

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-96-127

На правах рукописи
УДК 539.172

Ф-766

ФОМИЧЁВ
Андрей Сергеевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
С ВТОРИЧНЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ПУЧКАМИ
В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 1—60 МэВ/А

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Ю.Э. ПЕНИОНЖКЕВИЧ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

В.В. АВДЕЙЧИКОВ

доктор физико-математических наук,
профессор

Г.М. ТЕР-АКОПЬЯН

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г.Москва


Защита диссертации состоится “_____” _____ 1996 года в
“_____” час. на заседании специализированного совета Д 047.01.05 при
Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна Московской
области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “_____” _____ 1996 года.

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат физико-математических наук:

А.Г. Попеко



Общая характеристика работы

Актуальность темы.

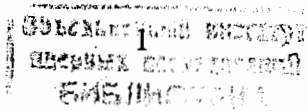
Возможность ускорения радиоактивных ядер (РЯ) позволяет значительно расширить круг исследований в ядерной физике, в частности, открываются новые перспективы в изучении структуры ядерной материи, а также механизмов ядерных реакций. В последние годы одним из интенсивно развивающихся направлением в исследованиях является изучение реакций упругого и неупругого рассеяния различных РЯ, реакций слияния-деления и слияния-испарения нейтронов под действием РЯ.

Ядра, далеко отстоящие от границы ядерной стабильности, обладают необычными свойствами, в частности, у них может проявляться нейтронное или протонное гало, т.е. аномально протяженное распределение нуклонов. Одним из эффективных способов зондирования плотности распределения нуклонов на периферии ядра и апробации теоретических моделей, учитывающих существование гало, является исследование упругого рассеяния этих ядер при энергии несколько десятков МэВ/А на различных мишенях.

Реакции слияния, индуцированные радиоактивными ядрами с энергией вблизи и ниже кулоновского барьера, являются малоизученными и особенно интересными. В этой области энергий сечение слияния определяется в основном вкладом от неупругих каналов и вкладом от реакций передач. Эти каналы реакции очень чувствительны к структуре взаимодействующих ядер. Так например, для реакции $^{11}\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$ предсказывается сильное (на несколько порядков) увеличение сечения слияния при энергии $E_{\text{cm}} < V_{\text{coul}}$ в основном за счет возбуждения мягкой моды дипольного резонанса.

Реакции слияния-деления интересны тем, что хорошо изученные моды деления составных ядер, полученных в разных комбинациях с помощью пучков стабильных и радиоактивных ядер, можно использовать для исследования свойств РЯ.

Проведение подобных экспериментов на радиоактивных пучках осложнено целым рядом обстоятельств: 1) интенсивности пучков



невысоки и как правило находятся в пределах 10^2-10^5 с⁻¹; 2) поперечный размер пучка имеет сечение несколько см²; 3) пучок РЯ содержит примеси различных изотопов на уровне 2-10%. В связи с этим, детектирующие системы должны обеспечивать:

- 1) пособытийное измерение профиля пучка РЯ и образующихся продуктов реакций под их действием для восстановления кинематики взаимодействий;
- 2) высокую разрешающую способность фрагментов по A , Z и E для пособытийной идентификации;
- 3) регистрацию РЯ и продуктов ядерных реакций под их действием в большом телесном угле.

Актуальность данной работы определяется прежде всего тем, что были разработаны и реализованы новые методы регистрации пучков РЯ и продуктов ядерных реакций под их действием, удовлетворяющие всем перечисленным требованиям, а также получены некоторые пучки РЯ с помощью имеющихся ионно-оптических систем на ускорителях ЛЯР У-400 и У-400М и проведены первые эксперименты с этими радиоактивными пучками.

Цель работы:

1. Получение пучков радиоактивных ядер низких (≤ 10 МэВ/А) и средних (≥ 30 МэВ/А) энергий в реакциях с тяжёлыми ионами с использованием имеющихся ионно-оптических систем на ускорителях У-400 и У-400М ЛЯР ОИЯИ.
2. Разработка экспериментальной методики, позволяющей проводить идентификацию ионизирующих излучений (заряженные частицы, γ -кванты и нейтроны) в большом телесном угле с хорошим энергетическим разрешением и высокой эффективностью регистрации.
3. Применение экспериментальной методики для регистрации диспергированных пучков радиоактивных ядер в режиме "меченых атомов" и проведение экспериментов по изучению ядерных реакций под действием экзотических ядер.
4. Исследование свойств радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ в реакциях упругого и неупругого рассеяния на углеродной мишени при энергиях 9 и 40 МэВ/А. Изучение эффекта нейтроной шубы (skin-

эффекта) у ядер ${}^6\text{He}$ в реакциях слияния-деления и слияния-испарения нейтронов при сравнении сечений реакций σ_f , σ_{4n} для систем ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ и ${}^4\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ вблизи и выше кулоновского барьера.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны и созданы сцинтилляционные детекторы с большой площадью регистрации на основе CsI(Tl) $\varnothing 200 \times 15 \text{ мм}^2$ и ФЭУ-173, обладающие высоким энергетическим разрешением и способностью идентифицировать легкие заряженные частицы по форме импульса высвечивания.
2. Впервые предложен высокоэффективный алгоритм энергетической калибровки CsI(Tl) детекторов для широкого диапазона по Z и A с использованием пучков радиоактивных ядер.
3. Показано, что спектрометр на основе нескольких позиционно-чувствительных лавинных счетчиков и CsI(Tl) детектора обеспечивает эффективную пособытийную регистрацию, позволяющую проводить эксперименты с радиоактивными пучками.
4. Установлено, что имеющиеся ионно-оптические системы QDDQ (У-400) и D3Q2D2Q (У-400М) удовлетворяют основным требованиям для получения, транспортировки и очистки некоторых радиоактивных пучков и могут быть использованы для проведения экспериментов с радиоактивными пучками.
4. С использованием разработанных методик впервые были измерены функции возбуждения деления в реакциях ${}^4,6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ вблизи и выше V_c , а также измерено сечение реакции ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, 4n){}^{211}\text{At}$.

Практическая ценность работы:

1. Разработанный метод светосбора может быть применён для других сцинтилляционных детекторов с большой площадью регистрации.
2. Предложенный алгоритм энергетической калибровки может быть распространён на большинство детекторов на основе неорганических сцинтилляторов.
3. Полученные экспериментальные результаты для реакций ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, f)$ и ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, 4n){}^{211}\text{At}$ представляют интерес для апробации теоретических моделей, описывающих структуру нейтроноизбыточных ядер ${}^6\text{He}$.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Создание методики, позволяющей проводить эксперименты с пучками радиоактивных ядер в режиме "меченых атомов". Детектирующая система выдерживает предельную загрузку до 10^5 с^{-1} и может работать с диспергированным потоком частиц. Пространственное разрешение вторичного пучка в X-, Y-плоскостях составляет порядка 1 мм, а энергетическое разрешение - не хуже 3% для частиц с энергией 10 МэВ/А.

2. Разработка и реализация метода светосбора с высоким коэффициентом однородности для CsI(Tl) кристаллов с большой площадью, а также эффективный способ энергетической калибровки сцинтилляционных детекторов с помощью пучка радиоактивных ядер для частиц в широком диапазоне Z и A.

3. Получение пучков радиоактивных ядер из реакций фрагментации, глубокоупругих передач и реакции типа (p,2p) на имеющейся ионно-оптической базе ускорителей ЛЯР У-400 и У400М.

4. Результаты экспериментов по упругому и неупругому рассеянию радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ на углеродной мишени при энергиях 9 МэВ/А и 40 МэВ/А соответственно, полученные в диапазоне углов $\vartheta_{\text{cm}}=2^\circ-30^\circ$. Из анализа данных получена информация о распределении нейтронной и протонной плотностей для этих ядер.

5. Экспериментальные результаты по исследованию сечений реакций слияния-деления и слияния-хп, полученные с использованием радиоактивного пучка ${}^6\text{He}$. В диапазоне энергий $E_{\text{cm}}/V_{\text{coul}} > 1.3$ измерены сечения реакций ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He},f)$ и ${}^{209}\text{Bi}({}^4\text{He},f)$, а также сечения деления в реакциях ${}^{208}\text{Pb}({}^7\text{Li},f)$ и ${}^{206}\text{Pb}({}^7\text{Li},f)$ (для тех же составных ядер ${}^{213,215}\text{At}$). Измерено сечение реакции ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He},4n){}^{211}\text{At}$. Сделан вывод, что канал испускания четырех нейтронов менее чувствителен к проявлению нейтронного избытка у ядер ${}^6\text{He}$ в реакции слияния с ${}^{209}\text{Bi}$, чем канал деления.

Апробация работы:

Материалы, послужившие основой данной диссертации, докладывались на международных конференциях и совещаниях:

1. IX Всесоюзной конференции Состояние и перспективы разработки и применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов (Харьков, 17-19 сентября 1986).

2. Workshop Multidetector Systems in Nuclear Physics (Varna, 16-23 May 1990).

3. International Conf. on New Nucl. Phys. with Advanced Techniques (Ierapetra, Crete, Greece, 1991).

4. Int. Nuclear Physics Conference (Weisbaden, Germany, 26 July - 1 August 1992).

5. Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Дубна, 20-23 апреля 1993).

6. Международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Дубна, Май 1993).

7. Fifth International Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions (Taormina, Italy, 30 May - 4 June 1994).

8. Low Energy Nuclear Dynamics (St.Petersburg, Russia, April 18-22 1995).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 108 страниц машинописного текста, включая в себя 41 рисунок, 18 таблиц и список литературы из 115 наименований.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах.

Содержание работы

Во введении сформулированы основные цели исследования и определен круг решаемых задач.

В первой главе рассмотрены основные способы получения пучков радиоактивных ядер, а именно, с использованием реакций фрагментации и ISOL метода. Приведена информация о крупных ускорительных комплексах, где уже реализованы данные методы или находятся в стадии проекта. Обсуждаются другие возможные способы получения пучков радиоактивных ядер, например, реакции

малонуклонных передач. Рассматриваются перспективы исследований с пучками радиоактивных ядер при энергиях вблизи и выше кулоновского барьера. Обсуждаются различные способы регистрации вторичных частиц для получения полной информации о пространственном и энергетическом распределениях сформированных пучков радиоактивных ядер, применяющиеся при настройке фрагмент-сепараторов и в экспериментах с радиоактивными пучками. Рассмотрены способы идентификации вторичных частиц с использованием полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов. Вторая глава посвящена описанию процессов люминесценции в органических и неорганических сцинтилляторах под действием различных ионизирующих излучений. Подробно проанализированы свойства процесса свечения, лежащие в основе идентификации частиц по форме импульса высвечивания. Обсуждаются преимущества и недостатки фосфич-детекторов, состоящих как правило из композиции двух сцинтилляторов с сильно отличающимися временами высвечивания. Приведены схемы сбора информации для идентификации частиц сцинтилляционным методом. Обсуждается алгоритм энергетической калибровки детектора на основе кристалла CsI(Tl) при помощи пучков радиоактивных ядер. Рассмотрены эффективности регистрации нейтронов и гамма-квантов для некоторых известных сцинтилляторов в зависимости от энергии.

Разработанная конструкция сцинтилляционного детектора на основе кристалла CsI(Tl) ($\varnothing 200 \times 15$ мм²) и фотоумножителя ФЭУ-173 ($\varnothing_{\text{ФК}} = 150$ мм) с эффективной площадью регистрации ~ 300 см² показана на рис.1. Использование диффузного отражения света внутри пустотелого световода позволило достигнуть высокую однородность светосбора в зависимости от места попадания ионизирующих излучений. На рис.1б показаны результаты испытаний различных световодов, полученные при сканировании коллимированным альфа-источником от центра к краю CsI(Tl) детектора. Видно, что при непосредственном соединении кристалла к фотоумножителю амплитуда сигнала ФЭУ резко уменьшается, начиная с $R = 4$ см, что объясняется достаточно большой $\sim 25\%$ неоднородностью фотокатода.

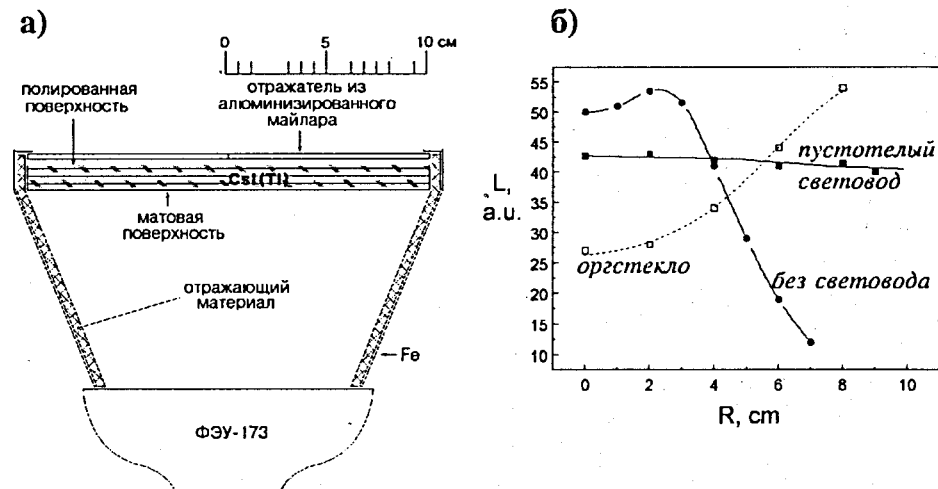


Рис.1. Конструкция детектора на основе кристалла CsI(Tl) (а) и зависимость световыхода детектора (в отн.ед.) от места попадания α частиц для разного типа световодов (б).

Традиционно использующиеся световоды из оргстекла как с диффузным, так и зеркальным отражением света от его боковых сторон дают неоднородность светосбора $\sim 50\%$. Пустотелый световод, принцип действия которого основан на многократном перерасеянии света внутри объема, позволил получить высокую равномерность светосбора со всей площади ($\Delta L/L \leq 6\%$). Энергетическое разрешение детектора, измеренное для коллимированных и изотропнолетающих альфа частиц от ^{238}Pu ($E_{\alpha} = 5.5$ МэВ) источника, соответственно составило 7% и 9%. Уникальная способность этого детектора идентифицировать легкие заряженные частицы и гама-кванты, используя свойства кристалла CsI(Tl) - зависимость формы импульса высвечивания от сорта частиц, видна из рис.2. Суть метода, получившего название анализ формы импульса (АФИ), заключается в интегрировании амплитуды сигнала ФЭУ в двух разных временных интервалах и построении соответствующей двумерной матрицы. На рис.2 по оси абсцисс отложен заряд Q_{slow} , собранный в интервале $T_1 = 0; 0.4$ мкс, а по оси ординат - заряд Q_{tail} , собранный в $T_2 = 1.5; 2.0$ мкс. Здесь первая цифра означает задержку относительно начала

нарастания сигнала, а вторая - длительность интервала интегрирования. Было установлено, что для данного детектора идентификация частиц методом АФИ начинается при энергиях $E > 1$ МэВ/А. Экспериментально также была определена оптимальная концентрация активатора Тl (0.07 - 0.08 % от объема) для кристаллов CsI(Tl), от величины которой сильно зависит как энергетическое разрешение, так и способность разделять частицы методом АФИ.

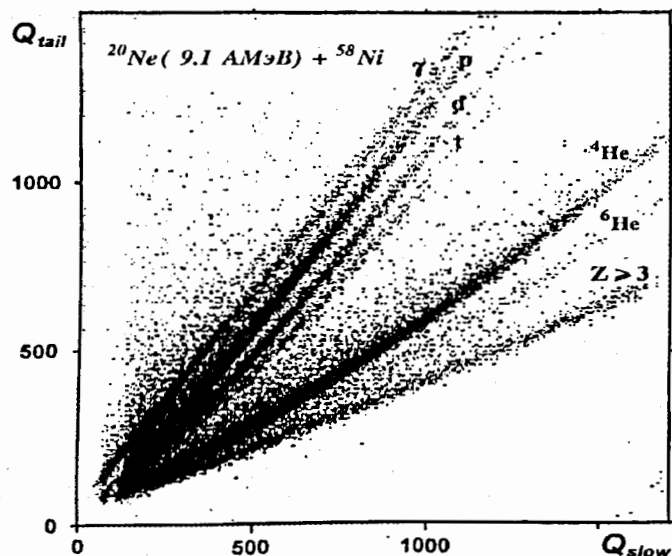


Рис.2. Идентификация легких заряженных частиц и гамма квантов, испущенных в реакции $^{20}\text{Ne} + ^{58}\text{Ni}$ под углом 45° .

Использование пучков РЯ для энергетической калибровки сцинтилляционных детекторов удобно тем, что энергии частиц дискретны и определены магнитным спектрометром (см. рис.3). Поскольку световыход сцинтиллятора есть функция $L(E, A, Z)$, то для частиц с конкретным значением A и Z знание их энергии дает возможность описать аналитическим выражением амплитуду сигналов детектора. Такая калибровка CsI(Tl) детектора с использованием пучков РЯ была сделана для различных изотопов в широком диапазоне частиц ($Z = 2 \div 13$). Энергия частиц точно определялась

выбранным значением магнитной жесткости спектрометра $B\rho$. Используя выражение для световыхода CsI(Tl) детектора :

$$L(E, A, Z) = a_0 + a_1 \left\{ E - a_3 AZ^2 \ln \left[\frac{E + a_2 AZ^2}{a_2 AZ^2} \right] \right\}$$

удалось воспроизвести все калибровочные кривые. Здесь параметры a_0 и a_1 означают пьедестал и наклон кривых, и они зависят только от электроники, в то время как эмпирически полученные параметры a_3 и a_4 определяются свойствами самого сцинтиллятора.

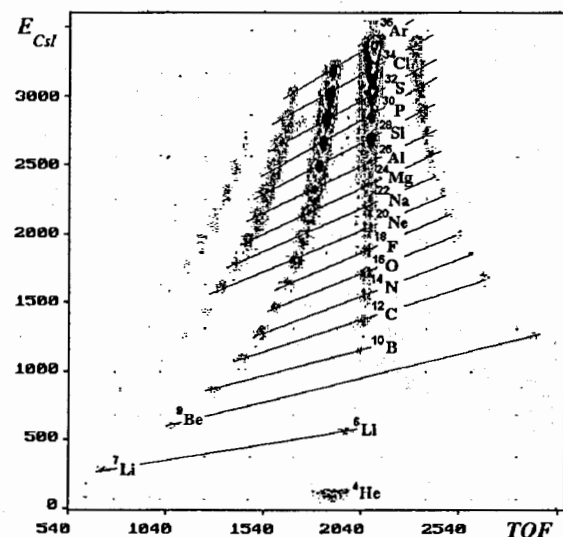


Рис.3. Идентификация продуктов реакции ^{36}Ar (44 МэВ/А) + ^{58}Ni , сформированных как пучок РЯ магнитным спектрометром LISE ($B\rho = 1.78$ Тм).

Разработанная и испытанная конструкция CsI(Tl) детекторов с большой площадью регистрации послужила основой при создании сцинтилляционной оболочки многодетекторной 4π -установки ФОБОС. Эти детекторы использовались также при создании методики "меченных атомов", позволившей проводить эксперименты с пучками радиоактивных ядер. В конце этой главы в качестве примера показаны большие возможности сцинтилляционного метода

регистрации различных ионизирующих излучений. Рассмотрены несколько экспериментов по изучению редких мод распада (четверное деление, мультинейтронные кластеры).

В третьей главе приведены основные характеристики магнитного спектрометра LISE национальной лаборатории GANIL (Франция) и получаемые на нем интенсивности некоторых пучков радиоактивных ядер. Описаны экспериментальные методы получения пучков РЯ на ускорителях У-400 и У-400М ЛЯР ОИЯИ, реализованные на базе имеющихся ионно-оптических систем на каналах вывода стабильных пучков циклотронов. Использование реакции глубоконеупругих передач $^{11}\text{B}(20 \text{ МэВ/А}) + ^{181}\text{Ta}$ для получения пучков РЯ на ускорителе У-400 мотивируется тем, что максимальный выход продуктов этой реакции на выходе спектрометра получается при энергиях вторичных частиц в диапазоне 7-9 МэВ/А. Это обстоятельство нашло свое применение при изучении реакций слияния-деления под действием РЯ ^6He при энергиях вблизи кулоновского барьера.

Таблица 1. Характеристики сепарирующих каналов $D3Q2D2Q$ (У-400М) и $Q2DQ$ (У-400).

Основные характеристики	$D3Q2D2Q$	$Q2DQ$
Номинальная магнитная жесткость $V_p, \text{ Т}\cdot\text{м}$	3.9	1.5
Апертура квадрупольных линз, мм	70	110
Гориз. / вертикальный угловой аксептанс, мрад	$\pm 6 / 8$	$\pm 20 / 20$
Гориз. / верт. поперечный аксептанс, мм·мрад	$\pm 30 / 40$	$\pm 235/157$
Телесный угловой аксептанс, мстер	0.15	1.25
Импульсный аксептанс $\Delta p/p, \%$	± 1.0	± 1.05
Размер пучка на конечной фок. плоскости, мм ²	20x10	30x20

Для магнитного канала на ускорителе У-400М показаны преимущества использования производящей реакции $^7\text{Li}(35 \text{ МэВ/А}) + \text{CH}_2$ по сравнению с реакцией $^{14}\text{N}(40 \text{ МэВ/А}) + ^{181}\text{Ta}$ для получения пучка ^6He . Так например, интенсивность пучка ^6He в реакции срыва протона может превосходить более чем в 100 интенсивность этого пучка, достигаемую с использованием реакции фрагментации.

Установлено, что имеющиеся ионно-оптические системы $QDDQ$ (У-400) и $D3Q2D2Q$ (У-400М) удовлетворяют основным требованиям для получения, очистки и транспортировки пучков РЯ. Характеристики спектрометров приведены в таблице 1.

В этой главе описаны также экспериментальные установки, которые работали в режиме "меченых атомов". Детектирующая система позволяла проводить пособытийную регистрацию частиц при изучении различных реакций под действием пучков радиоактивных ядер. На рис.4 схематично показан принцип работы установки для

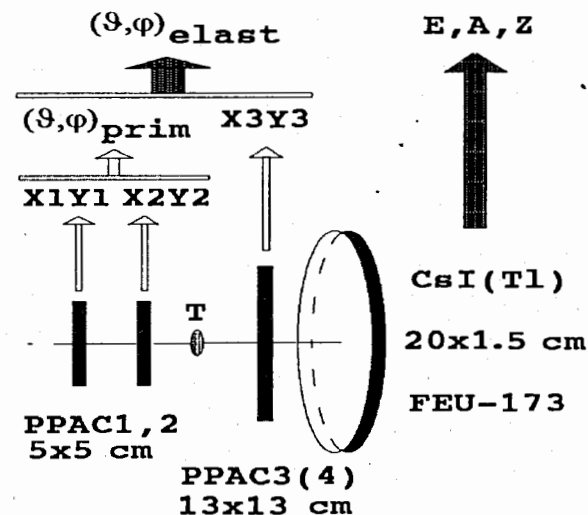


Рис.4. Схема установки, позволяющей проводить измерения в режиме "меченых атомов".

проведения экспериментов по упругому рассеянию радиоактивных ядер ^6He и ^9Li на углеродной мишени. Первые два позиционно-чувствительных лавинных счетчика (ПЧЛС), находящиеся между собой на расстоянии 40 см, использовались для воспроизведения пространственной картины движения частиц до мишени. Это позволяло определить их начальный угол попадания на мишень с точностью 0.5° . Третий лавинный счетчик измерял искомый угол упругого рассеяния частиц в диапазоне углов $\theta_{\text{cm}} \approx 5 \div 42^\circ$ с точностью

$\Delta\theta = \pm 2^\circ$. Идентификация частиц и измерение их энергий с разрешением $\Delta E/E \approx 3\%$ ($E_{\text{ря}} = 9 \text{ МэВ/А}$) осуществлялась CsI(Tl) детектором, находящимся за ПЧЛС3.

В четвертой главе приведены экспериментальные данные по упругому рассеянию радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^9\text{Li}$ на углеродной мишени при энергии 9 МэВ/А , а также данные по квазиупругому рассеянию ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ на ${}^{12}\text{C}$ при энергии 40 МэВ/А , полученные с использованием разработанных методик. Эксперименты по рассеянию ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^9\text{Li}$ проводились на ускорителе У-400 с помощью установки, показанной на рис.4. Для описания рассеяния этих ядер в измеренном диапазоне углов $\theta_{\text{cm}} \approx 5\div 30^\circ$ была выбрана оптическая модель, описывающая литературные данные ${}^6\text{Li}+{}^{12}\text{C}$ и ${}^{9,11}\text{Li}+{}^{12}\text{C}$. Было установлено, что для выявления особенностей в сечении упругого рассеяния ${}^6\text{He}$ по отношению к ${}^6\text{Li}$ необходимо существенно расширить диапазон измеряемых углов. При анализе рассеяния ядер ${}^9\text{Li}$ обнаружена неоднозначность в выборе параметров оптического потенциала, так как данные можно описать потенциалами из различных семейств. Эксперименты по квазиупругому рассеянию ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ на углеродной мишени проводились на спектрометре LISE (GANIL). Сечения упругого рассеяния этих ядер были измерены в диапазоне углов $\theta_{\text{cm}} \approx 2\div 18^\circ$ с высокой точностью $\Delta\theta \leq \pm 0.5^\circ$. Это достигалось за счет более точного определения начального угла попадания РЯ на мишень (расстояние между ПЧЛС1 и ПЧЛС2 было 110 см), а также за счет использования системы стриповых полупроводниковых детекторов вместо ПЧЛС3 (см. рис.4). Из анализа полученных данных было высказано предположение о существовании протонного гало у ядер ${}^8\text{B}$.

Большая часть этой главы посвящена исследованиям по выявлению особенностей процессов деления в реакциях ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, f)$, ${}^{209}\text{Bi}({}^4\text{He}, f)$ по сравнению с реакциями ${}^{208}\text{Pb}({}^7\text{Li}, f)$, ${}^{206}\text{Pb}({}^7\text{Li}, f)$, в которых образуются одни и те же составные ядра ${}^{215}\text{At}$ и ${}^{213}\text{At}$. Кроме того, было измерено сечение реакции ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, 4n){}^{211}\text{At}$. Функции возбуждения деления для реакций ${}^{209}\text{Bi}({}^{4,6}\text{He}, f)$ измерялись в диапазоне энергий $E_{\text{cm}}/B_{\text{coul}} = 1.3\div 1.5$. Экспериментальная процедура

заключалась в следующем. Многослойная стопка, состоящая из мишеней ${}^{209}\text{Bi}(\sim 1 \text{ мг/см}^2)$, трековых детекторов осколков деления (полиэтилен-терефталат) и поглотителей энергии (Al фольги толщиной от 60 до 200 мкм), устанавливалась между двумя ΔE - E Si(Li) детекторами и облучалась очищенным пучком ${}^6\text{He}$. Полупроводниковые детекторы обеспечивали мониторингирование радиоактивного пучка, а также дополнительное понижение энергии пучка за счет выбора толщины ΔE детектора (300 мкм при облучении на ускорителе У-400 и 4125 мкм - на У-400М). После длительного облучения (20 часов и более) пластиковые детекторы извлекались, обрабатывались в растворе NaOH и рассматривались под микроскопом для идентификации осколков деления, а висмутовые мишени анализировались на спектрометре редких событий с целью обнаружения наведенной альфа-активности ${}^{211}\text{Po}$ (как результат испарения 4-х нейтронов из составного ядра и последующего К-захвата). Таким образом, в одном облучении одновременно измерялись функция возбуждения деления и сечения испускания четырех нейтронов в диапазоне энергий $20 < E_{\text{cm}} < 100 \text{ МэВ}$. Отличие экспериментальной процедуры при измерении функций возбуждения деления в реакциях ${}^{206,208}\text{Pb}({}^7\text{Li}, f)$ заключалось лишь в том, что мониторингирование пучка осуществлялось традиционным способом по рассеянию пучка ${}^7\text{Li}$ на тонкой золотой фольге, а в качестве трековых детекторов осколков деления применялся лафсан, выдерживающий интегральный поток частиц до 10^{13} .

Было установлено (см. рис.5), что в изучаемом диапазоне энергий сечение деления $\sigma_f(E)$ в реакции ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, f)$ в 3-4 раза превышает литературные данные $\sigma_f(E)$ в реакции ${}^4\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$, в то время как функции возбуждения деления, полученные для составных ядер ${}^{215}\text{At}$ и ${}^{213}\text{At}$ в реакциях ${}^{206,208}\text{Pb}({}^7\text{Li}, f)$, совпали в пределах экспериментальных ошибок. Измеренное сечение $\sigma_{4n} = 925 \pm 323 \text{ мб}$ для реакции ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ совпало по абсолютной величине в пределах ошибок с литературными данными для ${}^{209}\text{Bi}({}^4\text{He}, 4n){}^{211}\text{At}$ реакций. На основании анализа полученных данных было высказано предположение о возможном существовании деформации

(статической или динамической) у ядер ${}^6\text{He}$, проявление которой наиболее ощутимо в канале деления.

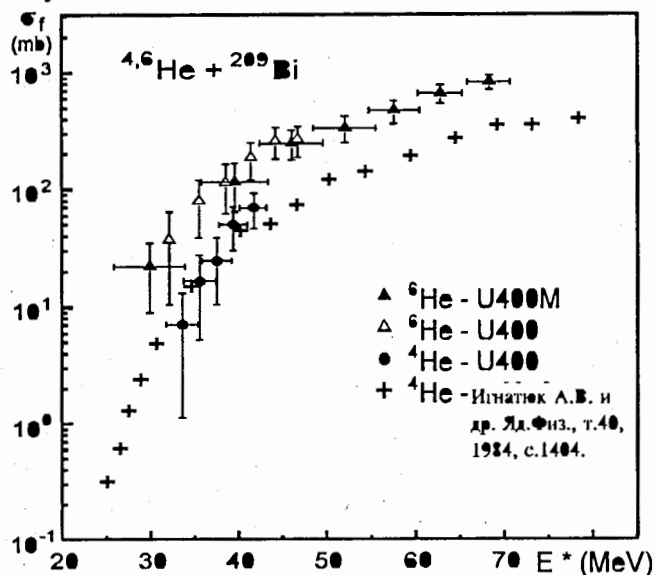


Рис.5. Экспериментально измеренные функции возбуждения деления в реакциях ${}^4,6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$.

В заключении представлены основные результаты, полученные в данной диссертационной работе.

Основные результаты диссертации

1. Впервые разработаны и созданы сцинтилляционные детекторы на основе CsI(Tl) с большой площадью регистрации, позволяющие регистрировать легкие заряженные частицы с энергией 1-65 МэВ/А и гамма-кванты с $E_\gamma < 8$ МэВ с высоким энергетическим разрешением ($\Delta E/E_{22+60\text{МэВ/А}} \approx 2.1 \pm 0.7\%$).
2. Предложен высокоэффективный алгоритм энергетической калибровки сцинтилляционного детектора с использованием пучков радиоактивных ядер. Оптимизация метода идентификации заряженных частиц по форме импульса высвечивания позволила расширить

диапазон регистрируемых частиц этим методом до $Z=7$ включительно (при фиксировании энергии частиц магнитным спектрометром).

3. На базе трех позиционно-чувствительных лавинных счетчиков и CsI(Tl) детектора разработан спектрометр, предназначенный для пособытийной регистрации пучков радиоактивных ядер, а также продуктов ядерных реакций под их действием.

4. Показано, что каналы вывода для стабильных пучков циклотронов У-400 и У-400М можно использовать для получения некоторых пучков радиоактивных ядер. В частности, для получения пучка ионов ${}^6\text{He}$ были исследованы различные реакции и установлено, что для достижения высокой интенсивности целесообразно использовать первичный пучок ионов лития при облучении водородосодержащей мишени.

5. С использованием разработанных методик и созданного спектрометра начаты исследования ядерных реакций под действием радиоактивных пучков. В частности, были исследованы реакции упругого рассеяния ионов ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ и ${}^8\text{B}$ на углеродной мишени. Благодаря полученной достаточно высокой интенсивности пучка ионов ${}^6\text{He}$ ($\geq 10^4 \text{ c}^{-1}$) впервые были измерены функции возбуждения деления в реакции ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, f)$, а также проведено экспериментальное исследование канала испускания четырех нейтронов $\sigma_{4n}(E)$ в реакции ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ с одновременной регистрацией осколков деления.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Каманин В.В., Куглер А., Соболев Ю.Г., Сртижов В.Ф., Фомичев А.С. Сравнительный анализ характеристик кристаллов NaI(Tl) и BGO для регистрации нейтронов и γ -квантов // ПТЭ, №6, 1988, с.61-64.
- [2] Фомичев А.С., Ортелеп Х.-Г., Пеннонжквич Ю.Э., Хербх К., Давид И., Вагнер В., Пауш Г., Зодан Х., Витенко В.А. Основные характеристики сцинтилляционных фосфич-детекторов 4п установки ФОБОС // Сообщение ОИЯИ P15-92-50, Дубна, 1992.

- [3] Wagner W., Fomichev A.S., Ortlepp H.-G., Hergbach C.-M., Matthies A., Pausch G., Strekalowskij O.V., Milovidov M.A., Vitenko V.A. *A large area CsI(Tl) detector for the scintillator shell of FOBOS* // JINR Rapid Com. 4[61]-93, Dubna, 1993, p.49-53.
- [4] Fomichev A.S., David I., Lukyanov S.M., Penionzhkevich Yu.E., Skobelev N.K., Tarasov O.B., Matthies A., Ortlepp H.-G., Wagner W., Lewitowicz M., Saint-Laurent M.G., Corre J.M., Dlouhy Z., Pecina I., Borcea C. *The response of a large CsI(Tl) detector to light particles and heavy ions in the intermediate energy range* // Nucl. Instr. and Meth. A., 1994, vol. 344, p.378-383.
- [5] Fomichev A.S., David I., Lukyanov S.M., Penionzhkevich Yu.E., Skobelev N.K., Tarasov O.B. *Effects of Pulse Time Gate on CsI(Tl) Light Output* // Nucl. Instr. and Meth. A., 1994, vol. 350, p.605-607.
- [6] Fomichev A.S., David I., Lukyanov S.M., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Skobelev N.K., Tarantin N.I., Tarasov O.B. *Characteristics of the radioactive ${}^6\text{He}$ -beam produced at the cyclotron U-400M using the proton pick-up reaction ${}^7\text{Li}(35 \text{ AMeV})$ on ${}^{12}\text{C}$ and $(\text{CH}_2)_n$* // Proceedings of the FOBOS Workshop 1994, Cracow, Poland June 28-30, 1994 Ed. by W. Wagner. FZR-65, p.140-142.
- [7] Fomichev A.S., David I., Kharitonov Yu.P., Lukyanov S.M., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Perelygin V.P., Skobelev N.K., Tarasov O.B., Wolski R. *Experimental Study of Fission and Evaporation Cross Sections For ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ reaction* // JINR Rapid Com. № 4[67]-94, Dubna, 1994, p.21-27.
- [8] Fomichev A.S., David I., Dlouhy Z., Lukyanov S.M., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Perelygin V.P., Skobelev N.K., Tarasov O.B., Wolski R. *Fission of ${}^{209}\text{Bi}$ Induced by ${}^6\text{He}$ Ions* // Z. Phys. A., 1995, vol. 351, p.129-130.
- [9] Penionzhkevich Yu.E., Cherapanov E.A., David I., Fomichev A.S., Kalpakchieva R., Lukyanov S.M., Oganessian Yu.Ts., Skobelev N.K., Tarasov O.B., Wolski R., Dlouhy Z. *Investigation of the Elastic Scattering and Fission Reactions Induced by ${}^6\text{He}$ Beam* // Nucl. Phys. A., 1995, vol. 583, p.791-794.

- [10] Pecina I., Anne R., Bazin D., Borcea C., Borrel V., Carstoiu F., Corre J.M., Dlouhy Z., Fomichev A., Guillemaund-Mueller D., Keller H., Kordyasz A., Lewitowicz M., Lukyanov S., Mueller A.C., Penionzhkevich Yu., Roussel-Chomaz P., Saint-Laurent M.G., Skobelev N., Sorlin O., Tarasov O. *Quasielastic scattering of ${}^8\text{B}$ and ${}^7\text{Be}$ on ${}^{12}\text{C}$ at 40 MeV/A* // Phys. Rev. C, 1995, vol. 52, p.191-198.
- [11] Lukyanov S.M., David I., Fomichev A.S., Heidel K., Matthies A., Penionzhkevich Yu.E., Skobelev N.K., Tarasov O.B. *A setup for the study of secondary beam induced reaction* // Scientific report FLNR JINR 1993-94, Dubna, 1995, p.184.
- [12] Fomichev A.S., David I., Ivanov M.P., Kuznetsov I.V., Kushniruk V.F., Lukyanov S.M., Mikhailov L.V., Sobolev Yu.G. *A note on the application of CsI(Tl)-counter to light charged particle detection in the spontaneous fission of ${}^{252}\text{Cf}$* // Nucl. Instr. and Meth. A., 1996, vol. 368, p.852-854.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 апреля 1996 года.