

11784

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



ЭКЗ ЧИТ ЗАЛА
Р7 - 11784

Н.К.Скобелев, В.З.Майдигов, Г.С.Попеко,
Ю.В.Гофман, О.Ф.Немец, Ю.Ц.Оганесян

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ
 ^{147}Dy и ^{199}Po - ПРОДУКТОВ
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ

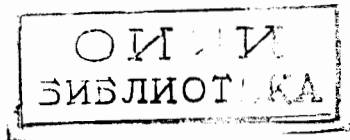
1978

P7 - 11784

Н.К.Скобелев, В.З.Майдиков,* Г.С.Попеко,
Ю.В.Гофман,* О.Ф.Немец,* Ю.Ц.Оганесян

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ
 ^{147}Dy И ^{199}Po - ПРОДУКТОВ
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ

Направлено в ЯФ



* ИЯИ АН УССР, Киев.

Скобелев Н.К. и др.

P7 - 11784

Исследование зарядовых состояний ^{147}Dy и ^{199}Po -
продуктов ядерных реакций полного слияния

Исследовались зарядовые состояния ионов ^{147}Dy и ^{199}Po продуктов ядерных реакций $^{113}\text{Cd}(^{40}\text{Ar},6n)$ и $^{164}\text{Dy}(^{40}\text{Ar},5n)$. Зарядовые распределения изучались на широкодиапазонном магнитном анализаторе. Наблюдаемые значения средних зарядов и полуширины зарядовых распределений исследуемых продуктов реакций значительно превышали расчетные значения. Для средних зарядов это отличие составляло 9 ± 12 единиц, а для полуширин - 7 ± 14 единиц. Этот эффект можно объяснить наличием сильно конвертированных ядерных уровней у ядер ^{147}Dy и ^{199}Po .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Skobelev N.K. et al.

P7 - 11784

Investigation of ^{147}Dy and ^{199}Po Charge States Being the
Products of Full Fusion Nuclear Reactions

Charge states of ^{147}Dy and ^{199}Po being the products of the $^{113}\text{Cd}(^{40}\text{Ar},6n)$ and $^{164}\text{Dy}(^{40}\text{Ar},5n)$ nuclear reactions were investigated. Charge distributions were studied on a wide-range magnetic analyzer. The values observed of average charges and half-widths of charge distributions of products under study considerably exceed the calculated ones. For average charges this difference was 9 ± 12 charge units, and for half-widths was 7 ± 14 charge units. This effect could possibly be due to the presence of strongly converted levels in ^{147}Dy and ^{199}Po levels.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

За последнее десятилетие в связи с дальнейшим развитием ускорительной техники значительно возрос интерес к физике тяжелых ионов. Детальное изучение свойств продуктов ядерных реакций является важным источником информации об их механизме. Широкое распространение при изучении продуктов ядерных реакций получили электромагнитные методы анализа. Однако исследование продуктов ядерных реакций, основанное на таких методах, требует знания распределения эффективных зарядов этих продуктов.

Известно, что при прохождении тяжелой частицы через вещество в столкновениях со стационарными атомами происходит захват или потеря электронов. Этот сложный процесс приводит к установлению равновесного распределения зарядов, на основании которого может быть получено значение среднего заряда.

Известно, что средний равновесный заряд частицы, прошедшей через вещество, является функцией скорости частицы, ее порядкового номера, массового числа, а также состояния конденсированной среды, порядкового номера и массового числа ядер среды. В настоящее время нет достаточно строгой теории по зарядовому распределению прошедших через среду тяжелых частиц.

Оценки, основанные на статистическом рассмотрении, не дают удовлетворительного согласия с экспериментом. Поэтому введены различные эмпирические факторы для объяснения экспериментальных данных по зарядовым распределениям тяжелых частиц. Наиболее полный обзор по этим вопросам представлен Бетцем /1/.

Отметим, что наиболее существенными параметрами зарядового распределения частиц, прошедших через среду,

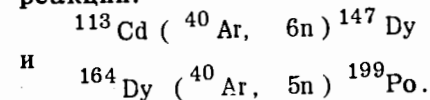
как показали эксперименты, являются скоростью частицы и ее порядковый номер. Равновесное распределение достигается при прохождении ионами твердотельных фольг толщиной 40-80 $\text{мкг}/\text{см}^2$ или газовой среды толщиной 10^{16} - 10^{17} молекул/ см^2 .

Для вычисления параметров зарядовых распределений пролетающих в среде частиц наибольшее распространение получили выражения Бетца^{/1/}, Николаева - Дмитриева^{/2/} и Барона^{/3/}, дающие лучшее согласие с экспериментом в различных энергетических интервалах.

Полученные зарядовые распределения ускоренных ионов аргона и ксенона^{/4/}, а также меди^{/3/} после прохождения углеродных фольг хорошо согласуются с расчетными значениями. Однако при изучении зарядовых состояний продуктов реакций в редкоземельной области / Tb и Ho / были получены зарядовые распределения со средними значениями значительно выше расчетных^{/5/}. Авторы объяснили этот эффект различием в энергиях связи электронов в начальном и конечном состояниях атомов. Значительное увеличение величины среднего заряда /на 15-20 единиц/ и уширение зарядового распределения наблюдалось также для ядер отдачи при α -распаде ^{241}Am ^{/6/}, а также для продуктов реакций с α -частицами^{/7/} и с тяжелыми ионами^{/8/}. Такие сильные отклонения объясняются образованием на внутренних электронных оболочках выбитых из мишени атомов отдачи вакансий вследствие внутренней конверсии ядерных переходов. Последовательное заполнение образовавшихся вакансий за счет переходов с более высоких уровней, сопровождающееся испусканием каскада оже-электронов, приводит к большому дефициту электронов на внешних оболочках, т.е. значительному увеличению заряда выбитого из мишени иона отдачи. Типичные оже-ширины соответствуют временам жизни меньше чем 10^{-15} с, а развивающийся оже-каскад с последовательным заполнением вакансий достигает внешних электронных оболочек за время 10^{-14} с^{/9/}. При прохождении атомов отдачи, образовавшихся в ядерных реакциях с тяжелыми ионами, через дополнительную твердотельную фольгу, установленную на расстоянии, достаточном для распада

на лету низколежащих состояний ядер, происходит восстановление нормального характера зарядовых распределений^{/8/}.

Настоящая работа была предпринята с целью получения дополнительных экспериментальных данных по зарядовым распределениям ионов в области более тяжелых ядер и изучения влияния возбужденных состояний ядер на величину ионного заряда. Нами были проведены эксперименты по исследованию зарядовых распределений диспрозия и полония, образующихся после испарения нейтронов из возбужденных составных ядер - продуктов реакций:



Эти продукты реакций были использованы ранее для определения эффективности широкодиапазонного магнитного анализатора в работе^{/4/}, там же приведено описание схемы эксперимента.

Рабочие мишени были изготовлены из естественной смеси изотопов кадмия путем вакуумного напыления и из обогащенного изотопа диспрозия-164 путем электролиза на 6-микронную алюминиевую подложку. Толщины кадмиевой и диспрозиевой мишеней составляли соответственно $\sim 100 \text{ мкг}/\text{см}^2$ и $\sim 300 \text{ мкг}/\text{см}^2$.

Энергия ионов аргона выбиралась из условия оптимального выхода продуктов реакций с помощью алюминиевых поглотителей и составляла 171 МэВ на слой кадмия и 180 МэВ на слой диспрозия-164. Образовавшиеся ядра-продукты реакций имели кинетическую энергию $\sim 52 \text{ МэВ}$ в первой реакции и $\sim 39 \text{ МэВ}$ - во второй.

Сбор продуктов полного слияния проводился с помощью алюминиевого поглотителя, установленного в фокальной плоскости магнитного анализатора.

Идентификация ^{147}Dy и ^{199}Po проводилась с помощью $\text{Ce}(\text{Li})$ -детектора по известным γ -линиям ^{147}Gd и ^{199}Pb , образовавшихся после цепочки электронных захватов исходных продуктов. Распределение продуктов реакций вдоль фокальной плоскости магнитного анализатора определялось измерением активности соответствующих участков сборника.

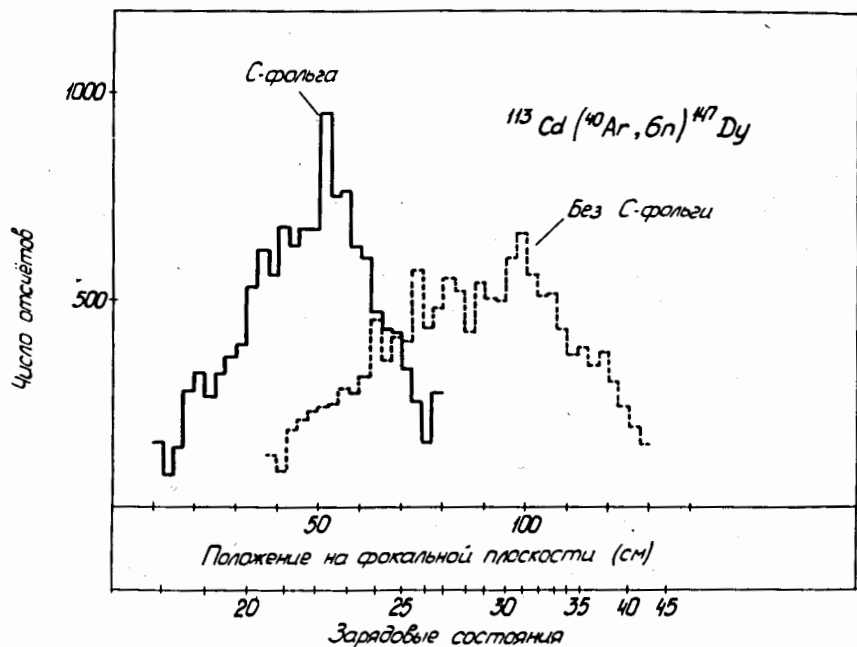


Рис. 1. Зарядовое распределение продуктов реакции $^{113}\text{Cd}(^{40}\text{Ar}, 6n)^{147}\text{Dy}$.

Для дополнительной перезарядки ионов перед входом в магнитный анализатор устанавливалась углеродная фольга толщиной $\sim 45 \text{ мкг/см}^2$. Расстояние от мишени до фольги $\sim 50 \text{ мм}$ / ионы диспрозия проходят за время $\sim 6 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, а ионы полония - за $8 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Максимальное время прохождения атомами отдачи всей толщины мишени, учитывая ее неоднородности, оценивается в обеих реакциях, как 10^{-14} с . Время пролета атомов отдачи из мишени до фокальной плоскости магнитного анализатора не превышает 10^{-7} с .

На рис. 1 и 2 представлены полученные распределения продуктов полного слияния ядер Dy и Po на фокальной плоскости широкодиапазонного магнитного анализатора.

Отметим, что дополнительная перезарядка существенно меняет форму и положение распределения продуктов реакций. При выбранной толщине мишеней энергетиче-

ский разброс ядер отдачи ^{147}Dy и ^{199}Po естественно приводит к размытию пиков отдельных ионных зарядовых состояний. Идентификация зарядовых состояний в каждом случае проводилась по расчетной магнитной жесткости продуктов каждого атомного заряда с использованием калибровочных характеристик анализатора. Вклад отдельных зарядовых состояний в суммарное распределение оценивался в предположении гауссовской формы энергетического размытия по спектроориентированной программе разложения смесей ^{10/}.

Полученные с учетом дисперсии анализатора и других факторов зарядовые распределения ионов диспрозия и полония, непосредственно вылетевших из мишени, а также прошедших дополнительную перезарядку, приведены на рис. 3 и 4. Из этих распределений видно, что дополнительная перезарядка продуктов реакций спустя некоторое

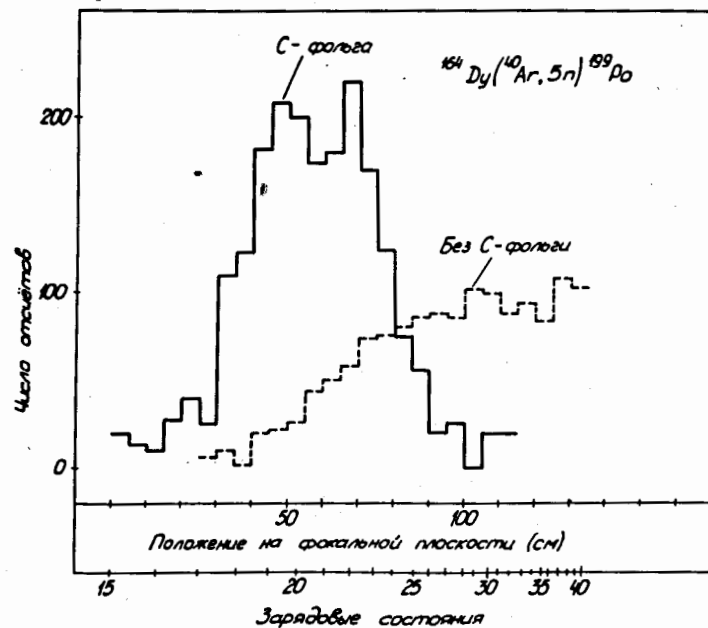


Рис. 2. Зарядовое распределение продуктов реакции $^{164}\text{Dy}(^{40}\text{Ar}, 5n)^{199}\text{Po}$.

время после их образования приводит к практически симметричному зарядовому распределению, близкому к нормальному. Параметры этого распределения для каждой реакции /равновесный заряд \bar{q} и полуширина распределения $\Delta_{1/2}$ / неплохо согласуются с рассчитанными по формулам /1,2/.

Сравнение этих параметров дано в таблице.

Ядро	Кинетическая энергия (МэВ)	Эксперимент				Расчет			
		Без перезарядки	С перезарядкой на С-фольге	Бетц /1/		Николаев /2/			
		\bar{q}	$\Delta_{1/2}$	\bar{q}	$\Delta_{1/2}$	\bar{q}	$\Delta_{1/2}$	\bar{q}	$\Delta_{1/2}$
^{147}Dy	52	29 \pm 1	13	22 \pm 1	5,7	23,5	5,2	20,5	5
^{199}Po	39	30 \pm 1	18	20 \pm 1	4,7	20	5,8	18,5	4,9

Отметим, что в случае ^{147}Dy полуширина зарядового распределения близка к ранее наблюдавшейся для $^{149}\text{Dy}^{5/}$, полученного в реакции $^{138}\text{Ba}(^{22}\text{Ne}, 11n)^{149}\text{Dy}$. Значительное уширение зарядовых распределений и увеличение равновесных зарядов продуктов реакций, по-видимому, происходит за счет испускания большого числа оже-электронов при заполнении вакансий, образованных на внутренних атомных оболочках. В случае ионов полония, как видно из рис. 2, уширение настолько велико, что при средней дисперсии анализатора около 15 мм/% полное распределение занимает почти всю фокальную плоскость анализатора, полная длина которой равна 150 см.

Испускание каскада оже-электронов, по-видимому, завершается за время, соответствующее движению продуктов ядерных реакций в вакууме от мишени до перезарядной фольги.

Исходя из ядерной природы возникновения вакансий на внутренних оболочках этих атомов, можно заключить,

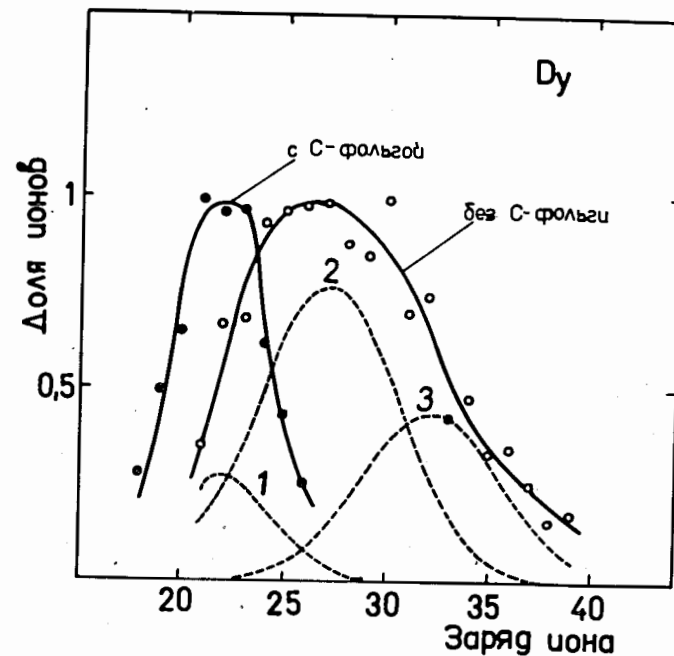


Рис. 3. Доля зарядовых состояний ^{147}Dy /линия для распределения, полученного в эксперименте с углеродной фольгой, соответствует нормальному распределению/.

что в ядрах ^{147}Dy и ^{199}Po должны существовать низколежащие возбужденные состояния с временами жизни в пределах $10^{-14} \text{ с} \leq \tau \leq 10^{-9} \text{ с}$, переходы между которыми должны быть сильно конвертированы.

Нами была предпринята попытка оценить число возможных конвертированных переходов в ядре диспрозия-147 в указанном временном интервале. С этой целью было проведено разложение зарядового распределения продуктов реакции, непосредственно выбитых из мишени и попавших в анализатор. На рис. 3 представлено такое разложение на ряд кривых, соответствующих последовательным конвертированным переходам, приводящим к оже-каскадам. Разложение проводилось также по спектроориентированной программе /10/ в предположении, что зарядовое распределение ионов после каждого по-

следовательного оже-каскада соответствует нормальному.

В суммарное зарядовое распределение ионов могут вносить вклад:

1/ выбитые ионизованные продукты реакций, образовавшиеся в основном состоянии, а также возбужденные продукты, переходы в которых не конвертированы;

2/ дополнительно ионизованные продукты реакций, ядра которых испытывают один или более конвертированных переходов.

При разложении суммарного зарядового распределения считалось, что ядра, образовавшиеся в основном состоянии, или ядра, у которых снятие возбуждения не приводит к испусканию электронов конверсии, будут иметь распределение с равновесным зарядом +22 и шириной,

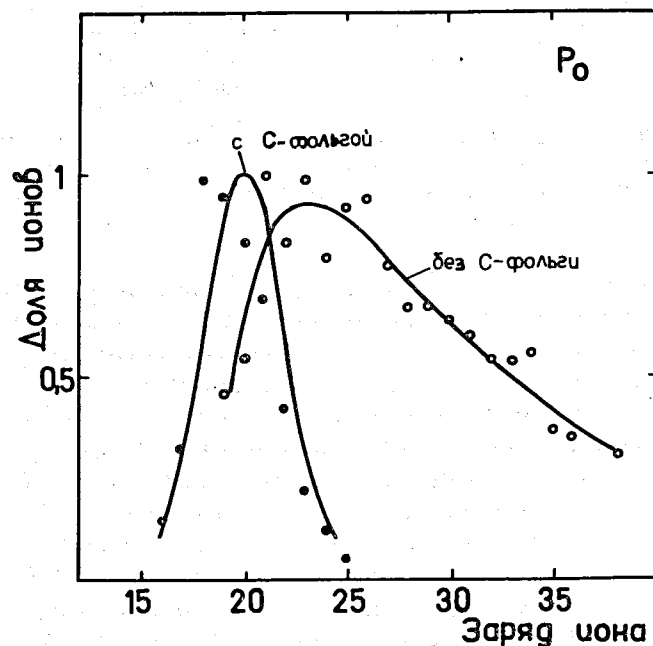


Рис. 4. Доля зарядовых состояний ^{199}Po /линия для распределения, полученного в эксперименте с углеродной фольгой, соответствует нормальному распределению/.

эквивалентной полученной в опытах с дополнительной перезарядкой ^{147}Dy .

Известно, что вакансии на внутренней электронной оболочке нейтрального атома приводят к его ионизации. Причем в среднем заряд иона возрастает в области ядер с $Z > 60$ от 6 до 14 единиц в зависимости от возможной вакансии и Z элемента^{/11/}.

В случае ионизованных атомов, как показано в работах^{/6,9/}, каждая новая вакансия приводит к значительно меньшему увеличению заряда. Основываясь на данных этих работ, мы брали такие же и несколько меньшие значения зарядов, при которых ожидаются максимумы зарядовых распределений, обусловленные испусканием каскада оже-электронов при заполнении образовавшихся при конверсии вакансий. Полуширины распределений выбирались такими же, как в работе^{/6/}, т.е. равными 8е.

Наилучшее согласие с суммарным распределением было получено для разложения со средними фиксированными значениями зарядов +22 /кривая 1/ и +27 и 32 /кривые 2 и 3/.

На основании этого разложения можно сделать вывод, что доля ядер ^{147}Dy , имеющих значение заряда, отвечающее расчетному, составляет около 10%. Можно указать, что в рамках рассматриваемой гипотезы образовавшиеся в реакции ядра ^{147}Dy имеют не менее двух низколежащих состояний, при распаде которых за время $10^{-14} \text{ с} \leq \tau \leq 10^{-9} \text{ с}$ с большой вероятностью испускаются электроны конверсии.

В рамках этой гипотезы следует предположить, что такие же переходы должны существовать и у ядер ^{199}Po . Причем широкое суммарное зарядовое распределение атомов отдачи ^{199}Po свидетельствует о большем числе конвертированных переходов.

Нельзя исключить наличие какого-либо дополнительного механизма образования вакансий на внутренних атомных оболочках. Возможно, что некоторые образовавшиеся при столкновении ядер возбужденные состояния, имеющие несколько большие времена жизни, чем мы предполагаем, приводят к возникновению вакансий на внутренних оболочках. Можно также предположить,

что имеет место относительно быстрый захват орбитальных электронов.

Авторы выражают признательность академику Г.Н.Флерову за интерес к работе, Г.М.Тер-Акопьяну, Р.В.Джолосу и Х.Зодану за полезные обсуждения и замечания, Н.Т.Суравицкой за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Betz H.D. *Rev. of Mod. Phys.*, 1972, 44, p.465.
2. Nikolaev V.S., Dmitriev I.S. *Phys.Lett.*, 1968, 28A, p.277.
3. Baron E. *These, Orsay, 1977, IPNO-T-77-04.*
4. Майдигов В.З. и др. ОИЯИ, P7-11393, Дубна, 1978.
5. Steiger N.H. In: *Proc. of the Third Conf. on Reactions between Complex Nuclei (Asilomar, USA, April 14-18, 1963)*, ed. by A.Chiorso et al. Univ. of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1963.
6. Wieclawick W. *Compt. Rend. Acad. Sc., Paris, 1968, 266, p.577.*
7. Habs D. e.a. *Phys.Rev.Lett.*, 1977, 38, p.387.
8. Skobelev N.K. e.a. *Reaction Model 77, Abstracts, Balatonfüred, Hungary, 1977, p.49.*
9. Metag V. e.a. *Hyperfine Interactions, 1977, 1, p.405.*
10. Злоказов В.Б. ОИЯИ, P10-10350, Дубна, 1976.
11. Carlson T.A. e.a. *Phys.Rev.*, 1966, 151, p.41.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 июля 1978 года.