

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**АЛЬФА-РАДИОАКТИВНОСТЬ  
В ОБЛАСТИ ЯДЕР С 82 НЕЙТРОНАМИ**

У ядер средней массы первой была открыта  $\alpha$ -радиоактивность изотопа Sm<sup>147</sup>. По полуэмпирической формуле масс, исправленной в соответствии с последними измерениями масс средних ядер, можно вычислить приближённо энергию, выделяющуюся при отрыве  $\alpha$ -частицы от ядра. Ещё в работе<sup>1</sup> было таким образом показано, что многие редкоземельные элементы являются  $\alpha$ -радиоактивными, ибо при отрыве  $\alpha$ -частицы должна выделяться небольшая положительная энергия — порядка 2 Мэв. Как известно из теории  $\alpha$ -распада, период полураспада быстро растёт с уменьшением энергии  $\alpha$ -частицы. Энергии  $\alpha$ -распада в 2 Мэв соответствует период  $\alpha$ -распада более 10<sup>16</sup> лет.  $\alpha$ -радиоактивность с таким большим периодом полураспада обнаружить не удаётся.

Из систематики  $\alpha$ -распада тяжёлых ядер<sup>2</sup> следует, что энергия  $\alpha$ -распада растёт с уменьшением числа нейтронов и что у тяжёлых ядер вблизи замкнутой оболочки из 126 нейтронов, именно у ядер с 128 нейтронами, энергия  $\alpha$ -распада достигает максимума. Такого же повышения энергии  $\alpha$ -распада следует ожидать в области редких земель у замкнутой оболочки из 82 нейтронов. Большие энергии  $\alpha$ -распада должны привести и к большим скоростям распада. По аналогии с тяжёлыми ядрами максимума энергии  $\alpha$ -распада в этой области следует ожидать у ядер с 84 нейтронами.

В реферируемых работах<sup>3, 4, 5</sup> приводятся экспериментальные данные об  $\alpha$ -радиоактивных ядрах средней массы, полученные в последние годы.

Два из изотопов средней массы имеют естественную  $\alpha$ -радиоактивность, остальные получены бомбардировкой средних ядер частицами с высокой энергией.

Недолгая бомбардировка протонами с энергией 200 Мэв вольфрама, серебра, тантала, палладия, окиси самария и окиси изотопа теллура Te<sup>122</sup> не привела пока к получению  $\alpha$ -радиоактивных ядер.

В таблице I представлены данные о всех известных в настоящее время  $\alpha$ -радиоактивных ядрах легче свинца.

Ни в одном из ядер средней массы не обнаружено тонкой структуры  $\alpha$ -распада, т. е. все ядра, приведённые в таблице I, испускают  $\alpha$ -частицы только одной энергии. Энергии  $\alpha$ -частиц измерены по анализу величин импульсов пропорциональных счётчиков, кроме данных для Tb<sup>149</sup>, отмеченных <sup>4</sup>. Энергия  $\alpha$ -частицы Tb<sup>149</sup> измерена магнитным спектрографом; стандартом при этом служила энергия  $\alpha$ -частицы Ra<sup>226</sup> с энергией 4,777 Мэв<sup>6</sup>. Погрешности, приведённые со знаками  $\pm$ , являются оценкой их пределов, а не вероятными погрешностями.

## Альфа-радиоактивность у изотопов элементов легче свинца

| Элемент | Порядковый номер Z | Массовое число A | Энергия $\alpha$ -частиц (Мэв) | Измеренный период полураспада | Другие типы превращения | Отношение $\alpha$ -разветвления $\alpha/\alpha_{\text{полный}}$ | Частичный $\alpha$ -полупериод                       | Получен путём реакции  |
|---------|--------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--|--|--|
| Nd      | 60                 | 144              | $1,9 \pm 0,1$                  | $\sim 1,5 \cdot 10^{15}$ г.   | —                       | —  | $\sim 1,5 \cdot 10^{15}$ г. (в пределах множителя 2) | Естественный   |
| Sm      | 62                 | 146              | $2,55 \pm 0,05$                | —                             | —                       | —  | $\sim 5 \cdot 10^7$ г. (оценка)                      | $\text{Nd}^{144} (\alpha, n) 40 \text{ Мэв}$ или<br>$\text{Nd}^{145} (\alpha, 2n) 40 \text{ Мэв}$ или<br>$\text{Nd}^{146} (\alpha, 3n) 40 \text{ Мэв}$ . |
|         |                    | 147              | $2,21 \pm 0,02$                | $1,4 \cdot 10^{11}$ г.        | —                       | —  | $1,4 \cdot 10^{11}$ г.                               | Естественный   |
| Eu      | 63                 | 147              | $2,88 \pm 0,10$                | $24 \pm 2$ д.                 | ЭЗ                      | $\sim 10^{-5}$   | $\sim 6 \cdot 10^8$ г. (в пределах множителя 3)      | $\text{Sm}^{147} (p, n) 8,5 \text{ Мэв}$<br>$\text{Sm}^{147} (d, 2n) 19 \text{ Мэв}$<br>$\text{Sm}^{148} (d, 3n) 19 \text{ Мэв}$                         |
|         |                    | 148              | $3,18 \pm 0,10$                | $> 35$ г.                     | —                       | —  | $\sim 1,4 \cdot 10^2$ г. (в пределах множителя 3)    | $\text{Sm}^{147} (\alpha, 3n) 36 \text{ Мэв}$<br>$\text{Eu}^{151} (p, 4n) 32 \text{ Мэв}$  |
| Gd      | 64                 | 149              | $3,0 \pm 0,15$                 | $9 \pm 1$ д.                  | ЭЗ                      | $\sim 7 \cdot 10^{-6}$   | $\sim 4 \cdot 10^8$ г. (в пределах множителя 3)      | $\text{Sm}^{147} (\alpha, 2n) 30 \text{ Мэв}$  |
|         |                    | 150              | $2,7 \pm 0,15$                 | более 2 г.                    | —                       | —  | —  | $\text{Eu}^{151} (d, 3n) 19 \text{ Мэв}$   |
|         |                    |                  |                                |                               |                         |  |  |  |

| Элемент | Порядковый номер Z | Массовое число A | Энергия $\alpha$ -частиц (Мэв) | Измеренный период полураспада | Другие типы превращения    | Отношение $\alpha$ -разветвления $\alpha$ /полный | Частичный $\alpha$ -полупериод        | Получен путём реакции  |
|---------|--------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|--|
| Tb      | 65                 | 149              | $3,95 \pm 0,04$                | $4,1 \pm 0,2$ ч.              | ЭЗ, возможно нет $\beta^+$ | —   | —                                     | $\text{Eu}^{151} (\alpha, 6n) 60 \text{ Мэв}$  |
|         |                    |                  | $3,95 \pm 0,02^a$              |                               |                            |   |                                       | $\text{Gd} (p, xn) 32-200 \text{ Мэв}$   |
| Dy      | 66                 | 151              | $3,44 \pm 0,10$                | $19 \pm 1$ ч.                 | —                          | —   | —                                     | $\text{Gd} (p, xn) 100 \text{ Мэв}$<br>$\text{Eu}^{151} (\alpha, 4n) 45 \text{ Мэв}$ |
|         |                    | 149—153          | $4,21 \pm 0,06$                | $7 \pm 2$ м.                  | —                          | —   | —                                     | $\text{Tb}^{159} (p, xn) 100 \text{ Мэв}$  |
|         |                    | 149—153          | $4,06 \pm 0,04$                | $19 \pm 4$ м.                 | —                          | —   | —                                     | $\text{Tb}^{159} (p, xn) 100 \text{ Мэв}$  |
| Au      | 79                 | 149—153          | $3,61 \pm 0,08$                | $2,3 \pm 0,2$ ч.              | —                          | —   | —                                     | $\text{Tb}^{159} (p, xn) 100 \text{ Мэв}$  |
|         |                    | 183—187          | $5,07 \pm 0,10$                | $4,3 \pm 0,2$ м.              | ЭЗ, $\beta^+$              | $\alpha/\text{ЭЗ}$ $x$ -лучи $\sim 10^{-4}$       | $\sim 30$ д. (в пределах множителя 4) | $\text{Au}^{197} (d, pxn) 190 \text{ Мэв}$<br>$\text{Pt} (p, xn) 120 \text{ Мэв}$    |
| Hg      | 80                 | <195             | $5,6 \pm 0,1$                  | $0,7 \pm 0,2$                 | —                          | —   | —                                     | $\text{Au}^{197} (d, xn) 190 \text{ Мэв}$  |

Неодим. Предсказанная ранее в <sup>1</sup>  $\alpha$ -радиоактивность естественного изотопа неодима  $\text{Nd}^{144}$  была открыта недавно <sup>5</sup>. Энергия  $\alpha$ -частиц найдена по изучению их следов в фотопластинках, пропитанных раствором соединения неодима с примесью самария. Сравнение следов  $\alpha$ -частиц  $\text{Nd}^{144}$  со следами  $\alpha$ -частиц  $\text{Sm}^{147}$  показало, что энергия  $\alpha$ -частиц  $\text{Nd}^{144}$  равна  $1,9 \pm 0,1$  Мэв. Период полураспада является грубой оценкой.

Самарий. Энергия  $\alpha$ -частиц  $\text{Sm}^{147}$  взята по наиболее точным данным работы <sup>7</sup>; по измерениям импульсов счётчика с аргоном эта энергия равна  $2,18$  Мэв. Но в соответствии с данными работы <sup>9</sup> это значение должно быть исправлено на нелинейность зависимости ионизации аргона от энергии  $\alpha$ -частиц. С этой поправкой энергия  $\alpha$ -частиц  $\text{Sm}^{147}$  будет  $2,21$  Мэв. Период полураспада  $\text{Sm}^{147}$  приведен по таблицам <sup>8</sup>.

Европий. Бомбардировки самария протонами с энергией  $200$  Мэв, длившиеся менее часа, не давали  $\alpha$ -радиоактивности. Только длительные бомбардировки протонами и дейтонами изотопа  $\text{Sm}^{147}$ , дали  $\alpha$ -активность. Принадлежность  $\alpha$ -частиц европию подтверждена химическим отделением европия. Установлено, что все бедные нейтронами изотопы европия с массовыми числами от  $144$  до  $150$ , кроме  $\text{Eu}^{147}$ , не имеют заметной  $\alpha$ -активности.

Гадолиний. Активность с энергией  $\alpha$ -частиц  $3,18$  Мэв получается бомбардировкой окиси самария, обогащённой изотопом  $\text{Sm}^{147}$   $\alpha$ -частицами с энергией  $38$  Мэв. Ту же активность можно получить, бомбардируя окись европия протонами с энергией  $50$  Мэв. Принадлежность этой активности гадолинию подтверждена химическим разделением.

Массовое число определено из порогов реакций, найденных экспериментально. Для реакции  $\text{Sm}^{147}(\alpha, xn)$  он равен  $28-30$  Мэв, и для реакции  $\text{Eu}^{151}(p, up)$  он оказался равным  $\sim 30$  Мэв. Сравнение этих опытных данных с порогом, вычисленным по полуэмпирической формуле для масс при разных  $x$  и  $y$ , приводит к выводу, что  $x = 3$  и  $y = 4$ , и продуктом реакции является  $\text{Gd}^{148}$ .

Оценка периода полураспада произведена по производительности реакции  $\text{Sm}^{147}(\alpha, 3n)$ , полученной из кривой возбуждения сравнением с аналогичной реакцией для  $\text{Bi}^{209}$ .

Принадлежность активностей с энергиями  $\alpha$ -частиц  $3,0$  Мэв и  $2,7$  Мэв гадолинию подтверждена химическим разделением. Массовые числа установлены предположительно при помощи полуэмпирических соотношений по энергиям  $\alpha$ -распада.

Семичасовая  $\alpha$ -активность, упоминаемая в сообщении <sup>10</sup> и приписанная гадолинию, не принадлежит ему.

Тербий. Принадлежность активности с энергией  $\alpha$ -частиц  $3,95$  Мэв тербию подтверждена химическим разделением. Массовое число установлено масс-спектрографически. Нижний предел отношения  $\alpha$ -активности к электронному захвату —  $1\%$ .

Принадлежность активности с энергией  $\alpha$ -частиц  $3,45$  Мэв тербию тоже подтверждена химически. Массовое число установлено предположительно по функции возбуждения для реакции  $\text{Eu}(\alpha, xn)$ , что приводит к вероятноному продукту реакции  $\text{Tb}^{151}$  и возможному  $\text{Tb}^{150}$ . Распад преимущественно с захватом электрона, с нижним пределом отношения  $\alpha$ -распад/электронный захват  $> 4 \cdot 10^{-6}$ . Это значение, возможно, занижено.

Диспрозий. Приближённый теоретический расчёт, аналогичный расчёту, приведённому в книге <sup>11</sup>, позволяет установить, что в реакции  $\text{Tb}^{159}(p, xn)$  наиболее вероятное число испарившихся нейтронов  $x$  от  $7$  до  $11$ , что приводит к выводу, что продуктом реакции является изотоп диспрозия с массовым числом  $A$  от  $149$  до  $153$ . Предположительный порядковый номер активных элементов с энергией  $\alpha$ -частиц  $4,2$  Мэв и  $4,06$  Мэв установлен из рассмотрения реакций, ведущих к образованию этих активностей.

Для активности с энергией  $\alpha$ -частиц 3,6 Мэв принадлежность её диспрозию установлена химическим разделением.

Недолгая бомбардировка окиси диспрозия протонами с энергией 200 Мэв даёт в числе других активностей  $\alpha$ -активность с энергией  $4,2 \pm 0,15$  Мэв с периодом полураспада 4 мин. Возможно, что это — изотоп холмия или эрбия.

Непродолжительная бомбардировка окиси самария ионами  $C^{12}$  с энергией 100 Мэв создаёт 3,5-минутную  $\alpha$ -активность, энергию  $\alpha$ -частиц которой измерить не удалось. Возможно, что эта  $\alpha$ -активность принадлежит изотопам холмия или эрбия.

Золото. Принадлежность активности с энергией  $\alpha$ -частиц 5,1 Мэв золоту подтверждена химическим разделением. Пределы значений массового числа основаны на оценке энергии бомбардирующих частиц, нужной для получения этой активности. Эти пределы весьма приближены.

Таблица II

Энергии  $\alpha$ -распада ядер элементов редких земель

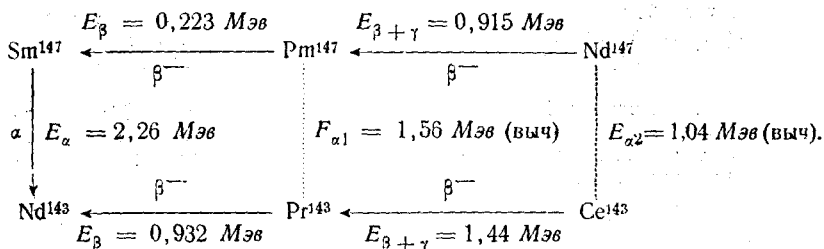
| Ядро                     | Число нейтронов $N$ | $E_\alpha$ (опытное), включая отдачу и поправку на экранирование (Мэв) | «Нормальное» $E_\alpha$ (вычислено по полужемпирической формуле масс) (Мэв) | Разность $E_\alpha$ (оп) — $E_\alpha$ (выч) (Мэв) |
|--------------------------|---------------------|--|---|---|
| $^{60}\text{Nd}^{144}$   | 84                  | 1,97   | -0,68   | 2,65  |
| $^{60}\text{Nd}^{147}$   | 87                  | 1,04 (цикл)  | -1,28   | 2,32  |
| $^{61}\text{Pm}^{147}$   | 86                  | 1,56 (цикл)  | -0,59   | 2,15  |
| $^{62}\text{Sm}^{144}$   | 82                  | <2,1 (теор.)   | +0,64   | <1,5  |
| $^{62}\text{Sm}^{146}$   | 84                  | 2,64   | 0,28  | 2,36  |
| $^{62}\text{Sm}^{147}$   | 85                  | 2,26   | +0,08   | 2,18  |
| $^{62}\text{Sm}^{148}$   | 86                  | <2,1 (теор.)   | -0,07   | <2,2  |
| $^{63}\text{Eu}^{147}$   | 84                  | 2,98   | +0,73   | 2,25  |
| $^{64}\text{Gd}^{148}$   | 84                  | 3,27   | 1,19  | 2,08  |
| $^{64}\text{Gd}^{149}$   | 85                  | 3,1  | 1,01  | 2,1   |
| $^{64}\text{Gd}^{150}$   | 86                  | 2,8  | 0,87  | 1,9   |
| $^{65}\text{Tb}^{149}$   | 84                  | 4,08   | 1,60  | 2,48  |
| $^{65}\text{Tb}^{(151)}$ | (86) *              | 3,56   | 1,28  | 2,28  |
| $^{66}\text{Dy}^{(150)}$ | (84) *              | 4,35   | 2,05  | 2,30  |
| $^{66}\text{Dy}^{(151)}$ | (85) *              | 4,20   | 1,87  | 2,33  |
| $^{66}\text{Dy}^{(152)}$ | (86) *              | 3,73   | 1,73  | 2,00  |

\*) Скобки означают, что массовое число неизвестно и принято предположительно для расчётов.

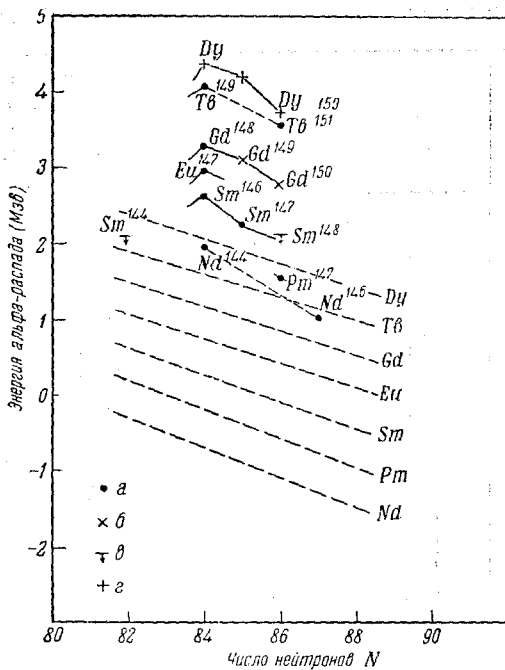
Ртуть. Принадлежность  $\alpha$ -частиц с энергией 5,6 Мэв изотопам ртути подтверждена химическим разделением.

Расчёт энергии  $\alpha$ -распада из циклов в области редких земель возможен лишь для  $\text{Pm}^{147}$  и  $\text{Nd}^{147}$  из энергии  $\alpha$ -распада  $\text{Sm}^{147}$  по

следующей схеме:



На схеме приведены полные энергии  $\alpha$ -распада, включая поправки на энергию ядра отдачи и на электростатическую потенциальную энергию  $\alpha$ -частицы по отношению к электронному облаку (поправка на экранирова-



Зависимость энергии  $\alpha$ -распада от числа нейтронов в ядрах. Пунктиром с длинными штрихами проведены линии, вычисленные по полуэмпирической формуле масс.  $a$  — массовое число известно,  $b$  — массовое число известно приблизительно,  $\gamma$  — известен лишь предел энергии  $\alpha$ -распада,  $z$  — массовое число неизвестно и принято предположительно.

ние). Последняя поправка в соответствии с работой <sup>12</sup> в области редких земель равна 20 кэв и должна прибавляться к энергии  $\alpha$ -частицы. Энергии

$\beta$ -распада  $Pm^{147}$  и  $Pg^{143}$  взяты из таблиц<sup>8</sup>, энергия распада  $Nd^{147}$  взята из работы<sup>13</sup>, а для распада  $Ce^{143}$  — по<sup>14</sup>.

В таблице II представлены полные энергии  $\alpha$ -распада изотопов элементов редких земель. Наряду с экспериментальными данными в таблице II приведены также предельные значения энергий  $\alpha$ -распада изотопов  $Sm^{144}$  и  $Sm^{148}$ , найденные теоретически, исходя из того, что период их полураспада больше, чем  $10^{14}$  лет, иначе их активность была бы обнаружена.

На рисунке представлены зависимости энергий, приведённых в таблице II, от числа нейтронов  $N$  в ядрах. Как и следовало ожидать, наибольшие энергии  $\alpha$ -распадов приходится на ядра с 84 нейтронами, что подтверждает, по аналогии с  $\alpha$ -систематикой для тяжёлых ядер, наличие оболочки из 82 нейтронов.

При изменении порядкового номера от 64 до 65 увеличение энергии  $\alpha$ -распада много больше, чем при переходе от 63 к 64. Это может означать, что 64 есть «полумагическое» число для протонов. Такую «подоболочку» из 64 протонов можно объяснить по схеме оболочек с сильной спин-орбитальной связью<sup>15</sup>, если принять во внимание некоторое расщепление уровней  $2d_{5/2}$  и  $2d_{3/2}$ .

В. К.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Кохман, Phys. Rev. **76**, 448 (1949).
2. И. Перлман, А. Гиорсо и Г. Сиборг, УФН **42**, 220 (1950).
3. J. Rasmussen, S. Thompson, A. Ghiorso, Phys. Rev. **89**, 33 (1953).
4. D. Dunlavey and G. Seaborg, Phys. Rev. **92**, 206 (1953).
5. E. Waldron, V. Schuitz and T. Kohman, Phys. Rev. **93**, 254 (1954).
6. G. Bastin-Scoffier et M. St. Dionisio, Comptes Rendus **236**, 1016 (1953).
7. W. Jesse and J. Sadauskis, Phys. Rev. **78**, 1 (1950).
8. J. Hollander, I. Perlman and G. Seaborg, Rev. Mod. Phys. **25**, 469 (1953).
9. J. Rhodes, W. Franzen and W. Stephens, Phys. Rev. **87**, 141 (1952).
10. K. Sun, P. Pecjak, B. Jennings, A. Allen and J. Nechaj, Phys. Rev. **82**, 772 (1951).
11. Э. Ферми, Ядерная физика, ИЛ (1951), стр. 223.
12. W. Dickinson, Phys. Rev. **80**, 563 (1950).
13. W. Emmerich and J. Kurbatov, Phys. Rev. **83**, 40 (1951).
14. C. Mandeville and E. Shapiro, Proc. Nat. Sci. India **17**, 45 (1951).
15. M. G. Mayer, Phys. Rev. **75**, 1969 (1949).