

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

У ядер средней массы первой была открыта α -радиоактивность изотопа Sm^{147} . По полуэмпирической формуле масс, исправленной в соответствии с последними измерениями масс средних ядер, можно вычислить приближённо энергию, выделяющуюся при отрыве α -частицы от ядра. Ещё в работе¹ было таким образом показано, что многие редкоземельные элементы являются α -радиоактивными, ибо при отрыве α -частицы должна выделяться небольшая положительная энергия — порядка 2 Мэв. Как известно из теории α -распада, период полураспада быстро растёт с уменьшением энергии α -частицы. Энергии α -распада в 2 Мэв соответствует период α -распада более 10^{16} лет. α -радиоактивность с таким большим периодом полураспада обнаружить не удаётся.

Из систематики α -распада тяжёлых ядер² следует, что энергия α -распада растёт с уменьшением числа нейтронов и что у тяжёлых ядер вблизи замкнутой оболочки из 126 нейтронов, именно у ядер с 128 нейтронами, энергия α -распада достигает максимума. Такого же повышения энергии α -распада следует ожидать в области редких земель у замкнутой оболочки из 82 нейтронов. Большие энергии α -распада должны привести и к большим скоростям распада. По аналогии с тяжёлыми ядрами максимума энергии α -распада в этой области следует ожидать у ядер с 84 нейтронами.

В реферируемых работах^{3, 4, 5} приводятся экспериментальные данные об α -радиоактивных ядрах средней массы, полученные в последние годы.

Два из изотопов средней массы имеют естественную α -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^{122} не привела пока к получению α -радиоактивных ядер.

В таблице I представлены данные о всех известных в настоящее время α -радиактивных ядрах легче свинца.

Ни в одном из ядер средней массы не обнаружено тонкой структуры α -распада, т. е. все ядра, приведённые в таблице I, испускают α -частицы только одной энергии. Энергии α -частиц измерены по анализу величин импульсов пропорциональных счётчиков, кроме данных для Tb^{149} , отмеченных⁴. Энергия α -частицы Tb^{149} измерена магнитным спектрографом; стандартом при этом служила энергия α -частицы Ra^{226} с энергией 4,777 Мэв⁶. Погрешности, приведённые со знаками $\pm$, являются оценкой их пределов, а не вероятными погрешностями.

Альфа-радиоактивность у изотопов элементов легче свинца

Таблица 1

344

Элемент	Порядковый номер Z	Массовое число A	Энергия α -частиц (Мэв)	Измеренный период полураспада	Другие типы превращения	Отношение α -разветвления α /полный	Частичный α -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 $\text{Nd}^{145} (\alpha, 2n) 40 \text{ Мэв}$ или $\text{Nd}^{146} (\alpha, 3n) 40 \text{ Мэв}$.
		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 ± 2 д.	ЭЗ	$\sim 10^{-5}$	$\sim 6 \cdot 10^3$ г. (в пределах множителя 3)	$\text{Sm}^{147} (p, n) 8,5 \text{ Мэв}$ $\text{Sm}^{147} (d, 2n) 19 \text{ Мэв}$ $\text{Sm}^{148} (d, 3n) 19 \text{ Мэв}$
Gd	64	148	$3,18 \pm 0,10$	> 35 г.	—	—	$\sim 1,4 \cdot 10^2$ г. (в пределах множителя 3)	$\text{Sm}^{147} (\alpha, 3n) 36 \text{ Мэв}$ $\text{Eu}^{151} (p, 4n) 32 \text{ Мэв}$
		149	$3,0 \pm 0,15$	9 ± 1 д.	ЭЗ	$\sim 7 \cdot 10^{-6}$	$\sim 4 \cdot 10^3$ г. (в пределах множителя 3)	$\text{Sm}^{147} (\alpha, 2n) 30 \text{ Мэв}$
		150	$2,7 \pm 0,15$	более 2 г.	—	—	—	$\text{Eu}^{151} (d, 3n) 19 \text{ Мэв}$

из ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Продолжение табл. I

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

Нео д и м. Предсказанная ранее в ¹ α -радиоактивность естественного изотопа неодима Nd ¹⁴⁴ была открыта недавно ⁵. Энергия α -частиц найдена по изучению их следов в фотопластинках, пропитанных раствором соединения неодима с примесью самария. Сравнение следов α -частиц Nd ¹⁴⁴ со следами α -частиц Sm ¹⁴⁷ показало, что энергия α -частиц Nd ¹⁴⁴ равна $1,9 \pm 0,1$ Мэв. Период полураспада является грубой оценкой.

С а м а р и й. Энергия α -частиц Sm ¹⁴⁷ взята по наиболее точным данным работы ⁷; по измерениям импульсов счётчика с аргоном эта энергия равна 2,18 Мэв. Но в соответствии с данными работы ⁹ это значение должно быть исправлено на нелинейность зависимости ионизации аргона от энергии α -частиц. С этой поправкой энергия α -частиц Sm ¹⁴⁷ будет 2,21 Мэв. Период полураспада Sm ¹⁴⁷ приведен по таблицам ⁸.

Е в р о п и й. Бомбардировки самария протонами с энергией 200 Мэв, длившиеся менее часа, не давали α -радиоактивности. Только длительные бомбардировки протонами и дейтонами изотопа Sm ¹⁴⁷, дали α -активность. Принадлежность α -частиц европию подтверждена химическим отделением европия. Установлено, что все бедные нейтронами изотопы европия с массовыми числами от 144 до 150, кроме Eu ¹⁴⁷, не имеют заметной α -активности.

Г а д о л и н и й. Активность с энергией α -частиц 3,18 Мэв получается бомбардировкой окиси самария, обогащённой изотопом Sm ¹⁴⁷ α -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 Sm ¹⁴⁷ (α , xn) он равен 28—30 Мэв, и для реакции Eu ¹⁵¹ (p, yn) он оказался равным ~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 Gd ¹⁴⁸.

Оценка периода полураспада произведена по производительности реакции Sm ¹⁴⁷ (α , 3n), полученной из кривой возбуждения сравнением с аналогичной реакцией для Bi ²⁰⁹.

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

Семичасовая α -активность, упоминаемая в сообщении ¹⁰ и приписанная гадолинию, не принадлежит ему.

Т е р б и й. Принадлежность активности с энергией α -частиц 3,95 Мэв тербию подтверждена химическим разделением. Массовое число установлено масс-спектрографически. Нижний предел отношения α -активности к электронному захвату — 1%.

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

Д и с п р о з и й. Приближённый теоретический расчёт, аналогичный расчёту, приведённому в книге ¹¹, позволяет установить, что в реакции 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 α -частиц 4,2 Мэв и 4,06 Мэв установлен из рассмотрения реакций, ведущих к образованию этих активностей.

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

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

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

Золото. Принадлежность активности с энергией α -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 приближительны.

Таблица II

Энергии α -распада ядер элементов редких земель

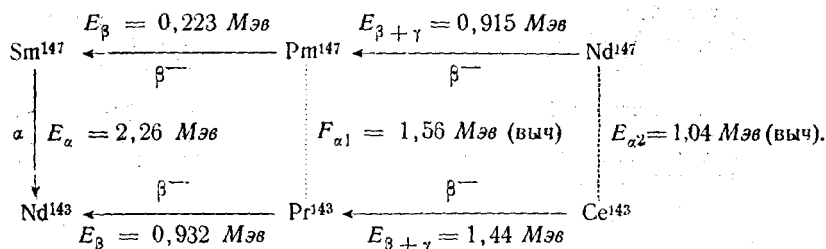
Ядро	Число нейтронов N	E_α (опытное), включая отдачу и поправку на экранирование (Мэв)	«Нормальное» E_α (вычислено по полуэмпирической формуле масс) (Мэв)	Разность E_α (оп) — E_α (выч) (Мэв)
$^{144}_{60}\text{Nd}$	84	1,97	-0,68	2,65
$^{147}_{60}\text{Nd}$	87	1,04 (цикл)	-1,28	2,32
$^{147}_{61}\text{Pm}$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

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

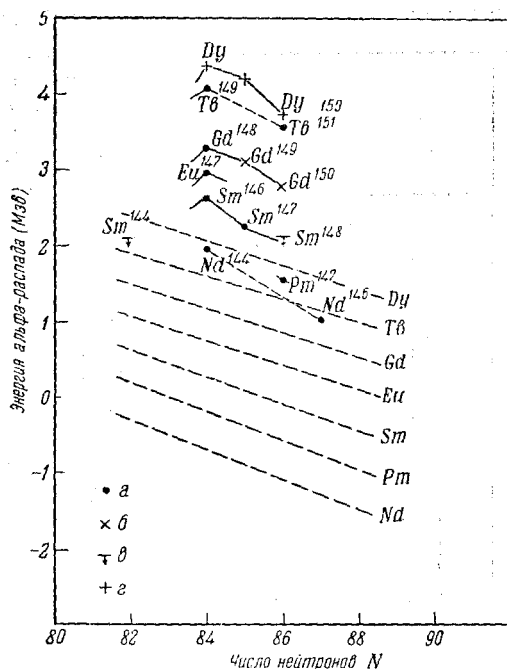
Ртуть. Принадлежность α -частиц с энергией 5,6 Мэв изотопам ртути подтверждена химическим разделением.

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

следующей схеме:



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



Зависимость энергии α -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, θ — известен лишь предел энергии α -распада, z — массовое число неизвестно и принято предположительно.

ние). Последняя поправка в соответствии с работой ¹² в области редких земель равна 20 кэв и должна прибавляться к энергии α -частицы. Энергии

β -распада Pm^{147} и Pr^{143} взяты из таблиц⁸, энергия распада Nd^{147} взята из работы¹³, а для распада Ce^{143} — по¹⁴.

В таблице II представлены полные энергии α -распада изотопов элементов редких земель. Наряду с экспериментальными данными в таблице II приведены также предельные значения энергий α -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 α -распадов приходятся на ядра с 84 нейтронами, что подтверждает, по аналогии с α -систематикой для тяжёлых ядер, наличие оболочки из 82 нейтронов.

При изменении порядкового номера от 64 до 65 увеличение энергии α -распада много больше, чем при переходе от 63 к 64. Это может означать, что 64 есть «полуmagicное» число для протонов. Такую «подоболочку» из 64 протонов можно объяснить по схеме оболочек с сильной спин-орбитальной связью¹⁵, если принять во внимание некоторое расщепление уровней $2d_{5/2}$ и $2d_{3/2}$.

В. К.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. T. Kohman, 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. Schultz 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).