

C-898

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

7 - 8125

Сун-Цзин-Ян
Галина Яновна

ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СИНТЕЗА ИЗОТОПОВ
С $Z \geq 84$ В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Специальность - 01.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

В.А.Друин.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук,
профессор
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

С.М.Поликанов,

В.П.Рудаков.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Ради-
евый институт им. В.Г.Хлопина /Ленинград/.

Автореферат разослан " " 1974 года
Защита диссертации состоится " " 1974 года
на заседании Объединенного Ученого совета Лабора-
тори ядерных реакций и Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований.

Адрес: г.Дубна, Московской области, ОИЯИ, конфе-
ренц-зал ЛЯР.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Э.Н.Каржавина

7 - 8125

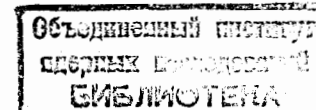
Сун-Цзин-Ян
Галина Яновна

ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СИНТЕЗА ИЗОТОПОВ
С $Z \geq 84$ В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Специальность - 01.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



В последние годы возрастает интерес к ускорению все более тяжелых ионов, таких как фосфор, цинк, криптон, ксенон и другие. Это обусловлено, в первую очередь, перспективами работ по синтезу новых трансурановых элементов с $Z \geq 106$.

Однако наряду с решением главной задачи ускорение более тяжелых, чем неон, частиц открывает широкие возможности и для синтеза неизвестных изотопов в до-урановой области.

В настоящей диссертации описываются опыты, в которых были синтезированы уже известные изотопы ^{195}Po , ^{196}Po , ^{213}Ac , ^{212}Ac , ^{215}Th , ^{215}Ac , ^{214}Ac , а также новый изотоп ^{216}Ra и изучены закономерности их образования. Рассматриваются вопросы, связанные с выбором методов идентификации α -радиоактивных изотопов и оценкой сечений реакций с испарением нейтронов на тяжелых ионах, приводящие к их синтезу. Диссертация состоит из введения и четырех глав.

В главе I приводятся систематизация данных по сечениям реакций с испарением нейтронов и их возможным оценкам. В связи с этим дается обзор теоретических представлений о возбужденном составном ядре и способах его распада, которые основаны на статистической модели ядра.

Основным фактором, определяющим величину сечений и соотношение между сечениями реакций, идущих через одно и то же составное ядро, является отношение вероятности испарения нейтронов к вероятности деления, выраженное через отношение соответствующих ширин Γ_n/Γ_f . Существуют две модели распада составного ядра: модель постоянной температуры и модель ферми-газа, отличающиеся различными предположениями о зависимости плот-

ности уровней от энергии возбуждения. В диссертации приводятся различные экспериментальные данные, интерпретация которых возможна только в рамках одной или другой модели. Эти различия появляются благодаря оболочечным эффектам. Если составное ядро содержит число нейтронов, превосходящее "магическое" $N > 126$ или $N > 152$, то соотношение между сечениями реакций, идущих через составное ядро, подчиняется интерпретации в рамках модели ферми-газа, т.е. допускается возрастание Γ_n/Γ_f с увеличением энергии возбуждения. Если же число нейтронов в составном ядре меньше "магического", то Γ_n/Γ_f не зависит от энергии возбуждения /модель постоянной температуры/. На опыте это выражается в том, что сечения испарительных реакций, идущих через одно составное ядро, с увеличением энергии возбуждения уменьшаются медленней для "надоболочечных" ядер, чем для "пободолочечных" /рис. 1/. Это имеет место даже тогда, когда параметр делимости Z^2/A в первом случае больше, чем во втором. Влияние оболочечных эффектов на величину Γ_n/Γ_f отмечено также в ряде других работ, результаты которых приводятся в главе 1.

Использование указанных моделей дает возможность осуществить достаточно хорошую подгонку экспериментальных результатов к теоретическим формулам при соответствующем выборе параметров в каждом конкретном случае: расхождение не превосходит 75%. Однако предсказать, каким будет сечение в неизвестной области, теория не может, т.к. точно не известна зависимость величины Γ_n/Γ_f от энергии возбуждения, массового числа, атомного номера и углового момента составного ядра в широком интервале изменения этих параметров, не известны также параметры плотностей уровней при высоких энергиях возбуждения. В основе имеющихся расчетов лежат лишь качественные предположения о степени влияния указанных параметров.

Поэтому на практике используются различные систематики поперечных сечений. Эмпирический подход при оценке сечений неизвестных реакций дает более надежные предсказания.

В первой главе также рассматривается влияние угло-

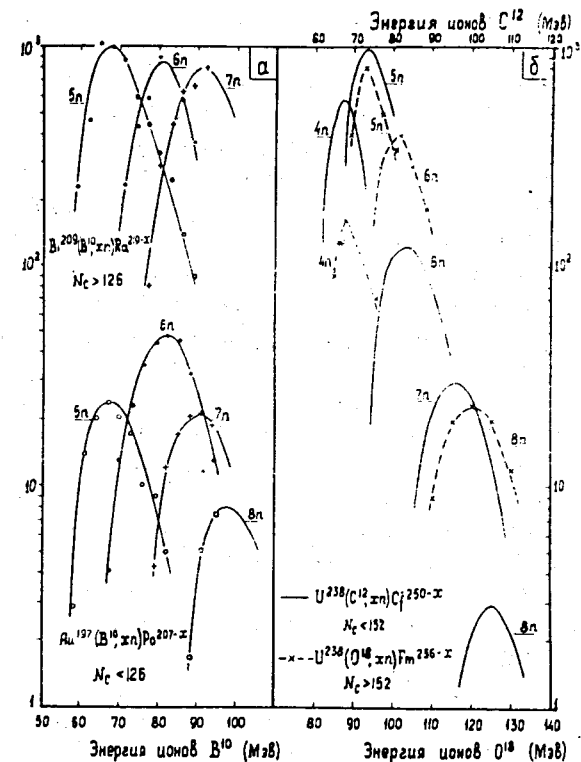


Рис. 1. Сравнение соотношений испарительных реакций, идущих через одно составное ядро для $N_c \leq 126$ и 152 .

вого момента на величину Γ_n/Γ_f . Анализ экспериментального материала с точки зрения зависимости Γ_n/Γ_f от углового момента показывает, что общая тенденция изменения Γ_n/Γ_f состоит в уменьшении Γ_n/Γ_f при увеличении массы иона.

Из всех доступных в настоящее время методов синтеза новых изотопов наиболее перспективным является использование ядерных реакций, возникающих при взаимодействии ядер с ускоренными тяжелыми ионами. Преимущество этого метода перед всеми остальными состоит в том, что он дает возможность:

1/ иметь относительно большой выход конечного продукта в области сверхтяжелых ядер;

2/ получать продукт с заданным Z и A , минуя стадии накопления промежуточных продуктов;

3/ отделять конечный продукт в процессе его производства в ядерной реакции от материала мишени, что позволяет применять экспрессные методы регистрации /1-3/.

Во второй главе описана методика экспериментов. При исследовании продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами широко применяется метод улавливания и транспортировки атомов отдачи с помощью газового потока. Выбитые из мишени атомы тормозятся в газе, переносятся тем или иным способом к детекторам излучения и затем анализируются. Существует пять основных методов сбора атомов отдачи. Однако при изучении короткоживущих изотопов с малым сечением образования очень важно, чтобы время выноса атомов отдачи к детектору было как можно меньшим и величина коэффициента сбора была высокой и устойчивой.

В основе нашей методики лежит метод адсорбции продуктов реакций из газового потока на тонкие высокоэффективные фильтры с малым сопротивлением /4/.

Для изучения сбора ядер отдачи различными материалами непосредственно на пучке многозарядных ионов использовалась реакционная камера, изображенная на рис. 2.

Пучок ионов, проходя вакуумноплотную фольгу, попал на мишень. Продукты реакций выбивались в газовый объем, в котором поддерживалось определенное, заранее выбираемое давление с помощью специальной системы подачи и откачки газа.

В трубопроводе для откачки газа из реакционной камеры устанавливался быстросъемный патрон с перфорированными материалами или фильтрами в качестве сборников.

После непродолжительного облучения, в зависимости от периода полураспада исследуемого изотопа, патрон с фильтром площадью $\sim 0,5 \text{ см}^2$ быстро извлекался из трубопровода и помещался в α -спектрометр. В этих экспериментах выяснилось, что наибольшим коэффициентом сбора обладают волокнистые фильтры ФПП-5 /60%/ и ЛФС-2 /70%/.

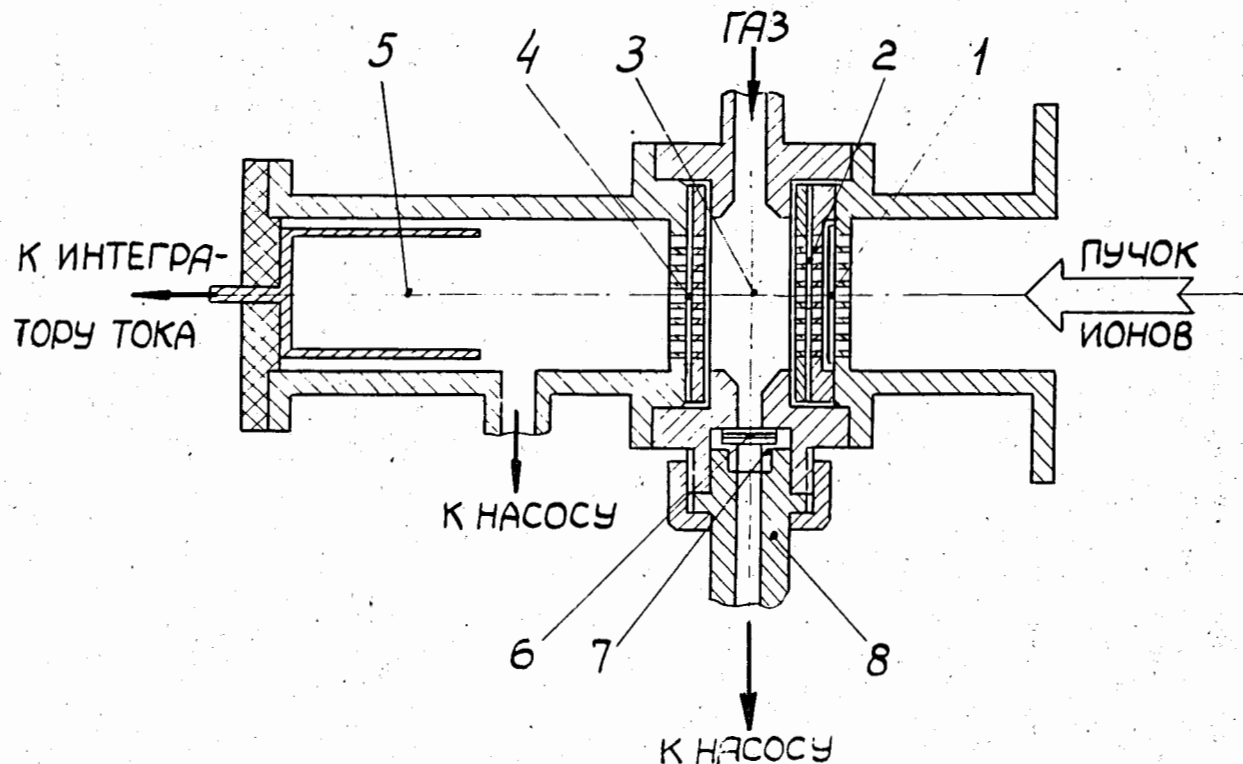


Рис. 2. Схема реакционной газовой камеры. 1 - входная фольга-поглотитель, 2 - мишень, 3 - газовый объем для торможения продуктов ядерных реакций, 4 - выходное окно, 5 - цилиндр Фарадея, 6 - фильтр или перфорированный материал, 7 - быстросъемный патрон, 8 - газопровод.

Оценка времени сбора продуктов реакции была сделана на основании измерения быстроты откачки газа из реакционной камеры методом постоянного объема^{/5/}. Расчетные значения времени выноса ядер отдачи приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Оценки времени выноса продуктов реакции на различные фильтры-сборники

Тип фильтра	Время выноса (сек)
1. Никелевые и металлокерамические фильтры	$\sim 4-5 \cdot 10^{-2}$
2. ЛФС-2	$\sim 1,0 \cdot 10^{-2}$
3. Никелевая сетка (прозрачность 60%)	$\leq 2 \cdot 10^{-3}$

Исследована также зависимость величины коэффициента сбора от сорта тормозящего газа. Такие эксперименты были проведены с азотом, воздухом и аргоном. Как выяснилось, при замене сорта тормозящего газа величина коэффициента сбора существенно не меняется.

Далее в диссертации разбираются различные методы идентификации новых изотопов и их применимость в определенных условиях экспериментов. Подчеркивается, что достоверность результатов обеспечивается комбинированием разных методов идентификации.

Рассматриваются также различные источники фона, имеющего место при регистрации распада трансфермиевых элементов^{/6/}. Такими источниками являются при регистрации α -распада изотопы в области Po-Th, , а при

регистрации спонтанного деления - sf -изомеры. Эти продукты образуются в реакциях, идущих на примесях легких элементов в материале мишени, в реакциях передачи и деления. Сечения таких процессов в ряде случаев значительно превосходят сечения образования трансфермиевых элементов. В диссертации анализируются условия, в которых возможно появление фона и описываются меры, принимаемые для его подавления.

В третьей главе описываются эксперименты^{/7/} по синтезу и идентификации изотопа ^{216}Po . Синтез осуществлялся в реакциях $^{189}\text{Os}(^{31}\text{P}, ^4\text{n})^{216}\text{Po}$, $^{190}\text{Os}(^{31}\text{P}, ^5\text{n})^{216}\text{Po}$ и $^{197}\text{Au}(^{24}\text{Mg}, ^5\text{n})^{216}\text{Po}$.

На рис. 3 схематически изображена экспериментальная установка, использовавшаяся в данных опытах^{/8/}. В ней атомы отдачи тормозились в газе, а затем улавливались фильтрами-сборниками, через которые откачивался газ. Сборники, укрепленные на рейке, перемещались к двум Si(Au)-детекторам. С помощью специально разработанной электронной аппаратуры осуществлялся амплитудно-временной анализ импульсов, поступающих с детекторов. Исходя из времени жизни исследуемого изотопа, выбирался временной режим "измерение"/облучение".

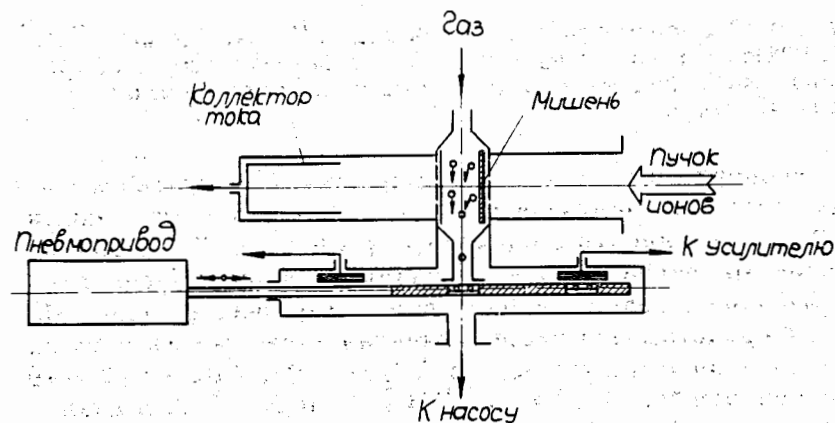


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для регистрации короткоживущих α -излучателей.

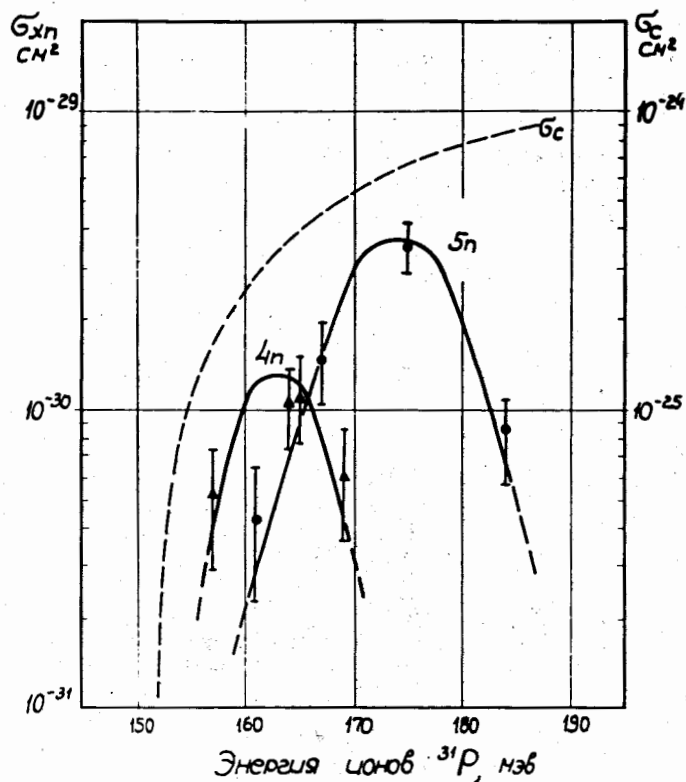


Рис. 4. Зависимость сечений реакции $^{189}\text{Os}(^{31}\text{P}, 4n)^{216}\text{Ra}$ и $^{190}\text{Os}(^{31}\text{P}, 5n)^{216}\text{Ra}$ от энергии бомбардирующей частицы. /лаб. система/. Дан ход сечений образования составного ядра.

Эксперименты сводились к поиску в продуктах ядерных реакций, получающихся при облучении Os ионами ^{31}P , α -активности с оцененными в работе [9] характеристиками распада. Идентификация изотопа проводилась по функциям возбуждения соответствующих реакций. На рис. 4 представлена энергетическая зависимость сечения образования α -активности с $E_{\alpha} = 7,92$; $7,82$ и $7,72$ МэВ при облучении ^{189}Os и ^{190}Os ионами ^{31}P в диапазоне энергий 157 - 184 МэВ. Функции возбуждения имеют ширину на полувысоте 10-12 МэВ, что не противоречит "испарительному характеру" реакции синтеза,

а положение максимума согласуется с предположением о том, что мы имеем дело с ядерными реакциями $^{189}\text{Os}(^{31}\text{P}, 4n)^{216}\text{Ra}$ и $^{190}\text{Os}(^{31}\text{P}, 5n)^{216}\text{Ra}$. Измерялся также период полураспада ^{216}Ra , который оказался равным $0,20 \pm 0,04$ сек. На рис. 5 показана кривая распада α -излучателя с $E_{\alpha} = 7,92$ МэВ, $E_{\alpha} = 7,82$ МэВ и $E_{\alpha} = 7,72$ МэВ. На этом же рисунке представлен α -спектр, в котором наиболее четко выде-

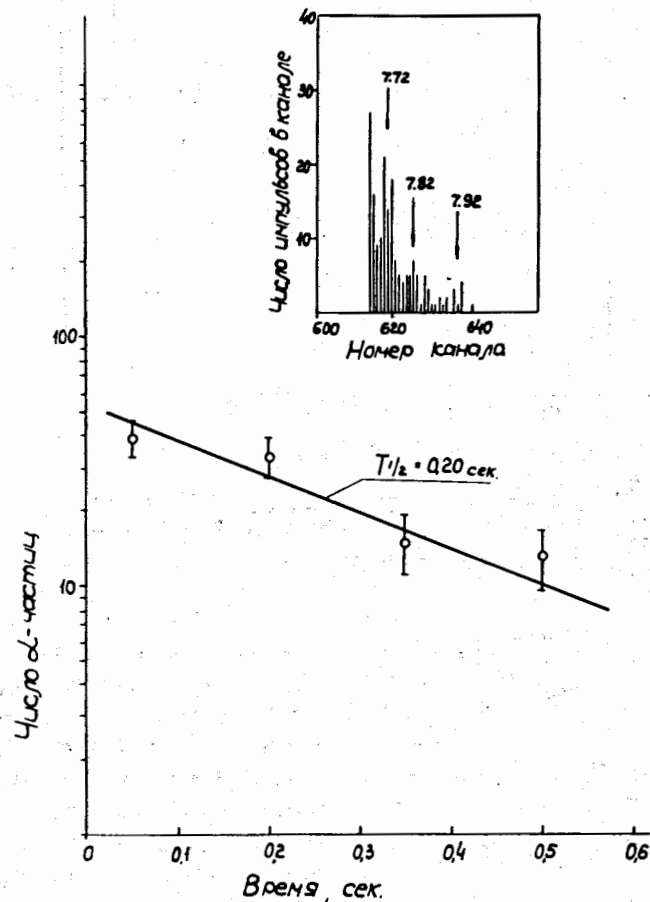
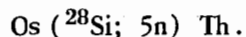
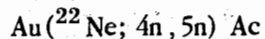
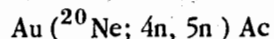
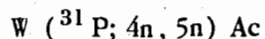
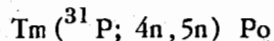


Рис. 5. Кривая распада ^{216}Ra . В правом углу рисунка дан энергетический α -спектр ^{216}Ra .

ляются три пика с $E_{\alpha} = 7,72 \text{ МэВ}$, $E_{\alpha} = 7,82 \text{ МэВ}$ и $E_{\alpha} = 97,92 \text{ МэВ}$.

Дополнительно было проведено облучение ^{197}Au ионами ^{24}Mg с энергией 146 МэВ . Излучатель с α -группами $E_{\alpha} = 7,72 \text{ МэВ}$; $7,82 \text{ МэВ}$ и $7,92 \text{ МэВ}$ и периодом полураспада $\sim 0,20 \text{ сек}$ и в этом случае наблюдался с ожидаемым для ^{216}Pa выходом в реакции $^{197}\text{Au}(^{24}\text{Mg}, 5n)^{216}\text{Pa}$.

Область ядер с $84 \leq Z \leq 91$ занимает промежуточное положение между неделящимися и сильно делящимися ядрами. Для выяснения эффекта понижения барьера деления, связанного с угловым моментом, изучались следующие ядерные реакции, вызываемые различными ионами:



В этих экспериментах исследуемый изотоп был идентифицирован по энергиям α -частиц и периодам полураспада. Идентификацию изотопов проводили также по функциям возбуждения соответствующих реакций ^{/10/}.

Полученные сечения реакций с испарением нейтронов обобщены в табл. 2. В этой таблице приведены приближенные значения барьеров деления и энергии связи нейтронов из работы ^{/11/}.

По мере уменьшения барьера деления по сравнению с энергиями связи нейтронов конкуренция деления приводит к существенному уменьшению сечения реакции с испарением нейтронов.

Как видно из таблицы, в исследуемом нами диапазоне реакций с ростом делимости сечения реакций с испарением нейтронов уменьшаются в 10^4 раз.

Четвертая глава диссертации посвящена обсуждению полученных результатов.

Таблица 2.

№№ п/п	Реакция	$\sigma_{\text{max}}(\text{см}^2)$	Барьер деления (МэВ)	Средняя энергия связи нейтрона
I.	$\text{Tm}(^{31}\text{P}; 4n)^{196}\text{Po}$	$2,7 \cdot 10^{-26}$	10,4	8,9
2.	$\text{Tm}(^{31}\text{P}; 5n)^{195}\text{Po}$	$3 \cdot 10^{-27}$	10,1	9,1
3.	$\text{W}(^{31}\text{P}; 4n)^{213}\text{Ac}$	$4 \cdot 10^{-28}$	7,1	7,7
4.	$\text{W}(^{31}\text{P}; 5n)^{212}\text{Ac}$	$8 \cdot 10^{-28}$	7,0	8,1
5.	$\text{Au}(^{20}\text{Ne}; 4n)^{213}\text{Ac}$	$2,4 \cdot 10^{-27}$	7,2	7,7
6.	$\text{Au}(^{20}\text{Ne}; 5n)^{212}\text{Ac}$	$4,8 \cdot 10^{-27}$	7,0	8,1
7.	$\text{Au}(^{22}\text{Ne}; 4n)^{215}\text{Ac}$	$2 \cdot 10^{-27}$	7,5	6,6
8.	$\text{Au}(^{22}\text{Ne}; 5n)^{214}\text{Ac}$	$4 \cdot 10^{-27}$	7,3	7,2
9.	$\text{Os}(^{28}\text{Si}; 5n)^{215}\text{Th}$	$6 \cdot 10^{-29}$	6,3	7,4
10.	$\text{Os}(^{31}\text{P}; 4n)^{216}\text{Pa}$	$1,1 \cdot 10^{-30}$	5,5	7,6
11.	$\text{Os}(^{31}\text{P}; 5n)^{216}\text{Pa}$	$3,5 \cdot 10^{-30}$	5,5	7,6
12.	$\text{Au}(^{24}\text{Mg}; 5n)^{216}\text{Pa}$	$6,1 \cdot 10^{-30}$	5,5	7,6

Экспериментальные результаты по исследованию энергетических зависимостей сечений $(\text{HI}, 4n, 5n)$ -реакций дают возможность выявить некоторые закономерности изменения сечений образования ядер в области $84 \leq Z \leq 91$.

Для определения экспериментальной величины сечения ядерной реакции необходимо знать поток частиц, прошедших через мишень, и эффективное количество атомов вещества мишени. Поток ионов измерялся вакуумным цилиндром Фарадея. При работе на выбивание необходимо знать толщину слоя вещества мишени, из которого вылетают атомы отдачи. Оценка может быть сделана на основании работы Норсклиffe^{/12/}. Вместе с тем мы провели эксперименты по выбиванию атомов отдачи из свинцовых мишеней различной толщины. Эти данные позволили нам экспериментально получить эффективно работающую толщину слоя, которая для ионов ^{22}Ne с энергией 110 МэВ составляет $\sim 1,1 \text{ мг/см}^2$ свинца.

Наши результаты по определению сечений образования различных изотопов удобны для анализа, имеющего целью установление влияния углового момента на отношение нейтронной и делительной ширин Γ_n/Γ_f , а также зависимость Γ_n/Γ_f от параметра делимости.

Все опыты проведены на одной установке в однотипных измерениях. Это обеспечивает относительную точность определения величин сечений не ниже 20-30%, что приводит к ошибке в величине Γ_n/Γ_f около 5-7%.

Анализ экспериментальных данных основан на том, что вероятность процесса, приводящего к образованию некоторого ядра - продукта из составного ядра путем испарения X-нейтронов, может быть определена соотношением

$$\sigma_{xn} = \sum_{\ell=0}^{\ell_c} \sigma_{\ell} P_{x,\ell} \prod_{i=1}^x [\Gamma_n/\Gamma_n + \Gamma_f]_{i,\ell}$$

Поскольку в процессе испарения нейтронов изменяются все характеристики составного ядра $/E^*, E_f, V_n, J, N /$, за исключением Z , то нахождение точных значений $\Gamma_n/\Gamma_n + \Gamma_f /_i$ представляет большие трудности.

Для качественного описания процесса испарения нейтронов можно ввести среднее значение $\langle \Gamma_n/\Gamma_n + \Gamma_f \rangle$

по данному каскаду, которое определяется следующим образом:

$$\langle \Gamma_n/\Gamma_n + \Gamma_f \rangle = \sqrt{\frac{\sigma_{xn}}{\sigma_c(E) P_{xn}(E)}}$$

$$\langle \Gamma_n/\Gamma_f \rangle = \langle \Gamma_n/\Gamma_n + \Gamma_f \rangle / (1 - \langle \Gamma_n/\Gamma_n + \Gamma_f \rangle) (*)'$$

На рис. 6 показана зависимость отношения вероятности испарения нейтрона к вероятности деления от параметра делимости Z^2/A . На этом рисунке кроме наших данных представлены также результаты ряда работ других авторов^{/7,13-15/}. Все величины $\langle \Gamma_n/\Gamma_f \rangle$ рассчитаны по формуле (*) для реакций типа $(\text{Hl}, 5n)$, что позволяет исключить зависимость $\langle \Gamma_n/\Gamma_f \rangle$ от энергии возбуждения. Верхняя линия представляет собой значения $\langle \Gamma_n/\Gamma_f \rangle$ для разных изотопов, образованных в реакциях с ионами ^{12}C , ^{13}C , нижняя - с ионами ^{31}P ,

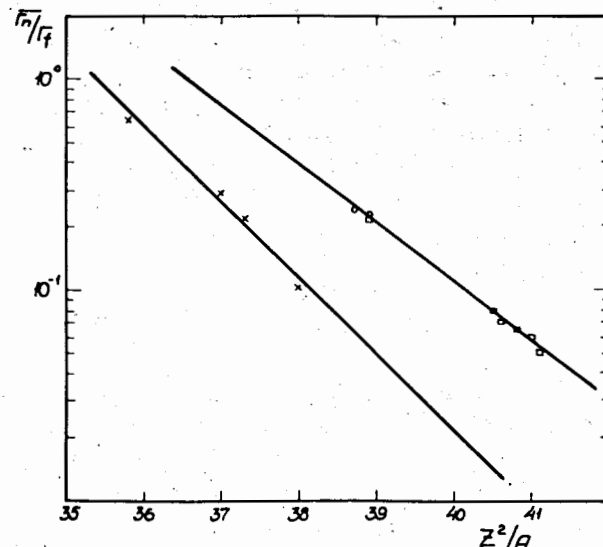


Рис. 6. Зависимость величин $\langle \Gamma_n/\Gamma_f \rangle$, найденных из реакции $(\text{Hl}, 5n)$ от параметров делимости Z^2/A . Наши данные обозначены (x), данные Волкова (o) и Гиорсо (□).

^{28}Si . Из рисунка видно, что линии, соединяющие значения $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle$ для разных изотопов, образованных в реакциях с ионами одной и той же массы, имеют вид прямых наклонных линий. Для заданного Z^2/A значения $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle$ уменьшаются с увеличением массы бомбардирующей частицы, что подтверждают теоретические предсказания о существенном влиянии углового момента на величину $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle$. Чем тяжелее бомбардирующая частица, тем больший угловой момент вносится в систему и тем меньше величина $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle$, а, следовательно, и сечение образования ядра с данным параметром делимости Z^2/A .

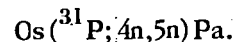
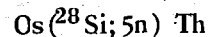
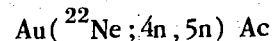
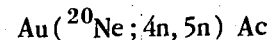
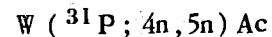
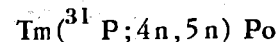
Из рассмотрения наших экспериментальных данных по определению сечений образования различных изотопов следует, что для $Z > 84$ максимальное сечение имеет реакция испарения 5 нейтронов из составного ядра. Это объясняется двумя причинами: во-первых, большая величина кулоновского барьера вызывает большее смещение максимума реакции испарения четырех нейтронов в сторону высоких энергий. При этих энергиях возбуждения испарение четырех нейтронов становится менее вероятным, уступая место более вероятной реакции пяти нейтронов. Во-вторых, большие энергии возбуждения обеспечивают некоторый рост $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle$ для реакции $(\text{Hl}, 5n)$. Оба фактора обеспечивают рост σ_{5n} по сравнению с σ_{4n} , несмотря на добавление еще одной ступени испарительного каскада.

ВЫВОДЫ:

1. Разработана высокоэффективная экспрессная методика сбора, транспортировки и детектирования короткоживущих α -излучателей на пучке тяжелых ионов.
2. Измерены пробеги некоторых продуктов ядерных реакций - атомов отдачи.
3. Изучены условия возникновения и подавления α -радиоактивного фона в реакциях с тяжелыми ионами.
4. Синтезирован новый α -излучатель ^{216}Ra и определены характеристики его распада: $T_{1/2} = 0,2 \pm 0,04 \text{ сек.}$

$$E_\alpha = 7,72 \text{ МэВ}, \quad E_\alpha = 7,82 \text{ МэВ}, \quad E_\alpha = 7,92 \text{ МэВ}.$$

5. Получены энергетические зависимости сечений и измерены абсолютные значения сечений следующих ядерных реакций:



6. Качественно изучено влияние углового момента на величину $\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle$. Показано, что $(\langle \Gamma_n / \Gamma_f \rangle)$ уменьшается с увеличением параметра делимости Z^2/A .

7. Найдено, что в области $84 \leq Z \leq 91$ при использовании многозарядных ионов с $Z=10, 14, 15$ наибольшее сечение имеет ядерная реакция $(\text{Hl}, 5n)$ по сравнению с реакциями испарения меньшего или большего числа нейтронов.

Результаты, лежащие в основе диссертации, опубликованы в журналах "Атомная Энергия", "Ядерная физика" и в виде сообщений ОИЯИ.

Диссертация написана по материалам работ /4,6,7,8,10/.

Литература

1. Г.Н.Флеров. Перспективы синтеза новых изотопов и элементов. Препринт ОИЯИ, Д7-3623, Дубна, 1967.
2. G.N.Flerov. Science Eng., 17, 1, 1967.
3. G.T.Seaborg. Ann.Rev.Nucl.Sci., 18, 53, 1968.
4. В.А.Друин, Н.К.Скобелев, Г.Я.Сун-Цзин-Ян. Атомная энергия, 26, 374, 1969.
5. Дж.Ярвуд. Техника высокого вакуума. М., Госэнергоиздат, стр. 123, 1960.
6. Г.Н.Акапьев, В.А.Друин, В.И.Рудь, Г.Я.Сун-Цзин-Ян. Ядерная физика, 12, 466, 1970.

7. Г.Я.Сун-Цзин-Ян, В.А.Друин, А.С.Трофимов. Ядерная физика, 14, 1297, 1971.
8. В.А.Друин, А.Г.Демин, Ю.П.Харитонов, Г.Н.Акапьев, В.И.Рудь, Г.Я.Сун-Цзин-Ян, Л.П.Челноков, К.А.Гаврилов. Ядерная физика, 13, 251, 1971.
9. K.Valli, E.K.Hyde. Phys. Rev., 176, 1377, 1968.
10. Г.Я.Сун-Цзин-Ян. Сообщение ОИЯИ, P15-6727, Дубна, 1972.
11. W.D.Myers, W.L.Swiatecki UCRL-11980 Nucl. Phys. 81, 1, 1966.
12. L.C.Northcliffe. Ann.Rev.Sci., 13, 67, 1963.
13. T.Sikkeland, A.Ghiorso, M.J.Nurmia. Phys.Rev., 172, 1232, 1968.
14. Э.Хайд, И.Перлман, Г.Сиборг. Методы синтеза тяжелых ядер. М., 1968, стр. 44.
15. В.В.Волков, Л.И.Гусева, А.С.Пасюк, Н.И.Тарантин, К.В.Филиппова. ЖЭТФ, 36, 762. 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 июля 1974 года.