

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1944/83

18/4-83

P7-82-890

Р.Н.Сагайдак, А.Г.Демин, В.А.Друин,
Ю.В.Лобанов, В.К.Утенков, З.Хюбенер

ОБРАЗОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ИЗОТОПОВ
Cf, Es, Fm и Md В РЕАКЦИЯХ
МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ,
ВЫЗЫВАЕМЫХ ИОНАМИ ^{15}N , ^{18}O И ^{22}Ne
НА ^{249}Bk , Cf

1982

1. ВВЕДЕНИЕ

Реакции передачи нуклонов налетающего иона ядру мишени широко изучаются в настоящее время ^{1-6/}. Детально исследованы процессы захвата как нескольких нуклонов ^{5-6/}, так и больших комплексов с зарядом в 9 единиц ^{4/} ядрами различных мишеней. Эти данные, за небольшим исключением ^{3/}, касаются области неделящихся ядер. В области делящихся ядер аналогичных работ до последнего времени не проводили, если не считать отдельных данных о сечениях образования различных актинидов в реакциях $(\text{HI}, \alpha \text{Xn})$ ^{3,7-11/}.

Особый интерес изучение реакций передач в области делящихся ядер приобретает в связи с проблемой получения новых изотопов актинидных элементов. Так, многонуклонные передачи являются основным источником фона в экспериментах по синтезу новых нуклидов в реакциях полного слияния (HI, Xn) с использованием актинидных мишеней и относительно легких налетающих ионов. Особенно остро проблема фона стоит в экспериментах по синтезу спонтанно делящихся нуклидов, идентификация которых представляет значительные трудности ^{12,13/}. Вместе с тем обнаружение новых спонтанно делящихся активностей, не связанных с реакциями полного слияния, имеет, очевидно, и самостоятельный интерес, так как эти активности могут быть новыми изотопами тяжелых актинидов либо неизвестными изомерными состояниями известных нуклидов, образующихся в реакциях передач.

Подробно реакции многонуклонных передач в области сильноделящихся ядер стали изучаться лишь в последнее время. Так, образование различных долгоживущих изотопов /от Вк до 102 элемента/ в реакциях $^{248}\text{Cm} + ^{16,18}\text{O}$ и $^{248}\text{Cm} + ^{20,22}\text{Ne}$ изучалось недавно с использованием радиохимической методики ^{14/}. Большое внимание образованию актинидов уделялось в экспериментах по получению сверхтяжелых элементов в реакциях глубоконеупругих передач при облучении ^{248}Cm ионами ^{238}U и ^{238}U ионами ^{238}U ^{15/}.

Несмотря на эти усилия многие стороны механизма образования нуклидов с массами в интервале между массой компаунд-ядра и массой мишени в области ядер, где деление является доминирующим каналом, остаются неясными. Это касается, например, энергий возбуждения и угловых моментов первичных фрагментов и их распределения между различными каналами реакций. Однако изучение процесса образования различных изотопов актинидных элементов в широкой области масс налетающих ионов и их энергий позволит, по-видимому, установить некоторые общие черты реакций их образования. Это, в свою очередь, определит возможности получения новых изотопов трансфермиевых элементов в различных реакциях многонуклонных передач.

Настоящая работа посвящена исследованию реакций многоноуклонных передач в области тяжелых актинидов, ранее /16,17/ по этой теме были опубликованы краткие сообщения. Здесь приводятся результаты измерений функций возбуждения реакций образования некоторых тяжелых актинидов, вызываемых ионами ^{15}N , ^{18}O и ^{22}Ne с энергиями от 7 МэВ/нуклон до глубоко подбарьерной на мишенях из ^{249}Bk и ^{249}Cf .

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Облучения ^{249}Bk и ^{249}Cf проводились на выведенном пучке циклотронов ОИЯИ У-300 ионами $^{15}\text{N}^{+3}$, $^{22}\text{Ne}^{+4}$ и У-200 ионами $^{18}\text{O}^{+4}$. Время облучения составляло 0,5-6 часов. Схема установки показана на рис.1. Облучения проводились ионами с током 0,5-1,5 мкА.

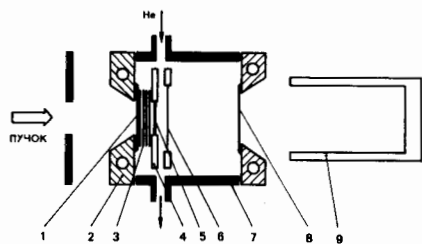


Рис.1. Схема реакционной камеры: 1,8 - входное и выходное окна; 2 - держатель мишени; 3 - алюминиевые поглотители; 4 - кассета мишени; 5 - мишень; 6 - сборник ядер отдачи - продуктов ядерных реакций; 7 - корпус реакционной камеры; 9 - вакуумный цилиндр Фарадея.

Мишени из ^{249}Bk и ^{249}Cf изготавливались путем послойного нанесения вещества на алюминиевые подложки толщиной 2,3 мг/см с последующим прокаливанием на воздухе до превращения вещества в оксидную форму. Содержание дочернего ^{249}Cf в свежеприготовленной мишени из ^{249}Bk не превышало 0,5%. Толщина мишени - от 0,1 до 0,5 мг/см², площадь - 0,5 см². Мишени заряжались в медную кассету /4/ и устанавливались на охлаждаемом водой держателе /2/.

Реакционная камера /7/ отделялась от вакуумного объема циклотрона /ионопровода/ входным /1/ и выходным /8/ алюминиевыми окнами /толщиной 2,3 мг/см²/ и в рабочих условиях наполнялась гелием до давления 100 Тор для предотвращения перегрева окон, поглотителей и мишени.

Энергия пучков ионов ^{22}Ne и ^{18}O измерялась в ходе облучения по упругому рассеянию на тонкой /0,1 мг/см²/ золотой мишени, расположенной перед входом в реакционную камеру. Полученные таким образом значения энергии для ионов ^{22}Ne - 178 ± 4 МэВ и для ионов ^{18}O - 128 ± 3 МэВ хорошо согласуются с величинами, вычисленными на основе известных значений параметров циклотрона при ускорении данных ионов и измеренными с помощью отклоняющего магнита. Входная энергия ионов ^{15}N принималась равной 145 ± 2 МэВ, согласно многочисленным измерениям с помощью отклоняющего магнита.

Энергия ионов, падающих на мишень, варьировалась с помощью алюминиевых поглотителей /3/, необходимая толщина которых определялась по таблицам пробег-энергия /18/. Поглотители заряжались в отдельную кассету и устанавливались перед мишенью /5/ на том же держателе /2/. Алюминиевые фольги толщиной от 1,2 до 2,3 мг/см², расположенные на расстоянии 2-3 мм от мишени, служили сборниками ядер отдачи /6/.

Проводилось два типа экспериментов. В первом из них после облучения берклиевой мишени ионами ^{15}N , ^{22}Ne и калифорниевой мишени ионами ^{18}O сборники экспонировались в контакте с диэлектрическими детекторами для регистрации актов спонтанного деления продуктов ядерных реакций, остановленных в сборниках. В качестве детекторов использовались слюда или лавсан, эффективность регистрации которых составляла 90%.

Во втором, с использованием радиохимического выделения, после облучения калифорниевой мишени ионами ^{22}Ne часть сборника экспонировалась в контакте с трековым детектором, а из другой части приготавливались тонкослойные образцы для альфа-спектрометрии. Для этого выделяли легколетучие элементы / $\Delta H_{\text{сублимации}} \leq 200$ кДж/моль/ из расплава алюминия с лантаном в атмосфере He при $T = 1300-1400$ К. Испарившиеся из сборника продукты осаждались на танталовой фольге, температура которой изменялась от указанной выше до 300 К, на расстоянии 30 мм от тигля /одна из модификаций этой установки использовалась ранее при изучении летучести менделевия /19/. При такой процедуре из сборника выделялись все щелочные и щелочноземельные элементы, редкоземельные / Eu и Yb / и тяжелые актиниды /от Cf до 102 элемента/. Использование градиента температуры в зоне адсорбции на тантале позволило получить частичное разделение Es , Fm , Md от Cf . Выход продуктов определялся по γ -активности ^{249}Cf и спонтанно делящейся активности ^{256}Fm измеряемой части сборника, не подвергавшейся химической переработке, и танталовой фольги с продуктами химического выделения. Измеряемые таким образом выходы составляла $80 \pm 5\%$ для Cf и $90 \pm 5\%$ для Es , Fm , Md . Продолжительность выделения в среднем составляла 30 минут.

В облучениях Cf ионами Ne при энергиях ниже барьера, когда большая часть энергии налетающих частиц "сбрасывалась" алюминиевыми поглотителями, необходимо было учитывать вклад в образование изотопов вторичных реакций типа $^{249}\text{Cf}(\alpha, xn)^{253-x}\text{Fm}$, вызываемых быстрыми α -частицами, образующимися на Al . Наиболее опасна в этом плане реакция $^{249}\text{Cf}(\alpha, 2n)^{251}\text{Fm}$, имеющая максимальное сечение /20/. Принимая интегральное сечение образования быстрых α -частиц равным $1,6 \cdot 10^{21}$ и учитывая, что в образовании Fm в реакциях (α, xn) участвует только поверхностный слой мишени, мы получили верхнюю границу кажущегося сечения образования ^{251}Fm , равную 1 мкб.

3. ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

А. Измерение спонтанного деления

Экспозиции сборников на слюде /лавсане/ позволили проследить изменение активности спонтанно делящихся продуктов во времени. Сборники после облучения ^{249}Bk ионами ^{22}Ne экспонировались около полугода с целью наблюдения распада долгоживущего ^{254}Cf . Во всех случаях было получено накопление спонтанно делящейся активности и ее распад с периодом полураспада около 2,6 часа. Примеры некоторых кривых изменения активности показаны на рис.2. Единственной спонтанно делящейся активностью с таким временем жизни является ^{256}Fm / $T_{1/2} = 157$ мин, $SF = 92\%$ /. Чтобы определить ее предшественника /материнский нуклид/, кривые изменения активности обрабатывались методом наименьших квадратов. Для этого в фитировании кривых период первично образованного продукта использовался как свободный параметр, а прямым образованием ^{256}Fm в реакциях пренебрегалось. Во всех случаях было получено значение $T_{1/2}$, согласующееся в пределах ошибки с известным для $^{256}\text{Md}/^{22}$ /. Так, для кривых распада, представленных на рис.2, значения $T_{1/2}$ составляли: $79,7 \pm 0,8$ мин ($^{249}\text{Bk} + ^{22}\text{Ne}$), 70 ± 8 мин ($^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$). В дальнейшем анализ кривых накопления и распада проводился методом наименьших квадратов в предположении независимого образования ^{256}Md / $T_{1/2} = 77$ мин, э.з. 90% /, его дочернего продукта ^{256}Fm и с учетом постоянного долгоживущего фона. Анализ показал, что во всех случаях регистрируемые события спонтанного деления практически полностью обусловлены образованием ^{256}Md в реакциях. При этом верхняя граница сечения прямого образования ^{256}Fm составляла примерно десятую часть приводимого сечения прямого образования ^{256}Md . Чтобы измерить величину сечения прямого образования ^{256}Fm в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Bk}$, где был получен максимальный выход ^{256}Md , было проведено облучение с использованием медленно движущейся / $V = 0,057$ см/с / "бесконечно" длинной / $l = 500$ м / ленты - сборника ядер отдачи /12/. В этом случае накопленные в сборнике за время облучения $\tau \approx d$ мишени / V ленты атомы отдачи непрерывно переносились к трековым детекторам осколков деления, расположенным вдоль ленты. Облучение проводилось при энергии ионов ^{22}Ne 123 МэВ, соответствующей максимуму функции возбуждения реакции образования ^{256}Md . Полученная таким образом "кривая распада" показана на рис.3. В результате анализа было определено с удовлетворительной точностью сечение образования ^{256}Md , согласующееся с полученным в опытах с неподвижным сборником, и сечение прямого образования ^{256}Fm . Сечение образования ^{256}Md (^{256}Fm) вычислялось по получаемой в результате анализа скорости образования ^{256}Md (^{256}Fm) полной эффективности регистрации /0,8/, числу атомов в мишени, интегральному потоку ионов и времени облучения. Считалось, что все образованные ядра ^{256}Md (^{256}Fm) вылетели из мишени и остановились в сборнике /17/. С учетом того, что ^{256}Fm может образоваться путем

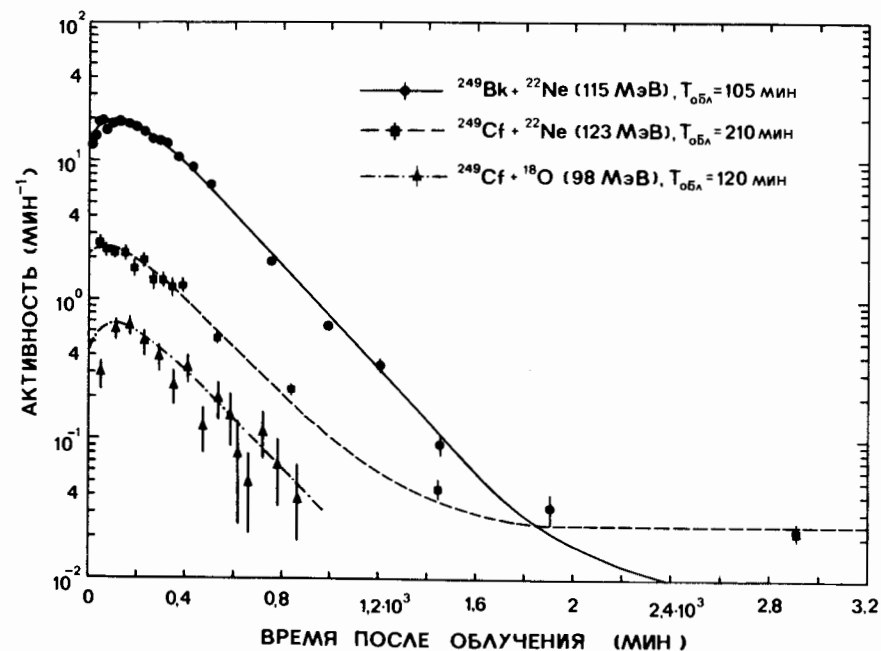


Рис.2. Примеры кривых изменения спонтанно делящихся активностей, образующихся в реакциях $^{249}\text{Bk} + ^{22}\text{Ne}$ (●), $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ (■), $^{249}\text{Cf} + ^{18}\text{O}$ (▲). Линии - результаты фитирования методом наименьших квадратов в предположении независимого образования ^{256}Md и ^{256}Fm в реакциях и с учетом постоянного фона.

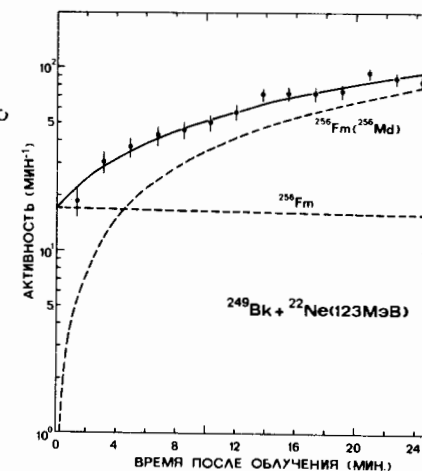


Рис.3. Кривая накопления спонтанно делящейся активности, образующейся в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{22}\text{Ne}$ в экспериментах с движущимся сборником ядер отдачи. Пунктир - вклады составляющих: ^{256}Fm , образующегося в реакциях, и ^{256}Fm из распада ^{256}Md , полученные в результате фитирования методом наименьших квадратов в предположении независимого образования ^{256}Md и ^{256}Fm в реакциях /сплошная линия/.

β^- -распада ^{256}Es , который в реакциях может получаться как в основном, так и в изомерном состояниях с периодами полураспада 25 мин и 7,6 час 222 , были определены верхние границы сечений образования данного нуклида в этих состояниях. На основе постоянного значения долгоживущего фона спонтанно делящейся активности были определены также верхние границы сечений образования ^{254}Cf в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{22}\text{Ne}$. Систематическая ошибка в значениях сечений образования ^{256}Md (^{256}Fm) обуславливалась неопределенностями толщины мишеней, величины интегральных потоков ионов, прошедших через мишень, а также вариацией тока ионов во время облучений, и оценивалась величиной +20%. В сечениях образования, полученных в реакциях на ^{249}Bk , учтены поправки на образование соответствующих продуктов в реакциях на ^{249}Cf и распад ядер мишени $\text{Bk} / T_{1/2} (^{249}\text{Bk}) = 314$ дней/.

Б. Измерение альфа-активности

В реакции $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ тонкослойные образцы, полученные после термохроматографического выделения актинидов из сборника ядер отдачи, измерялись на 8-канальном альфа-спектрометре с $\text{Si}(\text{Au})$ поверхностно-барьерными детекторами. Спектры записывались многоканальным анализатором /8x512 каналов/ и выводились периодически для построения кривых распада наблюдаемых альфа-активностей. Измерения продолжались больше месяца с тем, чтобы наблюдать распад долгоживущих альфа-излучателей, таких как ^{253}Es .

С целью определения числа зарегистрированных альфа-частиц отдельных излучателей полученные альфа-спектры обрабатывались с помощью программы UPEAK^{23/}, в которой для аппроксимации пиков использовалась "аппаратурная форма линии" калибровочного источника $^{212}\text{Po} / E_\alpha = 8,785$ МэВ/. Несколько примеров спектров, полученных в наших измерениях, и их обработки представлены на рис.4, где сплошными линиями изображены вклады различных компонент спектра. Получаемые кривые распада обрабатывались методом наименьших квадратов с тем, чтобы идентифицировать наблюдаемые активности по периоду полураспада и по энергии альфа-частиц. В частности, для линии 7,04 МэВ, которая, в принципе, могла быть связана с двумя нуклидами ^{252}Fm и ^{255}Fm , имеющими близкие времена жизни, было получено значение $T_{1/2} = 25,39 \pm 0,06$ час, хорошо согласующееся с табличными данными 222 / для ^{252}Fm . Этот факт, а также полученные впоследствии изотопные распределения Fm /см.ниже/ позволили сделать вывод о том, что эта активность относится в основном к ^{252}Fm . В результате анализа кривых распада ^{253}Es было обнаружено, что практически вся активность этого нуклида в изучаемом диапазоне энергий налетающих ионов обусловлена распадом его материнского продукта ^{253}Fm /электронный захват /э.з./ - 88%/. Пример кривой накопления и распада ^{253}Es , полученной в измерениях при энергии ионов ^{22}Ne 123 МэВ, приведен на рис.5. При этом пре-

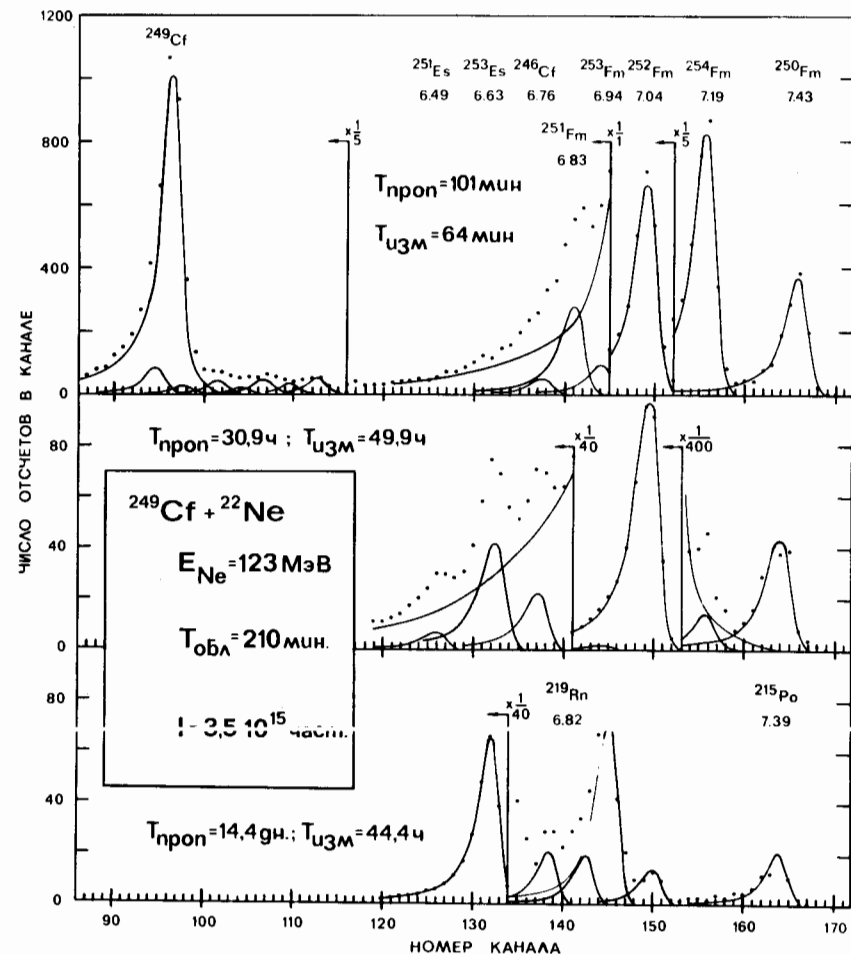


Рис.4. Примеры альфа-спектров, полученных в измерениях после термохроматографического выделения продуктов с $Z \geq 98$, образующихся в реакциях $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$. Точки - число отсчетов в каналах, сплошные линии - вклады различных активностей, указанных на рисунке.

делы сечений прямого образования ^{253}Es не превышали 10% от сечений образования ^{253}Fm во всем изучаемом диапазоне энергий налетающих ионов. Экспериментальные значения периодов полураспада, полученные для активности, идентифицированной как ^{250}Fm , совпадали с табличными данными 222 / для этого нуклида. В то же время в измерениях долгоживущих продуктов проявилась активность с близким значением энергии альфа-частиц /7,39 МэВ/ и периодом полурас-

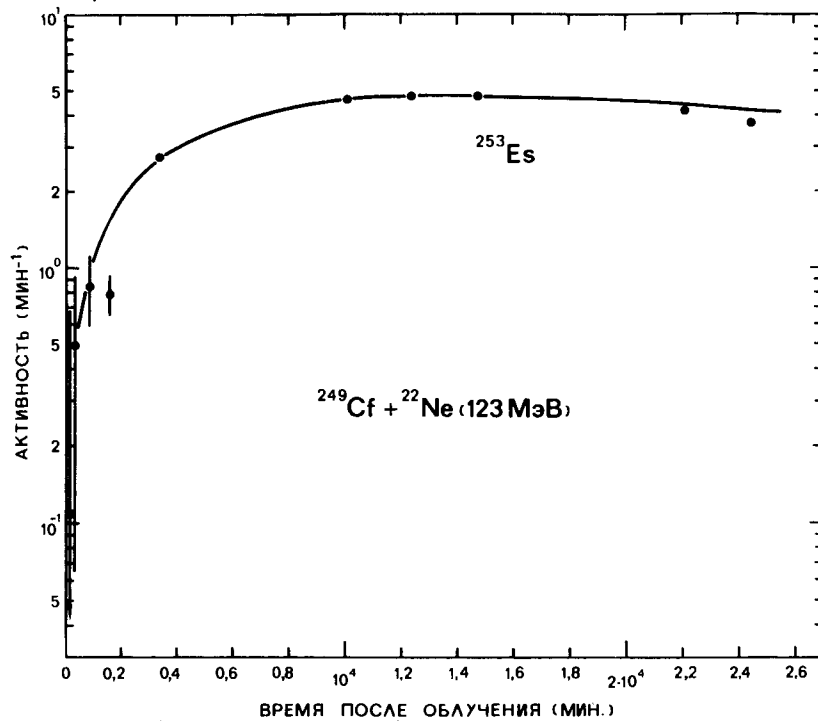


Рис. 5. Кривая накопления и распада ^{253}Es , образующегося в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ (●). Сплошная кривая - изменение активности ^{253}Es , получаемого в результате распада ^{253}Fm .

пада около 10 дней. Такой же период имел и обнаруженный излучатель с энергией 6,82 МэВ. Равные интенсивности этих активностей и период полураспада позволяли отнести их к ^{215}Po и ^{219}Rn , являющимся продуктами распада ^{223}Ra / $T_{1/2} = 11,4$ дня / - щелочно-земельного элемента, который мог выделяться из сборника наряду с актинидами. Следует отметить, что активность этого нуклида в наших условиях не мешала определению сечений образования актинидов. Свойства наблюдаемых нуклидов, а также некоторых соседних нуклидов приведены в таблице /22/.

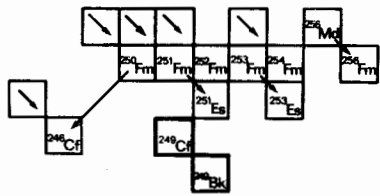
Сечения образования идентифицированных нуклидов были вычислены по измеренной активности, геометрии измерений, химическому выходу, числу атомов в мишени, интегральному потоку ионов, временному режиму облучения и измерения. Считалось, что все образовавшиеся продукты вылетели из мишени и остановились в сборнике /17/. Величина ошибки в получаемых значениях сечений определялась как погрешностями, указанными ранее для сечений образования ^{256}Md (^{256}Fm), так и дополнительными погрешностями в величинах химического выхода и геометрии измерений и оценивалась величиной +40%.

Таблица
Характеристики распада наблюдаемых нуклидов

Нуклид	Вид распада	Период полураспада	Ветвь распада	Энергия альфа-частиц (МэВ)	
Cf	246	α	35,7 час	1,0	6,76
	254	SF	60,5 дн	1,0	-
Es	251	α	33 час	0,005	6,29
	253	α	20,47 дн	1,0	6,63
Fm	250	α	30 мин	1,0	7,42
	251	α	5,3 час	0,017	6,83
	252	α	25,39 час	1,0	7,04
	253	α	3,0 дн	0,081	6,94
	254	α	3,24 час	1,0	7,19
	255	α	20,07 час	1,0	7,02
Md	256	SF	2,627 час	0,92	-
	256	EC \rightarrow SF	76 мин	0,83	-
102^{259}	α	58 мин	0,78	7,67-7,44	

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные сечения образования тяжелых актинидов при различных энергиях налетающих ионов позволяют построить функции возбуждения соответствующих реакций. Следует отметить, что в приводимых ниже сечениях образования для большинства нуклидов не учтены вклады от распадов их возможных короткоживущих предшественников /материнских продуктов/, какими являются, например, изотопы Md для регистрируемых изотопов Fm, то есть приводимые величины сечений являются кумулятивными. Карта изотопов, идентифицированных в настоящей работе, и их возможных короткоживущих предшественников показана на рис.6. Однако эти же величины сечений можно считать независимыми на основании: соответствующего анализа кривых распада - образование ^{256}Fm и ^{253}Es , пренебрежимо мало-го вклада от распада материнских продуктов /изотопов Md и 102 элемента в случае образования изотопов Fm /, которые должны иметь на несколько порядков величины меньший выход, как это следует из аналогичных измерений /14/, учета вклада предшественников ($^{250}\text{Fm} \xrightarrow{\alpha} ^{246}\text{Cf}$ и $^{251}\text{Fm} \xrightarrow{\alpha} ^{247}\text{Es}$). Для всех приводимых сечений указаны только статистические ошибки /там, где они превышают размеры точек/.



2 Рис.6. Участок карты изотопов, идентифицированных в настоящей работе /обозначены соответствующим символом/ и их возможных предшественников /материнских продуктов/, помеченных стрелкой, приводящих к образованию идентифицированных нуклидов.

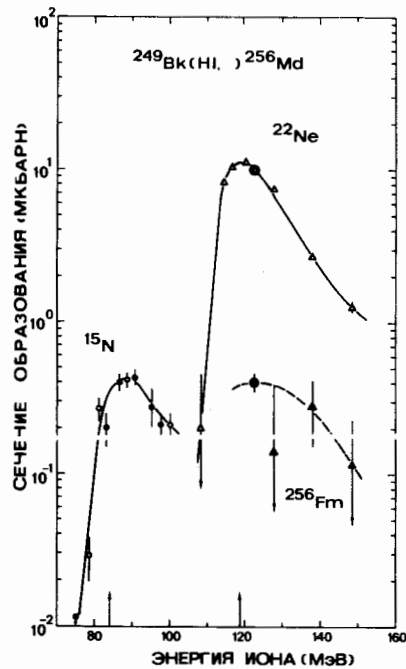


Рис.8. Энергетическая зависимость сечения образования ^{256}Md в реакциях ионов ^{18}O (Δ) и ^{22}Ne (\bullet) с ^{249}Cf . Кривые проведены через экспериментальные точки.

Энергетическая зависимость сечения образования ^{256}Md в реакциях с ионами ^{15}N и ^{22}Ne на ^{249}Bk /увеличение Z мишени на 4 единицы заряда, $\Delta Z = 4$ / показана на рис.7. Аналогичная зависимость в реакциях с ионами ^{18}O и ^{22}Ne на ^{249}Cf ($\Delta Z = 3$) приведена

Рис.7. Энергетическая зависимость сечения образования ^{256}Md в реакциях с ^{249}Bk ионов ^{15}N : \circ - данные работы [28], \bullet - настоящая работа и ^{22}Ne : Δ - для ^{256}Md , \blacktriangle - для ^{256}Fm . Треугольники, обведенные кружками, - значения сечений, полученные в экспериментах с движущимся сборником ядер отдачи. Кривые проведены через экспериментальные точки.

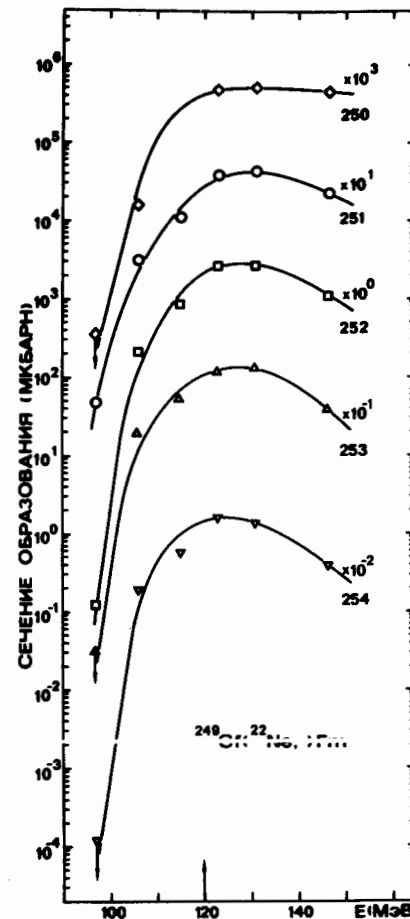
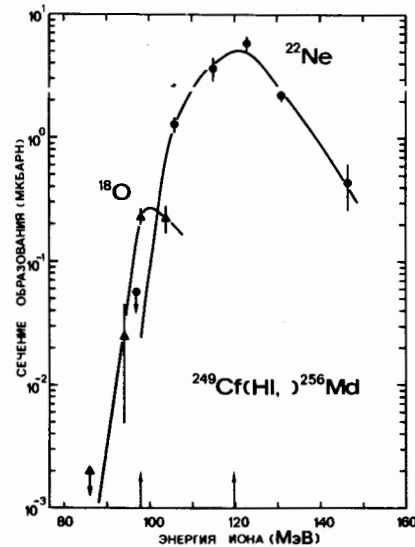


Рис.9. Энергетические зависимости сечений образования изотопов Fm с массовыми числами 250-254 в реакциях ионов ^{22}Ne с ^{249}Cf . Кривые проведены через экспериментально измеренные точки и помечены соответствующим массовым числом изотопа.

Рис.10. Энергетическая зависимость сечения образования ^{251}Es в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ (\bullet). Показаны также кумулятивные сечения ^{251}Es (\circ) и ^{251}Fm (\square). Кривые проведены через экспериментально полученные значения.

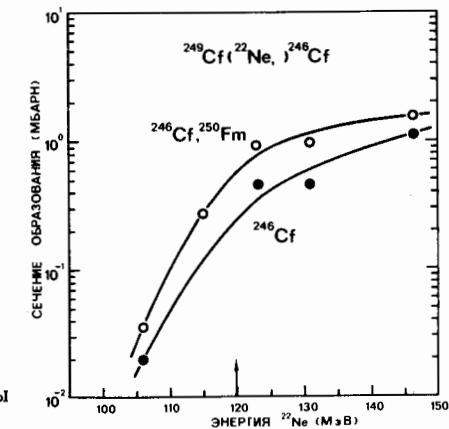
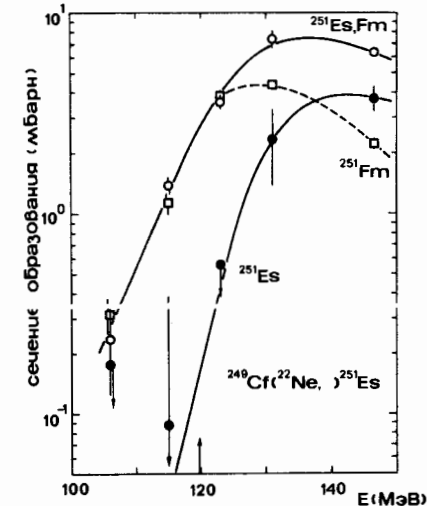


Рис. 11. Энергетическая зависимость сечения образования ^{246}Cf в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ (\bullet). Показаны также кумулятивные сечения образования ^{246}Cf (\circ). Кривые проведены через экспериментальные точки.

на рис.8. На рис.9 представлены энергетические зависимости сечений образования различных изотопов Fm в реакциях $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne} (\Delta Z=2)$, а на рис.10 и 11 - аналогичные зависимости для $^{251}\text{Es} (\Delta Z=1)$ и $^{246}\text{Cf} (\Delta Z=0)$. Стрелками на рисунках показаны величины кулоновского барьера во входном канале реакции, вычисленные обычным образом, с использованием радиусов ядер $R = 1,41 A^{1/3}$ Фм.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несколько замечаний общего характера можно сделать в связи с представленными на рис.7-11 функциями возбуждения.

1. Функции возбуждения реакций образования продуктов с массой, отличающейся от массы мишени не более, чем на 3 единицы А, имеют типичную форму, наблюдаемую обычно для реакций квазиупругих передач в области неделящихся ядер - сечение быстро растет при низких энергиях вблизи кулоновского барьера и становится примерно постоянным при более высоких энергиях налетающих ионов^{5/}.

2. Для передачи большего числа нуклонов, когда масса продукта отличается от массы мишени более, чем на 3 единицы А, функции возбуждения принимают характерную колоколообразную форму, наблюдаемую обычно для реакций типа $(\text{HI}, \alpha\text{п})$ ^{3,7-11/}.

3. Во многих случаях полученные функции возбуждения имеют относительно высокую величину сечения ниже кулоновского барьера во входном канале реакции - факт, наблюдавшийся в аналогичной работе^{7,14/}.

Как уже неоднократно отмечалось /см., например,^{5/} и ссылки в ней/, идентификация данного конечного продукта в общем случае недостаточна для выделения канала реакции, приведшего к его образованию. Более того, несколько каналов в принципе могут приводить к образованию наблюдаемого продукта. Одной из возможностей определения каналов, дающих наибольшие вклады в образование наблюдаемых конечных продуктов, является кинематический анализ распределений кинетических энергий, получаемых из распределений пробегов тяжелых фрагментов^{4,6/}. При этом предполагается, что реакция протекает в два этапа. На первом в различных каналах образуются легкие и возбужденные тяжелые фрагменты с разными массами; на втором этапе - наблюдаемые нуклиды в процессе девозбуждения тяжелых фрагментов путем эмиссии частиц и γ -квантов. В рассматриваемой области ядер основными каналами девозбуждения являются деление, эмиссия нейтронов и γ -квантов, в то время как вероятность эмиссии заряженных частиц незначительна^{24/}. Конкуренция деления и испарения нейтрона приводит к тому, что реакции с вылетом большого числа нейтронов не дают существенного вклада в образование наблюдаемых продуктов, как это было показано ранее^{3/} для реакций с ионами ^{12}C . В этом плане интересно сравнить сечения образования конечных продуктов с разной делимостью, но

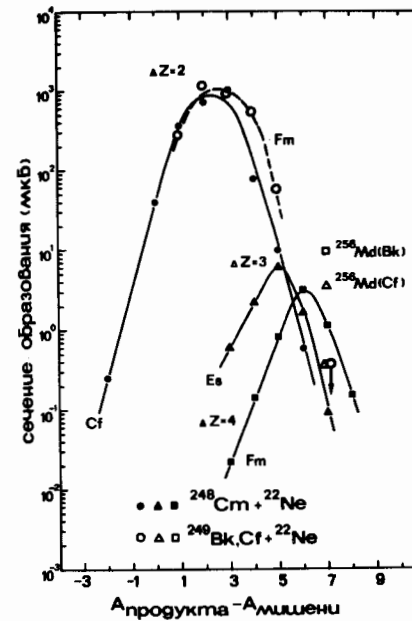


Рис.12. Сравнение сечений образования конечных продуктов, имеющих разную делимость, но соответствующих одному типу передачи /увеличению Z мишени на одно и то же число переданных зарядов, ΔZ , и одно и то же минимальное число переданных нейтронов/; (● ▲ ■) - данные из работы /14/, (○ □) - настоящая работа.

соответствующих данному типу передачи /увеличению Z мишени на одно и то же число переданных зарядов, ΔZ /. Это сравнение проведено на рис.12, где показаны сечения образования различных изотопов Bk, Cf, Es, Fm при облучении ^{248}Cm ионами ^{22}Ne , взятые из работы /14/, и выходы изотопов

Fm и ^{256}Md , полученные в настоящей работе при облучении ^{249}Cf и ^{249}Bk ионами ^{22}Ne при той же примерно энергии. На рисунке по оси абсцисс отложена величина $A_{\text{продукта}} - A_{\text{мишени}}$ с тем, чтобы уравнивать минимальные количества нейтронов, передаваемых на мишень. Видно хорошее согласие, в пределах экспериментальных погрешностей, в сечениях образования изотопов $^{249-251}\text{Cf}$ и $^{250-252}\text{Fm}$, для которых делимости отличаются примерно на порядок, как это следует, например, из эмпирических систематик $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle^{25/}$. Для более сложных передач, таких как образование изотопов $^{252-254}\text{Cf}$ на ^{248}Cm и $^{253-254}\text{Fm}$ на $^{249}\text{Cf} (\Delta Z=2)$, ^{256}Md на ^{249}Cf и соответствующего ^{255}Es на ^{248}Cm /экстраполированная величина сечения образования/ ($\Delta Z=3$), для ^{256}Md на ^{249}Bk и соответствующего ему ^{255}Fm на ^{248}Cm ($\Delta Z=4$), сечения образования отличаются примерно на порядок. Делимости Md и Fm различаются в 3 раза, а Fm и Cf - на порядок.

Некоторую ясность в наблюдаемую картину образования актинидов при энергиях ионов вблизи барьера может внести энергетический анализ, заключающийся в определении взаимного положения кривых $V_i(R)$ и $V_f(R) - Q_{gg}^{5/}$; $V_i(R)$ и $V_f(R)$ означают потенциалы взаимодействия системы во входном и выходном каналах реакции /сумма кулоновского и ядерного потенциалов при нулевом угловом моменте/, зависящие от расстояния между центрами ядер, а Q_{gg} - массовый баланс реакции. При этом энергия, реализуемая в реакции, определяется выражением $\Delta V + Q_{gg}$, где ΔV - разность между максимумами потенциалов во входном и выходном каналах реакции. Большая положительная величина этого выражения коррелирует с высоким подбарьерным сечением образования продукта, в то время как

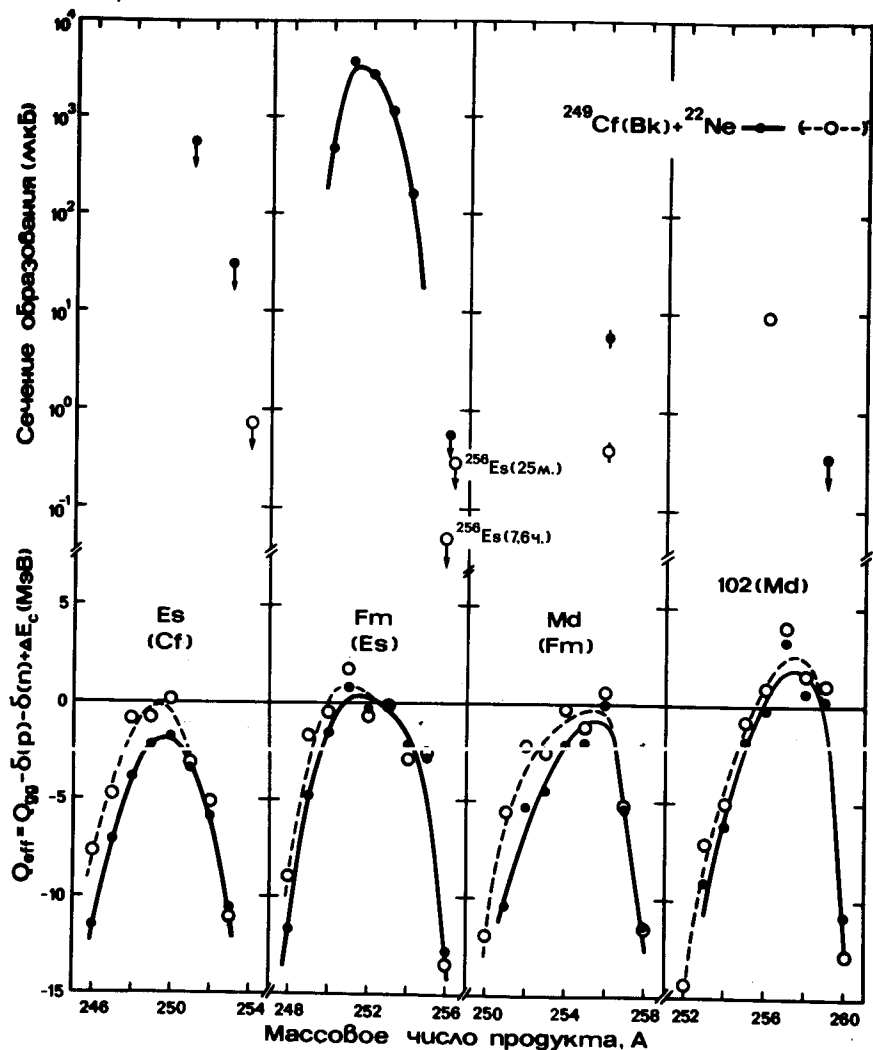


Рис.13. Сопоставление сечений образования тяжелых актинидов в реакциях $^{249}\text{Bk}, \text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ при энергии ионов 117-123 МэВ и величины Q_{eff} реакции для продуктов, образующихся "в основном состоянии".

большая отрицательная его величина означает, что реакция энергетически запрещена. В настоящей работе в качестве ΔB использовалась разность значения кулоновских барьеров во входном и выходном каналах реакции, ΔE_c . Учитывались поправки на неспаренность протонов $\delta(p)$ и нейтронов $\delta(n)$ при их передаче из ядра-

донора в ядро акцептор $^{26}/$. Полученные таким образом значения $Q_{\text{eff}} = Q_{\text{gg}} - \delta(p) - \delta(n) + \Delta E_c$ для образования различных продуктов "в основном состоянии" в системах $^{249}\text{Bk}, \text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ показаны на рис.13 в нижней его части, а измеренные при энергии ионов 117-123 МэВ сечения образования продуктов - в верхней. Аналогичные величины Q_{eff} для систем $^{248}\text{Cm} + ^{20,22}\text{Ne}$ и экспериментально измеренные сечения образования продуктов $^{14}/$ приведены на рис.14. Видно, что относительно большие величины сечений образования отдельных продуктов и даже изотропные распределения коррелируют с величиной Q_{eff} , когда число передаваемых нуклонов невелико. Корреляции нарушаются с увеличением числа передаваемых нуклонов /протонов/ - максимумы изотопных распределений $\sigma(A)$ смещаются в область нейтронного дефицита относительно максимумов кривых $Q_{\text{eff}}(A)$.

Следует отметить, что полученные величины Q_{eff} должны соответствовать энергиям возбуждения E^* промежуточной системы /тяжелого фрагмента/. Однако квантовомеханическая природа барьеров и малые сечения образования конечных продуктов не позволяют установить точного равенства между Q_{eff} и E^* в таком простом рассмотрении. Например, образование ^{251}Fm в реакции $^{248}\text{Cm} + ^{22}\text{Ne}$ связывается с Q_{eff} или $E^* = -13$ МэВ, то есть энергетически запрещено. Энергия возбуждения соседних изотопов Fm большей массы недостаточна для образования этого нуклида после испарения нейтронов, в то же время ^{251}Fm наблюдается среди продуктов реакции и имеет сечение 22 нб. Проблему не решают и другие подходы в вычислении барьеров, например, с использованием радиуса взаимодействия $R = 1,22(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) + d$, где $d = 2$ Фм. Однако при исследовании реакций многонуклонных передач с ионами Ar и тяжелее при энергиях вблизи барьера были обнаружены большие деформации в выходном канале реакции /кинетические энергии тяжелых фрагментов соответствовали энергии кулоновского отталкивания двух заряженных сфер, разделенных расстоянием $d = 5-6$ Фм $^{29,30}/$. Большие деформации в выходном канале были получены также при анализе данных об эмиссии ^4He в различных реакциях $^{31}/$. Принимая это во внимание, можно получить $E^* = 15-20$ МэВ, необходимую для испарения 2-3 нейтронов, и таким образом объяснить смещение изотопных распределений Fm в сторону нейтронного дефицита относительно распределения $Q_{\text{eff}}(A)$ в реакциях $^{248}\text{Cm} + ^{22,20}\text{Ne}$. В то же время для объяснения образования изотопов Bk и Cf в указанных выше реакциях и изотопов Fm в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ нет необходимости привлекать большие значения d . Это, по-видимому, говорит о том, что образование продуктов, связанное с передачей небольшого числа нуклонов, происходит на начальной стадии реакции, когда ядра только пришли в соприкосновение. Образование продуктов, связанное с передачей большего числа нуклонов, происходит на более поздних стадиях реакции, когда система слипшихся ядер эволюционирует к большим деформациям перед разделением. Что касается увеличения энергии возбуждения с ростом числа передаваемых нуклонов, то этот факт

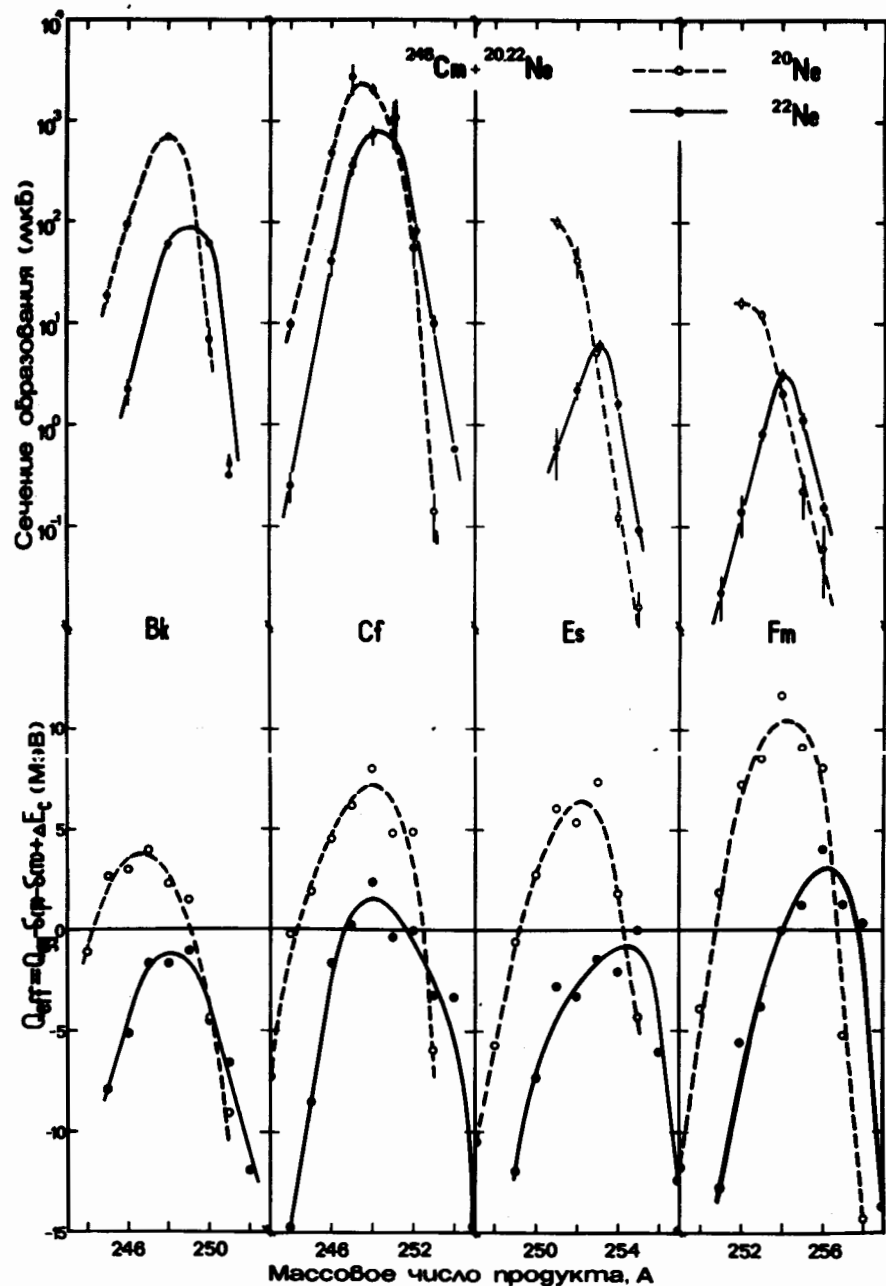


Рис.14. Сопоставление сечений образования тяжелых актинидов в реакции $^{248}\text{Cm} + ^{20,22}\text{Ne}$ при энергиях ионов 115, 116 МэВ, взятых из работы /14/, и величины Q_{eff} реакции для продуктов, образующихся "в основном состоянии".

следует, например, из результатов недавних измерений и анализа энергетических распределений легких фрагментов, образующихся в подобного рода реакциях /27/.

Сравнение выходов тяжелых актинидов в реакциях с ионами с аналогичными выходами, полученными в реакциях $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$, $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{238}\text{U} + ^{249}\text{Cf}$, показывает, что в реакциях с ионами ^{22}Ne они по меньшей мере на один-два порядка превосходят эти величины, измеренные в реакциях с ионами ^{238}U /15/. Это, очевидно, связано с различием в механизмах образования актинидов в этих реакциях. Так, энергии возбуждения первичных тяжелых фрагментов для реакций с ионами ^{22}Ne минимальны в случае передач, соответствующих $\Delta Z=2$, и, по-видимому, растут с увеличением числа передаваемых на мишень нуклонов /протонов/. Для реакций с ионами ^{238}U образование всех продуктов связано с энергией возбуждения 30-40 МэВ независимо от числа передаваемых на мишень нуклонов и энергии налетающего иона /15/.

Исследования образования актинидов в реакции $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ показали также, что в пределах экспериментальных погрешностей положение максимумов /центров тяжести/ и ширины изотопных распределений не зависят от энергии налетающих частиц. Изотопные распределения Fm, полученные нами в реакциях $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$, изменяют свою ширину с изменением энергии налетающего иона, как это показано на рис.15. Видно, что при максимальной энергии полуширина распределения составляет ~1,5 массовые единицы, в то время как глубоко под барьером она достигает ~3 массовых единиц.

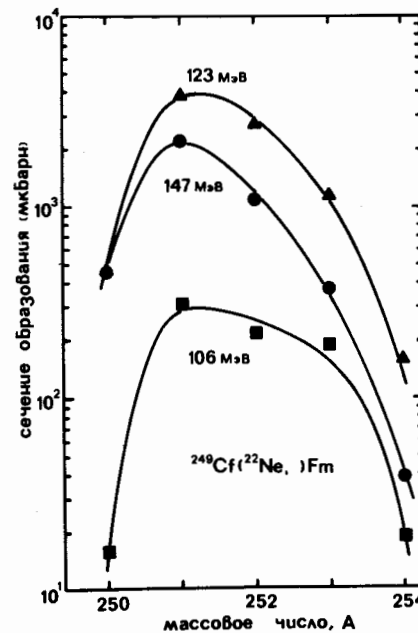


Рис.15. Изотопные распределения Fm, полученные в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$, при различных энергиях налетающих ионов ^{22}Ne /энергии указаны на рисунке/.

6. ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования реакций передач нуклонов ионов ^{15}N , ^{18}O , ^{22}Ne , ядра и мишеней ^{249}Bk , Cf показали, что сечения образования изотопов Fm и ^{256}Md имеют большую величину, в особенности в случае использования ионов ^{22}Ne . Эти величины на один-два порядка превышают аналогичные, получаемые в реакциях с ионами ^{238}U . Величины сечений образования отдельных тяжелых актинидов вблизи барьера достигают десятков мкбарн и даже нескольких мбарн. Большие величины сечений коррелируют с положительными величинами Q_{eff} реакции, когда число передаваемых нуклонов велико. Нарушение корреляций с увеличением числа переданных нуклонов связывается с увеличением энергии возбуждения промежуточной системы /тяжелого фрагмента/ и соответствующим увеличением числа испаряющихся в процессе девозбуждения нейтронов. Конкуренция процесса испарения нейтронов с преобладающим делением тяжелого фрагмента должна приводить к тому, что выходы продуктов, имеющих различную делимость, но относящихся к одному типу передачи, должны сильно различаться, как это следует из эмпирических систематик $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle$. Однако сравнение результатов настоящей работы с аналогичными 14 показывает, что выходы продуктов не зависят от их делимости.

2. Вид функций возбуждения реакций образования различных актинидов, вызываемых ионами ^{22}Ne , зависит от числа нуклонов, переданных на мишень, что отличает их от аналогичных в реакциях образования с очень тяжелыми ионами типа ^{238}U .

3. Большие выходы актинидов позволяют рассматривать реакции типа ^{249}Bk , $\text{Cf} + ^{22}\text{Ne}$ как перспективные для получения изотопов актинидных элементов, недоступных для получения в реакциях полного слияния.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность академику Г.Н.Флерову за постоянный интерес и внимание к работе. Мы благодарны также профессорам Ю.Ц.Оганесяну и В.В.Волкову за плодотворные дискуссии и полезные замечания, С.П.Третьяковой - за обеспечение обработки трековых детекторов, Г.В.Букланову - за приготовление мишеней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bimbot R. et al. Nucl.Phys., 1972, A189, p.193.
2. Hubert F. et al. Nucl.Phys., 1974, A228, p.415.
3. Hahn R. et al. Phys.Rev., 1974, C10, p.1889.
4. Bimbot R. et al. Nucl.Phys., 1975, A248, p.377.
5. Gardes D. et al. Phys.Rev., 1978, C18, p.1298.

6. Gardes D. et al. Phys.Rev., 1980, C21, p.2447.
7. Брандштетр И. и др. ОИЯИ, 990, Дубна, 1962.
8. Донец Е.Д. и др. АЭ, 1964, 16, с.195.
9. Ghiorso A. et al. Phys.Rev.Lett., 1969, 22, p.1317.
10. Ghiorso A. et al. Phys.Rev.Lett., 1970, 24, p.1498.
11. Silva R.J. et al. Nucl.Phys., 1973, A216, p.97.
12. Друин В.А. и др. АЭ, 1977, 43, с.55.
13. Nitschke J.M. В кн.: Международный симпозиум по синтезу и свойствам новых элементов. ОИЯИ, Д7-80-556, Дубна, 1980, с.28; LBL-11712, Berkeley, 1980.
14. Lee D. et al. Phys.Rev., 1982, C25, p.286.
15. Gaggeler H. et al. In: Proc. 4th Int.Conf.on Nuclei Far from Stability. Helsingør, Denmark, 7-13 June, 1981.
16. Демин А.Г. и др. ОИЯИ, Д7-80-556, Дубна, 1980, с.60.
17. Демин А.Г. и др. Там же, с.74.
18. Hubert F. et al. Ann.de Phys., 1980, 5S.
19. Звара И. и др. ОИЯИ, Р6-10334, Дубна, 1976.
20. Amiel S. et al. Phys.Rev., 1957, 106, p.553.
21. Бетак Э., Тонеев В.Д. ЭЧАЯ, 1981, т.12, с.1432.
22. Lederer C.M. et al. Table of Isotopes, 7th Ed. J.Wiley & Sons, Inc., New York, 1978.
23. Zlokazov V.B. Comp.Phys.Comm., 1978, 13, p.389.
24. Ильинов А.С. и др. ЯФ, 1981, 33, с.997.
25. Ильинов А.С., Черепанов Е.А. ОИЯИ, Д7-80-556, Дубна, 1980, с.30.
26. Михеев В.П. и др. ЯФ. 1977. 25. с.255.
27. Karp J.S. et al. Phys.Rev., 1982, C25, p.1838.
28. Ghiorso A. In: Proc. 3rd Int.Conf. on Nuclei Far from Stability. Corsica, France, May 19-26, 1976. CERN 76-13, Geneva, 1976, p.548.
29. Rivet M.F. et al. Nucl.Phys., 1976, A276, p.157.
30. Rivet M.F. et al. Z.Physik, 1980, A296, p.201.
31. Alexander J.M. et al. Z.Physik, 1982, A305, p.313.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 декабря 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги,
если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
Д1,2-12036	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12450	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды XIII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
Д4-80-271	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

P7-82-890

Сагайдак Р.Н. и др.
Образование некоторых изотопов Cf, Es, Fm и Md в реакциях многонуклонных передач, вызываемых ионами ^{15}N , ^{18}O и ^{22}Ne на ^{249}Bk , Cf

Измерены функции возбуждения реакций многонуклонных передач, вызываемых ионами ^{15}N , ^{18}O и ^{22}Ne на мишенях ^{249}Bk и ^{249}Cf и приводящих к образованию ^{256}Md , а также реакций, вызываемых ионами ^{22}Ne на мишени ^{249}Cf и приводящих к образованию $^{250-254}\text{Fm}$, $^{251,253}\text{Es}$ и ^{246}Cf , в области энергий от 7 МэВ/нуклон до глубоко подбарьерной. Проведен качественный анализ полученных функций возбуждения реакций, связанных с передачей различного числа нуклонов ядру мишени. Обсуждаются сечения образования нуклидов в области энергии ионов вблизи барьера. Проводится сравнение полученных результатов с аналогичными, измеренными в реакциях ^{238}U и ^{248}Cm с различными налетающими ионами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

P7-82-890

Sagaidak R.N. et al.
Production of Some Cf, Es, Fm, and Md Isotopes in Multinucleon Transfer Reactions Induced by ^{15}N , ^{18}O , and ^{22}Ne Ions on ^{249}Bk , Cf Target

Excitation functions have been measured for multinucleon transfer reactions induced by ^{15}N , ^{18}O , and ^{22}Ne ions on ^{249}Bk and ^{249}Cf targets and leading to the formation of ^{256}Md (^{256}Fm) and for ^{22}Ne -induced reactions on a ^{249}Cf target nucleus, which result in the formation of $^{250-254}\text{Fm}$, $^{251,253}\text{Es}$, and ^{246}Cf in the energy range from 7 MeV/A to a deep subbarrier value. The obtained excitation functions of the reactions involving the transfer of different numbers of nucleons to the target nucleus have been analysed qualitatively. The significant subbarrier production cross sections obtained for some products are discussed. Comparison is made with the similar results obtained in reactions of ^{238}U and ^{248}Cm target nuclei with various bombarding ions.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.