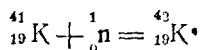


## РАДИОАКТИВНОСТЬ КАЛИЯ\*

Г. Гевеши, Копенгаген

Открытие явления искусственной радиоактивности, состоящего в том, что многие элементы под действием  $\alpha$ -частиц, нейтронов и других быстрых частиц, а в некоторых случаях даже под действием рентгеновых лучей могут быть приведены в радиоактивное состояние, по-новому осветило много дискутировавшуюся проблему о естественной радиоактивности калия. Ферми с сотрудниками<sup>1</sup> нашли, что подвергнутый облучению нейтронами калий наряду с обычными  $\beta$ -лучами испускает более жесткие  $\beta$ -лучи; при этом вызываемая нейтронами искусственная радиоактивность спадает с периодом полураспада 16 час. С другой стороны, автору данной статьи<sup>2</sup> удалось изолировать из облученного нейтронами скандия изотоп калия с массой 42, о котором можно показать, что он идентичен с изотопом, полученным Ферми с сотрудниками из обычного калия. Из этого совпадения следует, что образование изотопа  $^{42}\text{K}$  происходит при захвате нейтрона ядром  $^{41}\text{K}$  в соответствии со следующим уравнением:



$^{41}\text{K}$  является менее распространенным изотопом калия и составляет, как было показано Астоном,  $7\frac{0}{10}$  обычного калия, в то время как  $93\frac{0}{10}$  приходится на долю  $^{39}\text{K}$ . Теперь напрашивается мысль о том<sup>3</sup>, что подобно  $^{41}\text{K}$  ядра  $^{39}\text{K}$  при облучении нейтронами также захватывают их, но возникновение  $^{40}\text{K}$  не может быть доказано радиоактивными измерениями только потому, что возникающий продукт распадается слишком медленно. Доказательство существования искусственной радиоактивности основано на том, что вновь возникающие атомы радиоактивны и распадаются с испусканием отрицательных или положительных электронов достаточно быстро. Так например, превращение  $^{42}\text{K}$  при испускании  $\beta$ -лучей в Са, происходящее по уравнению  ${}_{19}^{42}\text{K} = {}_{20}^{42}\text{Ca} + \beta$ , протекает достаточно быстро для того, чтобы число испускаемых  $\beta$ -частиц легко могло быть установлено счетчиком. Если бы, однако, период распада  $^{42}\text{K}$  вместо 16 час. составлял 16 лет, то существование этого изотопа

\* Naturwiss. 23, 583, 1935; пер. Л. Грошева.

нельзя было бы установить, потому что в этом случае число распадающихся в единицу времени атомов было бы слишком мало, чтобы их можно было обнаружить с помощью счетчика.

Конечно, в рассматриваемом случае трудность можно было исключить тем, что подвергать облучаемый препарат действию нейтронов не в течение 24 час., как это было в вышеразобранных случаях, а в продолжение многих недель. Однако, если речь идет о таких атомах, которые имеют период распада много миллионов лет, как это мы должны принять для  $^{40}\text{K}$ , то в этом случае и длительное облучение нейтронами ничем помочь не может, так как даже самые длительные лабораторные опыты происходят на протяжении исчезающе малого промежутка времени по сравнению с упомянутыми выше огромными периодами. В лабораторных условиях поэтому получить  $^{40}\text{K}$  не удается; иначе обстоит дело в космосе. Ко времени, когда элементы в соответствующих местах мирового пространства подвергались действию нейтронов и подобных им частиц, в смеси основных веществ находились атомы всех сортов, которые теперь мы можем создать в лаборатории искусственно. Однако после прекращения действия названных агентов быстро исчезли все неустойчивые элементы, и только продолжительность жизни  $^{40}\text{K}$  и  $^{86}\text{Rb}$  оказалась достаточной для того, чтобы эти элементы наряду с ураном и торием можно было встретить спустя миллиарды лет. Мы должны поэтому принять, что радиоактивность калия может быть приписана радиоактивному изотопу  $^{40}\text{K}$ , возникшему в период до образования Земли. В дальнейшем мы исследуем, как далеко этот вывод подтверждается нашими знаниями о радиоактивности калия.

#### Вывод из результатов по разделению изотопов

Ниболее непосредственный путь к разрешению вопроса о том, какой изотоп калия является радиоактивным, заключался бы в разделении изотопов калия, например, приспособленным для количественного разделения методом Астона с последующим испытанием на радиоактивность покрытых разделенными изотопами полосок.

Такое полное разделение изотопов калия до сих пор произвести не удалось. Для получения ответа на поставленный вопрос автор совместно с Логstrup произвел несколько лет назад частичное разделение изотопов калия. После большого числа „идеальных“ перегонок<sup>5</sup>, в которых было использовано различие в скоростях испарений изотопов, была получена окончательная фракция, обогащенная  $^{41}\text{K}$  и обедненная  $^{39}\text{K}$ . О степени обогащения мы могли судить по результатам измерения атомного веса, которые позволяют указать, в какой мере произошло обогащение фракции изотопом  $^{41}\text{K}$ . Данные об обогащении фракции радиоактивным изотопом мы получили сравнением радиоактивности обычного и тяжелого калия; при этом пробы сравнивались, например, в виде KCl. Степень обогащения зависит при одних и тех же условиях

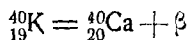
только от разности атомных весов обогащаемого изотопа и  $^{39}\text{K}$ . Если  $^{41}\text{K}$  является радиоактивным изотопом, то радиоактивность тяжелой фракции будет возрастать в той же мере, как и обогащение фракции изотопом  $^{41}\text{K}$ ; если радиоактивный изотоп тяжелее, чем  $^{41}\text{K}$ , то увеличение радиоактивности тяжелой фракции будет больше, чем обогащение ее изотопом  $^{41}\text{K}$ , и, наконец, если бы радиоактивным изотопом являлся  $^{40}\text{K}$ , мы должны были бы получить меньшее возрастание радиоактивности по сравнению с обогащением фракции  $^{41}\text{K}$ . Сравнение радиоактивностей различных проб с достаточной точностью не представляет никаких затруднений. Оно было произведено в лаборатории Гофмана<sup>6</sup> с помощью гофмановского электрометра и в институте в Фрейбурге с помощью счетчика Гейгер — Мюллера и показало<sup>7</sup>, что тяжелая фракция имела активность, увеличенную на 4,4% по сравнению с активностью обычного калия. Определение атомного веса представляет собой значительно более трудную задачу. Однако атомный вес нашей тяжелой фракции определен как в мюнхенской<sup>8</sup>, так и в гарвардской<sup>9</sup> лабораториях, работающих в этой области. Оба определения дали одни и те же значения и именно 39,109. Разность между этим значением и значением атомного веса, принимавшимся раньше для нормального калия (39,104), составляет 0,005 единиц. Если принять это значение за основу расчета, как это сделал раньше автор, то получается увеличение радиоактивности тяжелой фракции, соответствующее обогащению ее изотопом  $^{41}\text{K}$ . Это приводит к заключению о том, что радиоактивным изотопом калия является  $^{41}\text{K}$ . Однако теперь мы знаем, что атомный вес обычного калия<sup>10</sup> заметно отличается от вышеприведенного значения и составляет 39,096. Отсюда следует гораздо большее обогащение для изотопа  $^{41}\text{K}$  (0,013 единиц), чем для радиоактивности, т. е. радиоактивный изотоп отделяется труднее, чем  $^{41}\text{K}$ , и лежит поэтому ближе к  $^{39}\text{K}$ , чем к  $^{41}\text{K}$ . Это дает однозначное доказательство того, что ответственным за радиоактивность калия является изотоп  $^{40}\text{K}$ .

#### Период распада $^{40}\text{K}$

Мы знаем число  $\beta$ -частиц, испускаемых 1 г калия в единицу времени. Из этого числа получается, что половина существующего к какому-нибудь моменту времени калия распадается лишь через  $1,5 \cdot 10^{13}$  лет. При этом предполагается, что все атомы калия раньше или позже будут участвовать в распаде. Если в распаде участвуют лишь атомы  $^{40}\text{K}$ , то вышеупомянутое число  $\beta$ -частиц нужно разделить на концентрацию  $^{40}\text{K}$  в обычном калии. Если бы концентрация  $^{40}\text{K}$  была крайне ничтожна, то активность имела бы очень короткий период полураспада. В этом случае активность калия уже давно исчезла бы. Поэтому период  $^{40}\text{K}$  должен быть значительным. Хотя мы не в состоянии указать его значение, однако мы можем установить границы, в которых он лежит. Из того факта, что ни Астон<sup>11</sup> ни Бейнбридж<sup>12</sup> не могли доказать присутствия в масс-спектре изотопа калия массы 40, следует, что концентрация

$^{40}\text{K}$  во всяком случае меньше  $1/300$ , и, следовательно, период полураспада меньше  $5 \cdot 10^{10}$  лет. К установлению нижней границы приводят нас геохимические соображения. Если бы мы допустили сначала, что период составляет  $6 \cdot 10^7$  лет, тогда содержание  $^{40}\text{K}$  в обычном калии было бы равно  $4 \cdot 10^{-7}$ :1. Это значение относится к настоящему времени. Миллионы лет назад доля  $^{40}\text{K}$  была бы много больше, а миллиард лет назад, когда уже существовала твердая земная кора, смешанный элемент калий состоял бы, главным образом, из  $^{40}\text{K}$ ; мы имели бы  $^{40}\text{K}$  в 25 раз больше всего количества калия, встречающегося теперь.

Распад  $^{40}\text{K}$  по уравнению



ведет к образованию наиболее распространенного изотопа кальция  $^{40}_{20}\text{Ca}$ , и весь  $^{40}\text{K}$ , который распался на протяжении периода в  $10^9$  лет, должен существовать теперь в земной коре в виде  $^{40}\text{Ca}$ . Такие огромные количества кальция, однако, не обнаружены; концентрация  $^{40}\text{Ca}$  на 1 г земной коре) лишь незначительно превос-

Стр. Строка  
999 14 сверху

Напечатано

Следует читать

999 17

$^{40}_{20}\text{Ca}$

$^{40}\text{Ca}$

коре

кору

радиоактивностью,  $^{40}\text{Ca}$  на был богаче  
роли, которую тепло, выделяемое при распада, много большей  
играло в тепловом балансе земли. Указание о том, что выделяемое новления той  
при распаде калия тепло играет заметную роль, уже было сделано м распада, играло  
Гольмсом и Лаусоном<sup>13</sup>. В настоящее время это тепло, конечно, в распада, играло  
меньше (приблизительно в десятки раз), чем тепло, выделяемое при распада, играло  
лет назад это соотношение было сдвинуто в пользу калия, и если распада, играло  
время полураспада калия должно лежать ближе к нижней, чем распада, играло  
к верхней из вышеуказанных границ, то выделяемое при распада, играло  
 $^{40}\text{K}$  тепло было очень значительно. То же самое имеет место для распада, играло  
интенсивности испускаемого калием  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.

Период распада  $^{40}\text{K}$  и жесткость испускаемого  $\beta$ -излучения

Чем больше энергия испускаемого  $\alpha$ -излучения, тем больше скорость распада элементов, испускающих это излучение. Эта связь энергий  $\alpha$ -частиц с быстротой распада была установлена Гейгером и Нэттолом. Между энергией  $\beta$ -излучения и периодом распада имеется аналогичное соотношение, если производить сравнение энергий верхнего предела непрерывных  $\beta$ -спектров<sup>14</sup>. В  $\beta$ -спектре калия еще заметна компонента энергии  $700\,000\text{ eV}$ <sup>15</sup>, которая

соответствует, как это показывают опыты с другими элементами с  $\beta$ -распадом, очень быстро распадающемуся элементу. Если сравнивать излучение калия с излучением RaE и RaC, то для периода полураспада получается значение равное 25 дням. Однако такой короткий период распада находится в резком противоречии с вышеприведенными соображениями. Недавно Клемперер<sup>16</sup> указал на возможность, позволяющую разъяснить это противоречие. При распаде RaE, RaC и некоторых других радиоактивных элементов разность между спинами ядра распадающегося и вновь возникающего атома составляет  $\pm 1$ <sup>17</sup>. Клемперер установил с достаточной вероятностью, что разность спинов ядер <sup>40</sup>K и <sup>40</sup>Ca существенно больше и составляет около 4 единиц. Большая разница в ядерных спинах распадающегося и образующегося ядра уменьшает вероятность распада, и для того, чтобы учесть это уменьшение, нужно умножить вычисленный период распада 25 дней на 100<sup>4</sup>. Полученный таким путем период, составляющий около 10<sup>7</sup> лет, не противоречит установленным выше границам для периода.

О причинах радиоактивности калия со времени открытия ее Кэмпбеллом в 1907 г. делались различные предположения, из которых необходимо отметить предположение, высказанное Мейтнер<sup>18</sup>. Ее соображения основаны на рассмотрении элементов-изобаров, обладающих при различных атомных номерах одинаковой массой, например <sup>40</sup>Ag и <sup>40</sup>Ca. Изобары отличаются всегда друг от друга по атомному номеру на две единицы, при этом лежащий между ними третий изобар неизвестен и должен являться мало устойчивым элементом. Также в радиоактивных рядах из трех изобаров средний всегда имеет наименьший период распада. На основании этих соображений Мейтнер пришла к заключению, что радиоактивность калия должна быть приписана малоустойчивому и потому радиоактивному элементу <sup>40</sup>K.

## Резюме

Калий и рубидий являются единственными радиоактивными элементами с  $\beta$ -распадом, лежащими за пределами радиоактивных семейств. Объяснение существования таких одиночностоящих элементов с  $\beta$ -распадом встречало до сих пор целый ряд трудностей. После открытия искусственной радиоактивности эти трудности отпадают. Возникающие под действием нейтронов и подобных им частиц новые радиоактивные атомы образуют одиночностоящие элементы, распадающиеся в большинстве случаев с испусканием  $\beta$ -лучей. В периоды, предшествовавшие образованию земли, наряду с многими другими радиоактивными элементами появились также изотоп калия с массой 40 и изотоп рубидия с массой 86; тогда как за время, протекшее с тех пор, первые из названных элементов успели полностью распасться, вторые остались в обнаружимых количествах, которые и являются причиной радиоактивности калия и рубидия.

Наши знания о радиоактивности калия и в особенности результаты частичного разделения изотопов калия находятся с вышеуказанными выводами в наилучшем согласии.

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Amaldi, D'Agostino, Fermi, Pontecorvo, Rasetti & Segré *Ric. Sci.* 2 Dezember 1934.
  2. J. v. Hevesy, *Nature*, 19 Januar 1935.
  3. J. v. Hevesy, l. c.; F. H. Newman u. H. J. Walke, *Nature* 19, Januar 1935, S. 98; J. Hurst, *Nature* 1 June 1935.
  4. J. v. Hevesy u. M. Lögstrup, *Z. anorg. u. allg. Chem.* 171, 1, 1928.
  5. J. Brönsted u. J. v. Hevesy, *Z. physik. Chem.* 124, 22, 1922.
  6. M. Biltz u. H. Ziegert, *Physik. Z.* 29, 197, 1928.
  7. J. v. Hevesy, W. Seith u. M. Pahl, *Z. physik. Chem. Bodensteinfestb.* S. 309, 1931.
  8. J. Höhigsmid u. Joubeau, *Z. anorg. u. allg. Chem.* 163, 93, 1917.
  9. J. P. Baxter a. Ch. M. Alter, *J. Am. Chem. Soc.* 55, 3270, 1933.
  10. O. Hahn, *Atomgewichtsbericht*, 1935.
  11. F. W. Aston, *Mass Spectra and Isotopes*. 2 Изд. стр. 111, 1933.
  12. K. T. Bainbridge, *J. Frank. Inst.* 212, 3 8, 1931.
  13. A. Holmes a. R. W. Lawson, *Nature (Lond.)* 117, 620, 1926.
  14. B. W. Sargent *Proc. Roy. Soc. Lond.* 140, 659, 1933.
  15. Bocciarelli *R. C.* 17, 833, 1933.
  16. O. Klemperer, *Proc. Roy. Soc. Lond.* 148, 646, 1935.
  17. Ср. G. Gamow, *Physik. Z.* 35, 533, 1934.
  18. L. Meitner, *Naturwiss.*, 14, 719, 1926.
-