

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P15-85-786

А.В.Еремин, В.А.Тарабрин, С.В.Степанцов,  
Ю.Л.Обухов, Г.М.Тер-Акопьян

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ СЕПАРАТОР  
ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ  
ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ  
НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
УСТАНОВКИ "ВАСИЛИСА"

1985

Изучение продуктов реакций слияния атомных ядер открывает перспективы для синтеза тяжелых и сверхтяжелых элементов и изучения характеристик ядерного распада нейтронодефицитных изотопов. При изучении пределов стабильности тяжелых ядер /синтез тяжелых и сверхтяжелых нуклидов/ большая интенсивность пучков ионов позволяет получать атомные ядра, которые образуются в ядерных реакциях с поперечными сечениями вплоть до  $10^{-37}$  см<sup>2</sup> /1,2/. Получение нейтронодефицитных изотопов, находящихся на границе ядерной стабильности, связано с изучением характеристик  $\alpha$ -распада /3/ и спонтанного деления /4/, с изучением запаздывающего деления /5/ и различных видов протонного распада /6/ этих нуклидов в широком диапазоне атомных номеров.

Поперечные сечения реакций синтеза этих нейтронодефицитных изотопов не превышают  $10^{-30}$  см<sup>2</sup> и с ростом атомного номера  $Z$  компаунд-ядер быстро уменьшаются. Возможности их исследования определяются в основном чувствительностью экспериментальной методики, которая зависит от интенсивности пучка бомбардирующих частиц и от способности экспериментальной аппаратуры выделять исследуемые нуклиды с достаточно высокой эффективностью и за короткое время.

В ряде работ /см. напр. /7,8/ / высокая эффективность регистрации короткоживущих ядер /~ 60%/ достигалась с помощью установок, в которых ядра отдачи, вылетающие из мишени, вбивались в сборники из различных материалов / Al - фольга, лавсан/ и механически переносились к детекторам. Дальнейшее развитие этот способ получил в работе /1/. С помощью механических систем транспорта ядер отдачи удавалось наблюдать спонтанное деление атомных ядер, период полураспада которых  $T_{1/2} \geq 10^{-4}$  с.

Транспорт ядер отдачи с помощью газовой /аэрозольной/ струи может обеспечить доставку продуктов ядерных реакций к детекторам с эффективностью 40-80%. Методика, основанная на применении такой струи, допускает изучение  $\alpha$ -спектров и кинетической энергии осколков спонтанного деления для атомных ядер, период полураспада которых  $T_{1/2} \geq 10^{-1}$  с /9/. Ионный источник масс-сепаратора, основанный на процессе торможения и перезарядке атомов отдачи в газовом потоке, был описан в /10/. С помощью такого источника достигнуто быстроедействие  $10^{-3}$  с и эффективность 5%.

В литературе описаны различные кинематические сепараторы: электромагнитные, электростатические и комбинированные, допускающие быструю очистку продуктов реакций полного слияния от пучка бомбардирующих частиц. К числу таких устройств относятся

газонаполненные электромагнитные<sup>11,12</sup> и электростатические сепараторы<sup>13,14</sup>, быстродействие которых достигает  $10^{-6}$  с, эффективность 20-60%. Среди кинематических сепараторов наиболее широко на пучке тяжелых ионов применялся фильтр скоростей SHIP<sup>15,16</sup>. Эта установка позволяет анализировать атомы отдачи, вылетающие из мишени под углом  $\pm 1,5^\circ$  к направлению первичного пучка и имеющие разброс зарядовых состояний в пределах 20%. Степень очистки от пучка бомбардирующих частиц зависит от различия скоростей между этими частицами и ядрами отдачи. Коэффициенты очистки от пучков Ag, Kг и Хе составляли  $10^{12}$ ,  $10^{10}$  и  $10^8$  соответственно.

Система регистрации ядер отдачи с использованием время-пролетной методики позволяла грубо определять их массу ( $A \Delta t \sim 10$ ) и надежно регистрировать цепочки  $\alpha$ -распадов и спонтанное деление материнского и дочерних ядер.

В Дубне в Лаборатории ядерных реакций на завершающей стадии создания находится электростатический сепаратор продуктов ядерных реакций установки "Василиса". При электростатической сепарации разделение в пространстве траекторий движения атомов отдачи и бомбардирующих ионов происходит благодаря различию их энергии и, в значительно меньшей мере, зарядового состояния.

Продукты реакций полного слияния с массой  $A = A_1 + A_2$  вылетают из мишени в направлении первичного пучка с энергией  $E = E_1 \cdot \frac{A_1}{(A_1 + A_2)}$ , где  $A_1$  и  $A_2$  - массовые числа налетающей частицы и ядра мишени,  $E_1$  - энергия частицы. Таким образом для реакций полного слияния тяжелых ионов с массой  $A_1$  от 20 до 60 с ядрами мишени с массой  $A_2 \sim 100$  отношение  $E_1/E \sim 3$ .

В литературе<sup>17,18,19</sup> приводятся данные, которые позволяют с достаточной точностью рассчитывать спектры зарядовых состояний и средние значения зарядов бомбардирующих ионов  $q_1$  и продуктов реакций полного слияния  $q$ , вылетающих из твердой мишени\*. Для широкого класса реакций полного слияния, протекающих с тяжелыми ионами с массой  $A_1$  от 20 до 60 с ядрами мишеней с массой  $A_2 \sim 100$ , величина отношения средних значений зарядов находится в узком диапазоне  $q/q_1 \sim 0,9 \div 1,2$ .

Угол отклонения иона в электрическом поле пропорционален величине  $q/E$ , следовательно, отношение  $\alpha/\alpha_1 \sim \frac{(A_1 + A_2)}{A_1} \cdot q/q_1$ .

\* Изменение зарядовых состояний атомов отдачи, вызванное испусканием оже-электронов, легко компенсируется с помощью тонкой графитовой фольги, устанавливаемой на некотором расстоянии от мишени на пути движения атомов отдачи.

где  $\alpha$  и  $\alpha_1$  - углы отклонения атомов отдачи и частиц пучка соответственно. Например, для реакции  $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 2n)^{246}\text{Fm}$ , максимум функции возбуждения которой  $E_{\text{п.в.}} = 200$  МэВ, энергия атомов отдачи  $E \approx 33$  МэВ, среднее значение заряда атомов отдачи  $q = 20$ , ионов пучка  $q_1 = 16$ , отношение углов отклонения в электрическом поле атомов отдачи и ионов пучка  $\alpha/\alpha_1 = 8$ .

Схема установки "Василиса" приведена на рис.1. Сепарация ядер отдачи от пучка бомбардирующих ионов производится ахроматической системой, состоящей из трех электростатических конденсаторов. Максимальная дисперсия по энергии достигается в средней плоскости, проходящей через второй конденсатор. Пространственное разделение траекторий ядер отдачи и бомбардирующих ионов достигается после прохождения частиц через первый конденсатор. Поэтому через два последующих конденсатора проходят ядра отдачи, а основная часть первичного пучка не попадает в апертуру этих конденсаторов /см.рис.2/. Таким образом, при прохождении ядер отдачи через второй и третий конденсаторы достигается двухступенчатая очистка от рассеянных частиц пучка.

Продукты, образующиеся при испарении легких частиц из компаунд-ядра, вылетают из мишени в направлении пучка бомбардирующих частиц, но с определенным разбросом по углам, энергии и зарядовым состояниям. Вклад в дисперсию углового распределения вносит испарение легких частиц /нейтроны, протоны,  $\alpha$ -частицы/ из компаунд-ядра, и многократное рассеяние в веществе мишени. Оценки углового распределения зависят от многих факторов: от соотношения массовых чисел бомбардирующих ионов и ядер мишени, от числа испарившихся легких частиц, толщины мишени, от энергии налетающих ионов. В случае реакций типа (III, xp) это распределение значительно уже по сравнению с реакциями типа (III, axh). Описываемая установка предназначена, в основном, для сепарации продуктов реакций первого типа (III, xp). Согласно расчетам /см., напр., работу<sup>16</sup>/, чтобы анализировать около 60% ядер отдачи, вылетающих из мишени, в большинстве случаев достаточно иметь угол захвата  $\pm 13^\circ$ .

Ядра отдачи имеют довольно широкое энергетическое распределение, которое обусловлено, главным образом, потерями энергии в слое мишени. Например, в случае реакции  $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 2n)^{246}\text{Fm}$  при толщине мишени  $0,5$  мг/см<sup>2</sup> вылетающие атомы отдачи  $^{246}\text{Fm}$  будут иметь энергию в диапазоне от 33 до 26 МэВ. После прохождения графитовой фольги толщиной  $30$  мкг/см<sup>2</sup> 60% этих атомов будут иметь зарядовые состояния  $q = 19, 20$  и  $21$ .

Фокусирующие элементы установки должны быть рассчитаны с учетом указанных диапазонов углового, энергетического и зарядового распределений атомов отдачи. Схема установки включает в себя два триплета квадрупольных электромагнитных линз, которые расположены на оси пучка бомбардирующих ионов до и после системы конденсаторов /рис.1 и 2/. Первый триплет линз обеспечивает формирование подходящего профиля пучка ядер отдачи на участке

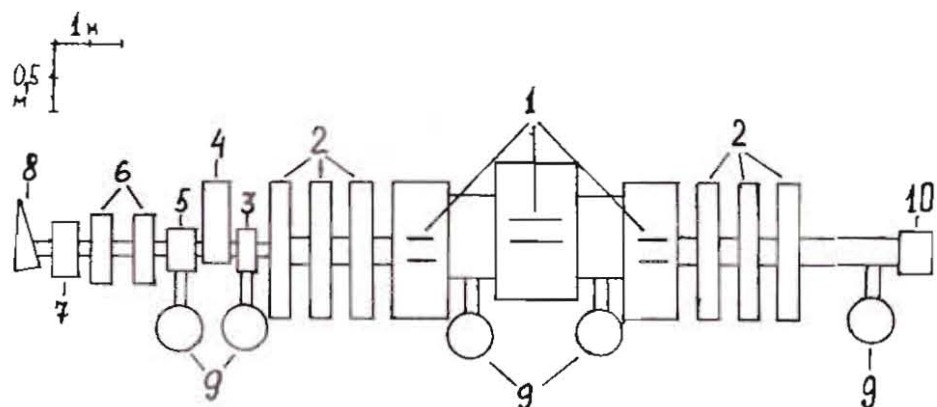


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 - электростатические конденсаторы, 2 - триплеты квадрупольных электромагнитных линз, 3 - вращающаяся мишень, 4 - электромагнит поворота пучка на  $4^\circ$ , 5 - блок диагностики пучка, 6 - дублет квадрупольных электромагнитных линз, 7 - блок разделения вакуумных объемов циклотрона, 8 - поворотный магнит, 9 - турбомолекулярные насосы, 10 - приемное устройство.

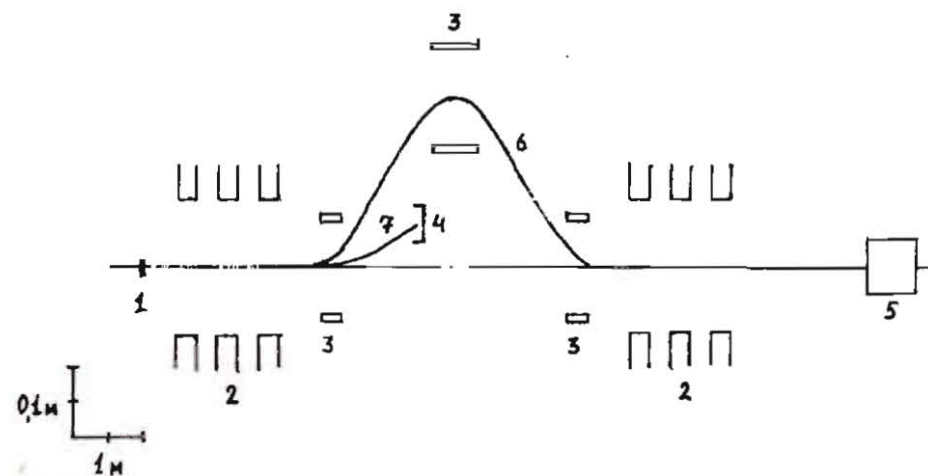


Рис.2. Центральные траектории ядер отдачи и ионов первичного пучка. 1 - мишень, 2 - триплеты квадрупольных электромагнитных линз, 3 - электростатические конденсаторы, 4 - цилиндр Фарадея, 5 - приемное устройство, 6 - ядра отдачи, 7 - первичный пучок.

дрейфа, на котором расположена система трех конденсаторов. Второй триплет позволяет получить относительно малое поперечное сечение пучка этих ядер в плоскости их регистрации, в которой располагается приемное устройство /см. рис.1/.

В схему установки входят также следующие узлы: мишенная камера, блок диагностики пучка, дублет квадрупольных электромагнитных линз для фокусировки пучка на мишень, блок разделения вакуумных объемов циклотрона и установки. Пучок бомбардирующих ионов до попадания на мишень проходит через зазор дипольного электромагнита. Изменением напряженности поля в этом зазоре можно варьировать угол между направлением движения пучка и осью установки в пределах от 0 до  $4^\circ$ .

Расчеты ионно-оптической системы установки "Василиса" проводились по программам TRANSPORT и DECAY TURTLE, описанным в [20,21]. Согласно этим расчетам, через сепаратор практически без потерь можно пропускать атомы отдачи с относительной дисперсией по энергии  $\pm 10\%$  и в относительном зарядовом диапазоне  $\pm 5\%$ . Это позволит анализировать около 60% всех атомов отдачи, вылетающих из мишени под углом  $\pm 3^\circ$ . На рис.3 показаны огибающие пучка атомов отдачи для реакции  $^{208}\text{Pb} (^{40}\text{Ar}, 2n) ^{246}\text{Fm}$ , рассчитанные по программе TRANSPORT для двух зарядовых состояний. Как видно из рисунка, в пространстве системы трех конденсаторов можно получить квазипараллельный пучок ядер отдачи с диаметром 6-8 см. Параметры ионно-оптической системы установки "Василиса" приведены в таблице.

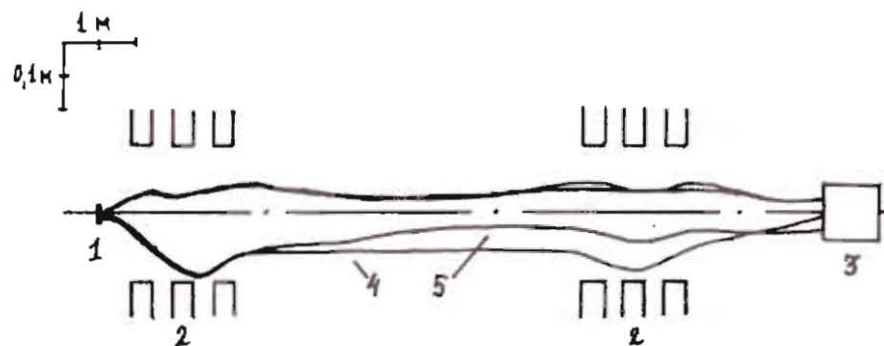


Рис.3. Огибающие пучка атомов отдачи для двух зарядовых состояний. 1 - мишень, 2 - триплеты квадрупольных электромагнитных линз, 3 - приемное устройство, 4 - зарядовое состояние 20, 5 - зарядовое состояние 21.

Таблица  
 Параметры ионно-оптической системы установки

Квадрупольные линзы:

Апертура	20 см
Эффективная длина	35 см
Максимальный градиент	10 Тл/м

Электрическая система:

Расстояние между пластинами	15 см
Эффективная длина пластин	2 x 40 см и 80 см
Максимальная напряженность поля	20 кВ/см

На каждую пару пластин конденсаторов высокое напряжение подается симметрично от отдельного источника питания. Максимальное напряжение на пластинах  $\pm 150$  кВ. Как показали эксперименты, при вакууме  $5 \cdot 10^{-7}$  Тор и первичном пучке  $^{40}\text{Ar} / 220$  МэВ,  $10^{12}$  част/с/, проходящем через конденсатор, электрических пробоев не возникает. Пульсации источников питания по высокому напряжению составляют  $\pm 5\%$ , и с учетом энергетического разброса ядер отдачи они практически не сказываются на условиях сепарации.

Вакуумная система установки рассчитана на получение разрежения до  $10^{-6}$  Тор, которое обеспечивается пятью турбомолекулярными насосами со скоростью откачки 500 л/с каждый. Чтобы избавиться от паров масла, которые могут попасть в объем установки из объема циклотрона, между этими двумя объемами установлена азотная ловушка /см. на рис.1 блок разделения вакуумной системы циклотрона от объема установки/.

В установке используется вращающаяся мишень. Она рассчитана таким образом, чтобы выдерживать пучки тяжелых ионов /например,  $^{48}\text{Ca}$  с энергией 300 МэВ/ интенсивностью до  $10^{13}$  част/с. В мишенном узле используется двигатель с плавной регулировкой числа оборотов от 60 до 3000 в мин.

Поперечное сечение пучка бомбардирующих ионов, падающего на мишень, должно быть  $\leq 1$  см, что достигается с помощью дублета квадрупольных линз /см. рис.1/. Для исключения возможности попадания частиц пучка на края деталей крепления мишени используются корректирующие магниты.

Чтобы исключить в плоскости мишени частицы пучка, траектории которых выходят за пределы поперечного сечения диаметром 1 см, на пути бомбардирующих ионов от циклотрона до установки устанавливаются диафрагмы. Сильной помехой для анализа ядер отдачи могут служить ионы пучка с энергиями  $E_1 \leq 40-50$  МэВ и с зарядами  $q_1 \leq 10$ , т.к. в этом случае  $q_1/E_1 \sim q/E_1$ , где  $q$  и  $E$  - заряд и

энергия атомов отдачи. С целью устранения низкоэнергетичной составляющей пучка бомбардирующих ионов используются два дипольных магнита, которые входят в систему транспортировки пучка от циклотрона к установке. В них устанавливаются диафрагмы, не пропускающие низкоэнергетичные частицы пучка. По программам TRANSPORT и DECAY TURTLE были проведены расчеты, показавшие, что число низкоэнергетичных ионов пучка с  $q_1/E_1 \sim q/E$ , попадающих в систему трех конденсаторов, пренебрежимо мало.

В модельных экспериментах была испытана установка с одной ступенью электростатической сепарации. Разность потенциалов на пластинах конденсатора равнялась 140 кВ, вакуум в установке -  $5 \cdot 10^{-7}$  Тор при использовании турбомолекулярного насоса с азотной ловушкой. Были проведены эксперименты с реакцией  $^{184}\text{Dy}(^{40}\text{Ar}, 5n)^{199}\text{Po}$ . Получены коэффициенты очистки ядер отдачи от ионов пучка  $10^5$  и эффективность транспортировки ядер отдачи от мишени до плоскости регистрации 10%.

Авторы выражают благодарность профессору Ю.Ц.Оганесяну за постоянное внимание к данной работе, Л.А.Рубинской за выполнение технического проекта установки, Ф.Ш.Абдуллину - за участие в модельных экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оганесян Ю.Ц. Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов, ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с.55.
2. Munzenberg G. et al. Z.Phys., 1981, A300, p.107.
3. Hofmann S. et al. Z.Phys., 1979, A291, p.53.
4. Somerville L.P. et al. Phys.Rev., 1985, C31, p.1801.
5. Гангский Ю.П. и др. ОИЯИ, P7-12584, Дубна, 1979.
6. Cable M.D. et al. Phys.Rev.Lett., 1983, 50, p.404.
7. Гиорсо А. Международная школа-семинар по взаимодействию тяжелых ионов с ядрами и синтезу новых элементов, ОИЯИ, Д7-9734, Дубна, 1975, с.33.
8. Chepigin V.I. et al. JINR, E15-9064, Dubna, 1975.
9. Nitschre J.M. et al. Nucl.Phys., 1979, A373, p.235.
10. Austo J. et al. Phys.Lett., 1984, 138B, p.369.
11. Lawin H. et al. Nucl.Instr. & Meth., 1976, 137, p.103.
12. Ghiorso A. et al. LBL 15995, Berkeley, 1984.
13. Dahlinger M. et al. Nucl.Instr. & Meth., 1983, 219, p.513.
14. Enge H.A. Nucl.Instr. & Meth., 1981, 186, p.413.
15. Munzenberg G. et al. Nucl.Instr. & Meth., 1979, 161, p.65.
16. Faust W. et al. Nucl.Instr. & Meth., 1979, 166, p.397.
17. Shima K. et al. Nucl.Instr. & Meth., 1982, 200, p.605.
18. Nikolaev V.S. et al. Phys.Lett., 1968, 28A, p.277.
19. Betz H.D. Rev.Mod.Phys., 1972, 44, p.465.
20. Brown K.L. et al. CERN, 80-04, Geneva, 1980.
21. Brown K.L. et al. CERN, 74-2, Geneva, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
 1 ноября 1985 года.