

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

2983/82

28/vi-82

P7-82-190

В.З.Майдигов, Н.Т.Суровицкая,  
Н.К.Скобелев, О.Ф.Немец

ИЗУЧЕНИЕ ИОНИЗАЦИИ  
ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ  
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1982

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В ядерных реакциях с тяжелыми ионами одной из важных проблем является исследование образующихся тяжелых продуктов. Особое внимание привлекают продукты реакции слияния. Для надежной интерпретации результатов таких экспериментов важно знать степень ионизации регистрируемых продуктов, особенно при использовании методов электромагнитного анализа. Эти сведения необходимы также для решения многих практических задач.

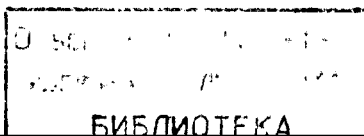
Степень ионизации движущегося иона в слое вещества определяется в основном его скоростью ( $v$ ), атомным номером ( $z$ ), а также зависит от материала мишени. Статистическое распределение энергетичных ионов по ионному заряду, получаемое после прохождения их через твердотельные мишени, неплохо описывается полуэмпирическими выражениями для среднего равновесного заряда и ширины распределения в определенных областях  $v$  и  $z^{1-3}$ . Однако результаты исследований ионизации продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами<sup>4,5,6/</sup>,  $(\alpha, xn)$ -реакций<sup>7/</sup> и осколков деления<sup>8/</sup> показали существенное увеличение как среднего заряда, так и ширины зарядового распределения по сравнению с расчетными значениями.

Настоящая работа посвящена изучению ионизации продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами в различных массовых областях с разными энергиями ядер отдачи.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Изучение ионизованных состояний атомов отдачи - продуктов реакций, вылетающих под углом  $0^\circ$ , проводилось на пучке тяжелых ионов ускорителя У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

С этой целью мишени в виде соединений естественной смеси изотопов бария, кадмия, вольфрама, гадолиния и диспрозия толщиной от 170 до 350 мкг/см<sup>2</sup>, нанесенных на алюминиевую подложку, облучались ионами кислорода-16, неона-22 и аргона-40 с заранее выбранной величиной энергии частиц, отвечающей максимальному выходу продуктов реакций. Легкие продукты были получены в реакциях  $^{27}\text{Al} + ^{22}\text{Ne}$  и  $^{27}\text{Al} + ^{40}\text{Ar}$ , приводящих к образованию изотопов  $^{43}\text{V}$ ,  $^{44}\text{Sc}$  с энергией отдачи ~60 МэВ - в первой, а также  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{61}\text{Cu}$  и  $^{62}\text{Ga}$  с энергией отдачи ~40 МэВ - во второй. Остальные продукты были получены в реакциях слияния:



$^{138}\text{Ba}$ ( $^{22}\text{Ne}$ , 7n) $^{153}\text{Dy}$	$/E_{\text{отд}} \sim 18 \text{ МэВ}/$ ,
$^{114}\text{Cd}$ ( $^{40}\text{Ar}$ , 7n) $^{147}\text{Dy}$	$/E_{\text{отд}} \sim 50 \text{ МэВ}/^{1/5}/$ ,
$^{182}\text{W}$ ( $^{16}\text{O}$ , 6n) $^{192}\text{Pb}$	$/E_{\text{отд}} \sim 8 \text{ МэВ}/$ ,
$^{158}\text{Gd}$ ( $^{40}\text{Ar}$ , 6n) $^{192}\text{Pb}$	$/E_{\text{отд}} \sim 35 \text{ МэВ}/$ ,
$^{164}\text{Dy}$ ( $^{40}\text{Ar}$ , 5n) $^{199}\text{Po}$	$/E_{\text{отд}} \sim 40 \text{ МэВ}/$ .

Идентификация изотопов, собранных на алюминиевые сборники в фокальной плоскости магнитного анализатора, проводилась по характерным  $\gamma$ -линиям и периодам полураспада ядер отдачи или продуктов их  $\beta$ -распада с временами жизни более одного часа. Энергии продуктов отдачи оценивались из кинематики ядерных реакций, а также определялись по величине их пробега в материале сборников.

Методика эксперимента подробнее описана в работе /5/.

По пути движения ионов отдачи на некотором расстоянии от мишени в ряде опытов устанавливалась углеродная фольга для выяснения возможности нормализации зарядовых распределений атомов отдачи.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1-4 представлены экспериментальные зарядовые распределения исследуемых ионов отдачи, вылетающих из мишени. Данные представлены в виде зависимости процентного вклада интенсивности данного зарядового состояния ( $N_i$ ) в суммарное зарядовое распределение ( $\sum N_i$ ) от расстояния вдоль фокальной плоскости магнитного анализатора ( $x$ ) или заряда иона ( $q_i$ ).

Стрелками на зарядовой шкале указаны значения среднего равновесного заряда ( $\bar{q}$ ) ионизованных атомов /2/, рассчитанные по формуле

$$\frac{\bar{q}}{Z} = \left[ 1 + \left( \frac{v_1 Z^{0,45}}{v} \right)^{1/0,6} \right]^{-0,6}, \quad /1/$$

где  $v_1 = 3,6 \cdot 10^8$  см/с;  $v$  - скорость ядер отдачи;  $Z$  - заряд ядра отдачи. Точками и сплошными плавными линиями показаны зарядовые распределения тех же продуктов после их дополнительной перезарядки на углеродной пленке.

Из приведенных рисунков видно, что в легкой области исследуемых ионов отдачи (Sc-Ga) средний ионный заряд практически не отличается от расчетного значения. Экспериментальное зарядовое распределение близко к равновесному расчетному распределению.

В тяжелой области (Dy-Po) экспериментальные зарядовые распределения значительно шире равновесных и смещены в сторону

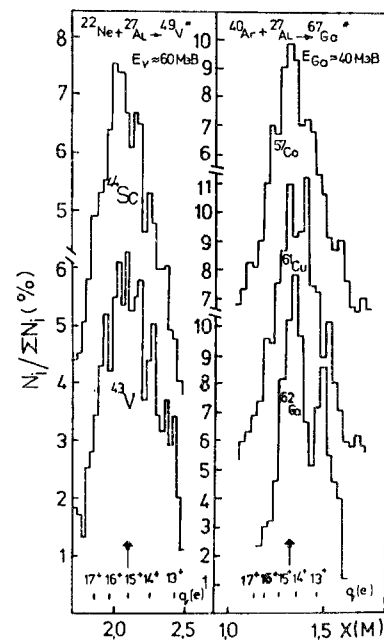


Рис. 1. Распределение по ионному заряду атомов отдачи легких продуктов ядерных реакций  $^{27}\text{Al} + ^{22}\text{Ne}$  и  $^{27}\text{Al} + ^{40}\text{Ar}$  /стрелками указано среднее значение равновесного заряда, рассчитанное по формуле /1//.

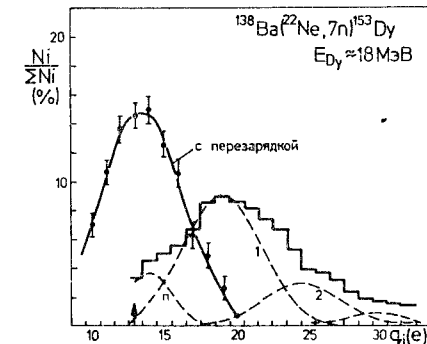
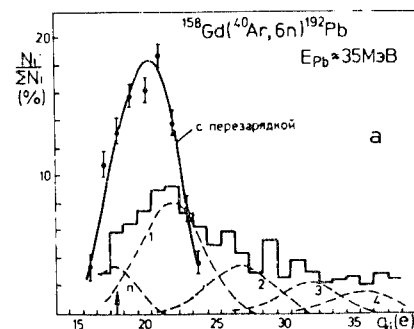


Рис. 2. Распределение ионов отдачи  $^{153}\text{Dy}$ . Гистограмма представляет экспериментальные вклады каждого зарядового состояния в зависимости от степени ионизации выбитых из мишени атомов отдачи. Плавной кривой представлено зарядовое распределение атомов отдачи после прохождения их через тонкую углеродную фольгу, пунктирные выделяют вклады:  $\pi$  - первичной, обычной ионизации, 1, 2, 3... - последующих ступеней автоионизации атомов /дополнительной, аномальной ионизации/.

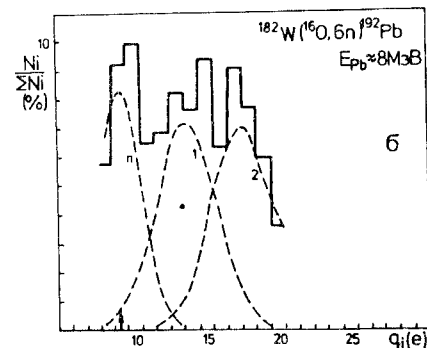


Рис. 3. Распределение ионизованных атомов отдачи  $^{192}\text{Pb}$ , полученных в ядерных реакциях: а/  $^{158}\text{Gd}(^{40}\text{Ar}, 6n)^{192}\text{Pb}$  и б/  $^{182}\text{W}(^{16}\text{O}, 6n)^{192}\text{Pb}$ .

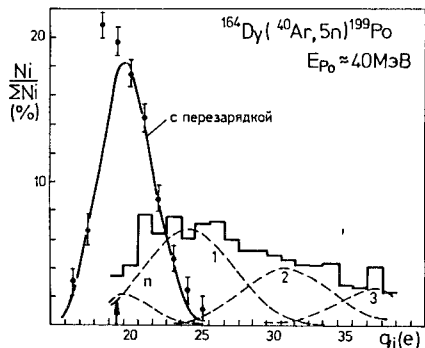
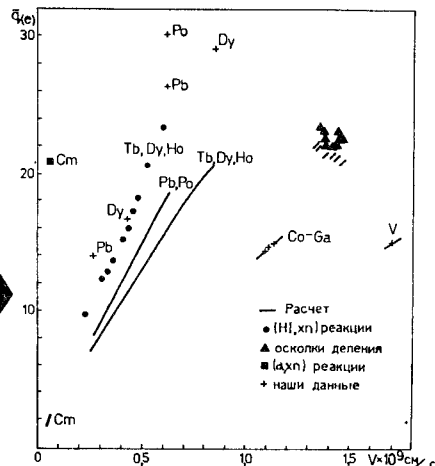


Рис. 4. Распределение ионизованных атомов отдачи  $^{199}\text{Po}$ .

Рис. 5. Данные по ионизации продуктов ядерных реакций, полученные в работах /4,7,8/ и настоящей работе +/- . По оси абсцисс - скорости ионов отдачи, по оси ординат - значения среднего ионного заряда  $\bar{q}$ .



больших зарядов. Распределение, близкое к равновесному, достигается только после дополнительной перезарядки ионов отдачи. Следует отметить, что согласно нашим измерениям характер зарядовых распределений тяжелых ионизованных атомов отдачи практически не зависит от толщины мишени в пределах до  $350 \text{ мкг/см}^2$ , на это указывают также и данные работы /4/. Восстановление зарядовых распределений, близких к равновесному, осуществляется только на некотором удалении от мишени. При непосредственном контакте перезарядной фольги с мишенью восстановление не происходит.

На рис. 5 представлены данные по ионизации продуктов ядерных реакций, полученные различными авторами в виде зависимости среднего заряда иона отдачи от его скорости. Сплошными линиями показаны результаты расчетов по формуле /1/, точками - данные работ /4,7,8/, крестиками - результаты настоящих измерений. В редкоземельной области наши данные неплохо согласуются с данными работы /4/. Из рис. 5 видно, что для тяжелых атомов отдачи, начиная с осколков деления, на известную зависимость среднего равновесного заряда от скорости, определяемую атомными процессами при движении иона в среде, накладывается влияние дополнительного механизма ионизации. Вклад этого дополнительного механизма возрастает с ростом скорости отдачи и с увеличением  $Z$  ядра.

Возможное восстановление зарядовых распределений выбитых атомов отдачи на некотором удалении от мишени указывает на ионизацию этих атомов в полете после вылета атома отдачи из мишени / $t \leq 10^{-14} \text{ с}$ /. К такой дополнительной ионизации продуктов реакций может привести несколько механизмов.

Увеличение ионизации может быть обусловлено образованием долгоживущих вакансий на внутренних оболочках атомов отдачи за счет внутренней конверсии  $\gamma$ -лучей /5,7/ при девозбуждении остатков ядерных реакций, взаимодействия кулоновского поля иона и атома мишени или при "встряхиивании" электронного облака при внезапном изменении ядерного заряда системы или атома остатка, которое наиболее вероятно для легких ядер /9/.

Однако суммарная ионизация К-оболочки при кулоновском взаимодействии падающих ионов, как указано в работах /10,11/, должна быть порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$  на ядерную реакцию.

Возможный вклад в ионизацию процесса "встряхиивания" электронного облака в значительной степени может быть нейтрализован в процессе движения иона отдачи в материале мишени. Для достижения равновесного зарядового распределения ионов достаточно  $\sim 10^{16}$  молекул/см<sup>2</sup> вещества, что составляет величину, меньшую, чем 0,1 толщины мишени, используемой в эксперименте.

Время жизни ионизованных состояний на К- и L-оболочках составляет в этой области ядер величины  $\sim 10^{-16} \text{ с}$  /11,12/.

Оценки образования вакансий за счет "встряхиивания" для атомов Po оцениваются величинами не более: на К-оболочке  $\sim 10^{-6}$ , L  $\sim 10^{-3}$  и M  $\sim 10^{-2}$  на реакцию /12/. Поэтому вкладом изомерных атомных состояний в ионизацию атомов отдачи, по-видимому, можно пренебречь.

Электронный захват не может увеличить степень ионизации вылетевших продуктов реакций, так как времена жизни исследуемых ядер по отношению к электронному захвату варьируются: от нескольких секунд до нескольких часов, что значительно больше времени пролета атомов отдачи в магнитном анализаторе / $\sim 10^{-7} \text{ с}$ /.

Таким образом, основным механизмом дополнительной ионизации изолированных атомов, движущихся в вакууме, служит автоионизация внутренних оболочек атома за счет внутренней конверсии  $\gamma$ -лучей в ядерных каскадах.

В экспериментальных зарядовых распределениях ионов отдачи, показанных на рис. 2-4, пунктирной линией выделена часть, соответствующая первичной ионизации. Параметры распределений этой части определены по формулам /1/ и

$$d = 0,5 \{ \bar{q}(1 - \bar{q}/Z) \}^{1/0,6} |^{1/2}. \quad /2/$$

Вклад ее в полное зарядовое распределение в исследуемой области ионов отдачи относительно невелик и составляет для разных

ядер от 10 до 30%. Очевидно, что в области масс  $A > 145$  от 70 до 90% образовавшихся атомов отдачи испытывают вторичную ионизацию.

В реакциях с многозарядными ионами тяжелые продукты образуются в возбужденном состоянии с высокими значениями спинов. Из-за большого числа переходов с испусканием  $\gamma$ -лучей и разной их мультипольности, включая сильно конвертированные переходы, велика вероятность образования нескольких вакансий на глубоколежащих оболочках атома. Имеющиеся в литературе данные <sup>/10,11,13/</sup> указывают на образование  $\gamma$  атомов - остатков только на K-оболочке от одной до трех вакансий. Наблюдаемая высокая множественность KX-лучей ~2-3 для продуктов реакций (<sup>6</sup>Li, xn) в районе P $\beta$  и T $\beta$  объясняется за счет внутренней конверсии  $\gamma$ -переходов при разряде возбужденных состояний ядер, при этом наибольший вклад дают переходы при разрядке состояний со значениями спинов в области  $\leq 10\hbar$  <sup>/13/</sup>.

Можно ожидать, что с увеличением энергии налетающего иона и, соответственно, энергии ядра-остатка будет возрастать множественность конвертированных переходов в каскадах, а следовательно, и число вакансий на внутренних оболочках атома. Образованные в результате внутренней конверсии вакансии на внутренних оболочках заполняются путем переходов электронов с вышележащих оболочек с испусканием рентгеновских лучей или развитием оже-каскадов, которые приводят к сильной ионизации атома. В соответствии с выводами работы <sup>/14/</sup> каждая вакансия на внутренней оболочке нейтрального атома может приводить к потере электронов, примерно равной числу вышерасположенных электронных оболочек. Приведенную авторами зависимость степени ионизации нейтрального атома при образовании вакансий на внутренних оболочках от Z ядра можно обобщить и на случай ионизованных атомов. При этом следует учитывать не только уменьшение числа электронов на внешних атомных оболочках, но и изменение вероятностей радиационных и оже-переходов в ионизованном атоме <sup>/15,16/</sup>.

Таким образом, в предварительно ионизованном атоме, очевидно, возрастает вероятность испускания оже-электронов, но в то же время каждый каскад приводит к потере меньшего числа электронов, чем в нейтральном атоме. Основываясь на таком представлении, вклад вторичной ионизации в экспериментальное зарядовое распределение можно представить в виде суммы вкладов нескольких атомов последовательной ионизации атомов отдачи за счет внутренней конверсии  $\gamma$ -лучей нескольких ядерных переходов.

Примеры такого разложения показаны на рис.2-4, где пунктирными линиями с цифрами 1,2,3,4... выделены вклады последовательных актов конверсии, приводящих к автоионизации атомов отдачи. По количеству и величине этих вкладов можно судить о характеристиках происходящих конверсионных процессов.

Итак, с помощью такого механизма ионизации можно удовлетворительно описать экспериментальные ионные зарядовые распределения продуктов ядерных реакций. Становится понятным высокий вклад /до 90%/ вторичной ионизации как следствие существенной роли внутренней конверсии радиационных переходов в тяжелых ядрах.

Высокая плотность уровней в области тяжелых ядер и большие коэффициенты внутренней конверсии переходов объясняют увеличение вклада вторичной ионизации с ростом атомного номера продуктов отдачи ядерных реакций.

Слабое изменение ширины зарядовых распределений ионизованных атомов с ростом энергии возбуждения указывают на то, что в основном ответственными за такую ионизацию являются переходы с малой энергией в узкой области относительно высоких значений спинов.

Авторы выражают признательность академику Г.Н.Флерову за предоставленную возможность проведения этой работы, профессору Ю.Ц.Оганесяну - за внимание и интерес к работе. Авторы благодарят Г.В.Рубленко и И.И.Штоня за помощь при проведении экспериментов и обработке результатов, а также группу эксплуатации У-300 за обеспечение работы ускорителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Betz H.D. Rev.Mod.Phys., 1972, 44, p.465.
2. Nikolaev V.S., Dmitriev I.S. Phys.Lett., 1968, A28, p.277.
3. Baron E. These, Orsay, 1977, IPN0-T-77-04.
4. Steiger N.H. In: Proc. of the 111 Conf. on Reaction Between Complex Nuclei. Asilomar, USA, April 14-18, 1963 (ed. by A.Giorso), Univ. of California Press, Berkeley, 1963.
5. Скобелев Н.К. и др. ЯФ, 1979, 29, с.615.
6. Майдигов В.З. и др. В сб.: Международный симпозиум по синтезу и свойствам новых элементов. Дубна, 23-27 сентября 1980 г. ОИЯИ, Д7-80-556, Дубна, 1980, с.77.
7. Metag V. et al. Hyperfine Interactions, 1976, 1, p.495.
8. Wolfarth H. et al. Z.Phys., 1978, A287, p.153.
9. Дыхне А.М., Юдин Г.Л. УФН, 1979, 125, с.377.
10. Deconnik G. et al. Phys.Rev., 1977, A16, p.1390.
12. Chmielewska D. et al. Nucl.Phys., 1981, A366, p.142.
12. Freedman M.S. Ann.Rev.Nucl.Sci., 1974, 24, p.209.
13. Karwowski H.J. et al. Phys.Rev.Lett., 1979, 42, p.1732.
14. Carlson T.A. et al. Phys.Rev., 1966, 151, p.41.

15. Bambinek W. et al. Rev.Mod.Phys., 1972, 44, p.716.  
16. Chen M.H. et al. Phys.Rev., 1981, A24, p.1852.

Майдиков В.З. и др.

P7-82-190

Изучение ионизации продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами

С помощью широкодиапазонного магнитного анализатора измерена ионизация атомов отдачи изотопов V, Sc, Co, Ga, Dy, , Pb и Po, образовавшихся в ядерных реакциях с ионами кислорода, неона и аргона. Анализ полученных зарядовых распределений показал, что ионизация атомов отдачи в области масс  $A \sim 40-70$  соответствует расчетным величинам. С ростом порядкового номера и энергии возбуждения ядер - продуктов реакций усиливается вклад дополнительной ионизации атомов отдачи, обусловленный внутренней конверсией ядерных переходов с последующим излучением оже-электронов. В области тяжелых ядер до 90% выбитых атомов отдачи испытывают дополнительную ионизацию.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Maidikov V.Z. et al.

P7-82-190

Study of Product Ionization of Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions

Studies of the ionization of V, Sc, Co, Ga, Dy, Pb and Po recoil atoms from nuclear reactions with O, Ne and Ar ions are carried out using a magnetic analyser. The obtained charge distribution of the recoil atoms shows that for isotopes in mass region of  $A \sim 40-70$  these are close to the calculated values. With increasing atomic number and excitation energy the contribution grows of additional ionization of recoil atoms due to the formation of inner-shell vacancies which is the result of strong internal conversion of nuclear transition accompanied by an Auger cascade. About 90% of heavy recoil atoms undergo additional ionization.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 марта 1982 года.