

1264
K-89

14440

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

М.Я. Кузнецова

2264

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
ТИПА (p, xn) , (p, pxn) и $(p, 2p xn)$
И ВТОРИЧНЫХ РЕАКЦИЙ
С ЗАХВАТОМ ЯДЕР ГЕЛИЯ И ЛИТИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

М.Я. Кузнецова

2264

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
ТИПА (p, α) , $(p, p\alpha)$ и $(p, 2p \alpha)$
И ВТОРИЧНЫХ РЕАКЦИЙ
С ЗАХВАТОМ ЯДЕР ГЕЛИЯ И ЛИТИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1965

В в е д е н и е

Основные особенности взаимодействия частиц высокой энергии со сложным ядром удовлетворительно описываются двухстадийной каскадно-испарительной моделью Сербера^{/1/}. Однако существует ряд явлений, которые не могут быть полностью объяснены только этой моделью; к таким явлениям принадлежат, в частности, так называемые простые, или поверхностные, реакции и процесс фрагментации, с которыми тесно связаны вторичные реакции. К простым реакциям относят реакции типа (p, n) , (p, pn) , $(p, 2p)$, $(p, p\pi^+)$ и др. В результате таких реакций возникает ядро, отличающееся от ядра мишени по массовому числу и заряду не больше чем на единицу. Вторичные реакции происходят на ядрах мишени под действием частиц, рождающихся в процессе первичного взаимодействия налетающей частицы с веществом мишени. В результате вторичных реакций образуются ядра, которые могут иметь заряд на несколько единиц больше заряда ядра мишени, если последнее взаимодействует с вторичными ядрами гелия или с еще более тяжелыми фрагментами. Имеются основания считать, что механизм простых ядерных реакций и процесс фрагментации связаны с поверхностной областью ядра, вопрос о которой до настоящего времени остается нерешенным.

Очевидно, что накопление экспериментального материала по вторичным реакциям и реакциям типа (p, xn) , (p, pxn) и $(p, 2pxn)$, включающим в себя и простые реакции — (p, n) , (p, pn) и $(p, 2p)$, может быть полезным как для лучшего понимания механизма ядерных реакций, так и для построения тех или иных моделей структуры ядерной поверхности.

В настоящей работе были изучены:

- 1) Реакции типа (p, pxn) на ^{127}I при энергии протонов от 100 до 660 Мэв^{/2/}.
- 2) Реакции типа (p, xn) и $(p, 2pxn)$ на разделенных изотопах теллура (^{128}Te и ^{126}Te) при энергии протонов от 120 до 660 Мэв^{/3/}.
- 3) Вторичные реакции захвата ядер гелия висмутом при энергии протонов от 120 до 660 Мэв^{/4/}.

4) Вторичные реакции захвата ядер лития свинцом при энергии бомбардирующих протонов от 80 до 660 Мэв^{/5/}.

При исследовании ^{127}I (p, pxl)—реакций оказалось, что интерпретация реакций с $x \geq 6$ затруднительна из-за недостатка сведений о радиоактивных изотопах йода с $A < 121$, поэтому была предпринята работа по идентификации легких изотопов йода с массовыми числами 117, 118, 119 и $121^{6/}$, результаты которой учитывались при проведении исследования реакций типа (p, xn) и ($p, 2\text{pxl}$).

Облучение мишеней проводилось на синхротронном ускорителе в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

В первой главе диссертации дается краткий обзор работ, посвященных ядерным реакциям на сложных ядрах под действием частиц высокой энергии. Во второй главе описывается методика эксперимента. Третья и четвертая главы посвящены изложению экспериментальных результатов и их обсуждению; при этом проводится сравнение наших результатов с результатами аналогичных работ, выполненных другими авторами.

Методика эксперимента

Экспериментальные результаты, излагаемые в настоящей работе, получены с помощью радиохимического метода. Искомые продукты ядерных реакций извлекались химическим путем из сложной смеси элементов, образующихся в результате взаимодействия бомбардирующих частиц с веществом мишени. Количество атомов радиоактивных продуктов оценивалось по их активности, а идентификация отдельных радиоизотопов данного элемента проводилась по периодам полураспада и характеру излучения.

Для регистрации излучения радиоактивных изотопов на определенных этапах исследования в соответствии с поставленной задачей применялись разные детекторы:

1) Гейгеровский счетчик, наполненный смесью криптона с парами эфира и соединенный с магнитным анализатором^{/7/}.

2) Стандартные счетчики Гейгера – Мюллера типа МСТ-17 (СИЗБ) и МСТ-40 (СТ-20).

3) Сцинтилляционный γ α -счетчик, состоящий из фотоумножителя ФЭУ-19 и сцинтиллятора ZnS(Ag) .

При исследовании свойства ^{119}Te ^{/8/} использовались также грубый магнитный β -спектрометр с фокусировкой на 180° (разрешение на линии ^{137}Cs равно 3,5%) и сцинтилляционный γ -спектрометр с кристаллом NaI(Tl) и многоканальным анализатором.

При вычислении эффективного сечения изучаемых ядерных реакций поток падающих протонов оценивался по образованию ^{24}Na из ^{27}Al в реакции $^{27}\text{Al} (p, 3p) ^{24}\text{Na}$, сечение которой известно для широкого интервала энергии протонов 19 .

Исследование реакций типа (p , xn), (p , pxn), (p , 2pxn)

а) Эксперимент

Экспериментальные значения эффективных сечений изучаемых реакций представлены в таблицах 1 и 2.

Т а б л и ц а 1
Сечения (p , pxn)-реакций на ^{127}I (10^{-27} см 2)

Реакция	E_p (Мэв)				
	100	170	300	480	660
$^{127}\text{I} (p, pn) ^{126}\text{I}$	128±19	60± 8	54± 6	72±10	55± 6
$^{127}\text{I} (p, p 2n) ^{125}\text{I}$	78±15	32± 7	29± 4	26± 4	26± 2
$^{127}\text{I} (p, p 3n) ^{124}\text{I}$	51± 5	50±11	28± 7	21± 5	18,7±1,7
$^{127}\text{I} (p, p 4n) ^{123}\text{I}$	50± 9	14±2,5	13,5±1,7	12,4±3,6	14,4±0,9
$^{127}\text{I} (p, p 6n) ^{121}\text{I}$	107	19	50	29	18
$^{127}\text{I} (p, p 7n) ^{120}\text{I}$					
$^{127}\text{I} (p, p 8n) ^{119}\text{I}$	9,2	6,3	8	5,9	5,5
$^{127}\text{I} (p, p 9n) ^{118}\text{I}$					
$^{27}\text{Al} (p, 3pn) ^{24}\text{Na}$	10,2	9,3	10,1	10,6	10,8

Т а б л и ц а 2

Сечения (р , хл) и (р , 2 рхл) -реакций на ^{125}Te и ^{126}Te (10^{-27}см^2)

Р е а к ц и я	E_p (Мэв)				
	120	200	300	480	660
$^{126}\text{Te}(p, 2p6n)^{119}\text{Sb}$	$5,5 \pm 1,0$	$6,0 \pm (0,6)$	$6,9 \pm 0,5$	$7,2 \pm 0,5$	$6,2 \pm 0,6$
$^{125}\text{Te}(p, 2p5n)^{119}\text{Sb}$	$8,9 \pm 0,5$	-	$6,9 \pm 0,6$	$5,4 \pm 0,5$	$7,3 \pm 0,2$
$^{126}\text{Te}(p, 2p5n)^{120}\text{Sb}$	$9,2 \pm 0,8$	$11,2 \pm (1,2)$	$10,3 \pm 0,6$	$9,8 \pm 0,6$	$9,3 \pm 1,0$
$^{126}\text{Te}(p, 2p4n)^{120}\text{Sb}$	$10,4 \pm 1,0$	-	$7,7 \pm 0,4$	$7,2 \pm 0,5$	$11,0 \pm 1,0$
$^{126}\text{Te}(p, 2p3n)^{122}\text{Sb}$	$17,7 \pm 1,2$	$13,0 \pm (1,3)$	$21,3 \pm 1,0$	$23,3 \pm 1,4$	$23,3 \pm 1,2$
$^{125}\text{Te}(p, 2p2n)^{122}\text{Sb}$	$19,6 \pm 1,3$	-	$17,8 \pm 1,1$	$16,3 \pm 1,0$	$23,9 \pm 1,6$
$^{126}\text{Te}(p, 2pn)^{124}\text{Sb}$	$11,4 \pm 1,5$	$11,8 \pm (1,7)$	$15,2 \pm 0,9$	$19,3 \pm 1,5$	$19,4 \pm 1,1$
$^{125}\text{Te}(p, 2p)^{124}\text{Sb}$	$9,3 \pm 1,0$	-	$11,1 \pm 0,7$	$13,4 \pm 1,2$	$21,6 \pm 1,0$
$^{126}\text{Te}(p, 4n)^{123}\text{I}$	$15,3 \pm 0,5$	$5,1 \pm (0,6)$	$2,2 \pm 0,4$	$2,1 \pm (0,3)$	$1,9 \pm 0,3$
$^{125}\text{Te}(p, 3n)^{123}\text{I}$	$19,6 \pm 1,2$	-	$2,4 \pm 0,4$	-	$1,9 \pm 0,4$
$^{126}\text{Te}(p, 3n)^{124}\text{I}$	$15,1 \pm 0,7$	$5,1 \pm (0,6)$	$2,8 \pm 0,5$	$2,0 \pm (0,3)$	$2,4 \pm 0,4$
$^{125}\text{Te}(p, 2n)^{124}\text{I}$	$13,0 \pm 1,8$	-	$2,5 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,4$
$^{126}\text{Te}(p, 2n)^{125}\text{I}$	$12,7 \pm 0,3$	$4,3 \pm (0,6)$	$2,3 \pm 0,4$	$1,3 \pm (0,2)$	$1,9 \pm 0,3$
$^{125}\text{Te}(p, n)^{125}\text{I}$	$7,1 \pm 1,1$	-	$1,2 \pm 0,2$	-	-
$^{126}\text{Te}(p, n)^{126}\text{I}$	$8,3 \pm 0,3$	~ 3	$1,1 \pm 0,2$	$0,8 \pm (0,1)$	$1,3 \pm 0,3$
$^{125}\text{Te}(p, ?)^{126}\text{I}$	$2,2 \pm 0,3$	-	$\sim 0,3$	-	$\sim 0,4$
$\sigma(p, 2p)/\sigma(p, 2n)$	0,71	-	4,44	5,83	8,64
$^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$	9,8	9,3	10,1	10,6	10,8

б) В ы в о д ы

1. Сравнение экспериментальных величин сечений (р , рхл) - реакций (х = 2, 3, 4) с результатами теоретических расчетов /10/ показало удовлетворительное согласие теории и эксперимента, что подтверждает справедливость применения двухстадийной модели Сербера для описания указанных реакций.

2. Экспериментальные сечения реакций $^{127}\text{I}(\rho, \rho\alpha)^{126}\text{I}$ в исследуемой энергетической области протонов оказались в 2-3 раза больше соответствующих теоретических величин, полученных на основе каскадно-испарительной модели^{/11,12/}. Энергетическая зависимость сечений $(\rho, \rho\alpha)$ - реакции на ^{127}I , наблюдаемая экспериментально, также отличается от рассчитанной функции возбуждения этой реакции.

3. Слабая зависимость сечений $(\rho, \rho\alpha)$ и $(\rho, 2\rho)$ - реакций от энергии падающих протонов в области энергий выше 300-500 Мэв позволяла провести сравнение экспериментальных величин сечений этих реакций с рассчитанными по формуле Бениоффа^{/13/}, учитывающей как диффузную природу ядерной поверхности, так и оболочечную структуру ядра мишени. Удовлетворительное согласие между экспериментальными и рассчитанными величинами сечений реакций $^{127}\text{I}(\rho, \rho\alpha)^{126}\text{I}$ и $^{125}\text{Te}(\rho, 2\rho)^{124}\text{Sb}$ рассматривается как подтверждение гипотезы Бениоффа, предполагающей, что в механизме простых реакций преимущественная роль принадлежит процессам прямого взаимодействия налетающего протона с поверхностными нуклонами ядра.

4. Сравнение абсолютных величин сечений реакций $^{125}\text{Te}(\rho, 2\alpha)^{124}\text{I}$ и $^{125}\text{Te}(\rho, 2\rho)^{124}\text{Sb}$ и анализ функции возбуждения для последней реакции также приводит к заключению, что при $E_p > 300$ Мэв $(\rho, 2\rho)$ -реакция на ^{125}Te идет преимущественно через процесс прямого взаимодействия.

5. Сравнение абсолютных величин сечений отдельных реакций типа $(\rho, \chi\alpha)$, $(\rho, \rho\chi)$ и $(\rho, 2\rho\chi)$ на различных ядрах не показало какой-либо систематической зависимости от порядкового номера ядра мишени.

6. Анализ полученных результатов и литературных данных по реакциям типа $(\rho, \chi\alpha)$ и $(\rho, \rho\chi)$ показал, что на сечения этих реакций оказывает определенное действие величина кулоновского барьера и избыток нейтронов над протонами в ядре мишени.

Вторичные ядерные реакции

а) Эксперимент

Сечение вторичной реакции условно определялось как произведение сечения рождения вторичных частиц на вероятность соответствующей реакции между вторичной частицей и ядром мишени.

При изучении вторичных реакций использовались толстые мишени, для которых сечение реакции не зависит от толщины мишени. Исключением были опыты по определению "сечения" астатина из свинца в зависимости от толщины облучаемой мишени.

Полученные сечения образования ^{210}At и ^{211}At из висмута и свинца под действи-

ем протонов различных энергий и отношения сечений $\sigma(^{210}\text{At}) / \sigma(^{211}\text{At})$ и $\sigma(^{207}\text{At}) / \sigma(^{211}\text{At})$ представлены в таблицах 3 и 4.

Т а б л и ц а 3
Сечения образования изотопов аstatина из висмута

E_p (МэВ)	$\sigma(^{211}\text{At})$ (10^{-29} см ²)	Число опреде- лений	$\sigma(^{210}\text{At})$ (10^{-29} см ²)	Число опреде- лений	$\frac{\sigma(^{210}\text{At})}{\sigma(^{211}\text{At})}$	Число опреде- лений
130	0,52±0,16	2	0,33±0,04	2	0,64±0,15	2
170	1,28±0,22	3	1,00±0,17	3	0,80±0,05	3
300	1,96±(0,39)	1	1,18±(0,24)	1	0,60±(0,09)	1
400	1,92±(0,37)	1	1,58±(0,32)	1	0,82±(0,13)	1
480	2,54±0,18	5	2,02±0,40	4	0,80±0,10	4
530	2,82±(0,56)	1	2,28±(0,46)	1	0,81±(0,12)	1
580	2,26±0,19	2	1,67±(0,33)	1	0,66±(0,10)	1
660	2,60±0,56	2	2,14±0,41	2	0,83±0,06	2

Т а б л и ц а 4
Сечения образования изотопов аstatина из свинца

E_p (МэВ)	$\sigma(^{211}\text{At})$ (10^{-32} см ²)	Число опреде- лений	$\sigma(^{210}\text{At})$ (10^{-32} см ²)	Число опреде- лений	$\frac{\sigma(^{210}\text{At})}{\sigma(^{211}\text{At})}$	Число оп- ределения	$\frac{\sigma(^{207}\text{At})}{\sigma(^{211}\text{At})}$	Число опреде- лений
80	I	I	-	-	-	-	-	-
120	0,5±0,1	2	1,0±0,4	2	1,87±0,31	2	1,1	1
340	3,3±0,5	4	5,0±0,2	2	1,69±0,24	3	-	-
500	6,1±0,7	11	9,6±3,2	4	1,75±0,34	5	-	-
660	16,8±1,7	12	21,0±3,0	4	1,31±0,33	5	1,34±0,03	3

"Сечения" образования ^{211}At из свинцовых фольг различной толщины под действием протонов с энергией 660 Мэв приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

"Сечения" образования ^{211}At в свинцовых пластинках разной толщины под действием протонов с энергией 660 Мэв

Толщина облучаемой мишени (мм)	$\sigma (^{211}\text{At}) 10^{-31} \text{ см}^2$
0,03	$0,80 \pm 0,20$
0,06	$1,00 \pm 0,20$
0,09	$1,32 \pm 0,21$
0,13	$1,52 \pm 0,11$
0,30	$1,74 \pm 0,20$
0,60	$1,72 \pm 0,12$
0,90	1,63
1,20	$1,67 \pm 0,04$
1,60	$1,57 \pm 0,16$

б) В ы в о д ы

1. На основе экспериментальных результатов, полученных при изучении вторичных реакций, были рассчитаны сечения образования надбарьерных α -частиц из висмута и ядер лития из свинца под действием высокоэнергичных протонов.

2. Найдено, что отношение сечений $\frac{\sigma(^{210}\text{c})}{\sigma(^{211}\text{At})}$ и $\frac{\sigma(^{207}\text{At})}{\sigma(^{211}\text{At})}$, в пределах ошибок эксперимента, не зависит от энергии налетающих протонов. Это указывает на то, что форма спектра надбарьерных α -частиц и ядер лития, образующихся при расщеплении висмута и свинца соответственно, или не зависит от энергии протонов, или меняется незначительно при изменении энергии протонов от 100 до 660 Мэв.

3. На основе экспериментальных результатов получены сведения о форме спектров α -частиц ($E_\alpha > 20$ Мэв) из висмута и ядер лития ($E_\alpha > 30$ Мэв) из свинца.

4. Образование надбарьерных α -частиц и ядер лития не может быть объяснено в рамках статистической модели ядерных реакций. Предполагается, что "выбрасывание" надбарьерных фрагментов, по крайней мере частично, осуществляется на более ранних этапах, чем происходит равномерное нагревание ядра.

Кроме результатов по вторичным реакциям и реакциям типа (p , xn), (p , рхн) и (p , 2рхн), получены новые сведения о легких изотопах йода и о существовании изомеров у ¹¹⁹Te.

1. На основе генетических связей изотопов йода с соответствующими изотопами теллура и сурьмы был открыт новый изотоп ¹¹⁷I (T_½ = 10 мин) и уточнены периоды полураспада для ¹¹⁵I (T_½ = 17+3 мин) и ¹¹⁹I (T_½ = 21,0+1,5 мин).

2. По генетическим связям между теллуrom и сурьмой доказано существование изомеров у ¹¹⁹Te с периодами полураспада, равными 4,25 дн. и 14 + 2 час, которые были известны и ранее, но наблюдались изолированно друг от друга и, по-видимому, считались взаимоисключающими.

3. Предложена схема распада для цепочки с A = 119.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в работах /2-8,8/.

Л и т е р а т у р а

1. R.Serber. Phys. Rev., 72, 1114 (1947).
2. М.Я. Кузнецова, В.Н. Мехедов, В.А. Халкин. ЖЭТФ, 34, 1096 (1958).
3. Н.Г. Зайцева, М.Я. Кузнецова, Мин Нам Бук, В.А. Халкин. ЖЭТФ, 43, 1672 (1962).
4. Ван Юн-юй, В.В. Кузнецов, М.Я. Кузнецова, В.А. Халкин. ЖЭТФ, 39, 230 (1960).
5. Ван Юн-юй, В.В. Кузнецов, М.Я. Кузнецова, В.Н. Мехедов, В.А. Халкин. ЖЭТФ, 39, 527 (1960).
6. Н.Г. Зайцева, М.Я. Кузнецова, И.Ю. Левенберг, В.А. Халкин. Радиохимия, 2, 451 (1960).
7. М.Я. Кузнецова, В.Н. Мехедов. Изв. АН СССР, сер. физ., 21, 1020 (1957).
8. Н.Г. Зайцева, М.Я. Кузнецова, И.Ю. Левенберг, В.Н. Покровский, В.А. Халкин. Изв. АН СССР, сер. физ., 24, 1083 (1960).
9. J.V.Cumming. Ann.Rev.Nucl. Sci., 13, 261 (1963).
10. J.M.Ladenbauer, L.Winsberg. Phys. Rev., 119, 1368 (1960).
11. H.P.Yule, A.Turkevich. Phys. Rev., 118, 1591 (1960).
12. S.S.Markowitz, E.S.Rowland, G.Friedlander. Phys.Rev., 112, 1295 (1958).
13. P.A.Bentoff. Phys. Rev., 119, 324 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел
9 июля 1965 г.