

ИЗОТОП ВОДОРОДА С МАССОЙ 3

В. И. Черняев, Ленинград

В 1934 г. были опубликованы опытные данные, на основании которых делался вывод о существовании изотопа водорода с массой 3 в естественных источниках¹.

Это утверждение в основном базировалось на опытах двух групп авторов. Во-первых, Тьюв, Хавштэд и Даал², как будто, обнаружили в пучке ионов, получаемом из 980/0 тяжелого водорода, некоторое количество частиц с массой 3, которые авторы отождествили с ядром изотопа ${}^3_1\text{H}$, а во-вторых, Лозиер, Смит и Бликней³ при помощи масспектрографа, как будто бы, смогли обнаружить наличие этого изотопа в порции почти чистого дейтерия (тяжелого изотопа водорода с массой 2). В настоящее время, однако, результаты этих опытов следует поставить под сомнение. Опыты Бликнея с сотрудниками, пытавшихся обнаружить изотоп ${}^3_1\text{H}$ при помощи масспектрографа, сначала⁴ привели к отрицательным результатам, затем, как будто, дали положительный результат^{3,5}, и, наконец, тщательное повторение опытов⁶ привело вновь к заключению о том, что изотоп ${}^3_1\text{H}$, во всяком случае в заметных количествах, в естественном водороде не содержится.

Методика Бликнея, однако, представляет самостоятельный интерес и может дать при ее рациональном использовании очень ценные результаты. Так например, пользуясь этой методикой⁷, автор смог, правда, уже после того как изотоп водорода с массой 2 (дейтерий) был открыт, обнаружить его наличие в естественном водороде, где он присутствует в очень малых количествах, смог оценивать изменения относительных количеств изотопов H и ${}^2\text{D}$ после частичного разделения изотопов и, наконец, при известных предосторожностях, смог с большой точностью определить отношение количеств обоих изотопов в естественном водороде⁸.

Поэтому представляет интерес более подробно ознакомиться с этой методикой; это поможет также уяснить причину противоречивых результатов, полученных с нею.

Как известно, основная идея масспектрографа состоит в том, что пучок положительных ионов проходит в пространстве, подверженном действию электрического и магнитного поля. Под действием этих полей ионы испытывают отклонения от первоначального направления движения, причем очевидно, что эти отклонения будут зависеть как от заряда данного иона, так и от его массы. Ион

с одинаковыми отношениями заряда к массе $\frac{e}{m}$ испытывают одинаковые отклонения. Поэтому они могут быть, например, «сфокусированы» в узкий пучок и, как это делалось в опытах Демистера, выведены из одной части масспектрографа в другую, если на место «фокуса» этих ионов в перегородке, отделяющей две части масспектрографа друг от друга⁹, приходится узкая щель. За щелью располагается ловушка для ионов, связанная с электрометром, которым измеряется ионный ток, а следовательно, и интенсивность ионов (т. е. их число, попадающее за 1 сек. в ловушку). Если в ионном пучке, идущем в масспектрограф, присутствуют разные ионы, то можно, изменяя электрическое поле и сохраняя магнитное поле неизменным, приводить к выходной щели пучки ионов с разными значениями отношения $\frac{e}{m}$. В случае присутствия ионов одного заряда, но разных масс из значений приложенной разности потенциалов непосредственно получаются относительные значения масс ионов. Меняя таким образом поле, следят, при каких его значениях электрометр дает максимальный отброс, и вычисляют отношения масс ионов. Величины максимальных отбросов электрометра (пики) дают возможность судить об относительных интенсивностях разных групп ионов.

Бликней разработал усовершенствованный тип масспектрографа, позволявший работать при чрезвычайно малых давлениях газа, и применил его к определению наличия в обычном водороде дейтерия⁷.

Из работ по масспектрографии было известно, что если получать ионы из газообразного водорода (например, при помощи электронной бомбардировки водорода), то главным образом образуются молекулярные ионы H_2^+ (молекула водорода без одного электрона) и в гораздо меньшем количестве — одноатомные ионы H^+ (протоны) и трехатомные ионы H_3^+ . Все эти ионы обладают единичным положительным зарядом. Так как газообразный водород двухатомен, то очевидно, что ионы H_2^+ образуются при простом электронном ударе. До тех пор пока столкновения с другими частицами, могущие привести, например, к распаду ионов H_2^+ , происходят редко, т. е. при достаточно малых давлениях, количество ионов H_2^+ растет пропорционально давлению. Таким образом интенсивность ионов H_2^+ при малых давлениях может быть выражена в виде линейной функции от давления p :

$$I(H_2^+) = a_1 p. \quad (1)$$

При тех же условиях (малые давления) интенсивность одноатомных ионов в зависимости от давления выразится функцией, обладающей как линейным, так и квадратичным членом:

$$I(H^+) = a_2 p + b_1 p^2, \quad (2)$$

а интенсивность трехатомных ионов выразится квадратичной функцией:

$$I(H_3^+) = b_2 p^2. \quad (3)$$

a_1 , a_2 , b_1 и b_2 — постоянные.

Действительно, ионы H^+ могут образоваться, во-первых, непосредственно из молекул H_2 при одном электронном ударе, когда ударяющий электрон ведет в одном акте к диссоциации молекулы H_2 и ионизации одного из атомов. Количество образованных при таком механизме ионов пропорционально давлению; это дает линейный член формулы (2). С другой стороны, ионы могут образоваться также в две ступени. Сначала ударяющий электрон, отрывая электрон у молекулы H_2 , образует молекулярный ион H_2^+ , который затем распадается под влиянием второго электронного удара или при столкновении с другими частицами на ион H^+ и атом H . Вероятность каждого из этих двух актов пропорциональна давлению, вероятность сложного процесса равна произведению вероятностей элементарных процессов, последовательность которых является сложной; поэтому вероятность последнего (а значит, и интенсивность ионов H^+ , образующихся при таком процессе) пропорциональна квадрату давления. Отсюда получается квадратичный член формулы (2). Вследствие незначительного количества ионов H^+ по сравнению с количеством ионов H_2^+ при этих процессах количество ионов H_2^+ практически не изменяется, а значит, интенсивность ионов H_2^+ остается пропорциональной давлению.

Наконец, в силу того, что не существует устойчивых молекул H_3 в нормальном состоянии, то при одном электронном ударе трехатомные ионы H_3^+ образоваться не могут, и линейный член в формуле (3) должен отсутствовать. Ион H_3^+ может образоваться, если, например, сначала образуется ион H_2^+ , к которому затем в результате столкновения присоединяется атом H . Получается чисто квадратичная зависимость от давления.

Предположим теперь, что вместо чистого водорода мы имеем смесь водорода и дейтерия (изотопа водорода с массой 2), причем количество дейтерия очень мало по сравнению с количеством водорода, как это и имеет место у водорода, получаемого из естественных источников. В таком случае в этой смеси должны присутствовать молекулы H_2 , HD и D_2 . Очевидно, что молекул H_2 будет подавляющее число, HD — незначительное количество, а D_2 — ничтожно малое число. Если подвергнуть эту смесь электронной бомбардировке, то мы получим различные одноатомные, двухатомные и трехатомные ионы, интенсивности которых выражаются (при малых давлениях) соответственно формулами вида (1), (2) и (3). Возможные получающиеся при этом ионы приведены в табл. 1. При этом второй столбец дает природу иона, третий — отношение массы иона к его заряду (если $\frac{m}{e}$ для протона положить равным единице), чем

ТАБЛИЦА 1

№	Ион	$\frac{m}{e}$	$I(p)$	Относительная интенсивность
1	H ⁺	1	$a_1p + b_1p^2$	Слабая
2	H ₂ ⁺	2	a_2p	Очень сильная
3	D ⁺	2	$a_3p + b_3p^2$	Очень слабая
4	H ₃ ⁺	3	b_4p^2	Слабая
5	(HD) ⁺	3	a_{5p}	»
6	D ₂ ⁺	4	a_6p	Крайне слабая
7	(H ₂ D) ⁺	4	b_5p^2	» »
8	(HD ₂) ⁺	5	b_6p^2	» »
9	D ₃ ⁺	6	b_7p^2	» »

определяется поведение иона в масспектрографе, четвертый — характер зависимости интенсивности $I(p)$ данной группы ионов от давления и пятый (качественно) относительную интенсивность ионов, если принять во внимание как отношение общих количеств H и D, так и вероятности образования ионов с разным числом атомов.

В табл. 1 $a_1, a_2, a_3, \dots$ и $b_1, b_2, b_3, \dots$ различные постоянные.

Подчеркнем еще раз, что давление p настолько мало, что вероятность вторичных реакций (которые пропорциональны квадрату давления) значительно меньше вероятности первичных, меняющихся с давлением линейно.

Из столбца $\frac{m}{e}$ мы видим, что в масспектрографе должны получиться шесть групп ионов, $\frac{m}{e}$ для которых равны 1, 2... 6. Однако конфигурации 6, 7, 8, 9 ($\frac{m}{e} = 4, 5, 6$) слишком слабы, чтобы их можно было наблюдать. Очевидно также, что ионы D⁺, обладающие очень малой интенсивностью, целиком маскируются наиболее интенсивной группой ионов H₂⁺, с тем же значением $\frac{m}{e}$. Ионы H₃⁺ и [HD]⁺ обладают сравнимой между собой интенсивностью; так как обе эти группы обладают одним значением $\frac{m}{e}$, то они не разделяются в масспектрографе. Общая их интенсивность в зависимости от давления, очевидно, имеет вид

$$I[\text{H}_3^+ + (\text{HD})^+] = ap + bp^2. \quad (4)$$

С другой стороны, интенсивность ионов массы 2 (здесь, как указывалось, имеют место практически только двухатомные ионы H₂⁺) пропорциональна давлению. Поэтому вместо того чтобы измерять давление, например, в миллиметрах ртутного столба, можно измерять его интенсивностью ионов H₂⁺ или же непосредственно

отбросом электрометра, соответствующим пику ионов массы 2 (т. е. когда в цель ионной ловушки как раз попадает пучок ионов массы 2). Пусть отброс, соответствующий ионам массы 2, равен I_2 , а отброс электрометра, когда на щель приведены ионы массы 3, равен I_3 . В таком случае, переходя от интенсивностей и давлений к соответственным отбросам электрометра, формулу (4) можем представить

$$I_3 = aI_2 + bI_2^2. \quad (5)$$

Бликней⁷ исследовал две порции водорода. Одна из них получена при помощи электролиза обычной воды, а вторая являлась несколько обогащенной дейтерием порцией, приготовленной Брикведде при помощи испарения водорода у тройной точки¹⁰. Результаты исследования зависимости интенсивности ионов от давления при помощи масспектрографа представлены на рис. 1. По оси абсцисс отложены в произвольных единицах давления (или интенсивности I_2 ионов массы 2), а по оси ординат — соответственные интенсивности ионов массы 3 (I_3). Кривая I дает результат для водорода, получаемого электролизом из обычной воды,

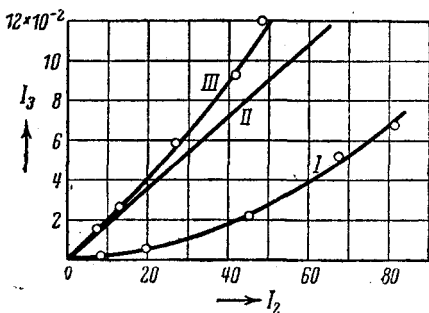


Рис. 1

а кривая III — для водорода, обогащенного Брикведде дейтерием. Как и следовало ожидать, кривая III ближе к прямой, чем кривая I (относительное преобладание двухатомных ионов с массой 3). Далее, оказывается, что обе эти кривые могут быть представлены формулой (5), если пользоваться разными значениями для константы a , но одним и тем же значением константы b . А именно в единицах рис. 1: кривая I

$$I_I = (6,6 I_2 - I_2^2) \cdot 10^{-5}, \quad (6)$$

кривая III

$$I_{III} = (190 I_2 - I_2^2) \cdot 10^{-5}. \quad (7)$$

Разность между кривыми III и I представлена на рис. 1 прямой II и аналитически выражается в виде:

кривая II

$$I_{II} = I_{III} - I_I = 183,4 \cdot 10^{-5} I_2. \quad (8)$$

Так как содержание дейтерия в обеих порциях мало, то очевидно, что обогащение не влияет заметно на число трехатомных ионов массы 3 (H_3^+), что и ведет к неизменности квадратичного

члена в формулах (6) и (7). Поэтому разность между числом изотопических ионов $(\text{HD})^+$ в обеих порциях водорода измеряется формулой (8). Так как I_2 измеряется числом ионов H_2^+ , то очевидно, что угловой коэффициент кривой *II* дает увеличение отношения количеств HD к H_2 , обязанное росту концентрации D

$$\frac{\text{HD}}{\text{H}_2} = 183,4 \cdot 10^{-5} = \frac{1}{546}.$$

Отношение концентрации молекул HD к концентрации молекул H_2 дается коэффициентом a уравнения (5). Для кривой *III*, следовательно, относительная концентрация равна

$$\frac{\text{HD}}{\text{H}_2} = 190 \cdot 10^{-5} = \frac{1}{526}, \quad (9)$$

а для обычного водорода (кривая *I*)

$$\frac{\text{HD}}{\text{H}_2} = 6,6 \cdot 10^{-5} = \frac{1}{15100}. \quad (10)$$

Переходя от молекулярных концентраций к атомным, для порции Брикведде, Бликней получил

$$\frac{\text{H}}{\text{D}} = 1050 \pm 5\% \quad (11)$$

и для электролитического водорода

$$\frac{\text{H}}{\text{D}} = 30\,000 \pm 20\%. \quad (12)$$

Более удобно те же результаты можно получить несколько иным путем. Разделив уравнение (5) на интенсивность I_2 ионов H_2^+ , получим

$$\frac{I_3}{I_2} = a + bI_2. \quad (13)$$

Это уравнение прямой, причем ордината в начале a дает непосредственно отношение количества двухатомных ионов с массой 3

$(\text{HD})^+$ к количеству двухатомных ионов массы 2 (H_2^+), так как линейный член в (5) происходит только от ионов $(\text{HD})^+$. На рис. 2 представлены соответствующие результаты. По оси абсцисс опять-таки отложены интенсивности I_2 (давления), а по оси ординат — отношения интенсивностей $\frac{I_3}{I_2}$. Кривая *I* относится к электролитическому водороду, кривая *III* — к порции Брикведде.

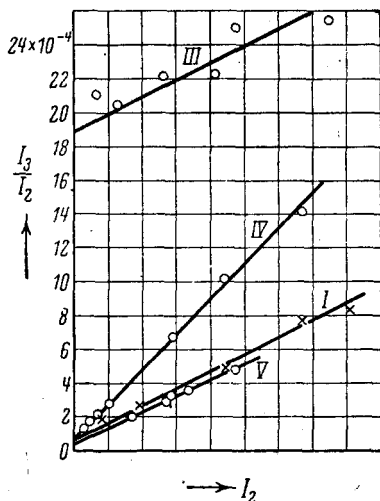


Рис. 2

Число трехатомных ионов H_3^+ зависит не только от давления, но также от употребляющихся в масспектрографе полей и геометрии приборов, которые могут быть более или менее выгодны для образования этих ионов. Коэффициент b в уравнении (5) относится к интенсивности этих трехатомных ионов, и, как видно из уравнения (13), дается наклоном кривых рис. 2. Относительное число изотопических молекул $\frac{\text{HD}}{\text{H}_2}$ (постоянная a) не зависит от этих условий потому, что ионы $(\text{HD})^+$ и H_2^+ двухатомны, механизм их образования один и тот же и изменившиеся внешние условия приводят к пропорциональному друг другу изменению их интенсивности.

Кривая IV на рис. 2 взята при других электрических и магнитных полях для электролитического водорода. Поэтому ее наклон b сильно изменился, а начальная ордината a в пределах ошибок опыта совпадает со значением a для кривой I. Наконец, кривая V относится к порции водорода, несколько обогащенной Юреем при помощи диффузии легким изотопом. Соответственно, ее начальная ордината a меньше, чем для обычного водорода.

Известно, что при электролизе воды преимущественно выделяется легкий изотоп водорода H. Поэтому оценка содержания D в обычном водороде из кривой I (рис. 1 и 2) явно преуменьшена. В дальнейшем, пользуясь тем же методом, Бликней и Гаульд⁸, получив водород из порции обычной воды полным ее разложением при помощи пропускания паров ее через горячее железо в вакууме, смогли установить истинное значение концентрации дейтерия в естественном водороде. Оно оказалось равным $\text{D}:\text{H} = 1:5000$.

Ту же методику можно употребить для того, чтобы установить, присутствует ли изотоп водорода с массой 3 (H_3^+ или T) в естественном водороде. Его количество в водороде, полученном из природных источников, должно быть совершенно незначительным. Однако если при электролизе вода остатка обогащается дейтерием, то она должна и, вероятно, еще в большей степени обогащаться изотопом T. Если взять порцию водорода, обогащенного в высокой степени дейтерием (например 99% содержания или около того), и предположить, кроме изотопов H и D, еще наличие изотопа T, то количество D значительно больше количества H, а количество H в свою очередь должно быть значительно больше количества T. Давление можно измерять интенсивностью двухатомных ионов D_2^+ ,

$\left(\frac{m}{e} = 4\right)$, содержащихся в подавляющем количестве. Ионы $(\text{DT})^+$ обладают отношением $\frac{m}{e} = 5$. Кроме них, тем же отношением $\frac{m}{e}$ обладают трехатомные ионы $(\text{DDH})^+$, а также $(\text{HNT})^+$. Однако последние чрезвычайно редки, потому что атомов H мало, а атомов T имеется совершенно ничтожное количество. Ионы с массой 5 состоят, таким образом, из двухатомных $(\text{DT})^+$ и трехатомных ионов $(\text{DDH})^+$, следовательно попрежнему их интенсивность представится суммой линейной и квадратичной функций давления или интенсив-

ности I_4 ионов D_2^+ . Линейный член дается интенсивностью ионов $(DT)^+$, а квадратичный интенсивностью ионов $(DDH)^+$. Деля уравнение, аналогичное уравнению (5), на давление (интенсивность I_4 ионов D_2^+), получим

$$\frac{I_5}{I_4} = a + bI_4, \quad (14)$$

т. е. прямую, аналогичную прямой рис. 2, начальная ордината которой a дает сразу отношение количеств $\frac{DT}{D_2}$. Изменяя, следовательно, отношения интенсивности ионов с массой 5 к ионам массы 4 при разных давлениях (разных интенсивностях ионов D_2^+), можно попрежнему определить концентрацию $\frac{DT}{D_2}$.

Первая попытка Бликнея и Гаульда⁴ привела в пределах ошибок опыта к значению $a = 0$. Отсюда, учитывая экспериментальные ошибки, авторы пришли к выводу, что содержание Т:Д в их порциях воды (91 и 98% тяжелой) меньше, чем 1:10⁵. Приняв для обычного водорода Д:Н = 5 000, авторы пришли к выводу, что в естественном водороде отношение Т:Н < 1:5·10⁸, если принять, что при электролизе разделения между Д и Т не происходит. В действительности некоторого увеличения концентрации Т при электролизе следует ожидать, поэтому Т:Н должно быть еще меньше в природе.

В дальнейшем Бликней с сотрудниками, сконструировав более чувствительную аппаратуру³ и пользуясь порцией воды с 99% содержанием тяжелой, установили, что начальная ордината a имеет малую, но все же отличную от нуля величину, откуда авторы получили для их порции значение Т:Д = 5:10⁶ или для обычного водорода Т:Н = 1:10⁹ или меньше, если принять во внимание относительное обогащение Т при электролизе. К этому времени уже были сделаны опыты Резерфорда с сотрудниками¹, которые получили искусственно изотопы Т при помощи расщепления ядер, а также, как будто, были получены доказательства и существования Т в естественном состоянии опытами Тьюва, Хавштэда и Даала², уже упоминавшимися. Кроме того, к этому же результату приводят, правда весьма сомнительные, опыты Лэйттаймера и Юнга¹¹, которые пользовались магнитооптическим эффектом Эллисона, до сих пор еще непонятным.

Описанные опыты Бликнея, давшие положительный результат, относились к водороду, полученному из остатка электролитической воды, полученной из первоначального объема, в 225 000 раз большего. Позднее объем был сведен к 1:150 000 000 доли первоначального, т. е. 75 *м* воды были сведены⁵ к 0,5 *см*³. При этом опыт дал то, что интенсивность иона массы 5 менялась пропорционально давлению, т. е. он должен был быть только двухатомным $(DT)^+$ (иными словами, концентрация Н слишком незначительна, чтобы в заметном числе получались трехатомные ионы массы 5).

Концентрация $T:D$ оказалась для этой порции равной $1:10^4$. Учитывая обогащение, которое должен испытывать изотоп T в течение различных этапов электролиза, авторы оценили количество T в обычной воде, как $T:H=7:10^{10}$.

Полученные результаты, естественно, были очень интересны для физиков, занимающихся ядерными процессами. Если бы удалось получить в достаточном количестве изотопы T , то это дало бы им в руки еще один элементарный «снаряд», при помощи которого, наряду с уже имеющимися в распоряжении физиков «снарядами» — протоном, дейтоном, нейтроном и α -частицей, можно было бы получать интересные ядерные реакции, не говоря о том, что исследование самого ядра изотопа T должно было бы привести к существенным результатам. Вследствие сказанного Резерфорд предпринял попытку сильно обогатить воду изотопом T при помощи длительного электролиза. Результаты исследования были опубликованы в 1937 г.¹² По просьбе Резерфорда из 13 000 *т* обычной воды в Норвегии электролитически был получен остаток в 11 *см*³, т. е. объем был уменьшен более чем в 10^9 раз. Эту окончательную порцию исследовал на масспектрографе Астон. При этом, однако, он пользовался не косвенным методом Бликнея, а гораздо более прямым. В масспектрографе Астона пучки различных ионов фокусируются при помощи магнитного и электрического полей на фотографическую пластинку. При этом фокусировка у Астона настолько точна, что ионы с массой 5 (DDH)⁺ и (DT)⁺ вследствие того, что они обладают хотя и очень незначительно, но все же разными массами (массу ядер T можно было определить из ядерных реакций Резерфорда с сотрудниками), должны были дать отдельные, отстоящие друг от друга на 0,5 *мм* линии на фотографической пластинке. Опыты дали линию массы 5, которая, без сомнения, являлась линией трехатомных ионов (DDH)⁺, но никаких следов линии от ионов (DT)⁺, которая должна была получиться в виде спутника линии (DDH)⁺, получено не было. Принимая во внимание время экспозиции и получающуюся интенсивность линии ионов (DDH)⁺, Астон пришел к выводу, что в этой порции тяжелой воды отношение $T:D$ во всяком случае меньше $2:10^5$. Этот результат явно противоречит данным Бликнея с сотрудниками, которые получили отношение $1:10^4$ для порции, разложенной примерно в 10 раз меньше. Резерфорд пытался, кроме того, установить наличие T этой порции тяжелой воды, пользуясь также некоторыми ядерными реакциями, которые должны были дать указание на его присутствие, но опять-таки с отрицательным результатом. На основании этих данных Резерфорд пришел к выводу, что изотоп T , вероятно, неустойчив, чем и можно объяснить ничтожные его количества в природе.

Оценка количества содержания изотопа T в опытах Бликнея, как мы видели, базировалась на том предположении, что трехатомные ионы (DDH)⁺ с массой 5 образуются только при двух последовательных столкновениях (квадратичная зависимость от давления). Однако работа Смита¹³ в 1937 г. показала, что первичный ион,

состоящий из трех атомов водорода, может быть образован при одном электронном ударе из молекул углеводов. Таким образом, если в качестве загрязнений в разряде присутствовали какие-либо углеводы, что имеет место весьма часто (пары вакуумной смазки и т. д.), они при помощи реакции замещения легко меняют свой водород на окружающий их дейтерий и из образованных таким образом «тяжелых» углеводов при одном ударе могут получаться трехатомные ионы $(DDH)^+$, число которых с давлением изменяется линейно, а значит они ошибочно учитываются в качестве двухатомных ионов $(DT)^+$ той же массы 5. Механизм получения при одном электронном ударе трехатомных ионов водорода из углеводов пока не ясен, однако экспериментальный факт, полученный Смитом, повидимому, правилен.

Для проверки результатов прежних опытов, а также попутно правильности заключения Смита Бликней с сотрудниками предприняли новые эксперименты⁶. Авторы пользовались в своей работе диффузионным аппаратом для разделения изотопов, работающим по принципу, предложенному в свое время Герцем¹⁴. Герцем же позднее была предложена более усовершенствованная методика¹⁵, которую использовал Шерр¹⁶ и которая употреблялась в описываемых опытах Шерра, Смита и Бликней⁶. Укажем здесь только на принцип работы аппаратуры Герца. Порция газа впускается в систему, состоящую из ряда диффузионных насосов (у Шерра — из двадцати девяти), и в результате преимущественной диффузии легких составляющих газа либо через стенки пористых трубок, либо через ртутные пары в самих насосах, с непрерывным перекачиванием порций газа насосами из одного места аппаратуры в другое, в конце концов достигается некоторое равновесие, при котором в одном конце аппаратуры устанавливается максимальная концентрация наиболее тяжелых составляющих смеси, а в другом — наиболее легких. Величина этих максимальных концентраций тем больше, чем больше различие в массах тяжелых и легких составляющих газа, а также зависит от рода аппаратуры.

Шерр, Смит и Бликней разлагали наиболее чистую тяжелую воду, которую можно было получить, над горячей вольфрамовой нитью в эвакуированной аппаратуре для разделения изотопов. Прежде чем насосы начали работать, из содержимого была взята небольшая порция, исследовавшаяся обычным образом на масспектрографе и давшая в основном прежние результаты, а именно образование первичного иона с массой 5. Затем аппаратура была пущена в ход, и, по установлении равновесия, из «легкого» и «тяжелого» концов системы были опять взяты порции. Газ, взятый из «легкого» сосуда, содержал приблизительно 10% обычного водорода и 90% дейтерия, а прочие загрязнения были крайне ничтожны, очевидно, вследствие того, что загрязнения, обладавшие гораздо большим молекулярным весом, чем H_2 или D_2 , почти целиком ушли в «тяжелый» сосуд аппаратуры. В масспектрографе эта порция дала пик с массой 5, относительная высота которого исчезала, если экстраполировать результаты к давлению, равному нулю, т. е.

начальная ордината a для него равна нулю, а значит, ионы исключительно трехатомны — $(DDH)^+$. Газ с «тяжелого» конца аппаратуры содержал много загрязнений и давал гораздо более высокий пик с массой 5, хотя, казалось бы, молекулы легкого водорода должны были практически целиком перейти в легкую порцию.

Затем вся тяжелая фракция была удалена из аппаратуры, и оставшийся газ был вновь подвергнут разделению. Так как аппаратура отделяла другие газы от водорода с очень большой эффективностью, то эта процедура практически убирала из прибора все более тяжелые соединения. Подсчеты, подтвержденные измерениями над различными водородными газами, дали, что если бы молекулы массы 5 присутствовали, то в тяжелой порции имело бы место заметное обогащение ими по сравнению с газом, который не подвергался процессу разделения. Анализ этой порции показал, что она была наиболее чистым дейтерием, который когда-либо находился в руках исследователя. Опыты в масспектрографе показали, что отношение количества ионов массы 5 к количеству ионов массы 4 равно $3 \cdot 10^{-7}$, т. е. несравненно меньше, чем в порциях газа, не подвергавшихся процессу диффузии. Так как при указанной последовательности операций преимущественно удалялись тяжелые газы, а количество молекул, содержащих Т в тяжелой порции, должно было бы даже несколько возрасти по сравнению со свежей порцией газа, представляется весьма вероятным, что пик первичных ионов с массой 5 был обязан наличию «тяжелых углеводов». Оценив полное обогащение, которое нужно было ожидать как от электролиза, так и от диффузии, авторы пришли к заключению, что отношение Т в обычном водороде к количеству Н должно быть меньше чем $1:10^{12}$.

В свете этих новых результатов интересно было бы повторить опыты Тьюва, Хавштэда и Даала, чтобы установить, не заключали ли они какой-либо ошибки.

Следует, конечно, отметить, что очень низкий верхний предел содержания в природе изотопа водорода с массой 3, установленный экспериментально, не обязательно приводит к выводу о его неустойчивости, хотя некоторые подсчеты¹⁷ говорят в пользу этого вывода.

В результате разбора описанных опытов можно, таким образом, сказать, что если изотопов водорода с массой 3 и присутствует в естественных источниках, то в таком ничтожном количестве, что выделение его сопряжено с невероятными, если вообще преодолимыми, трудностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Черняев, Природа, **23**, № 9, 68, 1934.
2. M. A. Tuve, L. R. Hafstad a. O. Dahl, Phys. Rev., **45**, 840, 1934.
3. W. Wallace Lozier, Ph. T. Smith a. Walker Bleakney. Phys. Rev., **45**, 655, 1934.
4. W. Bleakney a. A. J. Gould, Phys. Rev., **45**, 281, 1934.

5. P. W. Selwood, H. S. Taylor, W. W. Lozier a. W. Bleakney, J. Am. Chem. Soc., **57**, 780, 1935.
 6. R. Sherr, L. G. Smith a. W. Bleakney, Phys. Rev., **54**, 388, 1938.
 7. W. Bleakney, Phys. Rev., **41**, 32, 1932.
 8. W. Bleakney a. A. Gould, Phys. Rev., **44**, 265, 1933.
 9. Дж. П. Гарнвелл и Дж. Дж. Ливингуд, Экспериментальная атомная физика, ОНТИ, 1936, гл. IV.
 10. В. И. Черняев, Природа, **23**, № 2, 31, 1934; Успехи физич. наук, **14**, 711, 1934.
 11. W. Laytmer a. H. Young, Phys. Rev., **44**, 690, 1933.
 12. E. Rutherford, Nature, **140**, 303, 1937.
 13. L. G. Smith, Phys. Rev., **51**, 263, 1937.
 14. G. Hertz, Z. Physik, **79**, 108, 1932; В. И. Черняев, Успехи физич. наук, **14**, 685, 1934.
 15. G. Hertz, Z. Physik, **91**, 810, 1934.
 16. R. Sherr J. Chem. Phys., **6**, 251, 1938.
 17. T. W. Bonner, Phys. Rev., **53**, 711, 1938.
-