывавшееся за последние 30 лет утверждение, что существует возможность получения энергии путем разложения часто встречающихся элементов. Если кривая Астона хотя бы приблизительно верна, то только очень тяжелые элементы способны выделять энергию при распаде, а элементы с атомным весом большим 80 встречаются очень редко. Все они, взятые вместе, составляют не больше 1 % общего количества материи[1].

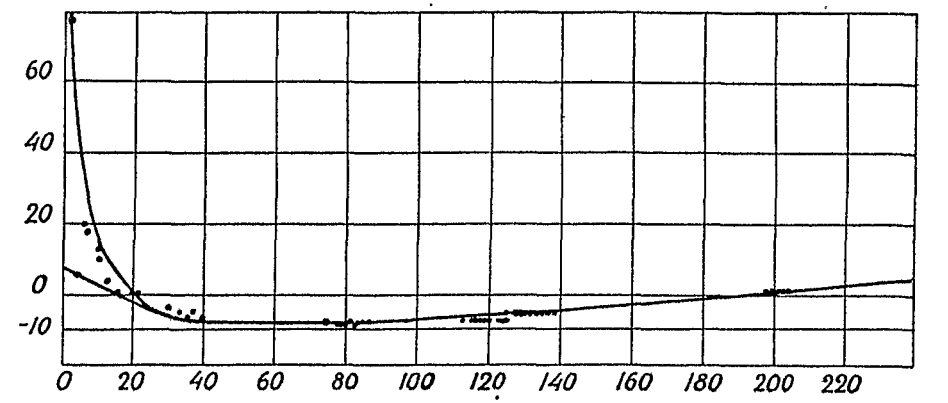

Рис. 1. Кривая Астона. По осям абсцисс отложены атомные массы элементов, по осям ординат — коэффициенты упаковки („packing traction"), помноженные на 10 000, т. е. дефекты массы, отнесенные к одному протону $\times 10^4$.

Кривая Астона дает возможность легко вывести то условие, которому должен подчиняться тяжелый атом, для того, чтобы иметь возможность освобождать энергию выбрасыванием α-частицы. Это освобождение может иметь место лишь в той части кривой, которая подымается так быстро с ростом атомного веса, что

$$n \cdot \Delta y > 4\,(0{,}00054 - y_n).$$

Здесь n — атомный вес атома, выбрасывающего α-частицу, Δy — разность ординат в точках $n-4$ и n, y_n — ордината, соответствующая атомному весу n, а 0,00054 — значение y

[1] Ф. В. Клерк (Chem. News. *123*, 311, 1921) показал, что 9 легких элементов — O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, H и Te — составляют 98 % земной коры.

для гелия (см. рис. 1), т. е. кажущаяся масса протона в α-частице[1].

Это уравнение не только показывает, что лишь очень тяжелые атомы могут распадаться путем выбрасывания α-частиц и терять при этом энергию, но и позволяет нам оценить максимальную жесткость, т. е. проникающую способность излучения, могущего возникнуть в том или ином процессе радиоактивного распада.

Рассмотрим, например, выбрасывание α-частицы атомом тория. Кривая показывает, что при $n=232$, $y_n=0{,}00031$, т. е. что увеличение массы α-частицы на один грамм-атом, вызванное вылетом ее из ядра тория, равно

$$4\,(0{,}00054-0{,}00031)=0{,}00092.$$

Потеря массы в остатке распавшегося атома тория есть

$$n\Delta y=0{,}000034\cdot 228=0{,}007752.$$

Следовательно полная потеря массы при испускании α-луча есть

$$0{,}00775-0{,}00092=0{,}00683\ г \text{ на грамм-атом.}$$

По уравнению Эйнштейна такая потеря массы должна повлечь за собой потерю энергии в количестве $0{,}00683\,c^2$ *эрг* на грамм-атом. Полная энергия, выделяющаяся в каждом акте выбрасывания α-частицы, получается делением этой величины на число Авогадро $6{,}062\times10^{23}$, т. е. она равна $1{,}004\times10^{-5}$ *эрг*. Но, с другой стороны, мы знаем, что энергия самых быстрых α-частиц, выбрасываемых радием, согласно последним таблицам Коварика и Мак-Кигана[2], равна 7 700 000 V, что эквивалентно $1{,}2\times10^{-5}$ *эрг*. Энергия α-частиц, выбрасываемых ThC, на 14 % больше этой величины. Те же таблицы говорят, что „верхний предел" энергии β-лучей, выбрасываемых продуктами распада тория и радия, есть 7 540 000 V или $1{,}2\times10^{-5}$ *эрг*[3]. Таким образом уравне-

[1] См. ся этого неравенства становится совершенно ясным из дальнейших рассуждений. *Ред.*

[2] Kovarika. Mc. Keehan. Nat. Res. Council Rep. on Radioact., p. 68.

[3] Kovarika. Keehan, l. c., p. 92.

ние Эйнштейна действительно позволяет нам с большой точностью, лежащей в пределах ошибок измерений Астона, определить максимальную энергию, выделяющуюся в данном радиоактивном процессе.

Вообще говоря, потеря массы при выбрасывании α-частицы поставляет энергию не только для α-, но и для β- и γ-лучей, так как эти излучения сами по себе не связаны с заметной потерей массы. Следовательно в большинстве случаев — как это видно и из радиоактивных таблиц — энергия α-, β-, и γ-лучей значительно меньше вышеуказанных максимальных значений. Действительно, энергия γ-лучей радия или тория соответствует не больше чем 2 000 000 V[1] (у RaC′ и ThC″) и их коэффициент поглощения равен 4,0 на 1 *м* воды[2]. Эти лучи почти совершенно — т. е. на 98 % своей первоначальной интенсивности — поглотились бы, пройдя через 1 *м* воды. В том факте, что энергия самых жестких γ-лучей не больше $^1/_4$ энергии самых быстрых α- и β-лучей, нет ничего странного, так как Мейтнер[3], Эллис[4] и Резерфорд[5] показали, что испускание заряженной частицы является первичным, а испускание γ-лучей — вторичным процессом в радиоактивном распаде. Таким образом уравнение Эйнштейна, в связи с точными астоновскими измерениями атомных масс, не только показывает, что способностью испускать α-лучи обладают только очень немногие, очень тяжелые и очень редко встречающиеся элементы, но и позволяет вполне удовлетворительно оценить энергию того или иного излучения. С нашей точки зрения наиболее существенным пунктом здесь является тот факт, что почти все возможные процессы распада атомов связаны с поглощением, а не с излучением энергии и что ни один из возможных экзотермических процессов распада не может

---

[1] Kovarik a. Mc. Keehan, l. c., p. 122, см. также Meyer u. Schweidler, Radioaktivität, p. 641.

[2] Kovarik a. Mc. Keehan, l. c., p. 114.

[3] Meitner. Z. f. Physik, *26*, 169, 1924.

[4] Ellis a. Wooster. Proc. Camb. Phil. Soc., *22*, 844, 1925.

[5] Rutherford a. Wooster. Proc. Camb. Soc., *22*, 834, 1925.

вызвать излучения энергии больше, чем та, которая соответствует падению электрона в поле с напряжением в 8 000 000 V. Излучение, соответствующее этому теоретическому верхнему пределу, было бы в 4 раза более проникающим, чем самые жесткие γ-лучи RaC или ThC'', т. е. полностью (на 98 % своей первоначальной интенсивности) поглощалось бы в 4 *м* воды. Следовательно, космические лучи, обладающие согласно нашим измерениям в 18 раз большей проникающей способностью, т. е. могущие проходить через 70 *м* воды, должны иметь совершенно другое происхождение. Они соответствуют падению электрона в поле 216 000 000 V и ни один из процессов распада атомов не может доставить такого количества энергии, которое необходимо для их возникновения.

4. Непригодность всех процессов постепенного образования атомов. С другой стороны, кривая Астона и уравнение Эйнштейна показывают, что процесс построения атомов наиболее часто встречающихся элементов из протонов и электронов не только способен вызвать появление лучей с такими проникающими способностями, но и является единственным атомным процессом, способным это сделать. Об этом подробно будет итти речь в §§ 5 и 6. Однако уже предшествующая качественная оценка позволяет притти к тому выводу, что космические лучи представляют собой эфирные сигналы, возвещающие нам о постоянном образовании тяжелых элементов из легких.

Более того, кривая Астона и уравнение Эйнштейна дают нам совершенно новые сведения о самом характере процессов построения атомов. Они показывают, что построения тяжелых атомов из легких, поскольку оно связано с появлением космических лучей, не может итти путем последовательного добавления каждый раз по одному протону. Действительно, из кривой Астона видно, что максимальная потеря массы при образовании такого элемента, как, например, железа, путем добавления одного протона к ядру элемента с массой на единицу меньшей, чем масса атома железа, была бы равна

$$0{,}00778 + 0{,}0008 = 0{,}00858 \text{ г на грамм-атом.}$$

Она эквивалентна количеству энергии того же порядка, как и энергия, выделяющаяся при распаде тория (т. е. 0,00683). Следовательно эфирная волна, возникающая при таком акте, обладала бы лишь немного большей проникающей способностью, чем те γ-лучи, которые сконцентрировали бы в себе всю энергию радиоактивного превращения. Как было показано выше, эта волна полностью поглотилась бы в 4 *м* воды.

Совершенно так же обстоит дело и при образовании любого атома путем добавления одного протона к атому с массой на единицу меньшей. Только в одном случае — при образовании углерода из бора — выделившаяся энергия была бы равна (см. данные Астона):

$$11 \times 0{,}0007 + 0{,}0076 = 0{,}0153,$$

т. е. величине примерно вдвое большей, чем аналогичная величина для железа. Но даже и это излучение целиком поглотилось бы в 8 *м* воды и не дошло бы даже до той области, в которой мы производили свои измерения над космическими лучами.

Тот же самый ход рассуждений показывает невозможность построения тяжелых атомов посредством последовательного добавления по одной α-частице к ядру легких атомов. Действительно наибольшее выделение энергии при такого рода процессах соответствовало бы исчезновению массы в

$$4(0{,}00054 + 0{,}0008) = 0{,}0054 \text{ г на грамм-атом}$$

и дало бы излучение, целиком поглощающееся в 3 *м* воды. Наблюденные космические лучи не могут возникнуть при добавлении к какому-нибудь атому одного ядра водорода или гелия и образовании атома на одну или соответственно 4 единицы более тяжелого, чем первоначальный, так как дефект массы в таком процессе был бы слишком незначителен.

Результаты, полученные Милликэном и Боуэном в опытах с электроскопами на воздушном шаре, поднявшемся на 0,92 пути до „верхушки атмосферы“, позволяют нам пойти еще дальше и утверждать, что в земной атмосфере не наблюдается излучения заметной интенсивности,

которое по длине волны лежало бы между жесткими γ-лучами и космическими лучами. В самом деле, лучи, которые проникали бы через 80 *см* воды (этот слой эквивалентен слою воздуха над высшей точкой полета шара), разрядили бы электроскоп на вершине полета. А между тем излучение, которое возникало бы при построении атомов посредством последовательного добавления по одному протону или по одной α-частице, по своей жесткости стояло бы как раз между γ-лучами и космическими лучами. Мы можем, следовательно, сделать вывод не только о том, что при такого рода построении атомов не могут возникнуть космические лучи, но что оно по всей вероятности совсем не имеет места, если судить по излучениям, попадающим в нашу атмосферу. Во вселенной происходят процессы, сопровождающиеся более сильными отдачами энергии.

5. Количественное доказательство построения гелия из водорода в едином акте. Все наши предыдущие рассуждения сводились, главным образом, к устранению различных возможных гипотез. Однако уравнение Эйнштейна позволяет нам пойти и дальше — исходя из наблюденной проникающей способности космических лучей количественно объяснить их возникновение.

Поскольку атомы построены из протонов и электронов — доказательство чего мы видим в существовании изотопов — и поскольку постепенное построение атомов посредством добавления по одному протону или α-частице не может служить источником космических лучей, как было показано в § 4, постольку первичным и самым фундаментальным процессом построения атомов должно быть соединение четырех протонов с двумя электронами и образование в едином акте атома гелия. Действительно, дальнейшее соединение ядер гелия в ядра более тяжелых элементов, если оно и имеет место, должно быть актом значительно более редким, чем образование гелия из водорода, так как самое его возникновение предполагает множество таких первичных актов. Точно так же, если бы тяжелые атомы образовались непосредственно из водорода, не проходя через промежуточную стадию создания гелия, то растущая сложность этого акта

с ростом атомного веса привела бы опять к тому, что наиболее частым событием было бы образование гелия. Поэтому вопрос о том, присутствует ли в космических лучах волна, соответствующая этому акту, является основным вопросом в проблеме построения атомов. Как мы сейчас увидим, наблюдение дает поистине замечательный ответ на этот вопрос.

Согласно уравнению Эйнштейна и данным Астона, потеря массы в акте образования гелия равна

$$4\ (1{,}00778 - 1{,}00054) = 0{,}029\ г \text{ на грамм-атом}$$

и энергия, излученная при каждом таком акте, есть

$$\frac{0{,}029 \times 9 \times 10^{20}}{6{,}032 \times 10^{23}} = 4{,}3 \times 10^{-8}\ эрг.$$

Частота возникающей эфирной волны определяется из уравнения $E_1 - E_2 = h\nu$, откуда $4{,}3 \times 10^{-5}/6{,}547 \times 10^{-27} = 6{,}57 \times 10^{22}$. Она соответствует длине волны $\lambda = 0{,}00046\ \text{Å}$. Для вычисления коэффициента поглощения волны такой энергии (т. е. такой частоты) можно с большой уверенностью воспользоваться формулой Дирака[1], выведенной на основе релятивистской квантовой механики:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{ZN}{A} \cdot \frac{2me^4}{n^2c^4} \cdot \frac{1+\alpha}{\alpha^{21}} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \lg(1+2\alpha) \right].$$

Здесь Z — атомный номер (т. е. для воды 10), A — атомный вес (18), e — заряд электрона ($4{,}774 \times 10^{-10}$), m — масса электрона ($9{,}05 \times 10^{-28}$), $c = 3 \times 10^{10}$ и

$$\alpha = \frac{h}{mc^2} = \frac{0{,}0242}{\lambda} = 53.$$

Подстановка этих чисел дает $\frac{\mu}{\rho} = 0{,}0030$ или 0,30 на 1 *м* воды вместо того значения 0,35, к которому мы пришли чисто эмпирически. Эти две цифры можно считать совпадающими с точностью порядка тех ошибок измерений, которые мы имеем в верхней части кривой. Действительно, нужно

---

[1] Dirac. Proc. Roy. Soc., *A*, *111*, 423, 1926.

помнить, что непосредственное наблюдение давало $\mu = 0{,}22$, а значение 0,35 было получено путем вычитания из наблюденной кривой той величины ионизации, которая вызвана более проникающими компонентами, определяемой из нижней части кривой и путем подбора μ, наилучшим образом выражающей величину получаемой при этом разницы. Ошибки в определении длины волны и интенсивности этих более проникающих компонент могли при этом повлиять, хотя и не очень сильно, на величину подбираемого коэффициента μ; поэтому вышеприведенное совпадение можно рассматривать как вполне удовлетворительное. Мы надеемся получить скоро новые данные, позволяющие несколько уточнить эти рассмотрения.

Здесь нужно указать еще на один источник возможной неуверенности в количественных результатах. Формула Дирака дает значение μ для однородного монохроматичного излучения, тогда как наши измерения произведены над лучами, некоторые из которых выродились во вторичные (с половинным значением $h\nu$), третичные $\left(\frac{h\nu}{4}\right)$ и т. д. Это обстоятельство не влияет на предыдущие расчеты только в одном случае, который возможно и имеет у нас место. Мы уже указывали, что после того, как излучение пройдет через достаточное количество материи и придет в равновесие со своими вторичными компонентами, состав пучка, т. е. отношение энергии любого вторичного луча к первичному, остается неизвестным. Как только такое состояние уже достигнуто, коэффициент поглощения смешанного пучка становится очевидно таким же, как и первичного. Только в том случае, когда первоначальный монохроматический пучок возникает при прохождении через материю, его коэффициент поглощения будет несколько меньше, чем у смешанного пучка. Следовательно мы во всем предыдущем пользовались предположением, что вблизи поверхности земли, где были произведены наши измерения, равновесие между первичным и вторичными пучками уже достигнуто. Если бы это было не так, то вводимая таким путем ошибка могла бы достигнуть 30—40 %. Но даже и она не совсем разрушила бы

то сопоставление, на котором основывается наш вывод о построении гелия из водорода в едином акте, при котором возникают космические лучи с $\mu = 0{,}30$. Для ясного понимания того факта, что этот вывод основывается не на одном лишь количественном совпадении, мы приведем под рубрикой (a) говорящие в его пользу экспериментальные факты, а под рубрикой (b) — сопоставляемые с ними теоретические соображения.

a. Наша экспериментальная кривая, вместе с данными полета Милликэна и Боуэна, показывает, что значительная часть ионизации атмосферы, вызванной космическими лучами в области от 1 до 10—12 *м* ниже „верхушки атмосферы", обусловлена одним монохроматическим излучением с показателем поглощения $\mu = 0{,}30$ на 1 *м* воды. Только при больших глубинах в 25—70 *м*, когда почти все это излучение уже поглощено (рис. 2), выходит на сцену другое излучение, примерно в 4 раза более проникающее. Таким образом излучение является совершенно изолированным как по длине волны, так и по интенсивности.

b. С теоретической точки зрения, процесс образования гелия из водорода должен быть наиболее частым процессом во вселенной, во-первых, потому, что он является первичным и самым простым из всех процессов построения атомов, а, во-вторых, потому, что создаваемые им α-частицы (ядра гелия) входят в состав многих других атомов. Теоретическое значение коэффициента поглощения излучения, возникающего при этом процессе, есть как раз $\mu = 0{,}3$ на 1 *м* воды. Далее, между гелием с атомным весом 4 и кислородом (или азотом) с атомным весом почти в 4 раза большим, нет часто встречающихся элементов, так что этот космический луч должен быть совершенно изолированным как со стороны высоких, так и со стороны низких частот и ближайший к нему должен быть луч в 4 раза более проникающий, что и происходит в действительности. Все теоретические факты (2) в точности согласуются с экспериментальными фактами (1). И большая интенсивность этого излучения, и его изолированное положение в спектре, и чи-

сленное значение его коэффициента поглощения говорят в пользу вышеприведенной аргументации, хотя неуверенность в численных значениях еще не полностью устранена.

6. Количественное доказательство построения кислорода из водорода. Сравним теперь проникающие способности, выводимые из нижней части кривой, с энергиями, выделяющимися при образовании других часто встречающихся элементов из водорода.

Открытие Боуэна, что небулий состоит из кислорода и азота [1] в связи с громадными размерами содержащих его туманностей, многие из которых видимы на расстоянии 20° от возбуждающей звезды — эквивалентном громадному числу световых лет — показало, что эти газы встречаются в космосе в громадных количествах. Кроме линий небулия, в туманностях видны только сильные линии водорода и гелия и слабые линии углерода. Поэтому, если судить по составу туманностей, то естественно ожидать найти космические лучи, соответствующие образованию кислорода, азота и углерода из водорода или из гелия.

Энергия, выделяющаяся при образовании кислорода из водорода

$$16 \times 0,\ 00778 = 0,\ 1245\ г \text{ на грамм-атом},$$

коэффициент абсорбции соответствующего излучения, вычисленный по формуле Дирака, ест $\mu = 0{,}074$ на 1 *м* воды. Излучение, возникающее при образовании азота с выделением энергии в 0,108 *г* на грамм-атом, дало бы $\mu = 0{,}086$. Среднее из этих двух чисел есть 0,08, т. е. совпадает с одним из тех коэффицентов, которые мы ввели наряду с $\mu = 0{,}35$ в согласии с экспериментальной кривой.

Образование сравнительно редко встречающегося углерода из водорода, при котором теряется энергия в 0,9933 *г* на грамм-атом, свелось бы лишь к незначительному расширению этой полосы в сторону длинных волн, обнаружить которое в условиях нашего опыта невозможно. По нашему мнению, вышеприведенное количественное совпадение, в связи с тем

[1] Ср. В. Гротриан. УФП, 8, 279, 1928. *Ред.*

фактом, что теоретически полоса с $\mu = 0{,}08$ (которую мы чисто условно будем называть „кислородной полосой") должна стоять совершенно изолированно между гелиевой и кремниевой полосой (см. ниже), ясно приводит к выводу, что образование кислорода (и азота) из водорода в едином акте действительно имеет место.

Другой путь построения кислорода — из соединения 4 атомов гелия — привел бы к потере энергии в размерах $0{,}00054 \times 16 = 0{,}00858$ *г* на грамм-атом. Эта величина почти точно совпадает с вычисленной нами выше максимальной энергией, выделяющейся при радиоактивном превращении; она соответствует излучению, почти целиком абсорбирующемуся в 4 *м* воды. Если бы даже такое излучение существовало, оно не могло бы войти в круг наших наблюдений и могло бы обнаружиться лишь в опыте Милликэна и Боуэна на воздушном шаре. Возможно, что факт расхождения между наблюденным коэффициентом поглощения гелиевой полосы (0,35) и вычисленным (0,30) объясняется как раз присутствием в верхних слоях атмосферы слабого излучения такого рода. Действительно, если исходить из данных, полученных на горных озерах, то значение $\mu = 0{,}30$ будет лучше соответствовать наблюдениям, чем значение $\mu = 0{,}35$, как это видно из кривой рис. 2 (см. ниже). Но коэффициент $\mu = 0{,}30$, как мы уже указывали, дает значение полной ионизации, примерно на 30% меньше, чем то, которое следует из данных Милликэна и Боуэна[1]; именно поэтому, подбирая наилучшие согласующиеся с опытом коэффициенты, мы отбросили величину $\mu = 0{,}30$[2].

Поскольку речь идет о газах, можно говорить только о двух частотах, обусловленных актами построения атомов, дающими космические лучи, наблюдаемые у земной поверхности, так как единственными, очень часто встречающимися — по сравнению с другими элементами — газами являются водород, кислород, азот и гелий. Они-то и дают две действительно наблюдаемые в спекторе космических лучей полосы

[1] Millikan a. Cameron. Phys. Rev., *31*, 921, 1928.

[2] Именно поэтому в наших первоначальных таблицах экспериментальные значения в верхней части кривой лежали выше вычисленных.

с $\mu=0{,}30$ и $\mu=0{,}08$. Таким образом кислородная полоса, хотя и установленная с меньшей достоверностью, чем гелиевая, является существенным подтверждением выдвигаемой нами интерпретации.

7. Количественное доказательство построения кремния из водорода. Переходя, далее, к твердым телам, мы имеем три рода данных для оценки того, насколько часто встречается данный элемент: 1) состав метеоритов, 2) состав земли и 3) спектральный анализ звезд. Все они примерно сводятся к одному и тому же. 95% общей массы метеоритов[1] состоит из четырех элементов: кислорода (54%), магния (13%), кремния (15%) и железа (13%). Точно так же 76% земной коры[2] состоит из трех элементов: кислорода (55%), кремния (16%), алюминия (5%), причем количество каждого другого элемента не превышает 2%. Железо составляет только 1,5% земной коры, но его, вероятно, значительно больше во внутренних слоях земли. Данные спектрального анализа звезд менее определенны, но и они говорят о преобладании вышеперечисленных элементов, а из других предоставляют место главным образом кальцию и калию. Кальций составляет 1,5% земной коры и 1% метеоритов; калий — 2% земной коры и почти совершенно не заметен в метеоритах. Таким образом вслед за кислородом, следующим из часто встречающихся элементов, нужно признать кремний; кроме него могут иметь значение алюминий и магний. Но с точки зрения космических лучей, алюминий и кремний можно считать совершенно идентичными, так как их атомные веса суть соответственно 27 и 28; магний, с атомным весов 24, при образовании из водорода практически дает такой же дефект массы. Иными словами, между кислородом и железом только образование кремния и его ближайших соседей может повести к возникновению космических лучей заметной интенсивности. Возникающую таким путем

---

[1] Harkins. Phil. Mag., *42*, 313 (1921).

[2] Cecilia H. Payne. Stellar Atmospheres, Harv. Univ. Press, 1925, p. 5.

полосу мы будем чисто условно называть кремниевой полосой, поскольку главную роль в ней играет кремний.

Согласно кривой Астона и уравнению Эйнштейна, энергия, выделяющаяся при образовании кремния и водорода, равна

$$28\,(0{,}00778 + 0{,}00050) = 0{,}232 \text{ г на грамм-атом.}$$

Формула Дирака дает для такого излучения коэффициент поглощения $\mu = 0{,}041$ на 1 *м* воды. Эта величина очень близка к эмпирическому коэффициенту 0,04, которым фактически определяется наша кривая от 30 до 70 *м* глубины. Энергия этого излучения соответствует падению электрона в поле 216 000 000 V. Нет никаких сомнений в том, что космические лучи с такой проникающей способностью действительно существуют. Здесь снова можно сказать, что особенно существенным является не количественное совпадение, а самый тот факт, что вслед за кислородной полосой заметной интенсивностью может обладать только полоса кремния; иначе говоря, между кислородом и железом только один кремний (и его ближайшие соседи) может дать полосу космических лучей, которая и действительно наблюдается.

Существует, однако, и еще один путь образования кремния, вызывающий появление лучей, по жесткости сравнимых с космическими лучами. Речь идет о соединении в одном акте семи α-частиц, т. е. ядер гелия, — в атом кремния. При этом выделится энергия в количестве

$$28\,(0{,}00054 + 0{,}00050) = 0{,}029 \text{ г на грамм-атом,}$$

в точности равном количеству энергии, выделяющемуся при соединении 4 атомов водорода для образования гелия. Такое излучение нельзя было бы отделить от гелиевой полосы, но оно должно было бы быть не меньше, чем в семь раз менее интенсивным, так как до его появления минимум 7 раз должен произойти акт образования гелия из водорода. Возможность его появления не влияет, разумеется, сколько-нибудь существенным образом на предыдущие рассмотрения.

8. Образование железа. Итак мы на основе данных об относительном богатстве вселенной элементами, поль-

зуясь кривой Астона и формулами Эйнштейна и Дирака, теоретически обосновали существование всех наблюденных трех полос космических лучей.

Так как ни между кремнием и железом, ни за железом нет часто встречающихся элементов, то заметной интенсивностью может обладать еще только одна полоса космических лучей, с частотой большей, чем у кремниевой полосы,— а именно полоса, соответствующая образованию железа из водорода. Кальций и калий, довольно часто появляющиеся в данных астрофизики, могут дать лишь очень слабый сателлит к кремниевой полосе в сторону бо̀льших частот; тогда как никель и титан, с точки зрения космических лучей, совпадают с железом. Гипотетическая полоса, соответствующая образованию железа из водорода, была бы связана с потерей энергии в размерах

$$56\,(0{,}00778 + 0{,}00080) = 0{,}48\ г \text{ на грамм-атом}$$

и обладала бы коэффициентом абсорбции $\mu = 0{,}019$. Существование такого излучения можно обнаружить только путем тщательных измерений в нижней части кривой. Достигнутая нами до сих пор разрешающая способность не позволяет сделать по этому поводу никаких заключений. Однако мы утверждаем, что существование такого излучения не противоречит нашей кривой, и даже, как выяснится из дальнейшего, позволяет несколько лучше согласовать теоретические данные с экспериментальными.

Так же, как и для кремния, для железа существует еще другой путь возникновения, при котором могут образоваться космические лучи, а именно — соединение 14 атомов гелия в один атом железа. При таком процессе освобождается энергия в размере

$$56\,(0{,}00054 + 0{,}00080) = 0{,}075\ г \text{ на грамм-атом.}$$

Получающееся излучение практически совпадает с излучением, возникающим при образовании углерода из водорода. Другими словами, оно должно было бы входить в состав кислородной полосы. У нас нет данных, которые позволяли бы решить вопрос о том, существует ли оно или нет. Далее,

можно было бы представить себе и образование железа из 2 атомов кремния, но в таком акте освободилась бы энергия

$$56\,(0{,}00080 - 0{,}00050) = 0{,}0168\ г \text{ на грамм-атом}$$

и возникло бы излучение, поглощающееся в 8 *м* воды (см. выше). Опыты Милликэна и Боуэна показывают, что если такое излучение и существует, то интенсивность его должна быть слабой. Точно так же образование железа из 4 атомов азота дало бы энергию

$$56\,(0{,}0008 + 0{,}0002) = 0{,}056\ г \text{ на грамм-атом}$$

и вызвало бы излучение, примерно вдвое более проникающее, чем при образовании гелия из водорода. Наша кривая не свидетельствует о существовании такого излучения сколько-нибудь заметной интенсивности.

9. Построение кривой космических лучей. Из предыдущих рассмотрений ясно, что если в первом приближении принять скорость процесса возникновения данного элемента пропорциональной его общему количеству во вселенной, то проблема возникновения космических лучей в громадной степени упрощается благодаря тому факту, что кроме водорода мы имеем только четыре часто встречающихся элемента: гелий, кислород, кремний и железо.

Первые два из них — гелий и кислород — могут быть образованы только одним путем — путем соединения в одном акте требуемого количества водородных атомов, при котором возникают космические лучи. Тот факт, что именно так обстоит дело, доказывается количественным совпадением между наблюденными и вычисленными проникающими способностями.

В случае кремния есть два возможных пути образования: соединение в едином акте 28 атомов водорода или 7 атомов гелия. У нас имеется прямое положительное доказательство того, что первый из этих процессов действительно имеет место, так как соответствующий ему луч действительно обнаруживается нашей кривой. У нас нет положительных доказательств того, что второй процесс не происходит, так как соответствующие ему лучи попали бы в гелиевую полосу — самую интенсивную из всех полос. Но существуют

некоторые косвенные указания, позволяющие заключить, что он менее вероятен, чем первый процесс. В самом деле, опыты Милликэна и Боуэна показывают (см. выше), что образование кислорода из четырех частиц является во всяком случае редким событием; а между тем вряд ли можно думать, что образование кремния из семи частиц происходит более часто.

Что касается последнего из часто встречающихся элементов — железа, то существует много различных возможных способов его образования. Мы, однако, по аналогии с кислородом и кремнием, будем считать, что наиболее вероятным является его образование непосредственно из водорода в едином акте.

Желая построить теоретическим путем полученную кривую космических лучей, мы взяли за исходный пункт те средние пропорции, в которых кислород, кремний (т. е. кремний + алюминий + магний) и железо находятся в метеоритах и в земной коре, а именно 55%, 26% и 7%. Приняв, далее, что эти атомы образуются из водорода именно в таких пропорциях, мы определили с помощью таблиц Гольда относительную интенсивность соответствующих им излучений, после того как эти излучения с $\mu = 0{,}08$, $\mu = 0{,}04$ и $\mu = 0{,}02$ прошли через 30 *м* воды. Таким путем были получены числа O 1,4; Si 2,9; Fe 1,8, которые показывают, что на такой глубине влияние кислорода и железа приблизительно одинаково, а влияние кремния примерно вдвое больше, чем каждого из них. Для дальнейшего построения мы разделим в этих пропорциях общую величину ионизации на глубине 30 *м*, выбрав ее потому, что как раз на этой глубине исчезает гелиевая полоса ($\mu = 0{,}30$). Опыт показывает, что эта ионизация равна 1,79 ионам на 1 *см*³, из которых по 0,45 мы приписали железу и кислороду, а остающуюся часть, примерно вдвое бо́льшую,— кремнию.

Фиксировав таким образом исходный пункт, т. е. значение ионизации в некоторой определенной точке для каждого из этих трех излучений с $\mu = 0{,}08$, $\mu = 0{,}04$ и $\mu = 0{,}02$, мы можем, с помощью таблиц Гольда, построить для каждого из них полную кривую ионизации для всех глубин. Эти результаты приведены в таблице 1 и графически пока-

ТАБЛИЦА I.

Глубина	Железо =0,02	Кремний 0,04	Кислород 0,08	Гелий 0,30	Полная сумма	Эксп. кривая
70	0,13	0,10	0,015	—	0,245	0,16
60	0,18	0,17	0,03	—	0,38	0,24
50	0,24	0,28	0,07	—	0,59	0,44
40	0,32	0,17	0,19	—	0,98	0,85
30	0,45	0,84	0,50	—	1,79	1,79
20	0,64	1,52	1,42	0,12	3,70	3,95
15	0,83	2,09	2,46	0,65	6,03	6,24
12	0,89	2,56	3,50	1,90	8,85	8,60
10	0,96	2,94	4,46	3,84	12,20	12,20
9	1,01	3,17	5,06	5,62	11,86	16,05
7	1,10	3,69	6,55	12,18	23,52	—
5	1,23	4,34	8,64	27,6	41,81	—
3	1,37	5,24	11,75	64,4	82,76	—
2	1,16	5,75	13,9	105,1	126,21	192,0

заны на рис. 2. На рис. 2 площадь между горизонтальной прямой и первой кривой представляет собою полную ионизацию, вызванную образованием железа, площадь между

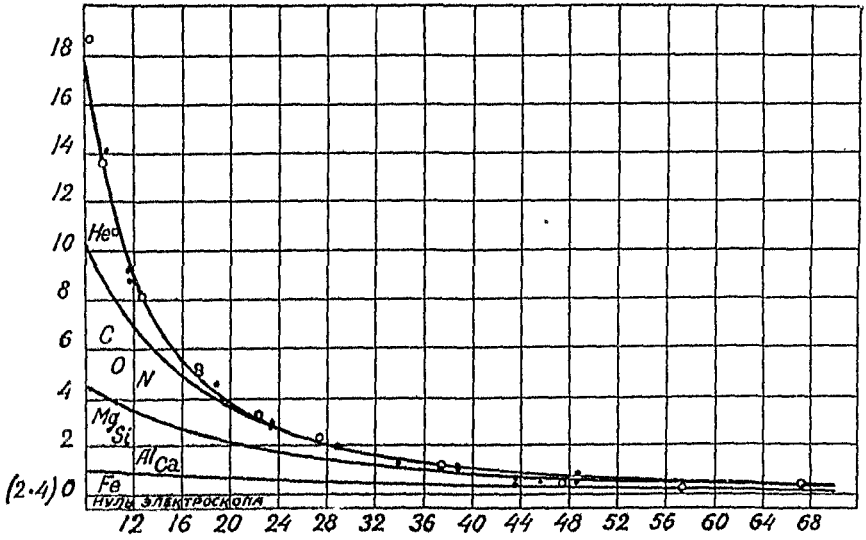

Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой, построенной по четырем коэффициентам абсорбции. Абсциссы — глубины; ординаты — ионизация в ионах на *см*³ в *сек*. Точками обозначены наблюдения на озере Арроухид; кружками — наблюдения на озере Джем.

кривой железа и следующей кривой — ионизацию, вызванную образованием кремния, и, наконец, площадь между кривой кремния и следующей кривой — ионизацию, вызванную образованием кислорода. В качестве исходного пункта для гелия мы взяли разность между наблюденной ординатой при 10 *м* и ординатой этой последней кривой в той же точке и затем по таблицам Гольда вычислили значение ионизации на всех глубинах, вызванное образованием гелия. Полная величина этой ионизации выражается площадью, заключенной между двумя верхними кривыми. Из чертежа видно, что построенная таким путем теоретическая кривая довольно удовлетворительно накладывается на наблюденные точки. Разумеется, этой синтетической кривой не нужно придавать особого значения, поскольку среднее содержание элементов в метеоритах и в земной коре еще не настолько хорошо известно, чтобы служить мерой быстроты их образования. Все же и кривая и таблица в известной мере существенны, поскольку они показывают, что для построения наблюденной кривой космических лучей достаточно 4 элементов: гелия, кислорода, кремния и железа; они наглядно рисуют ход зависимости ионизации, вызванной каждым из этих 4 элементов от глубины (например, из них видно, что полная ионизация, вызванная образованием железа, настолько мала, что может быть без заметной ошибки совсем отброшена, тогда как 80 % ионизации в верхних слоях обусловлены гелиевой полосой); они дают некоторое косвенное указание на возможность образования железа из водорода, так как наиболее точно определенные замечательные экспериментальные точки вблизи 12 *м* лучше укладываются на кривую при добавлении коэффициента 0,02, чем при одних только чисто эмпирических коэффициентах[1].

10. Термодинамическая и кинетическая точки зрения на происхождение космических лучей. Все наши рассуждения носили до сих пор чисто термодинами-

[1] В таблице IV в Phys. Rev., *31*, 929, 1928 для одной точки (при 12 *м*) расхождение между вычисленными и наблюденными данными едва укладывается в границы ошибок опыта. Это обстоятельство устраняется при введении кривой с $\mu = 0{,}02$.

ческий характер. Мы не занимались механизмом построения атомов, а ограничились лишь подбором тех атомных превращений, которые подходят для нашей цели при условии справедливости основных энергетических соотношений. Хотя такой метод исследования физика всегда считала наиболее достоверным, мы не можем игнорировать и кинетическую сторону вопроса.

На первый взгляд она представляет большие трудности. Действительно, мы, во-первых, приняли, что положительные электроны могут собраться в одном месте, несмотря на силы взаимного отталкивания, и после присоединения определенного количества отрицательных электронов (которое для легких элементов не больше половины числа положительных) превратиться в новое ядро с положительным зарядом от 2 до 92. Между тем мы имеем ясные доказательства справедливости закона обратных квадратов вплоть до расстояния порядка 10^{-12} *см*. Введение собственного вращения электрона, которое делает его магнитным диполем, притягивающим диполь противоположного знака с силой обратно пропорциональной кубу расстояния, может помочь нам в описании механизма связывания двух положительных электронов одним отрицательным — как это происходит, например, в атоме гелия — и в объяснении того факта, что при образовании гелия из водорода энергия не поглощается, а теряется, но и при нем остается в силе необходимость затратить работу для того, чтобы сблизить положительные заряды до расстояний внутриядерного порядка, на которых могут начать действовать магнитные силы. Величина этой работы настолько громадна, что ни при одной из известных нам температур не может возникнуть такая кинетическая энергия, обладающий которой протон мог бы приблизиться к другому протону на расстояние внутриядерного порядка. В самом деле, при самой высокой из температур, царящих внутри звезд — т. е. при 40 000 000° С — максимальной энергией в спектре черного излучения обладает длина волны в 1 Å, которая не только не может сблизить между собой протоны на расстояние 10^{-13} *см*, но и оторвать *K*-электроны от тяжелых атомов, так как для этого требуется волна в 0,2—0,7 Å. Таким

образом высокие температуры не могут помочь нам разрешить проблему образования атомных ядер. Вероятнее всего они даже противодействуют этому образованию.

Второе затруднение кинетики построения атомов заключается в том, чтобы объяснить с точки зрения вероятности возможность встречи 4 протонов и 2 электронов в одном месте и в условиях, способных повлечь образование атома гелия. Разумеется, эта трудность еще более возрастает при переходе к кислороду, кремнию и железу.

Для выхода из первого затруднения мы предлагаем — о чем будет еще подробно итти речь ниже — считать, что образование ядра есть такое явление, для которого особенно благоприятным, по неизвестным нам причинам, являются неисследованные еще условия низких температур и плотностей, существующие в межзвездном пространстве.

Возможный путь выхода из второго затруднения заключается в следующем. Не затрагивая пока вопроса о том, как возникают электроны и протоны — путем ли конденсации излучения или иначе — мы можем во всяком случае утверждать, что они существуют в пространстве в большом количестве. Под влиянием взаимного притяжения один из электронов начинает приближаться к протону посредством квантовых перескоков, при которых возникает спектр атомного водорода, часто встречающийся в спектре звезд и туманностей. При этом даже когда электрон достигнет самой ближайшей к ядру квантовой орбиты, общий дефект массы, вызванный его присутствием, будет незначителен. Далее мы можем себе представить, что этот нормальный атомный водород способен присоединить к себе еще один протон, причем получается ионизированная молекула водорода, являющаяся — по данным спектрографии положительных лучей — устойчивой системой. До сих пор протоны и электроны были недостаточно близки друг к другу, чтобы вызвать заметный дефект массы. Допустим теперь, что две такие ионизированные водородные системы сталкиваются друг с другом. Естественно будет принять, что при обычных условиях это столкновение будет протекать согласно общепринятым законам кинетической теории газов. Но представим себе теперь, что по исте-

чении долгого, долгого времени условия столкновения, управляемые неизвестными пока законами вероятности, окажутся как раз таковы, что 4 протона и 2 электрона соединятся, образовав ядро гелия. В этом случае, почти вся потеря массы произойдет в самый момент столкновения, так что величина излученной энергии будет попрежнему равна 4(0,00778—0,00054); но мы при этом избежим затруднений, связанных с вероятностью встречи в одном месте 6 электронов (4 положительных и 2 отрицательных). Процесс их собирания шел шаг за шагом, но само образование ядра произошло в одно мгновение. Эти рассмотрения можно обобщить на кислород, кремний и железо. Возможно, что это скопление электронов, предшествующее образованию ядер, облегчается той низкой температурой, которой обладает межзвездное пространство. Другими словами, энергия толчков может препятствовать тому скоплению электронов, которое, согласно только что сказанному, должно предшествовать образованию ядер. Интересно было бы проследить, не проявляет ли водород в лабораторной обстановке при температуре жидкого гелия стремления превратиться в гелий.

Вообще говоря, кинетика построения атомов должна лишь не на много отличаться от кинетики образования комплексных молекул и кристаллических структур. В этом последнем случае различие велико только, если атомы в кристалле занимают свои места постепенно; если же бóльшая часть их делает это сразу, то обе проблемы по существу во многом схожи друг с другом. Заметим, что построение кристаллов облегчается не высокой, а низкой температурой, а это обстоятельство, как мы увидим ниже, является по всей вероятности характерным для процесса построения атомов.

11. Место возникновения космических лучей. В настоящее время все наблюдатели пришли к выводу, что если эффект направления в космических лучах и существует, то он во всяком случае невелик. Мы совсем не обнаружили наличия такого эффекта, вопреки результатам Кольгер-

стера[1] и Бюттнера[2]. Во всяком случае можно сказать, что космические лучи падают на землю почти одинаково по всем направлениям. Это означает, что они возникают или 1) в межзвездных и межпланетных пространствах, в частности в туманностях, или 2) в звездах, более или менее правильно расположенных на небесном своде. Существуют только эти две альтернативы. В обеих этих областях материя существует в пока неисследованных условиях. Вся история физики за последние 30 лет позволяет нам считаться с возможностью, что в этом новом поле наблюдения материя ведет себя неизвестным нам и неожиданным образом.

Из двух вышеуказанных альтернатив мы считаем возможным „с известной долей уверенности" отбросить вторую и обосновать первую на основе следующих соображений.

I. Если присутствие материи в большом количестве и при высокой температуре способствует тем атомным процессам, при которых возникают космические лучи, то нужно ожидать, что солнце, благодаря своей близости, посылает земле гораздо бо́льшее количество этих лучей, чем всякая другая звезда. Между тем все наблюдатели согласны в том, что интенсивность космических лучей в полдень и в полночь одинакова[3]. Это может означать только то, что условия, существующие около солнца и в нем самом, — а возможно, что и условия и в остальных звездах — не благоприятствуют тем атомным процессам, при которых возникают космические лучи.

Отсюда, так как лучи идут к нам постоянно, днем и ночью, и почти одинаково по всем направлениям — согласно некоторым наблюдателям с точностью порядка точности наших измерений — мы почти неизбежно приходим к выводу, что этим атомным процессам благоприятствуют условия, существующие в межзвездном пространстве. Если же, по мере перехода от какой-нибудь точки межзвездного пространства к центру звезды, благоприятные условия для построения

---

[1] Kolhörster, Sitz. Ber. d. Pr. Akad., *34*, 366, 1923.
[2] Büttner, ZS. f. Geophysik, *21*, 87, 1926; *21*, 291, 1926.
[3] R Millikan a. Cameron. Phys. Rev., *31*, 929, 1928.

атомов исчезают, как только мы из внешнего пространства доходим до поверхности звезды, то совершенно невозможно себе представить, что они снова появятся на пути от поверхности к центру, так как физические условия здесь будут все время изменяться в одном направлении. Таким образом из предыдущего мы можем заключить, что звезды не только не являются источниками космических лучей, но что, вероятно, основные процессы образования атомов совсем не имеют места в звездах.

II. К такому выводу можно притти и совсем с другой точки зрения — исходя из полученных нами данных о коэффициентах поглощения и полной энергии космических лучей.

Самые жесткие из наблюденных нами лучей полностью — т. е. на 98 % своей первоначальной интенсивности — поглощаются в 70 *м* воды. Это означает, что даже если в звездах происходят построения атомов, то возникающие при этом космические лучи не могут выйти наружу и превращаются в тепло [1], за исключением тех лучей, которые возникают в самых внешних слоях звезды, эквивалентных по своей поглощательной способности, примерно, 100 *м* воды.

Между тем мы нашли, что энергия, приносимая в земную атмосферу космическими лучами, равна почти 0,1 полной энергии, попадающей на землю от всех звезд, кроме солнца [2]. Этот факт означает, что если бы космические лучи возникали в звездах, интенсивность их в месте возникновения не превышала бы больше чем в 10 раз интенсивности, наблюденной в земной атмосфере, так как эти лучи, поглощаясь в звездах, превращались бы там в тепло и обусловливали бы от звезд бо́льший поток энергии, чем тот, который наблюдается в действительности. Другими словами, если искать источник космических лучей в звездах, то из наших измерений их коэффициентов поглощения и полной энергии

---

[1] Напомним, что, как мы уже показали в Phys., Rev. *28*, 866, 1926, лучи такого рода при переходе через материю превращаются в тепло без всякого изменения частоты или коэффициента абсорбции в остальном пучке.

[2] Millican a. Cameron. Phys. Rev., *31*, 928, 1928.

следует, что общий поток тепла от звезд обусловливается только процессом образования атомов, происходящим в их самых внешних слоях, по поглощательной способности эквивалентных 100 *м* воды, внутри же звезд не происходит ни построения атомов, ни других процессов, способных поставлять тепло.

Но считать, что атомы могут создаваться только у поверхности звезды и на глубине 100 *м*, а потом это вдруг внезапно делается невозможным, явно абсурдно. Итак мы снова приходим к тому выводу, на который нас уже навело отсутствие космического излучения в солнце, что наблюденные космические лучи возникают вовсе не в звездах, а под влиянием как раз противоположных условий, существующих в межзвездном пространстве.

Эти рассуждения с двух совершенно различных точек зрения приводят к заключению, что поток тепла, идущий от звезд, имеет своим источником нечто совершенно отличное от тех процессов построения атомов, в которых возникают космические лучи. Джинс[1] и Эддингтон[2], исходя из других соображений, базирующихся на продолжительности жизни звезд, уже неоднократно указывали на необходимость найти для этого потока тепла источник более интенсивный, чем процесс построения атомов. Теперь мы можем пойти дальше и сказать, что построение атомов совсем не происходит в звездах, или не происходит по крайней мере в таком размере, чтобы звезды могли испускать большое количество космических лучей, так как если бы это было так, общая отдача энергии звездами была бы больше, чем в действительности.

Известно, что Эддингтон и Джинс нашли такой источник звездного тепла не в процессе построения атомов, а в процессе их уничтожения, который, как они предполагают, постоянно происходит внутри звезд. В этом процессе протоны все время превращают всю свою массу

---

[1] J. H. Jeans. Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics. Cambridge 1919, p. 286.

[2] A. S. Eddington. The Internal Gonstitution of the Stars. Cambridge 1926, chap. XI.

в энергию, согласно требованию уравнения Эйнштейна. Как уже указывалось выше, мы тщетно искали среди космических лучей луч, соответствующий этому акту. Напомним, что дефект массы при образовании одного грамма-атома кремния из водорода — а при нем возникает самый жесткий из наблюденных космических лучей, так как лучи железа еще в известной мере гипотетичны — равен 0,23 *г*. Согласно уравнению Эйнштейна, полное уничтожение массы водорода вызвало бы появление луча, примерно в 4 раза (точнее в 1,00778:0,23 раза) более проникающего, чем этот луч. Отсутствие излучения такой частоты вовсе не является, конечно, аргументом против того, что такой процесс действительно происходит внутри звезд, где и температура и плотность имеют громадные значения. Невозможность обнаружить это излучение показывает скорее, что если этот процесс действительно происходит — как думают Эддингтон и Джинс — то он происходит именно внутри звезд, где возникающее излучение скрыто от нас непроницаемым экраном материи — экраном, превращающим всю энергию луча, прежде чем он выйдет, в тепло. Если бы космические лучи возникали в звездах, они были бы точно так же скрыты от нас.

С другой стороны, тот факт, что наряду с только что рассмотренным процессом уничтожения атомов происходит и процесс возникновения атомов, который, как показывают наши опыты, идет вне звезд и обладает энергией такого же порядка величины, как и энергия, излучаемая звездами, является поистине замечательным. Действительно, сопоставляя его с рассуждениями Эддингтона, мы сразу получаем следующий неполный цикл процессов, экспериментальные свидетельства о каждом из которых даны в скобках:

1) в межзвездном пространстве существуют в большом количестве электроны и протоны (данные спектроскопа);

2) эти электроны, под влиянием условий, царящих в межзвездном пространстве, т. е. низкой температуры и разрежения материи, конденсируются в атомы (данные космических лучей);

3) эти атомы затем, под влиянием сил тяготения, скопляются в звезды (данные телескопа);

4) во внутренности звезд, под влиянием громадных температур, плотностей и давлений, какой-нибудь случайный протон, возможно принадлежавший ядру тяжелого атома, превращает всю свою массу в эфирный импульс энергии, который превращается в тепло, поддерживает температуру звезды и излучаемый ею поток энергии (данные продолжительности жизни звезд — Эддингтон — Джинс).

Все предыдущее основано на базе непосредственного эксперимента. Однако открытие второго элемента этого неоконченного цикла, а именно того, что запас протонов и электронов постоянно расходуется на образование атомов, сигналом рождения которых являются космические лучи, сразу же ставит вопрос о том, как может этот процесс длиться целыми эпохами — иначе говоря, почему все основные кирпичи материи уже давно не исчерпаны? И единственное, что можно ответить на этот вопрос — это дополнить цикл и принять, что запас этих кирпичей постоянно возобновляется за счет конденсации излучения в протоны и электроны, идущей по пока совершенно неизвестному механизму.

Такой подход является новой точкой зрения на заключение, часть которого по крайней мере была известна давно. Действительно, само уравнение Эйнштейна, допускающее превращение массы в лучистую энергию, требует существования и обратного процесса, если только не отказаться от общепринятой формы второго принципа термодинамики. Другими словами, с чисто термодинамической точки зрения, равновесие в замкнутой системе, содержащей излучение и материю, может наступить только, если превращение массы в лучистую энергию является обратимым процессом. Попытка разработать термодинамику на основе цикла, содержащего этот процесс, была недавно сделана Штерном[1], Тольманом[2] и Цвикки[3].

---

[1] Stern ZS. f. Elektroch., *31*, 448 (1925).
[2] Tolman. Proc. Nat. Acad., *14*, 268, 348, 353 (1928).
[3] Zwicky. Proc. Nat. Acad., июль 1928 г.

Но мы в предыдущих рассуждениях пошли дальше, чем они. Действительно, одно только предположение об обратимости вышеуказанного процесса само по себе недостаточно для того, чтобы избежать „тепловой смерти“, т. е. постепенного уничтожения всей энергии, могущей быть использованной. Сущность второго принципа заключается в утверждении, что изолированная система стремится к состоянию с постоянной температурой, характеризуемому законом черного излучения для распределения лучистой энергии и скоростей молекул газа. Простое допущение о том, что лучистая энергия может превращаться в атомы, ни в какой мере не изменяет следствий второго начала, поскольку атомы оказываются наделенными кинетическими энергиями, соответствующими температуре того излучения, из которого они возникли, а дело должно в среднем обстоять именно так — если исходить из второго принципа — так как иначе в изолированной системе данной температуры возникла бы разность температур. Действительно, с эйнштейновской точки зрения, излучение по самой своей природе корпускулярно.

С другой стороны, если рассматривать вселенную как замкнутую систему, то единственным путем для избежания „тепловой смерти“ является предположение, что после того, как потенциальная энергия превращается в тепло, она может где-то каким-то образом снова целиком принять свою потенциальную форму; в частности, что кинетическая энергия световых квантов может быть целиком превращена в потенциальную энергию статически притягивающих друг друга систем. В этом и состоит сущность сделанной нами выше гипотезы, что только при условиях температуры и давления, царящих в межзвездном пространстве, лучистая энергия превращается в протоны и электроны, которые затем сближаются под влиянием взаимного притяжения, скопляются в более тяжелые атомы и путем постоянных взаимных столкновений этих атомов снова превращают свою потенциальную энергию в тепло, образуя в пространстве новые „горячие массы“ (звезды). Эта гипотеза противоречит второму принципу термодинамики, примененному для всей вселенной, причем к

этому противоречию нас привели наблюденные свойства космических лучей. С точки зрения земных явлений обычного масштаба, к которым он успешно применялся до сих пор, второй принцип остается правильным. Существенно новый элемент, который мы внесли в данные эксперимента, заключается в том, что процесс образования атомов происходит не в звездах, т. е. не в тех частях вселенной, где материя обладает большими плотностями и температурами, а исключительно в межзвездных пространствах, где и плотность и температура равны нулю. Наш непосредственный опыт не относится, правда, к образованию легчайшего из элементов — водорода — из лучистой энергии, но включение этого процесса в ряд других „стремительных" процессов, происходящих только в межзвездном пространстве, является естественным расширением наших наблюдений, так как нужно ожидать, что водород создается там же, где и те элементы, для которых он служит строительным материалом. Делая это обобщение, мы отрицаем обратимость процесса превращения материи в излучение при обычных температурах и давлениях. Вот почему наши выводы отличны от выводов Штерна и Тольмана и почему мы можем рассматривать вселенную как находящуюся в равновесном состоянии, хотя и не удовлетворяющем условию микроскопической обратимости.

В известном формальном смысле, наше допущение можно не считать нарушением второго принципа, так как он в формулировке Карно гласит: коэффициент полезного действия $(T_1-T_2)/T_1$, т. е. действительно тепло целиком превращается в работу, когда T_2 есть абсолютный нуль. Несмотря на это, мы своим допущением отрицаем применимость обычных термодинамических представлений к космическим процессам. Нужно, впрочем, отметить, что сомнения в применимости этих представлений к космосу, как целому, высказывались неоднократно. Наша гипотеза вряд ли является более радикальной, чем гипотеза Эйнштейна в 1905 г., и ценность ее не может быть отвергнута до тех пор, пока мы не получим сведений о поведении материи в межзвездном пространстве. Она представляется нам наименее радикальной из всех трех возможных гипотез, основывающихся на справедливости

уравнения Эйнштейна $Mc^2 = E$. Эти три гипотезы заключаются в следующем:

1. Первая гипотеза — Джинса и др. — заключается в том, что электроны, а следовательно и атомы и молекулы, превращаются в лучистую энергию, причем этот процесс никаким путем не обратим. Недавнее высказывание Джинса гласит [1]: „Таким образом и наблюдения, и теория приводят к тому выводу, что вселенная растворяется в излучении. Наше положение сходно с положением белых медведей, находящихся на айсберге, который оторвался от общей массы льдов, окружающих полюс, и постепенно тает при переходе к экваториальным широтам, стремясь к полному исчезновению".

Это — старая гипотеза „тепловой смерти". Она не противоречит наблюдаемым фактам и до работы Эйнштейна считалась неизбежным следствием второго принципа, если только считать вселенную за замкнутую систему. Наука, однако, всегда возражала против такой незаконной экстраполяции нашего ограниченного земного опыта. После открытия Эйнштейна, эта гипотеза встала еще перед тем затруднением, что она вводит в термодинамику один единственный процесс, неудовлетворяющий условию микроскопической обратимости, требуемой современным толкованием второго принципа.

2. Вторая возможная гипотеза — Штерна, Тольмана и Цвикки — говорит, что вышеупомянутые процессы повсюду обратимы. Эта гипотеза оставляет в силе второй принцип, в том числе и микроскопическую обратимость, разрушаемую гипотезой Джинса, но, как было показано выше, она не избегает „тепловой смерти" и не подтверждается тем фактом, что процесс построения атомов, при которых возникают космические лучи, происходит не везде — например не в звездах, — а исключительно лишь в глубинах межзвездных пространств.

3. Третья гипотеза, представленная здесь, столь же радикально, как и первая, противоречит микроскопической обра-

---

[1] J. H. Jeans. Nature *121*, 467, 1928.

тимости, но зато позволяет — в противоположность (1) и (2) — избежать „тепловой смерти“. Точно так же она утверждает столь же решительно, как и вторая гипотеза, что лучистая энергия может превращаться в атомы, но лучше согласуется с данными космических лучей, говорящими, что процессы создания атомов происходят только в межзвездном пространстве.