



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.172.17.

П-25

7-84-696

ПЕНИОНЖКЕВИЧ

Юрий Эрастович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПАДА ЯДЕР
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ
С ЭНЕРГИЯМИ ДО ~ 10 МэВ/НУКЛОН

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1984

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций

Объединённого института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент АН КазССР,
доктор физико-математических
наук, профессор

В.Н.Околович

Доктор физико-математических
наук, профессор

А.А.Оглоблин

Доктор физико-математических
наук, старший научный сотрудник

Ю.П.Попов

Ведущее предприятие:

Радиевый институт им.В.Г.Хлопина (г.Ленинград)

Защита диссертации состоится " " 1985 года
в " " часов на заседании Специализированного совета
Д.047.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований
(г.Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан " " 1984 г.

Учёный секретарь Специализированного совета

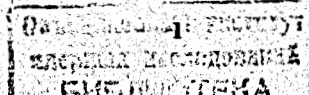
Ю.В.Таран

Актуальность проблемы. Реакции с тяжёлыми ионами отличаются большим разнообразием всевозможных процессов взаимодействия. Изучение этих процессов является одной из актуальных проблем современной ядерной физики. Прогресс в области ускорительной техники и методики эксперимента в последние годы позволил получить экспериментальную информацию о новых типах взаимодействия тяжёлых ионов с ядрами (глубоконеупругие реакции передачи, быстрое деление, подбарьерное слияние), позволяющую существенно расширить наши представления о свойствах ядерной материи.

В основном процессы взаимодействия двух сложных ядер сопровождаются их сильной перестройкой, значительным изменением нуклонного состава и диссипацией вносимой энергии по разным степеням свободы. В результате таких взаимодействий образуются сильно возбуждённые конечные ядра-продукты. При этом тепловая часть энергии возбуждения образующихся в реакции с тяжёлыми ионами ядер может составлять 100 МэВ, а угловой момент может достигать величины 50 - 70 \hbar .

В настоящее время в ядерной физике имеется ряд важнейших задач, которые могут быть решены только с использованием ядерных реакций с тяжёлыми ионами, сопровождающихся образованием слабовозбуждённых конечных продуктов. Одной из таких задач является синтез новых элементов. Все элементы второй сотни, включая 105-й элемент, были получены в реакциях слияния тяжёлых ионов с ядром мишени. В этих реакциях обычно использовались тяжёлые мишени с $Z \geq 92$ (от урана до калифорния) и относительно лёгкие бомбардирующие ионы (от углерода до неона). Однако дальнейшее продвижение в область $Z > 105$ этим традиционным способом встретило ряд серьёзных проблем, связанных с уменьшением сечений образования новых элементов из-за сильной делимости образующихся ядер, которая в значительной степени определяется их энергией возбуждения. Поэтому важным вопросом в проблеме синтеза новых ядер трансфермиевых элементов является выбор таких реакций, в которых эти ядра образуются с минимальной энергией возбуждения.

Другая задача, непосредственно связанная с получением в реакциях с тяжёлыми ионами слабовозбуждённых конечных продуктов, состоит в решении проблемы существования области повышенной стабильности сверхтяжёлых элементов вблизи магических чисел нейтронов $N = 184$ и протонов $Z = 114$. Поскольку стабильность таких ядер полностью определяется влиянием замкнутых нуклонных оболочек, то весьма принципиальным в вопросе синтеза этих ядер является получение их в реакциях с такими энергиями возбуждения, при которых оболочечные эффекты сохраняются ($E^* < 30 - 40$ МэВ).



Проблема получения в реакциях с тяжёлыми ионами слабовозбуждённых тяжёлых ядер имеет большое значение для изучения механизма деления ядер. Значительный прогресс в физике деления произошёл с появлением пучков ускоренных тяжёлых ионов. В реакциях с тяжёлыми ионами впервые были получены спонтанно-делящиеся изотопы тяжёлых элементов вплоть до $Z=109$, получены и изучены свойства спонтанно-делящихся изомеров, открыто запаздывающее деление ядер, изучено деление ядер в широком диапазоне Z и A ($Z/A = 20 - 44$) с энергией возбуждения до 60 - 100 МэВ. Однако деление из основного и сильно возбуждённого состояний может происходить различными способами и иметь совершенно различные характеристики, которые для ядер с $Z \geq 100$ в значительной степени определяются оболочечными эффектами, зависящими от температуры и углового момента делящегося ядра. Можно предполагать, что характеристики деления возбуждённых тяжёлых ядер соответствуют характеристикам спонтанного деления в той степени, в какой оболочечные эффекты сохраняются с ростом температуры и углового момента ядра. Поэтому изучение деления слабовозбуждённых тяжёлых и сверхтяжёлых ядер даёт возможность получения важной информации о характеристиках спонтанного деления таких ядер, о их барьере деления, а также представляет самостоятельный интерес для теории деления.

С задачей получения ядер с малой энергией возбуждения связана одна из фундаментальных задач ядерной физики - синтез и изучение свойств нуклидов, расположенных вблизи границ ядерной стабильности. Прогресс в этом направлении был обусловлен использованием пучков ускоренных тяжёлых ионов. В реакциях с тяжёлыми ионами были получены нейтронно-дефицитные ядра в области $A=150$, испытывающие протонный распад. Реакции с тяжёлыми ионами позволили существенно продвинуться к границам ядерной стабильности, особенно в область лёгких элементов. Однако получение ядер вблизи границ ядерной стабильности связано с большими методическими сложностями из-за малого сечения их образования ($10^{-31} - 10^{-34}$ см²) и короткого времени жизни. Особые требования в этих исследованиях предъявляются к методу синтеза таких ядер в связи с необходимостью их получения с малой энергией возбуждения из-за небольшой энергии связи нуклонов в этих ядрах.

Основная цель работы заключалась в проведении экспериментальных исследований механизмов ядерных реакций с тяжёлыми ионами - реакций, идущих с образованием составных ядер, деления, прямых процессов с вылетом высокоэнергетических лёгких частиц, реакций перезарядки, приводящих к образованию слабовозбуждённых ядер - продуктов этих реакций.

Исследовались некоторые особенности распада слабовозбуждённых ядер с целью получения новой физической информации о процессах взаимодействия двух сложных ядер при бомбардирующих энергиях 5 - 10 МэВ/нуклон и их использования для синтеза экзотических ядер, как в области трансформивых элементов, так и ядер лёгчайших элементов, расположенных вблизи границ ядерной стабильности.

Научная новизна работы

Изучены функции возбуждения для реакций слияния с последующим испарением нейтронов, реакций слияния - деления в широком интервале параметра $130 \leq Z_1, Z_2 \leq 2900$, и определены значения эффективного радиуса взаимодействия для всех исследованных реакций, в том числе с использованием таких ускоренных ионов, как ^{48}Ca , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{74}Ge . Предложен метод определения порогов слияния ядер с $Z_1, Z_2 > 1500$. Изучено упругое рассеяние ускоренных ионов ^{40}Ca , ^{44}Ca , ^{48}Ca , а также ^{40}Ar и ^{48}Ti на дважды магических ядрах ^{208}Pb . Проведён анализ полученных данных с использованием квазиклассического подхода, определены эффективные радиусы взаимодействия ускоренных ионов ^{40}Ca , ^{44}Ca и ^{48}Ca с ядрами ^{208}Pb .

Показано, что в реакциях с ионами ^{48}Ca , ^{54}Cr , ^{58}Fe можно получить составные ядра с энергией возбуждения $E^* = 20 - 30$ МэВ.

Разработана и использована на пучках тяжёлых ионов методика определения массы двух коррелированных продуктов ядерных реакций путём измерения их времени пролёта с разрешением $\Delta t \approx 200$ пс и кинетической энергии с разрешением не хуже 1%.

С помощью прецизионной времяпролётной методики измерены энергетические и массовые распределения осколков деления ядер трансурановых элементов ионами ^4He . Наблюдены симметричные и асимметричные компоненты массовых распределений и исследованы их зависимости от энергии возбуждения.

Впервые в реакции с тяжёлыми ионами измерены массовые распределения осколков деления трансурановых ядер при энергиях возбуждения $E^* \approx 25 - 40$ МэВ. Наблюдены некоторые закономерности деления этих ядер, в частности асимметричные массовые распределения осколков деления.

Разработана высокочувствительная методика измерения спектров лёгких заряженных частиц с использованием магнитного спектрометра.

Впервые с чувствительностью по сечению до 10^{-33} см²/МэВ исследованы процессы эмиссии лёгких заряженных частиц (изотопов водорода, гелия, лития, бериллия) под передними углами.

Обнаружено новое явление — вылет высокоэнергетических частиц с энергиями, максимально возможными для данной реакции. Изучены характеристики таких процессов — сечение, реакции, зависимость сечения от массы мишени и бомбардирующего иона, а также от энергии иона, угловые распределения. Исследована связь канала эмиссии частиц с другими каналами реакции. Изучены угловые моменты ядер, образующихся в реакциях с вылетом быстрых частиц. Показано, что в реакциях с вылетом высокоэнергетических частиц образуются "холодные" слабообращающиеся ядра. На основе полученных данных предложен высокочувствительный метод получения и идентификации тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в этих реакциях. Впервые, с использованием магнитного спектрометра с чувствительностью $d\theta/dR \leq 5 \cdot 10^{-7}$ мб/ср, проведены эксперименты по синтезу ядер ^{10}Ne . Получена верхняя граница их сечения образования.

Проведены эксперименты на циклотроне У-300 с использованием пучков ускоренных радиоактивных ядер ^{14}C по изучению механизма реакций перезарядки этих ядер. На основе этих экспериментов разработан и предложен метод определения масс слабосвязанных ядер лёгчайших элементов, в том числе и ядер ^{10}Ne .

Практическая ценность работы

Данные по барьерам взаимодействия ядер в широком диапазоне параметра $Z_1 Z_2$, полученные в диссертации, широко используются в экспериментах по синтезу новых трансфермиевых элементов, а также при получении и изучении характеристик распада ядер, образующихся в реакциях с тяжёлыми ионами с минимальной энергией возбуждения. Результаты измерений функций возбуждения и полученные в диссертации значения эффективных радиусов взаимодействия, в том числе для изотопов Са, используются в теоретических исследованиях механизма взаимодействия двух сложных ядер.

Данные экспериментов по исследованию вылета высокоэнергетических частиц в реакциях с тяжёлыми ионами используются для теоретической интерпретации этого нового механизма ядерных реакций, а также для разработки нового метода синтеза тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. Эти результаты легли в основу физических обоснований новых поколений ускорителей тяжёлых ионов, в частности тандем-циклотронов ЛЯР У-400 — У-400М. Реакции, сопровождающиеся эмиссией лёгких заряженных частиц и ядер, составляют основную часть физической программы на этих ускорителях, особенно перспективной, с этой точки зрения, является возможность использования вторичных пучков таких экзотических ядер, как ^6He , ^8He и др. Реакции с вылетом лёгких частиц и ядер успешно используются для получения ядер вблизи границ ядерной стабильности.

Практическое значение имеют разработанные и исследованные в настоящей работе методики (магнитный анализ, газовые счётчики, детекторы на основе микроканальных пластин и рыхлых диэлектриков, гамма-спектрометр, времяпролётный спектрометр). Полученные в настоящей работе методические результаты используются при разработке прецизионных экспрессных методик регистрации ядерных излучений как в Лаборатории ядерных реакций, так и в других научных центрах. Времяпролётный спектрометр, включающий в себя в качестве временных детекторов микроканальные пластины с вторичным эмиттером электронов на основе рыхлого диэлектрика MgO , успешно используется для диагностики пучков ускоренных ионов (измерение абсолютного значения пучка энергии и формы без прерывания пучка).

Кроме того описанные в работе времяпролётные спектрометры для регистрации осколков могут использоваться как прецизионные спектрометры быстрых заряженных частиц $^{25/}$ в ядерной физике. Использование микроканальных пластин $^{30/}$ и эмиттеров вторичных электронов на основе рыхлых диэлектриков $^{36/}$ может иметь самостоятельный интерес для регистрации различных ядерных излучений как в ядерной физике низких, средних и высоких энергий, так и в смежных областях науки и техники. Такой же интерес представляют и газонаполненные счётчики (позиционно-чувствительные ионизационные камеры $^{27/}$, плоскопараллельные счётчики), разработанные и описанные в настоящей работе.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Созданные высокочувствительные прецизионные методики регистрации продуктов ядерных реакций с тяжёлыми ионами, включающие в себя времяпролётный спектрометр с высоким разрешением по времени пролёта ($\sim 2 \cdot 10^{-10}$ с) и энергии ($\Delta E/E \approx 10^{-2}$), магнитный спектрометр с высоким разрешением по импульсу ($\Delta p/p \approx 10^{-4}$), двухплечевой времяпролётный спектрометр с высокой светосилой, гамма-спектрометр для измерения множественности гамма-квантов, являются наиболее эффективными приборами для исследования механизма ядерных реакций, свойств ядер и характеристик их распада.

2. В реакциях полного слияния с тяжёлыми ионами в диапазоне $130 < Z_1 Z_2 < 2000$ можно получать составные ядра с минимальной энергией возбуждения вплоть до 18 МэВ. При переходе к более тяжёлым комбинациям ион — мишень ($Z_1 Z_2 > 2000$) появляется разница между барьером взаимодействия и барьером слияния. Это приводит к существенному повышению минимальной энергии возбуждения тяжёлых составных ядер.

3. Исследование упругого рассеяния тяжёлых ионов на ядрах является надёжным методом определения эффективных радиусов взаимодействия. В пределах экспериментальной точности эффективные радиусы взаимодействия ионов ^{40}Ca , ^{44}Ca и ^{48}Ca с ядрами ^{208}Pb не отличаются, несмотря на сильное отличие их нуклонного состава.

4. В массовых и энергетических распределениях осколков деления составных ядер с $Z > 94$, образованных в реакциях с тяжёлыми ионами с энергией возбуждения $E^* \leq 40$ МэВ, проявляются оболочечные эффекты. Изучение этих характеристик деления позволяет получить информацию о механизме деления и свойствах делящихся ядер.

5. Процесс взаимодействия тяжёлых ионов с ядрами при энергиях ионов $6 - 10$ МэВ/нуклон сопровождается эмиссией лёгких частиц и ядер (изотопов водорода, гелия, лития, бериллия); энергетический спектр которых становится более жёстким под передними углами, и энергии достигают максимально возможных для данной реакции значений.

6. В реакциях с вылетом высокоэнергетических частиц с энергиями вблизи граничной энергии могут образовываться слабовозбуждённые ("холодные") ядра.

7. Верхняя граница сечения образования изотопа ^{10}He ($5 \cdot 10^{-7}$ мб/ср) в реакции $^{232}\text{Th} + \text{Pb}$ свидетельствует о нестабильности ядер ^{10}He .

Зарядообменные реакции под действием тяжёлых ионов могут быть использованы для синтеза слабосвязанных ядер вблизи границ ядерной стабильности и определения их массы.

Апробация работ

Основные результаты работы доложены автором на Международной конференции по взаимодействию сложных ядер (г.Рибейрак, Франция, 1969 г.), на Международной конференции по физике тяжёлых ионов (г.Дубна, 1971 г.), на Международной летней школе по ядерной физике (г.Миколайки, ПНР, 1976 г.), на Международной школе по ядерной физике и атомной энергетике (г.Варна, НРБ, 1978 г.), на симпозиуме МАГАТЭ по физике и химии деления (г.Юлих, ФРГ, 1979 г.), на Международном совещании по взаимодействию тяжёлых ионов с ядрами и синтезу новых элементов (г.Дубна, 1977 г.), на Международном симпозиуме по синтезу и свойствам новых элементов (г.Дубна, 1980 г.), на Международном совещании по взаимодействию ядер и ядерным воз-

буждениям (г.Дубна, 1982 г.), на совещании по экспериментальным установкам У-400 и физической программе первоочередных экспериментов на них (г.Дрезден, ГДР, 1982 г.), на Международной школе-семинаре по физике тяжёлых ионов (г.Алушта, 1983 г.), на Сессии отделения ядерной физики АН СССР по ядерной физике (г.Москва, 1983 г.), на Международном совещании по экспериментам на пучках тяжёлых ионов (г.Варна, НРБ, 1984 г.), на 18, 26, 30, 31, 32, 34 - совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, на заседаниях Комитета по физике тяжёлых ионов в г.Дубне, на научных семинарах в ОИЯИ, ГСИ (г.Дармштадт, ФРГ), институте Макса Планка (г.Гайдельберг, ФРГ), Институте ядерной физики (г.Орсе, Франция) и других семинарах и совещаниях.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 227 страниц машинописного текста (включая рисунки), 13 таблиц, 81 рисунок и список литературы из 240 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана аннотация работы, показана актуальность исследований механизма образования и распада ядер в реакциях с тяжёлыми ионами, кратко изложено содержание диссертации и приведены основные результаты, полученные автором.

В первой главе рассмотрены экспериментальные возможности получения ядер с минимальной энергией возбуждения в реакциях с образованием составных ядер.

Минимальная энергия возбуждения составных ядер, образующихся в реакциях полного слияния ядер иона и мишени определяется барьером слияния этих ядер, который связан с эффективным радиусом взаимодействия, в соответствии с выражением

$$V_{\text{сл.}} = z_1 z_2 e^2 / r_{\text{эф.}} (A_1^{1/3} + A_2^{1/3}). \quad (I)$$

Для реакций слияния, идущих с образованием составных ядер, значение барьера слияния определяется несколькими способами. Один из наиболее распространённых способов основан на измерении энергетической зависимости сечения образования остаточных ядер после испарения нейт-

ронов из составного ядра. Зависимость сечения $(nI, \alpha n)$ -реакции от энергии возбуждения составного ядра имеет вид

$$\sigma_{\alpha n}(E^*) = \prod_{k=1}^x P_k(E^*) (\Gamma_n / \Gamma_f)_k \sigma_{c.я.} \quad (2)$$

где $P_k(E^*)$ - вероятность вылета из составного ядра x нейтронов.

Сечение образования составного ядра вблизи барьера слияния описывается классическим выражением

$$\sigma_{c.я.}(E_n) = \pi r_{эф}^2 (A_n^{1/3} + A_m^{1/3}) (1 - V_{cл.} / E_n) \quad (3)$$

Величина $\sigma_{c.я.} P_k$ оказывается сильно чувствительной к величине барьера слияния $V_{cл.}$ особенно для реакций, идущих с испарением малого числа нейтронов. Поэтому из анализа функций возбуждения можно определить значение барьера слияния. Некую неопределённость в расчёты вносит неточность в знании величины Γ_n / Γ_f , рассчитываемой по различным полуэмпирическим систематикам. Однако эта величина существенна лишь для сильно делящихся ядер ($Z_{c.я.} > 100$).

Нами были экспериментально исследованы функции возбуждения реакций с образованием составного ядра и с последующим испарением нейтронов и заряженных частиц в широкой области изменения энергии возбуждения и угловых моментов составных ядер $^{81}\text{Rb}^*$ и $^{125}\text{Cs}^*$ в реакциях с ионами B^{11} , I^{18} , O^{22} , Ne .

В связи с необходимостью точной идентификации конечных продуктов по Z и A , а также экспрессности и высокой эффективности их выделения, была использована методика, основанная на применении масс-спектрометра для выделения щелочных элементов от Li до Fr . Эта методика, разработанная в Лаборатории им. Р.Бернаса (Орсе, Франция) для пучков протонов высокой энергии, впервые была использована в ЛЯР ОИЯИ на пучках тяжёлых ионов $^{12}/$.

В совместном Дубна-Орсе эксперименте были изучены функции возбуждения реакций слияния с образованием составных ядер рубидия и цезия. Измерены сечения $(nI, \alpha n)$ -реакций для этой области ядер в диапазоне энергий $0,9 V_c < E_n < 2,5 V_c$ для $\alpha = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ $^{3}/$.

Из анализа функций возбуждения были получены значения величин барьеров слияния и эффективных радиусов взаимодействия в диапазоне $130 < Z_n Z_m < 450$. Эти значения представлены на рис.2 зачернёнными точками.

Для более тяжёлых систем ($Z_n Z_m > 1500$) основным каналом распада является деление, поэтому для этой области ядер был разработан и использован метод определения барьера слияния путём измерения энергетической зависимости сечения деления, которое, предполагалось, полностью соответствует для сильно делящихся систем сечению слияния двух вза-

имодействующих ядер. Для измерения сечения деления составных ядер использовались различные методики. При исследовании реакций на ядрах с высоким барьером деления (свинец, висмут) использовалась радиохимическая методика выделения элементов - продуктов реакций с последующим измерением их гамма-активности и характеристического рентгеновского излучения $^{9,10}/$. В случае, когда в качестве мишени брались сильно делящиеся ядра в области урана, для выделения продуктов реакций полного слияния был использован корреляционный метод измерения кинетических энергий парных фрагментов $^{11}/$, который основывался на кинематическом разделении осколков, образующихся в реакции, идущей с полной передачей импульса (реакции полного слияния) и неполной передачей импульса (деление после реакции передачи).

В таблице представлены результаты измерений барьеров слияния - симметричного деления для разных реакций.

Таблица

| Частица | Мишень | Барьер слияния (МэВ) | $\Gamma_{эф.}$ (фм) | Барьер для реакций передачи (МэВ) | $\Gamma_{эф.}$ (фм) |
|------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|
| ^{40}Ar | ^{208}Pb | $157 \pm 1,5$ | $1,44 \pm 0,02$ | $157 \pm 1,5$ | $1,44 \pm 0,015$ |
| ^{40}Ar | ^{238}U | $171 \pm 1,5$ | $1,44 \pm 0,015$ | $169 \pm 1,5$ | $1,45 \pm 0,015$ |
| ^{40}Ca | ^{238}U | $188,5 \pm 1,5$ | $1,46 \pm 0,02$ | - | - |
| ^{44}Ca | ^{238}U | $186,4 \pm 1,5$ | $1,46 \pm 0,02$ | - | - |
| ^{48}Ca | ^{208}Pb | $171,5 \pm 1,5$ | $1,44 \pm 0,02$ | - | - |
| ^{48}Ca | ^{238}U | $184,5 \pm 1,5$ | $1,46 \pm 0,02$ | - | - |
| ^{52}Cr | ^{208}Pb | $203,0 \pm 1,5$ | $1,44 \pm 0,02$ | $202 \pm 1,5$ | $1,45 \pm 0,02$ |
| ^{58}Fe | ^{208}Pb | $216,0 \pm 2,0$ | $1,45 \pm 0,03$ | $216 \pm 2,0$ | $1,45 \pm 0,03$ |
| ^{74}Ge | ^{232}Th | $310,0 \pm 10$ | $1,30 \pm 0,05$ | 285 ± 10 | $1,40 \pm 0,03$ |

В этой же таблице для сравнения представлены барьеры для реакций передачи одного или нескольких нуклонов и соответствующие им эффективные радиусы взаимодействия.

Как видно из таблицы, во всех случаях, кроме реакции $^{232}\text{Th} + ^{74}\text{Ge}$, значения радиусов взаимодействия, определённых из функций возбуждения реакций слияния-деления и реакций передачи, в пределах ошибки эксперимента не отличаются. При взаимодействии $^{232}\text{Th} + ^{74}\text{Ge}$ наблюдается различие барьеров реакций деления и передачи на величину $\Delta V \approx 25 \text{ МэВ}^{8}/$.

Уменьшение $\Gamma_{эф.}$ при переходе к более тяжёлым взаимодействующим ядрам можно объяснить тем, что при возрастании величины кулоновского потенциала эффективный радиус взаимодействия приближается к радиусу

сильного ядерного поглощения, определяемому из условия

$$\partial(V_{кул.} + V_{ц.д.} + V_{яд.})/\partial R \Big|_{R=R_{с.л.}} = 0.$$

Иными словами, глубоконеупругие процессы, в том числе и слияние, происходят в данном случае при практически полном перекрытии ядерных поверхностей. В то же время для реакций передачи нескольких нуклонов вблизи кулоновского барьера основной вклад в сечение по-прежнему дает краевое соударение, и эффективный радиус при переходе к более тяжёлым взаимодействующим системам меняется слабо.

Поскольку разные каналы реакции могут характеризоваться разными барьерами, можно ожидать, что эта разница в наибольшей степени будет проявляться в барьерах, полученных из энергетической зависимости полного сечения реакции, определяемого из упругого рассеяния ядер и наиболее неупругого канала, соответствующего симметричному делению. В связи с этим нами были проведены эксперименты по измерению упругого рассеяния ускоренных ионов ^{40}Ar , ^{40}Ca , ^{48}Ti , ^{48}Ca на ядрах ^{208}Pb . При описании упругого рассеяния было использовано классическое рассмотрение, при котором сохраняется понятие о траектории движения тяжёлых частиц в поле ядра мишени.

Результаты квазиклассического анализа экспериментальных данных по упругому рассеянию [14] показали, что эффективный радиус взаимодействия, определённый из условия $d\sigma_{упр}/d\sigma_{рез.} = 1/4$ в пределах экспериментальной погрешности, для всех приведённых в таблице реакций упругого рассеяния одинаков и составляет 1,44 – 1,45 фм, что согласуется со значением эффективного радиуса взаимодействия, определённого из функций возбуждения для реакций слияния-деления ионов ^{40}Ar , ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{48}Ti с ядром ^{208}Pb .

Таким образом, для рассмотренных реакций слияния в области $Z_1 Z_2 \approx 1500$ не наблюдалось превышения барьера слияния над барьером взаимодействия.

Результаты исследований упругого рассеяния ядер с энергиями 5 – 10 МэВ/нуклон могут быть использованы для определения радиусов распределений нуклонов в ядрах в предположении, что характер взаимодействия ядер с близкими значениями Z и A не меняется. Примером такого случая является упругое рассеяние ядер ^{40}Ca и ^{48}Ca на ядрах ^{208}Pb , которое исследовалось нами и сравнивалось с упругим рассеянием ядер ^{40}Ar и ^{48}Ti . Так как экспериментальные данные по упругому рассеянию описываются функцией, зависящей от параметра наибольшего сближения ядер по резерфордским траекториям ($d\sigma_{упр.}/d\sigma_{рез.} = f(D)$), то, если радиусы распределения нуклонов в ядрах в точности следуют зависимости $R = r_0 A^{1/3}$, все точки в угловых распределениях упругого рассеяния для всех четырёх реакций с ионами ^{40}Ar , ^{40}Ca , ^{48}Ca и

^{48}Ti должны описываться одной кривой, представляющей зависимость ($d\sigma_{упр.}/d\sigma_{рез.}$) от d , где $d = D/(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$. Эта зависимость представлена пунктирной кривой на рис. 1, откуда следует, что все экспериментальные значения хорошо согласуются друг с другом и находятся

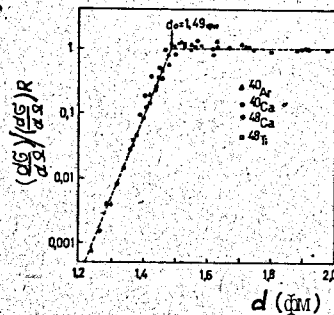


Рис. 1. Отношение сечений упругого рассеяния и резерфордского рассеяния в зависимости от параметра $d = D/(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$.

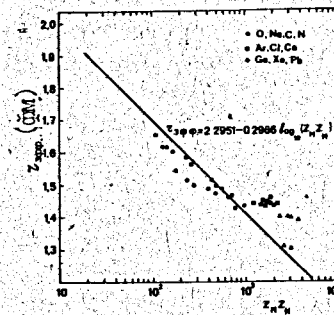


Рис. 2. Зависимость эффективного радиуса взаимодействия от произведения атомных номеров бомбардирующего иона и мишени. Чёрные точки – результат настоящей работы.

в соответствии с предположением о том, что $R \sim A^{1/3}$ и распределение плотности нуклонов на границе этих ядер имеет одинаковый характер. Проведённый анализ с использованием оптической модели упругого рассеяния подтверждает эти выводы [15].

На рис. 2 представлена зависимость эффективного радиуса взаимодействия от произведения атомных номеров ядер мишени и частицы. Чёрными точками на этом рисунке показаны данные настоящей работы. Сплошные кривые определяют эмпирическую зависимость для эффективного радиуса взаимодействия, полученную в работе [1]. Видно существенное различие между расчётными и экспериментальными значениями $R_{эф}$ в области $1000 \leq Z_1 Z_2 \leq 2000$, что соответственно отразится на отличии расчётных и экспериментальных барьеров слияния. Это указывает на сложный механизм реакций слияния ядер, которые могут протекать в глубоководбарьерной области относительно одномерного барьера, определяемого зависимостью (1). Вместе с тем полученные нами, а также в других работах данные по симметричному делению относятся к надбарьерной области энергий и не могут быть непосредственно связаны с сечением образования составных

ядер в глубоководбарьерной области. С другой стороны, эффекты, наблюдаемые при симметричном делении, будут присутствовать и в реакциях, идущих с образованием составного ядра. Поэтому можно полагать, что в этом случае величина $(\Delta E)_{с.я.} \geq (\Delta E_{ff})$.

Для более тяжёлых взаимодействующих ядер с $Z_1 Z_2 \geq 1500$ процесс деления может проходить несколько иным способом, чем это имеет место для более лёгких ядер — без образования составного ядра. В этом случае возникают трудности, связанные с необходимостью разделения осколков, образующихся в двух разных процессах — "истинного" деления и т.н. "быстрого" деления. Отметим, однако, что полученные в настоящей работе значения эффективных радиусов взаимодействия находятся в хорошем согласии с данными, извлекаемыми из функций возбуждения (НИ, αn)-реакций, в которых измерялся непосредственно продукт распада составных ядер. В этих экспериментах в качестве мишеней использовались стабильные ядра Рb и Bi, которые облучались ионами с массой $A_1 \approx 40 - 50$. Минимальная энергия возбуждения составных ядер в этих реакциях составляла 18-25 МэВ. Это обстоятельство определяло относительно высокое значение сечения образования тяжёлых элементов вплоть до $Z = 104 - 106$ /7,16/.

Однако при продвижении в область $Z_1 Z_2 > 2000$ сечение образования продуктов (НИ, αn)-реакций резко понижается, что может быть связано с увеличением барьера реакций слияния в более сильной степени, чем это следует из энергетической зависимости сечения симметричного деления вблизи барьера. Это обстоятельство должно приводить к увеличению минимальной энергии возбуждения составной системы. Между тем, как следует из представленных в первой главе результатов, в реакциях полного слияния можно получать составные ядра вплоть до $Z_{с.я.} \sim 110$ с минимальной энергией возбуждения < 50 МэВ, которые, в основной доле случаев, будут испытывать деление на два осколка.

Во второй главе представлены результаты экспериментального изучения массовых и энергетических распределений осколков деления ядер трансурановых элементов тяжёлыми ионами с массой $4 \leq A_1 \leq 48$ при энергиях возбуждения $E^* < 50$ МэВ. До последнего времени исследования характеристик деления в реакциях с тяжёлыми ионами проводились при энергиях возбуждения $E^* > 50$ МэВ. Между тем известно, что при делении тяжёлых составных ядер с энергией возбуждения до 30-40 МэВ наблюдается влияние оболочечных эффектов на формирование масс осколков деления. Поэтому исследование формы массовых распределений в зависимости от энергии возбуждения составных ядер даёт информацию о том, каким образом оболочечные эффекты зависят от энергии возбуждения.

Оболочечные эффекты при вынужденном делении ядер от тория до фермия

проявляются в виде структуры в массовых распределениях и спектрах полной кинетической энергии осколков.

Поэтому большой интерес представляет изучение характеристик деления этих ядер в широком диапазоне энергий возбуждения.

В настоящей работе были измерены массовые и энергетические распределения осколков деления ядер ^{238}U , ^{237}Np , ^{242}Pu , ^{243}Am , ^{249}Cf при облучении их ионами ^4He в диапазоне энергий 24 - 36 МэВ.

Для изучения массовых распределений осколков деления использовался метод одновременного измерения кинетической энергии и скорости осколков деления, что позволяло непосредственно определять массу регистрируемого осколка. Для этих измерений был разработан и использован времяпролётный спектрометр /25/. Измерение скорости осколка производилось с помощью двух временных детекторов. Для получения стартового сигнала использовался детектор на основе микроканальных пластин /26/. Для увеличения числа вторичных электронов, а следовательно и амплитуды сигнала, в качестве эмиттера вторичных электронов в спектрометре использовался эмиттер на основе рыхлого диэлектрика MgO /36/. В качестве детектора "стоп"-сигнала использовался плоскопараллельный газовый счётчик /27/. Измерение кинетической энергии осколков производилось с помощью позиционно-чувствительной ионизационной камеры /27/. Это позволило получить временное разрешение спектрометра ~ 200 пс, энергетическое разрешение не хуже 1% при телесном угле $2 \cdot 10^{-2}$ ср.

Такие характеристики позволяли измерять массу продуктов реакции с разрешением не хуже 1,5 а.е.м.

Были измерены массовые распределения осколков деления ядер ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{246}Cm , ^{249}Bk , ^{253}Fm и спектры их полных кинетических энергий (ПКЭ) в зависимости от энергии бомбардирующих ионов. При делении составных ядер ^{241}Am , ^{243}Bk и ^{253}Fm было найдено, что с ростом энергии в массовом распределении начинает проявляться пик, соответствующий осколкам симметричного деления (рис.3). При сравнимых энергиях возбуждения вклад осколков симметричного деления увеличивается с ростом массы делящегося ядра. Наличие максимума в массовом распределении, соответствующего симметричному делению, позволило более чётко, чем это делалось раньше, разделить симметричную и асимметричную компоненты, используя сравнительно простой математический формализм, предложенный для спонтанного деления и развитый нами для вынужденного деления /28/. Была получена зависимость отношения симметричной моды деления к асимметричной для различных делящихся ядер от Ra до Fm. Была найдена корреляция соотношения симметричного и асимметричного вида деления с теоретической зависимостью $\Delta V_f = f(A_{с.я.})^{1/6}$, рассчитанной в предположении о существовании двух барьеров деле-

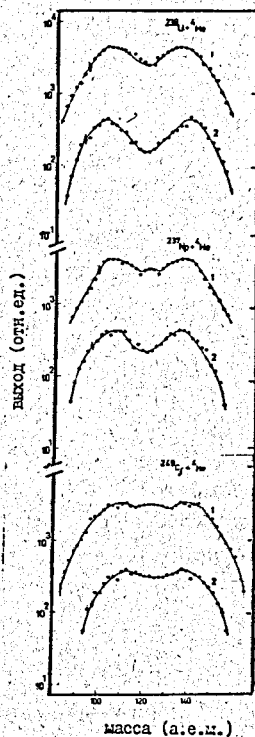


Рис.3. Массовое распределение осколков деления ^{238}U , ^{237}Np и ^{249}Cf α -частицами с энергиями 36 МэВ (кривые 1) и 28 МэВ (кривые 2).

Как было показано в первой главе, облучая мишени с $Z \geq 80$ тяжёлыми ионами с $Z \geq 20$, можно получить составные ядра с $Z \geq 100$ с энергией возбуждения 18–25 МэВ и небольшим угловым моментом.

нии, ответственных за симметричное и асимметричное деление.

Следует отметить также, что с увеличением энергии возбуждения составных ядер ^{247}Bk , ^{253}Fm ПКЭ осколков асимметричного деления и симметричного деления практически не отличаются, и их значения с ростом энергии возбуждения меняются одинаково в отличие от того, что имеет место для более лёгких составных ядер (^{242}Pu). Этот результат рассмотрен в рамках оболочечных представлений с точки зрения проявления при симметричном делении тяжёлых ядер ($Z \sim 100$) замкнутой оболочки с $Z = 50$, причём влияние этой оболочки на формирование массового распределения может быть таким же, как оболочки с $N = 82$ при асимметричном делении.

Экспериментальное изучение массовых распределений осколков деления тяжёлых ядер, а также зависимости ПКЭ (M) показывает, что оболочечные эффекты играют заметную роль в описании этих характеристик вплоть до $E^* \approx 40$ МэВ. Большой интерес представляет исследование деления ядер с $Z > 100$. В реакциях с тяжёлыми ионами возможно получать слабо возбуждённые тяжёлые ядра, которые трудно синтезировать, а тем более изучать их свойства в основном состоянии.

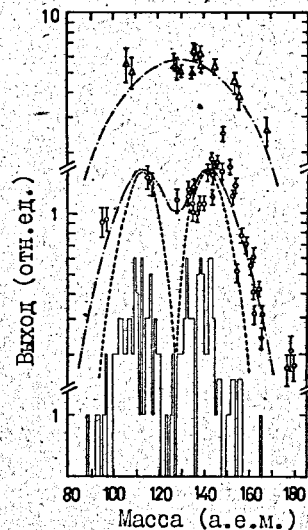


Рис.4. Массовые распределения осколков деления составного ядра $^{256}\text{Io}_2$ при $E^* = 53$ МэВ (светлые треугольники) и $E^* = 25$ МэВ (светлые точки), ^{256}Fm (спонтанное деление) – пунктирная кривая, $^{252}\text{Io}_2$ (спонтанное деление) – гистограмма.

На рис.4 показаны массовые распределения осколков деления составного ядра $^{256}\text{Io}_2$ при энергиях возбуждения 25 МэВ (точки) и 53 МэВ (треугольники), образующегося в реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$. При энергии возбуждения 25 МэВ массовое распределение имеет чётко выра-

женную структуру с двумя максимумами так же, как и в случае спонтанного деления ^{256}Fm (пунктирная кривая) и $^{252}\text{Io}_2$ (гистограмма). Таким образом, "двугорбая" структура массового распределения осколков деления $^{256}\text{Io}_2$ при $E^* = 25$ МэВ обусловлена влиянием оболочки с $Z = 50$ и $N = 82$ подобно тому, что наблюдается при делении актинидных элементов при низких энергиях возбуждения ($E^* < 40$ МэВ). При таких энергиях возбуждения характеристики деления ядер в значительной степени определяются оболочечными эффектами. Это находит проявление в форме массовых распределений и их изменении в зависимости от энергии возбуждения делящегося ядра.

Естественно, что представляло большой интерес расширить область исследования характеристик деления для более тяжёлых ядер, включая область сверхтяжёлых элементов. При получении составных ядер в этой области происходит сильное возрастание кулоновского фактора $Z_1 Z_2 / R$ > 2000 и, как было показано в первой главе, сечение реакций полного слияния может резко уменьшаться по сравнению с сечением других каналов реакции, и наблюдаемые в эксперименте осколки симметричной фрагментации могут быть не связаны однозначно с осколками деления составного ядра. Вместе с тем исследования деления таких тяжёлых систем позволяют делать некоторые выводы о механизме распада составной системы, которые могут быть сопоставлены с тем, что ожидается в случае деления составного ядра.

При получении более тяжёлых составных ядер в качестве мишеней используются ядра в районе урана. В этом случае в экспериментах необходимо отделиться от продуктов деления ядер мишени после реакции передачи. С этой целью в настоящей работе использован метод корреляционных измерений кинетических энергий парных продуктов реакций /11/, позволяющий с высокой эффективностью выделить продукты двухтельного процесса, связанные с полной передачей импульса бомбардирующего иона образующемуся ядру. С использованием корреляционной методики были исследованы массовые распределения и спектры кинетических энергий осколков деления в реакциях $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$, $^{208}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$, $^{208}\text{Pb} + ^{52}\text{Cr}$, $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$, $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$, $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ в широком диапазоне энергий бомбардирующих ионов.

Более детально исследовалась реакция $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$, для которой измерялись массовые, энергетические и угловые распределения продуктов в энергетическом диапазоне бомбардирующих ионов от 44 МэВ до 300 МэВ.

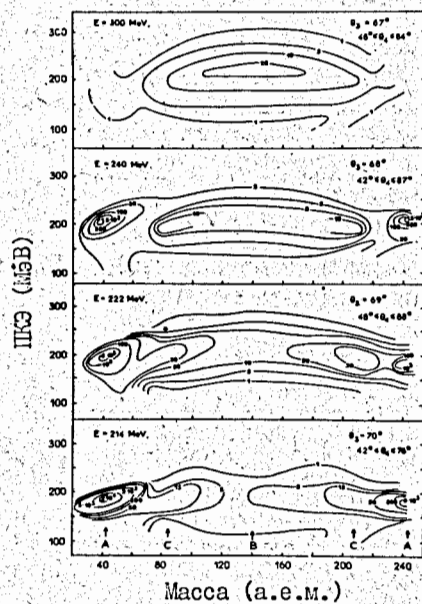


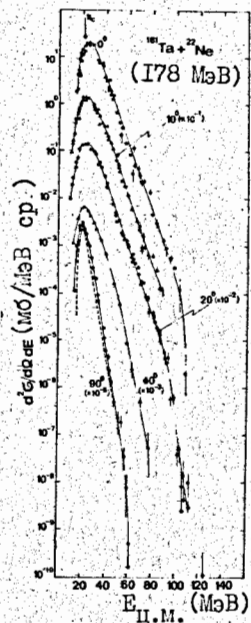
Рис. 5. Зависимость полной кинетической энергии продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ от их массы для четырёх значений энергий бомбардирующих ионов.

На рис. 5 в виде контурных диаграмм показана зависимость полной кинетической энергии продуктов реакции от массового числа, полученная корреляционным методом, для четырёх значений энергий ионов ^{40}Ar . Основную часть распределения в области масс, обозначенных индексом "А", составляют упругие и квазупругие события. Распределение продуктов в областях масс "В" и "С" с уменьшением энер-

гии сильно изменяются от симметричного (при энергии $E_{\text{Ar}} = 300$ МэВ) до сильно асимметричного (при энергии $E_{\text{Ar}} = 214$ МэВ). Таким образом, для энергии возбуждения $E^* \approx 40$ МэВ наиболее вероятным оказывается сильно асимметричное деление с отношением масс $M_{f_1}/M_{f_2} = 2,5$, которое соответствует массе тяжёлого осколка $M_{f_1} = 200 - 210$ (область "С"). Возможным объяснением наблюдаемого эффекта может быть проявление оболочек с $Z = 82$ и $N = 126$ при распаде начальной составной системы на два фрагмента подобно тому, как это имеет место при делении актинидных ядер. Однако, учитывая существенную разницу в динамике процессов формирования осколков в истинном делении и при распаде системы, жидкокапельный барьер деления которой равен нулю, для однозначной интерпретации асимметрии массового распределения продуктов таких реакций необходимы эксперименты по получению сверхтяжёлых ядер с ещё меньшими энергиями возбуждения. С этой точки зрения перспективными могут оказаться реакции с вылетом высокоэнергетических частиц.

Третья глава посвящена исследованию эмиссии быстрых заряженных частиц, образующихся в реакциях с тяжёлыми ионами при энергиях ионов $E_{\text{и}} < 10$ МэВ/нуклон. До постановки настоящих экспериментов было известно, что в реакциях с тяжёлыми ионами образуются α -частицы, спектры которых отличаются от спектров, рассчитываемых по испарительной модели распада составного ядра, и выход быстрых α -частиц уменьшается с увеличением угла вылета. Чувствительность этих экспериментов была относительно невелика ($dG/d\Omega dE \approx 0,01$ мб/МэВ ср). Учитывая все возможности ускорителей, а также более совершенную методику, включающую в себя магнитный анализ с высоким разрешением по импульсу и селективностью для лёгких продуктов реакции, мы поставили эксперименты по измерению энергетических и угловых зависимостей выхода лёгких заряженных частиц от изотопов водорода до бериллия при бомбардировке мишени разными ионами в широком диапазоне энергий.

Для измерения энергетических спектров лёгких заряженных частиц была создана методика, основанная на использовании магнитного спектрометра МСП-144 в комбинации с детектирующей системой, состоящей из $dE/dx \cdot E$ -детекторов /19/. Магнитный спектрометр мог перемещаться относительно направления пучка в диапазоне углов $0^\circ - 150^\circ$ и охватывал интервал углов $\Delta\theta = \pm 2,5^\circ$. На рис. 6 представлены энергетические спектры α -частиц, измеренные для реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ под разными углами. На этом же рисунке пунктирной линией представлен спектр α -частиц, рассчитанный по испарительной модели распада составного ядра. Измеренный под углами $0^\circ - 40^\circ$ и расчетный спектры сильно отличаются в области энергий $E_{\alpha} > 40$ МэВ. Энергетический



спектр экспоненциально спадает вплоть до максимально возможной энергии, которая может быть реализована в двух-тельном процессе E_{α}^{max} (т.н. кинематический предел), когда налетающий ион передаёт почти весь импульс вылетающей частице, а оставшаяся масса поглотится ядром мишени 177 . Из полученных данных следует, что максимальная энергия α -частиц лишь на несколько мегаэлектронвольт ниже максимально возможной энергии, которую может унести ядро ^4He .

Рис.6. Энергетические спектры α -частиц, измеренные под разными углами для реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$. Пунктирной кривой представлены результаты расчётов по испарительной модели.

Установлен ряд закономерностей образования α -частиц вблизи кинематического предела. Оказалось, что сечение образования α -частиц с предельной энергией сильно зависит от комбинации сталкивающихся ядер. Форма энергетического спектра слабо меняется с изменением ядра мишени. Эти экспериментально наблюдаемые закономерности являются весьма принципиальными для понимания механизма образования быстрых заряженных частиц.

Несмотря на то, что интегральные сечения образования α -частиц в реакциях с тяжёлыми ионами велики, с большей вероятностью могут испускаться и другие, более сложные заряженные частицы, а также протоны. Во всех исследованных в настоящей работе реакциях наблюдался вылет, кроме α -частиц, других лёгких заряженных частиц ($^1,2,3\text{H}$, $^3,4,6,8\text{He}$, $^6,7,8\text{Li}$, $^9,10\text{Be}$) со скоростями, в несколько раз превышающими скорость бомбардирующего иона. На рис.7 представлены спектры изотопов He и H для реакции $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$.

Все измеренные энергетические спектры лёгких заряженных частиц под 0° так же, как и в случае α -частиц имеют максимум на несколько МэВ выше выходного кулоновского барьера и экспоненциально спадают в область больших энергий, приближаясь к кинематическому пределу.

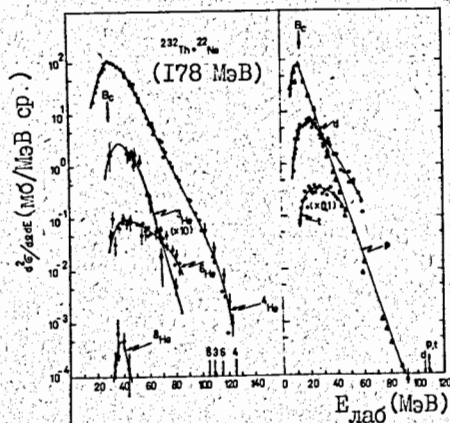


Рис.7. Энергетический спектр изотопов гелия и водорода, образованных в реакции $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$. Стрелками показана максимально возможная для данной реакции энергия частиц.

Измерены угловые распределения быстрых частиц с $Z = 1-4$ для реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$. Для всех случаев с уменьшением угла энергетические спектры становятся более жесткими. Высокая чувствительность настоящих экспериментов позволила измерить сечения, лежащие на семь порядков ниже сечений в максимумах энергетических спектров, и исследовать некоторые их особенности вблизи кинематического предела. В частности, получена зависимость значения разницы между максимальной энергией спектров и кинематическим пределом от угла регистрации, которая существенно увеличивается с ростом угла. Показано, что сечения образования более тяжёлых частиц чем α -частиц (изотопы лития и бериллия) резко падают с увеличением угла. Под углами больше 40° изотопы лития и бериллия, в пределах чувствительности эксперимента ($\sim 10^{-33}$ см²/МэВ ср), не наблюдались. Это свидетельствует о том, что в реакции эти ядра образуются только в прямом процессе.

Таким образом, в реакциях с тяжёлыми ионами, сопровождающихся эмиссией быстрых заряженных частиц с максимально возможными энергиями, могут образовываться остаточные ядра с минимальной энергией возбуждения вплоть до нескольких мегаэлектронвольт. Если имеет место механизм образования "холодного" ядра после вылета высокоэнергетической частицы, ядра с относительно высоким барьером деления будут переходить в основное состояние путём испускания каскада γ -квантов. Эти ядра можно наблюдать в выходном канале реакции.

В настоящей работе измерялись функции возбуждения реакций $^{176}\text{Lu}(^{22}\text{Ne}, \alpha xn)^{194-x}\text{Au}$ для $x = 0, 1, 2, 3$. Изучение функций возбуждения αxn -реакций даёт важную информацию о характеристиках остаточных ядер, а также является одним из методов, устанавливающих двухтель-

ный характер реакций, связанных с вылетом энергичных α -частиц. Выбор данной комбинации иона и мишени объясняется её уникальностью для возможности наблюдения независимого выхода продуктов α -реакций/22/

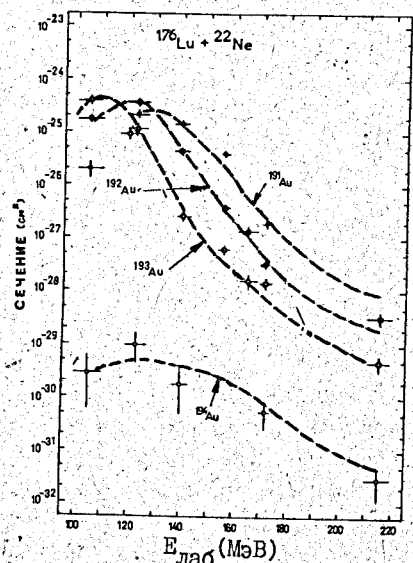


Рис. 8. Функции возбуждения для реакции $^{176}\text{Lu} + ^{22}\text{Ne}$. Пунктирные кривые проведены через экспериментальные точки.

На рис. 8 представлены экспериментальные функции возбуждения для реакции с вылетом α -частицы. Как видно из рисунка с сечением 10^{-30} - 10^{-32} см², в данной реакции образуются ядра ^{194}Au , являющиеся продуктом реакции с вылетом α -частицы.

Был проведён теоретический анализ экспериментальных данных по функциям возбуждения, который показал, что основной вклад в образование энергичной частицы вносит узкий интервал угловых моментов вблизи максимального углового момента.

Для непосредственного определения угловых моментов ядер были проведены эксперименты по измерению множественности γ -квантов в реакциях с вылетом лёгких частиц. С этой целью был создан многокристалльный гамма-спектрометр, состоящий из 12 сцинти-

лляционных NaI(Tl)-детекторов, расположенных вокруг мишени, работающих в совпадении и запускающихся от детектора, регистрирующего лёгкие заряженные частицы/23/. Для выделения конкретного канала реакции и определения вклада в экспериментальную множественность гамма-квантов $\langle M_\gamma \rangle$ других каналов реакции проводились измерения $\langle M_\gamma \rangle$ в совпадении с осколками деления и характеристическим рентгеновским излучением ядра-остатка. Таким образом, в эксперименте одновременно измерялись угол вылета, масса и заряд лёгкой частицы, характеристическое рентгеновское излучение ядра-остатка и множественность гамма-лучей.

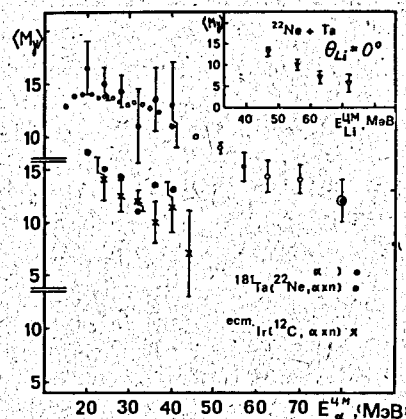


Рис. 9. Зависимость множественности гамма-квантов от энергии α -частиц для реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ (верхний ряд точек) и $\text{Ir} + ^{12}\text{C}$ (нижний ряд точек). В правом верхнем углу представлена зависимость $\langle M_\gamma \rangle$ от энергии ядер лития.

На рис. 9 представлены измеренные таким образом зависимости множественности гамма-квантов $\langle M_\gamma \rangle$ от энергии α -частиц и лития для двух реакций с ионами ^{22}Ne и ^{12}C .

Из экспериментально измеренной величины $\langle M_\gamma \rangle$ определялась величина остаточного углового момента ядра после вылета заряженной частицы (l_γ) /24/. На основе полученного значения l_γ в предположении о локализованной области заселения угловых моментов во входном канале, отвечающей испусканию быстрых частиц, а также о тангенциальном характере их эмиссии с поверхности ядра были определены средние значения входных угловых моментов ($l_{\alpha xn}$) для αxn -канала реакции. Полученные таким образом для реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ значения $l_{\alpha xn}$ лежат вблизи значений критического углового момента для канала полного слияния ($l_{kp} \approx 50 \hbar$). Величины входных угловых моментов для канала эмиссии ядер лития лежат выше, чем $l_{\alpha xn}$ для αxn -канала. Измеренные нами величины $l_{\alpha xn}$ для αxn -канала реакции $\text{Ir} + ^{12}\text{C}$ значительно превышают расчётную величину l_{kp} для этой реакции и лежат вблизи $l_{\alpha xn}$ для реакции $^{181}\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$, αxn .

Был проведён анализ полученных данных по угловым моментам с точки зрения механизма образования высокоэнергетических частиц, из которого следует, что в результате эмиссии быстрых частиц в реакциях с тяжёлыми ионами могут образовываться "холодные" ядра с различными значениями угловых моментов от нескольких десятков до нескольких единиц \hbar , что открывает возможность исследования свойств слабо возбуждённых ядер в широком интервале угловых моментов.

Для тяжёлых ядер одним из основных каналов реакции после вылета α -частицы будет являться деление тяжёлого ядра-остатка.

Проведены эксперименты по исследованию деления тяжёлых ядер в реакциях с вылетом α -частиц. Показано, что для делящихся ядер

большинство α -частиц связано с осколками деления остаточного ядра. Были измерены угловые распределения осколков деления в реакциях $^{197}\text{Au}(^{22}\text{Ne}, f)^{219}\text{Ac}$ и $^{197}\text{Au}(^{22}\text{Ne}, \alpha, f)^{215}\text{Fr}$. В случае деления ядра ^{215}Fr угловая анизотропия оказалась > 15 . Этот факт можно объяснить тем, что процесс деления протекает быстро, и не происходит температурного размытия ориентации углового момента ядра по отношению к направлению оси деления. В этом случае можно ожидать форму углового распределения, близкую к $1/\sin\theta$. Полученные данные по делению в реакциях с вылетом α -частиц подтверждают выводы о быстром механизме их образования и большой вероятности получения "холодного" ядра-остатка после вылета быстрых заряженных частиц.

Был проведён анализ полученных экспериментальных данных на основе нескольких теоретических моделей, использующихся в настоящее время для качественного описания инклюзивных спектров. Были рассмотрены возможности этих моделей для решения наиболее важных вопросов в проблеме эмиссии лёгких заряженных частиц, требующих теоретического ответа: определение количества составляющих энергетического спектра (числа источников эмиссии), относительная интенсивность испускаемых частиц, наиболее вероятная энергия испускания частицы, а также поведение сечения вблизи максимальной энергии вылетающей частицы. Наиболее удовлетворительное качественное описание характеристик спектров (положение максимумов, наклонов, поведение вблизи кинематического предела) были получены при рассмотрении модели развала бомбардирующего ядра с последующим захватом массивного фрагмента. Однако, несмотря на большое число теоретических моделей, пытавшихся интерпретировать процесс эмиссии быстрых частиц в реакциях с тяжёлыми ионами, однозначного описания этого интересного явления не существует до настоящего времени.

Таким образом, как следует из полученных экспериментальных данных, в реакциях с тяжёлыми ионами, сопровождающихся вылетом быстрых заряженных частиц и ядер от изотопов водорода до изотопов бериллия, после вылета преимущественно в переднем направлении быстрых частиц образуются ядра с массой, меньшей суммарной массы ядер иона и мишени на величину массы вылетающей частицы, и с энергией возбуждения и угловым моментом, зависящими от энергии, уносимой частицей, и её массы. Так, реакции, сопровождающиеся вылетом частицы с энергией на кинематическом пределе, приводят к образованию остаточных ядер с нулевой энергией возбуждения. Небольшое отличие граничной энергии энергетического спектра частиц от кинематического предела может определяться угловым моментом остаточного ядра. Этот момент зависит от типа реакции и испускаемой частицы. Так, в случае эмиссии ядер Be граничная энергия их

энергетического спектра при относительно высоких сечениях (10^{-3} мбарн/МэВ.ср) практически достигает кинематического предела и такие реакции могут оказаться выгодными для получения ядер в основном состоянии. Подтверждением этому могут явиться последние данные, полученные в Беркли (США) и Дармштадте (ФРГ), где в реакциях с тяжёлыми мишенями ^{248}Cm и ^{249}Bk были получены новые спонтанно-делящиеся ядра. Полученные результаты находят объяснение в рамках механизма предравновесной эмиссии ядер бериллия и лития.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию возможности синтеза и изучения свойств ядер легчайших элементов, расположенных вблизи границы ядерной стабильности, в частности ядер ^{10}He .

Одним из наиболее эффективных методов получения ядер легчайших элементов, удалённых от линии β -стабильности, являются реакции с тяжёлыми ионами. Особые требования предъявляются к методу синтеза таких ядер в связи с необходимостью их получения с небольшой энергией возбуждения из-за малой энергии связи нуклонов в этих ядрах. Получение ядер легчайших элементов на границе ядерной стабильности является одной из актуальных проблем ядерной физики. В значительной степени это относится к нуклиду ^{10}He , стабильность которого уже более 15 лет исследуется теоретически и экспериментально.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментов по поиску ядер ^{10}He в различных реакциях с тяжёлыми ионами с использованием высокочувствительной установки, регистрирующей образование лёгких частиц до сечения $5 \cdot 10^{-35}$ см²/ср. Как было показано в предыдущей главе, в реакциях с вылетом лёгких заряженных частиц с определённой вероятностью образуются ядра с энергией, лежащей вблизи максимально возможной для данной реакции. В этом случае продукты реакции будут иметь энергию возбуждения несколько мегаэлектронвольт, и в таких реакциях можно пытаться получить слабосвязанные ядра, такие, как ^{10}He . Для выбора оптимальной комбинации мишень-частица нами исследовался выход всех известных изотопов He, образующихся в ядерных взаимодействиях ускоренных ионов ^{10}B , ^{11}B и ^{22}Ne с мишенями из титана, тантала и тория в энергетическом диапазоне от 8 до 10 МэВ/нуклон ^{34/}. Для изучения энергетических спектров и сечений образования этих ядер под углами 0° и 20° по отношению к направлению бомбардирующего пучка ионов использовался магнитный спектрометр, в фокальной плоскости которого располагалась система из 8 полупроводниковых телескопов, каждый из которых состоял из двух ΔE и одного E-детектора. На основе полученных данных по сечению образования изотопов гелия было показано, что сечение образования ^{10}He в реакции $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$ максимально и

должно составлять $5 \cdot 10^{-3}$ мб/ср. Эта реакция и была выбрана для поиска ядер ^{10}Ne . Использование двух ΔE -детекторов и системы измерения времени пролёта продуктов позволяло существенно повысить надёжность идентификации. Для ещё большей чувствительности экспериментов в отдельных облучениях для регистрации частиц использовался диэлектрический детектор на основе пластика CR-39, который позволял регистрировать все частицы, входящие в фокальную плоскость спектрометра, практически с эффективностью 100%. Во время эксперимента было зарегистрировано $1,5 \cdot 10^6$ ядер ^8He и не обнаружено ни одного события, соответствующего ядрам ^{10}Ne . На рис. 10 представлены зависимости выходов

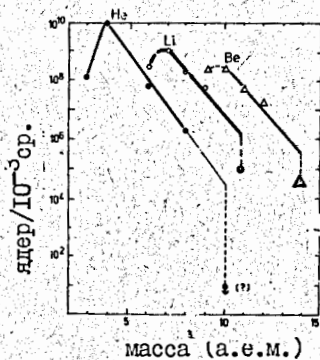


Рис. 10. Выходы изотопов гелия, лития и бериллия в реакции $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$.

изотопов гелия от массового числа для реакции $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$. Определённая таким образом граница сечения образования ядер ^{10}Ne в реакции $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$ сос-

тавляла $5 \cdot 10^{-7}$ мб/ср, что оказалось почти на пять порядков меньше ожидаемого, полученного путём экстраполяции сечений образования лёгких изотопов гелия (см. рис. 10). Этот факт, по-видимому, свидетельствует о нестабильности ядер ^{10}Ne . Однако не исключено, что вследствие слабой нуклонной устойчивости, сечение образования ядер ^{10}Ne сильно подавлено из-за наличия некоторой энергии возбуждения остаточных ядер. На это указывают результаты экспериментов по измерению сечения образования слабосвязанных ядер ^{11}Li и ^{14}Be , которые оказались на порядок ниже ожидаемых сечений (см. рис. 10). Это означает, что предсказание сечений образования слабосвязанных ядер в реакциях с тяжёлыми ионами путём экстраполяции данных по остальным изотопам может быть неоднозначным.

Для прямого ответа на вопрос о стабильности ядер ^{10}Ne является необходимым отбор событий, соответствующих образованию этих ядер в основном состоянии. С этой целью могут быть использованы зарядово-обменные реакции под действием тяжёлых ионов. Реакции перезарядки приводят к образованию конечных продуктов в основном состоянии и могут дать информацию о массе ядра, даже если оно является нестабильным.

Эксперименты в этом направлении начаты в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. С этой целью используется магнитный спектрометр МСП-144, в фокальной плоскости которого расположена позиционно-чувствительная ионизационная камера, позволяющая измерять удельные потери и энергию регистрируемых продуктов. Эксперименты проводятся на пучке радиоактивных ядер ^{14}C , ускоренных на циклотроне У-300 до энергии 11,5 МэВ/нуклон с интенсивностью $\sim 10^{12}$ част/с. В зарядово-обменных реакциях с ядрами ^{14}C образуются продукты со свойствами, удобными для регистрации. Так, в реакции двукратной перезарядки образуются ядра ^{14}O , измерения энергетический спектр которых вблизи энергий, соответствующих основному состоянию изучаемого ядра, можно определить его дефект массы. Первый возбуждённый уровень в ядре ^{14}O составляет около 5 МэВ, поэтому при энергетическом разрешении методики $\sim 1\%$ можно надёжно разделить пики в энергетическом спектре ^{14}O , соответствующие энергетическим уровням этого ядра и основному состоянию исследуемого ядра.

В четвёртой главе представлены результаты первых экспериментов по изучению сечений реакций перезарядки с ускоренными ионами ^{14}C . Измерены спектры ионов ^{14}O в реакциях однократной перезарядки $^{14}\text{C}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{B})^{14}\text{O}$ и двукратной перезарядки $^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^9\text{He})^{14}\text{O}$. Наблюдены уровни, соответствующие первым возбуждённым уровням ^{14}O и основному состоянию ^{14}B . Сечение реакции двойной перезарядки с ядрами ^{14}C оказалось на порядок выше сечения перезарядки на π -мезонах $\nu/\bar{\nu}$. Построена систематика всех данных по сечением реакции двойной перезарядки на тяжёлых ионах в зависимости от Q -реакции. Сделана оценка сечения образования ^{10}Ne в различных реакциях перезарядки. Предлагается постановка эксперимента по измерению дефекта масс ядер ^{10}Ne в реакции $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{10}\text{He})^{14}\text{O}$ с использованием магнитного спектрометра.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Проведены эксперименты по определению барьеров слияния тяжёлых ионов с ядрами в диапазоне кулоновского параметра $200 \leq Z_1 Z_2 \leq 3000$. Получены значения эффективного радиуса взаимодействия для этой области взаимодействующих ядер. Для реакции $^{232}\text{Th} + ^{74}\text{Ge}$ ($Z_1 Z_2 \sim 3000$) наблюдается разница между барьерами взаимодействия и барьером, соответствующим образованию составной системы. Показана перспективность реакций слияния с использованием тяжёлых ионов ^{48}Ca , ^{48}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe для получения составных ядер трансфермиевых элементов с энергией возбуждения ~ 20 МэВ.

2. Проведены эксперименты по изучению упругого рассеяния ионов ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{40}Ar , ^{48}Ti на ядрах ^{208}Pb . Из анализа данных следует, что радиусы взаимодействия этих ядер в пределах точности эксперимента ($\sim 0,02$ ф.м) совпадают.

3. На основе разработанной прецизионной методики определены массы двух коррелированных продуктов ядерных реакций по времени пролёта ($\Delta t \approx 200$ пс) и кинетической энергии ($\Delta E/E \approx 1\%$), измерены массовые и энергетические распределения осколков деления ^{237}Np , ^{238}U , ^{242}Pu , ^{243}Am и ^{249}Cf при облучении их ионами ^4He в диапазоне энергий 24 - 36 МэВ. Наблюдены симметричные и асимметричные компоненты массовых распределений и исследованы их зависимости от массы составного ядра и энергии возбуждения.

4. В реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ исследовано деление составного ядра $^{256}\text{102}$ в широком диапазоне энергий возбуждения. При энергии возбуждения 25 МэВ впервые в реакциях с тяжёлыми ионами наблюдается асимметричное массовое распределение осколков деления, что является следствием проявления оболочечных эффектов в процессе формирования осколков.

5. Измерены энергетические и массовые распределения коррелированных продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ при различных энергиях ионов аргона. При бомбардирующих энергиях $E_{\text{и}} \leq 220$ МэВ наблюдаются асимметричные массовые распределения с повышенным выходом фрагментов в области масс $A = 200 - 210$.

6. Разработана и создана высокочувствительная методика измерения энергетических спектров лёгких заряженных частиц с использованием магнитного спектрометра, позволяющая исследовать процессы, протекающие с сечением до 10^{-6} мб/МэВ ср, в диапазоне углов $0^\circ - 150^\circ$ при различных энергиях бомбардирующих ионов.

С использованием этой методики измерены энергетические спектры ядер $^1, 2, 3, \text{H}$, $^3, 4, 6, 8, \text{He}$, $^6, 7, 8, \text{Li}$, $^9, 10, \text{Be}$, образующихся в реакциях с тяжёлыми ионами. Показано, что во всех изученных реакциях наблюдается вылет быстрых заряженных частиц и ядер с энергиями, близкими к максимально возможными для двухтелной реакции. Проведены эксперименты по прямому наблюдению продуктов реакции, образующихся после вылета высокоэнергетических альфа-частиц. Показана возможность образования "холодных" ядер в этих реакциях. Проведён анализ полученных экспериментальных данных на основе различных моделей.

7. Создана методика по измерению множественности гамма-квантов и проведены эксперименты по определению угловых моментов ядер в реакциях с вылетом быстрых частиц. Получены зависимости угловых моментов остаточных ядер от энергий и масс бомбардирующего ядра и

вылетевшей частицы, исследована связь канала эмиссии быстрых частиц с другими каналами реакции.

8. С помощью высокочувствительной методики, с использованием магнитного анализатора в различных реакциях с ускоренными ионами определены сечения образования изотопов гелия с массой $A = 3, 4, 6, 8$. Показано, что в реакции $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$ выход изотопов гелия максимален. Был проведён эксперимент по синтезу ядер ^{10}He в этой реакции. Получена верхняя граница сечения образования ядер ^{10}He в реакции $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B} \leq 5 \cdot 10^{-7}$ мб/ср, что может свидетельствовать о нестабильности ядер ^{10}He , образующихся в этой реакции.

9. Исследованы зарядовообменные реакции на пучках ускоренных ионов ^{14}C с энергиями 11,5 МэВ/нуклон. Показана возможность определения в этих реакциях дефекта масс сильно нейтронноизбыточных ядер лёгчайших элементов. Получены первые результаты по определению сечения образования ядер ^9He в реакции двойной перезарядки $^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^9\text{He})^{14}\text{O}$. Разработан метод определения стабильности ядер ^{10}He с помощью зарядовообменных реакций.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E., Shamsutdinov A. O. Some features of compound nucleus formation and decay in reactions induced by heavy ions with energies higher than 10 MeV/nucleon. - Acta Physica Polonica, 1975, vol. 6, no. 2, p. 323-332.
2. De Saint-Simon M., Lessard L., Reisdorf W., Remsberg L., Thibault C., Roeschl E., Klapisch R., Kuznetsov I. V., Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E. On-line mass spectrometric measurement of rubidium and cesium isotopic distributions in ^{11}B and ^{22}Ne - induced fission of ^{238}U . - Phys. Rev., 1976, vol. C14, no. 6, p. 2185-2188.
3. Клапиш Р., Кузнецов И. В., Лессар Л., Оганесян Ю. Ц., Пенионжкевич Ю. Э., Рейсдорф В., Ремсберг Л., Роекл Э., де Сен-Симон М., Тибо К., Изучение с помощью масс-спектрометра продуктов реакций слияния с последующим испарением нейтронов - Дубна, 1978 - 19с (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: Р7-И1661).

4. Reisdorf W., De Saint-Simon M., Lessard L., Remsberg L., Thibault C., Roeckl E., Klapisch R., Kuznetsov I.V., Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E. Low neutron multiplicity in the symmetric fission reaction $^{158}\text{Gd}(^{22}\text{Ne}, \text{Rb})\text{Rb}$. - Phys. Lett., 1976, vol. 62B, no. 1, p. 33-36.
5. Флёров Г. Н., Карамян С. А., Ленионжкевич Ю. Э., Третьякова С. П., Шелаев И. А. Некоторые эксперименты по изучению взаимодействия ускоренных ионов ксенона с ядрами. - Дубна, 1972. - 18с (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: P7-6262).
6. Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E. Fission des noyaux et possibilites de synthese de nouveaux isotopes. - Le Journal de Physique, 1970, vol. 31, p. 259-268.
7. Oganessian Yu. Ts., Demin A. G., Iljinov A. S., Tretjakova S. P., Pleve A. A., Penionzhkevich Yu. E., Ivanov M. P., Tretjakov Yu. P. Experiments on the synthesis of neutron deficient Kurchatovium isotopes in reactions induced by ^{50}Ti ions. - Nucl. Phys., 1975, vol. A239, no. *, p. 157-171.
8. Оганесян Ю. Ц., Надкарни Д. М., Нгуен Так Ань, Ленионжкевич Ю. Э., Пустыльник Б. И. Энергетические зависимости сечений реакций деления и передачи нуклонов при взаимодействии ^{232}Th с ускоренными ионами ^{74}Ge . - ЯФ, 1974, т. 19, № 3, стр. 486 - 491.
9. Оганесян Ю. Ц., Ленионжкевич Ю. Э., Гаврилов К. А., Ким Де Еи. Определение порогов реакций при бомбардировке ядер ^{208}Pb и ^{238}U ионами ^{40}Ar и ^{52}Cr . - ЯФ, 1975, т. 21, № 2, стр. 239 - 244.
10. Зодан Х., Оганесян Ю. Ц., Ленионжкевич Ю. Э., Полянский В. И., Брухертзайфер Х. Определение барьера взаимодействия ионов ^{58}Fe с ядрами свинца. - Дубна, 1975, - 12 с (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед. P7-9377).
11. Зодан Х., Калпакчиева Р., Ленионжкевич Ю. Э., Букланов Г. В., Вакатов В. И., Злоказов В. Б., Саламатина Т. С. Корреляционный метод измерения характеристик продуктов ядерных реакций с тяжёлыми ионами. - Дубна, 1977, - 18с (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: P7-9377).
12. Калпакчиева Р. Г., Оганесян Ю. Ц., Ленионжкевич Ю. Э., Полянский В. И., Брухертзайфер Х., Гаврилов К. А., Чой Вал Сек. Экспериментальное изучение реакций деления урана и тория ионами $^{40}, ^{44}, ^{48}\text{Ca}$. - ЯФ, 1977, т. 26, № 2, с. 253-257.
13. Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E. Some regularities of the formation of the products of nuclear reactions induced by heavy ions with $A \geq 40$. - Nukleonika, 1976, vol. 21, no. 3, p. 237-250.
14. Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E., Manko V. I., Poljansky V. N. Elastic scattering of ^{40}Ca and ^{48}Ca by ^{208}Pb nuclei. - Nucl. Phys., 1978, vol. A303, p. 259-264.
15. Вербицкий В. П., Ленионжкевич Ю. Э., Полянский В. И., Теренецкий К. И. Анализ упругого рассеяния ионов ^{40}Ar , $^{40}, ^{48}\text{Ca}$ и ^{48}Ti на ^{208}Pb . - ЯФ, 1980, т. 31, № 5, с. 1134-1138.
16. Оганесян Ю. Ц., Третьяков Ю. П., Ильинов А. С., Дёмин А. Г., Плева А. А., Ленионжкевич Ю. Э., Третьякова С. П., Плётко В. М., Иванов М. П., Данилов Н. А., Короткин Ю. С., Флёров Г. Н. Явление образования изотопа с атомным номером 106. - Государственный реестр открытий СССР, 22 декабря 1977 г., № 194.
17. Borcea C., Gierlik E., Kalpakchieva R., Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E. Alpha-particle energy spectra measured at forward angles in heavy-ion induced reactions. - Nucl. Phys., 1981, vol. A351, p. 312-320.
18. Герлик Э., Калинин А. М., Калпакчиева Р., Оганесян Ю. Ц., Ленионжкевич Ю. Э., Вакатов В. И., Саламатина Т. С. Изучение вылета α -частиц в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$. - ЯФ, 1980, т. 32, вып. 1, с. 45 - 50.
19. Gierlik E., Kalinin A. M., Kalpakchieva R., Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E., Kharitonov Yu. P. Measurements of the maximum-particle energy at forward angles in the reactions $^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$. - Z. Physik, 1980, vol. A295, p. 295-297.
20. Borcea C., Gierlik E., Kalinin A. M., Kalpakchieva R., Oganessian Yu. Ts., Pawlat T., Penionzhkevich Yu. E., Ryklyuk A. V. Emission of high-energy charged particles at 0° in Ne-induced reactions. - Nucl. Phys., 1982, vol. A391, p. 520-532.
21. Borcea C., Gierlik E., Kalpakchieva R., Nguyen Hoai Chau, Oganessian Yu. Ts., Pawlat T., Penionzhkevich Yu. E. Angular and energy dependences of emission probability for light particles in ^{22}Ne -induced reactions at ~ 8 MeV/nucleon. - Nucl. Phys., 1984, vol. A415, p. 169-188.
22. Брухертзайфер Х., Лангрок Э., Музыка Ю. А., Оганесян Ю. Ц., Павлат Т., Ленионжкевич Ю. Э., Пустыльник Б. И., Шиллинг К. Д. Исследование реакций с вылетом α -частиц. - ЯФ, 1981, т. 33, вып. 6, с. 1453-1459.
23. Каманин В. В., Оганесян Ю. Ц., Ленионжкевич Ю. Э., Петров В. Ф., Рюдигер Ю. Множественность гамма-лучей при вылете быстрых α -частиц в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{181}\text{Ta}$. - Дубна, 1981, - 11с (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: 7-81-726).
24. Kamanin V. V., Kugler A., Penionzhkevich Yu. E., Rudiger J. Determination of angular momenta in incomplete fusion channels of the reactions $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$ and $\text{Ir} + ^{12}\text{C}$. - Dubna, 1983. - 11p. (Preprint/JINR: E7-84-130).

25. Дмитриев В.Д., Зодан Х., Калинин А.М., Калпакчиева Р.Г., Лукьянов С.М., Носокин В.И., Пенионжкевич Ю.Э., Саттаров Д.К., Субботин В.Г., Стары Э., Шиллинг К.Д. Время-пролётный спектрометр осколков деления. - Дубна, 1979, 7 с (Сообщение/Объед.ин-та ядер.исслед.: P7-13006).
26. Дмитриев В.Д., Журавлёва И.В., Зодан Х., Калинин А.М., Киселёва Г.Я., Лукьянов С.М., Пенионжкевич Ю.Э., Саттаров Д.К., Шиллинг К.Д. Стартовый детектор на основе микроканальных пластин. В Сборник "Прикладная ядерная спектроскопия", 1981, т.10, с.8-13.
27. Зайдель Х., Зодан Х., Лукьянов С.М., Манфрак П., Пенионжкевич Ю.Э., Стары Э., Шиллинг К.Д. Позиционно-чувствительная ионизационная камера для времяпролётного спектрометра. ПТЭ, 1983, т.4, с. 52-58.
28. Дмитриев В.Д., Зодан Х., Калинин А.М., Лукьянов С.М., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Саламатина Т.С. Массовые распределения осколков деления ядер ^{249}Cf , ^{237}Np и ^{238}U α -частицами. - ЯЭ, 1982, т.35, с. III2-III8.
29. Дмитриев В.Д., Калпакчиева Р.Г., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Букланов Г.З. Изучение некоторых характеристик деления ядер трансурановых элементов α -частицами. - ЯЭ, 1979, т.30, вып.4 (10), с. 915-923.
30. Дмитриев В.Д., Лукьянов С.М., Пенионжкевич Ю.Э., Саттаров Д.К. Микроканальные пластины в экспериментальной ядерной физике.-ПТЭ, 1982, т.2, с.7 - 18.
31. Kalpakchieva R., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Sodan H., Gvozdev B.A. The mass distribution of fission fragments in the reaction $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$. - Phys. Lett., 1977, vol 69B, no. 3, p.287-289.
32. Kalpakchieva R., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Sodan H. Asymmetric mass distribution from the fusion-fission reaction $^{40}\text{Ar} + ^{243}\text{Am}$. - Z.Physik, 1977, vol. A283, p.253-256.
33. Kalpakchieva R., Kartavenko V.C., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Sodan H. Manifestation of shell effects in the interaction of heavy nuclei with ions of $A \geq 40$. - Nukleonika, 1979, vol.24, p. 417 - 424.
34. Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Герлик Э., Калпакчиева Р.Г., Павлат Т., Борча К., Белозёров А.В., Харитонов Ю.П., Третьякова С.П., Субботин В.Г., Лукьянов С.М., Пронин Н.В., Быков А.А. Эксперименты по поиску ядер ^{10}Ne в реакциях с тяжёлыми ионами. - Письма в ЖЭТФ, 1982, т.36, вып.3, с.104-106.

35. Пенионжкевич Ю.Э. Эмиссия высокоэнергетических частиц и поиски ядер ^{10}Ne в реакциях с тяжёлыми ионами. - В: Труды международной школы - семинара по физике тяжёлых ионов, Дубна, 1983, -с.279 - 287 (Препринт/Объед.ин-та ядер.исслед.:Д7-83-644).
36. Ковалов Р.Л., Лукьянов С.М., Маргарян Ю.Л., Пенионжкевич Ю.Э., Гаспарян С.Г., Чубарян Г.Г. Временной детектор с рыхлым диэлектрическим эмиттером. - Дубна, 1983, 7с. (препринт/Объед.ин-та ядер.исслед.: 13-83-188).

Цитированная литература

- /a/ Vaz L.C., Alexander J.M., Satchler. Fusion barriers, empirical and theoretical evidence for dynamic deformation in subbarrier fusion.-Phys.Rept., 1981, vol. 69, no.5, p. 373-399.
- /б/ Moller P. Odd multipole shape distortions and the fission barriers of elements in the region $84 < Z < 120$. - Nucl.Phys., 1972, vol. A192., p. 529- 580.
- /в/ Nann H. Mass measurements with pion double charge exchange. In: Atomic masses and fundamental constants (Ed. J.A. Nalen, Jr., W. Benenson), Plenum Press, New York and London, 1979, vol.6, p. 51 - 59.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 октября 1984 года.