

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.1.074

И - 204

15-84-764

ИВАНОВ

Михаил Петрович

РАЗРАБОТКА

**И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
РЕДКИХ СОБЫТИЙ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук Г.М. ТЕР-АКОПЬАН

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор К.А. ПЕТРЖАК
кандидат физико-математических наук,
ст.научный сотрудник В.И. ЛЕБЕДЕВ

Ведущая организация:
Институт ядерных исследований АН СССР, Москва.

Защита состоится " " _____ 1985 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 " " _____ 1985 года.

Ученый секретарь специализированного совета Ю.В. ТАРАН

Актуальность темы. Вопросы стабильности наиболее тяжелых химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева являются предметом глубокого изучения на протяжении последних десятилетий. Наибольший прогресс в этом направлении был достигнут в 60 – 70 годы, когда появились данные о свойствах спонтанного деления целого ряда нуклидов тяжелее фермия и были разработаны теоретические методы для оценки барьеров деления ядер. На основании этих данных было предсказано возможное существование долгоживущих атомных ядер, находящихся вблизи магических чисел протонов $Z = 114$ и нейтронов $N = 184$.

Решение проблемы существования сверхтяжелых ядер и выяснение вопроса о пределе устойчивости элементов имеют важное значение для различных разделов науки и, в первую очередь, для ядерной физики.

Продвижение в область тяжелых ядер осуществляется с помощью ускорителей тяжелых ионов путем последовательного синтеза все более тяжелых элементов, попыток синтеза сверхтяжелых ядер, а также при поиске сверхтяжелых элементов (СТЭ) в природе.

Характерной особенностью трансфермиевых нуклидов наряду с коротким временем жизни является все возрастающая роль спонтанного деления. Эта особенность элементов с $Z > 100$ широко использовалась для их обнаружения при синтезе в реакциях с тяжелыми ионами. Элементы с $Z = 104-107$ были впервые зарегистрированы по осколкам спонтанного деления самих тяжелых нуклидов либо их дочерних продуктов.

Новый природный спонтанно делящийся нуклид, обнаруженный в некоторых метеоритах и гидротермах, также был зарегистрирован по мгновенным нейтронам, испускаемым при спонтанном делении.

Спонтанное деление является не менее информативным процессом, чем другие виды распада, однако до настоящего времени его характеристики практически не использовались для идентификации ядер при синтезе и поиске в природе. Это связано с тем, что в экспериментах такого рода речь идет о регистрации чрезвычайно редких событий, что требует использования высокоэффективной аппаратуры. Поэтому приобрела актуальность задача совмещения высокой эффективности регистрации с прецизионным измерением характеристик спонтанного деления.

Цель работы заключалась в совершенствовании имеющихся и разработке новых методов детектирования редких событий спонтанного деления, применении этих методов в исследованиях спонтанного деления ядер в природных объектах и ядер, синтезируемых на пучках тяжелых ионов.

Объединенный институт
ядерных исследований
ОИЯИ

Научная новизна и практическая ценность. Существенно расширены экспериментальные возможности исследования спонтанного деления ядер при поисках природных сверхтяжелых элементов. Фон нейтронного детектора снижен в пять раз, достигнута чувствительность регистрации сверхтяжелых элементов 10^{-13} г/г (при периоде полураспада СТЭ 10^9 лет). Таким образом, стали доступными массовые измерения активности спонтанного деления природных образцов и продуктов их химической переработки, что существенно для поисков СТЭ и других практических применений.

Впервые выполнены измерения активности спонтанного деления в более чем 60 геологических образцах и получены данные о пределе содержания СТЭ $< 10^{-13}$ г/г.

Предложенные техническое решение конструкции двойной ионизационной камеры с площадью источника 2700 см^2 и способ обработки информации позволяют производить идентификацию СТЭ при наличии фона от спонтанного деления урана и трансурановых элементов.

Впервые проведены многопараметровые измерения характеристик спонтанного деления ^{238}U и получены данные о полной кинетической энергии и масс-асимметрии осколков деления.

Впервые на пучке тяжелых ионов разработана и применена методика для коррелированного измерения энергий осколков спонтанного деления короткоживущих ядер и измерены средняя полная кинетическая энергия и масс-асимметрия осколков спонтанного деления ^{244}Fm ($T_{1/2} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$), а также ^{246}Fm ($T_{1/2} = 1,1 \text{ с}$).

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Разработаны и осуществлены методы снижения уровня фона детектора множественной эмиссии нейтронов, основанные на применении многослойной пассивной защиты, включающей бетон и полиэтилен, и активной защиты, основанной на регистрации вторичных нейтронов от космических лучей.

2. Проведен поиск сверхтяжелых элементов в 63 геологических пробах и образцах гидротерм Солтон Си и Атлантис II. Получены пределы содержания сверхтяжелых элементов в геологических пробах $(2 + 5) \cdot 10^{-13}$ г/г и в гидротермах $3 \cdot 10^{-12}$ г/г.

3. Разработана двойная ионизационная камера для измерения кинетической энергии осколков спонтанного деления при площади образца 2700 см^2 , позволяющая определять угол вылета осколков деления с точностью $5^\circ - 3^\circ$ и измерять суммарную кинетическую энергию осколков деления с точностью около 2%.

4. Исследованы характеристики спонтанного деления ^{238}U : средняя полная кинетическая энергия осколков деления составила

168,8 МэВ при среднеквадратичной ширине распределения $G_E = 10,5 \text{ МэВ}$, средние массы тяжелых и легких осколков равны соответственно 140,0 и 98,0 а.е.м. при $G_M = 6,07 \text{ а.е.м.}$

5. Разработана экспериментальная методика для изучения характеристик спонтанного деления короткоживущих ядер, синтезируемых на пучках тяжелых ионов, позволяющая проводить измерения полной кинетической энергии осколков при поперечных сечениях реакций образования $\geq 10^{-33} \text{ см}^2$ и периоде полураспада $T_{1/2} \geq 0,1 \text{ мс}$. Измерены характеристики спонтанного деления ядер ^{244}Fm ($\bar{E}_{\text{tot}} = 196,0 \text{ МэВ}$) и ^{246}Fm ($\bar{E}_{\text{tot}} = 198,7 \text{ МэВ}$).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 140 страниц машинописного текста (включая рисунки), 9 таблиц, 33 рисунка и список литературы из 141 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поставленной задачи, сформулирована цель работы, отмечены новые полученные результаты, изложены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе рассмотрены вопросы, существенные для постановки задачи регистрации редких событий спонтанного деления. Изложено современное состояние проблемы стабильности тяжелых химических элементов, центральное место в которой занимает вопрос о существовании сверхтяжелых элементов. Обсуждаются результаты экспериментальных работ, посвященных синтезу тяжелых и сверхтяжелых элементов и рассмотрены методы синтеза и идентификации тяжелых ядер. Приведены современные представления о механизме ядерных реакций с тяжелыми ионами, ведущих к синтезу тяжелых делящихся ядер. Из рассмотрения данных о ядерных реакциях следует вывод о малой вероятности образования в реакциях с тяжелыми ионами атомных ядер с $Z > 100$ (поперечные сечения реакций $< 10^{-30} \text{ см}^2$). Рассмотрены эксперименты по поискам в природе сверхтяжелых элементов. Основное внимание уделено поискам СТЭ в земной коре и метеоритах. Рассматриваются данные о наблюдении нового спонтанно делящегося нуклида в некоторых метеоритах* и в гидротермах полуострова Челекен**/. Эти данные приводят к представлению об очень низкой концентрации искомого СТЭ. Для образцов метеоритов она состав-

*/ Флеров Г.Н. и др. ЯФ, 1977, т.26, №3, с.449-456.
**/ Flerov G.N. et al. Z.Phys., 1979, v.A292, n.I, p.43-48.

лет $\leq 10^{-14}$ г/г, для гидротерм полуострова Челекен $\leq 5 \cdot 10^{-16}$ г/г (при оценке концентрации СТЭ обычно предполагают, что его период полураспада равен 10^9 лет).

В дальнейших экспериментах по поискам СТЭ требуется изучение большого количества земных образцов при чувствительности аппаратуры около 10^{-13} г/г. В связи с этим возникает задача усовершенствования методики детектирования спонтанного деления ядер по множественной эмиссии нейтронов с целью проведения массовых анализов образцов. Для этого необходимо исследовать фон нейтронов, связанный с взаимодействием космических лучей с защитой детектора и разработать методику контроля фона, связанного с загрязнениями образцов техногенными спонтанно делящимися нуклидами. Для экспериментов по поискам СТЭ в природе и по синтезу трансформивых и сверхтяжелых элементов на ускорителях требуется разработка высокоэффективных методов изучения характеристик спонтанного деления ядер.

Во второй главе изложены результаты изучения фоновых характеристик нейтронного детектора, предназначенного для поиска редких событий спонтанного деления в земных образцах /1/.

Схема нейтронного детектора с защитой изображена на рис.1. Нейтронный детектор представлял собой блок из оргстекла с полостью для помещения образцов и 56 ^3He пропорциональных счетчиков, которые располагались в четырех рядах вокруг чувствительного объема с иссле-

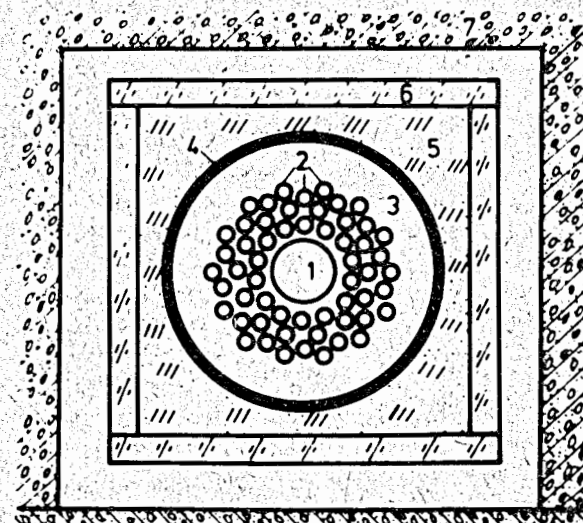


Рис.1. Схема нейтронного детектора с защитой: 1-чувствительный объем, 2- ^3He счетчики, 3-корпус детектора, 4-кадмий, 5-полиэтилен, 6-пластические сцинтилляторы, 7-бетон.

дуемым образцом. При делении ядер испускается, как правило, более одного нейтрона. Регистрация нейтронным детектором в течение определенного промежутка времени (100 - 200 мкс) двух или более нейтронов рассматривается как факт детектирования события спонтанного деления. Для защиты детектора от адронной компоненты космических лучей использовался бетонный слой толщиной 7м (15м водного эквивалента). Жесткая заряженная компонента космических лучей (мюоны) блокировалась с помощью системы антисовпадений на пластических сцинтилляторах. Такая защита позволяла уменьшить фон событий с кратностью ≥ 2 до 5 событий в день, что обеспечивало регистрацию спонтанного деления в образцах при концентрации около $5 \cdot 10^{-13}$ г/г. На рис.2 приведены результаты измерений фона одиночных нейтронов при различных условиях защиты

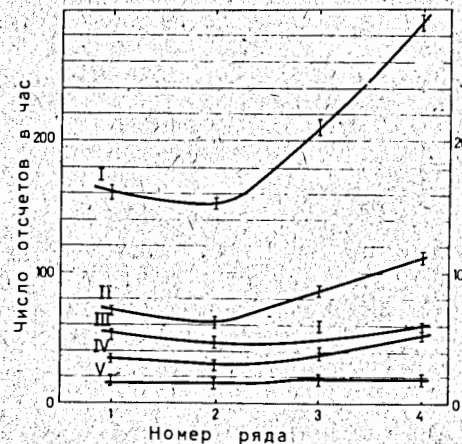


Рис.2. Фон одиночных импульсов при различных условиях защиты детектора: I-фон без сцинтилляторов и полиэтилена, II-фон с установленными сцинтилляторами, III-фон с установленными сцинтилляторами и полиэтиленом, IV-фон с блокировкой от сцинтилляционных счетчиков без полиэтилена, V-фон с полной защитой.

I и 2 ряда (ближайшие к образцу) срабатывают чаще счетчиков 3 и 4 ряда. Это различие очевидно из рис.3, на котором приведена скорость счета нейтронов по рядам счетчиков при помещении в чувствительный

детектора. Виден вклад нейтронов, генерируемых космическими лучами в стенах низкофоновой лаборатории. Фон вторичных нейтронов удалось устранить практически полностью путем использования дополнительной защиты из полиэтилена, помещенного в промежуток между корпусом детектора и сцинтилляционными блоками. Фоновые события множественной регистрации нейтронов распределялись по рядам счетчиков равномерно, то есть, например, совпадения импульсов от счетчиков, находящихся в I и 2 рядах, наблюдались с такой же частотой, как и для счетчиков в 3 и 4 рядах. Однако при регистрации кратных нейтронных событий от актов спонтанного деления в образце, помещаемом в чувствительный объем детектора, счетчики

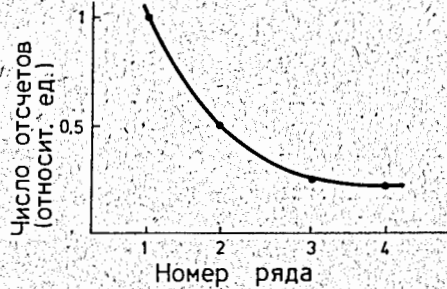


Рис. 3. Распределение скорости счета по рядам счетчиков при помещении в центр детектора источника нейтронов ^{252}Cf .

нейтронных событий, связанных с взаимодействиями космических мюонов, с утечками высокого напряжения, подаваемого на счетчики, а также с внешними электромагнитными помехами. Использование этого способа позволило снизить фон кратных событий нейтронного детектора в среднем более чем в два раза.

В целом, благодаря применению многослойной защиты, включающей бетонные блоки, систему антисовпадений и дополнительную полиэтиленовую защиту, а также благодаря учету пространственного распределения импульсов от счетчиков, удалось снизить фон до одного события множественной эмиссии нейтронов в день. При таком фоне чувствительность детектора при поиске сверхтяжелых элементов в образцах составила около 10^{-13} г/г.

При поисках сверхтяжелых элементов помимо фона, вызванного космическими мюонами и спонтанным делением ^{238}U , необходимо учитывать возможный фон спонтанного деления техногенных трансурановых элементов, находящихся в образцах в виде загрязнений. Эти нуклиды — продукты ядерных испытаний, а также мишенные материалы, использовавшиеся в лаборатории для синтеза тяжелых элементов, представляют собой смесь изотопов, для которой отношение вероятностей альфа-распада и спонтанного деления составляет не ниже $2 \cdot 10^5$. Для контроля содержания таких загрязнений в исследовавшихся образцах была создана ионизационная камера с цилиндрическими электродами и площадью источника cm^2 . В качестве прототипа была взята ионизационная камера, описанная в работе: Якунин М.И. в сб.: Прикл. ядер. спектроскопия. Вып. 5. — М: Атомиздат, 1975, с. 117–129.

объем источника ^{252}Cf . Использование этих различий позволило уменьшить фон детектора. Для этого при регистрации кратных совпадений отбирались события, в которых наблюдались импульсы от счетчиков 1 или 2 ряда. В этих событиях могли также наблюдаться импульсы от счетчиков 3 и 4 рядов. В то же время отбрасывались все события, в которых наблюдались совпадающие импульсы, поступившие только от счетчиков 3 и 4 рядов. Этот способ позволил уменьшить фон кратных

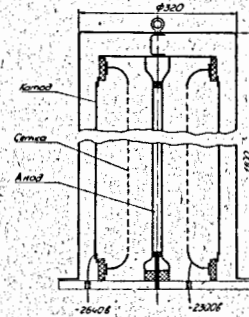


Рис. 4. Схема ионизационной камеры.

4500 cm^2 (рис. 4) /2/. Энергетическое разрешение камер составляло 55 кэВ. На рис. 5 показан спектр альфа-излучения препарата, выделенного из гидротерм Челекена.

Разработанные методики были использованы в экспериментах по поискам сверхтяжелых элементов в природных образцах /3/. При выборе объектов для поиска сверхтяжелых элементов учитывались результаты предсказаний химических и физических свойств новых элементов. На первом этапе исследований было изучено несколько десятков образцов, представляющих некоторые породы и руды, в том числе моно- и полиминеральные образования.

Выбор геологических объектов производился по принципу наибольшей глубины происхождения (кимберлиты, хромиты, анортозиты, железистые кварциты, синныриты и др.), а также наибольших концентраций таких элементов, которые могли являться геохимическими аналогами соответствующих сверхтяжелых элементов. Всего измерено 63 образца геологических проб и продуктов переработки руд. Были изучены две пробы осадков, полученных путем бурения со дна Красного моря в районе впадины Атлантис II и продуктов переработки рудоносных гидротерм Солтон Си (Калифорния, США) /4/. В измерениях учитывался фон спонтанного деления урана и взаимодействия космического излучения с материалом образца. Эти эксперименты позволили

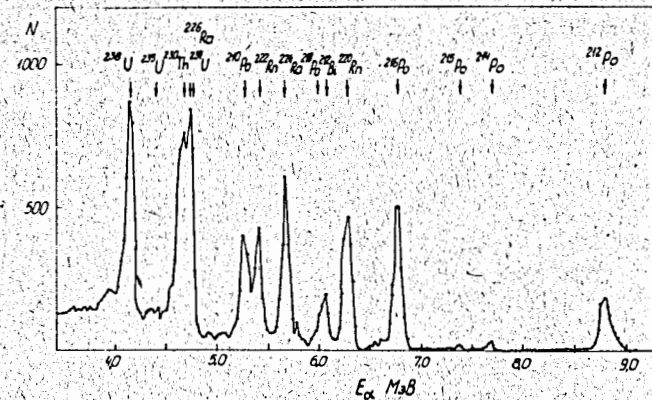


Рис. 5. Спектр альфа-излучения образца гидротерм Челекена.

оценить предельную концентрацию сверхтяжелых элементов в изученных геологических образцах $(2 + 5)10^{-13}$ г/г и для образцов Солтон Си и Атлантис II $3 \cdot 10^{-12}$ г/г. С использованием цилиндрической ионизационной камеры выполнены измерения альфа-спектров возгонов вещества метеорита Алленде и образцов, полученных при химической переработке гидротерм Челекена, в которых ранее была обнаружена активность нового спонтанно делящегося нуклида. Нами было показано, что эта активность не связана с загрязнениями образцов техногенными спонтанно делящимися изотопами. Пределы скоростей счета альфа-частиц с энергиями 5,5 МэВ (^{241}Am) и 5,8 МэВ (^{244}Cm) составили около $4 \cdot 10^{-2}$ альфа-частиц/мин для возгонов из метеорита Алленде. Для альфа-частиц с энергией 5,8 МэВ (^{244}Cm) в продуктах переработки гидротерм Челекена предел скорости счета составлял около 0,5 альфа-частиц/мин.

В третьей главе описывается двойная ионизационная камера с площадью источника 2700 см^2 для измерения полной кинетической энергии и масс-асимметрии осколков спонтанного деления /5/. Разработка установки, позволяющей измерять энергетические характеристики спонтанного деления нуклидов в большом объеме балластного вещества, представляется целесообразной для идентификации нового нуклида, обнаруженного в метеоритах и гидротермах, поскольку недостаточное знание химических свойств затрудняет его концентрирование.

Как следует из данных о множественности зарегистрированных нейтронных событий, среднее число нейтронов $\bar{\nu}$, сопровождающее деление

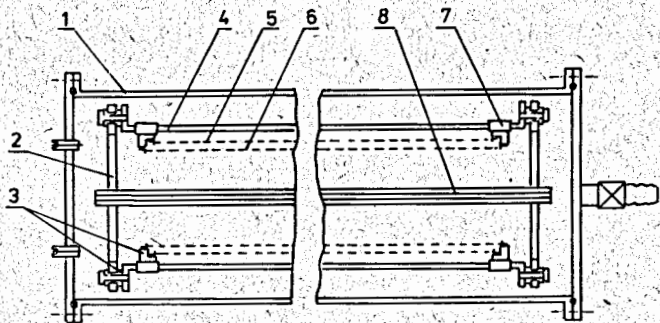


Рис. 6. Схема двойной ионизационной камеры: 1-корпус, 2-диск, 3-изоляторы из фторопласта, 4-собирающие электроды, 5,6-экранирующие и сигнальные сетки, 7-устройство натяжения сеток, 8-источник. Диаметр корпуса камеры - 0,36 м, длина - 2,05 м.

этого нуклида, невелико - не более четырех. Поэтому, если этот нуклид принадлежит к области сверхтяжелых элементов, полная кинетическая энергия осколков его спонтанного деления должна быть не менее 270 МэВ. Эта величина существенно превышает полную кинетическую энергию осколков спонтанного деления известных долгоживущих изотопов.

Ионизационная камера (рис.6) состояла из герметического корпуса и внутренней части, которая представляла собой жесткую конструкцию, содержащую высоковольтный и собирающие электроды, экранирующие сетки и дополнительные сетки для определения угла вылета осколка из слоя источника. Определение угла вылета осколка позволяло производить электронную коллимацию и вводить поправки к энергиям осколков.

Исследуемый образец наносился на тонкие подложки из полимерных пленок, закрепленных на рамках размером $100 \times 150 \text{ мм}^2$. В камеру устанавливалось 18 таких рамок. Конструкция высоковольтного электрода, на котором закреплялись рамки со слоем образца, позволяла обеспечить равномерное распределение потенциала в рабочих объемах камеры без металлизации поверхности образца. Для этой цели пленки со слоем образца помещались между двумя металлическими сетками.

Сигналы с электродов камеры после усиления подавались на амплитудно-цифровые преобразователи. Регистрация поступающей с камеры информации осуществлялась с помощью автоматической системы для многомерного анализа, созданной на базе микро-ЭЕМ МАКАМАК и аппаратуры КАМАК.

С помощью разработанной методики было проведено исследование спонтанного деления ^{238}U . Источник представлял собой поликарбонатную пленку толщиной 50 мкг/см^2 с нанесенным на нее методом термического испарения в вакууме слоем UF_4 толщиной 100 мкг/см^2 (уран естественного изотопного состава). В камеру было помещено около 220 мг урана.

Для определения угла вылета (θ) осколка деления по отношению к нормали к плоскости источника использовалось выражение:

$$(I) \quad N_q = k_1 N_E (1 - k_2 N_E \cos \theta)^{2/3} + k_3$$

Здесь N_q и N_E - амплитуды импульсов соответственно с сетки и с собирающего электрода, коэффициенты k_1, k_2, k_3 определялись с использованием уравнения (I) и экспериментально измеренных значений N_q и N_E для осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами.

Наличие естественной примеси ^{235}U в измеренном образце урана позволило корректно провести энергетическую и угловую калибровку камеры. При калибровке использовались средние значения энергий легкого и тяжелого осколков соответственно $E_l = 101,4 \text{ МэВ}$ и $E_h = 70,4 \text{ МэВ}$.

Поправки к энергиям осколков в явном виде вводились только для осколков, прошедших подложку. Для этой цели с использованием электронной коллимации определялись потери энергии ΔE_{\perp} для осколков, прошедших подложку в перпендикулярном направлении. Поправки к энергиям осколков при вылете их под углом θ определялись по формуле:

$$\Delta E_{\theta} = \Delta E_{\perp} / \cos \theta.$$

Поправки на потери энергии осколками в слое образца вводились неявно в результате процедуры энергетической калибровки. С использованием полученных энергий обоих осколков E_1 и E_2 вычислялись массы и полная кинетическая энергия E_{tot} для каждого события деления.

После электронного коллимирования, при котором исключались из рассмотрения осколки, имеющие угол вылета $\theta > 60^\circ$, были

обработаны 8200 событий деления ^{235}U тепловыми нейтронами и 2800 событий спонтанного деления ^{238}U . Полученные распределения по массам и полным кинетическим энергиям представлены на рис. 7 и 8. В таблице приведены величины средних кинетических энергий \bar{E}_l и \bar{E}_h и масс \bar{M}_l и \bar{M}_h легкого и

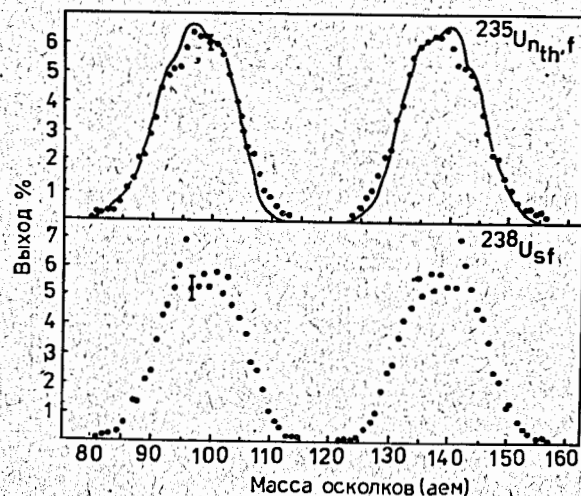


Рис. 7. Распределения по массам осколков деления ^{235}U и ^{238}U .

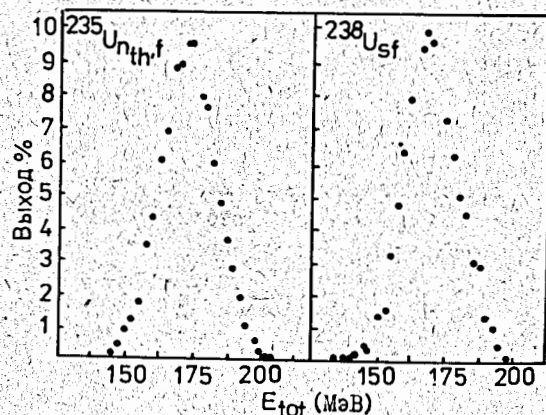


Рис. 8. Распределения полных кинетических энергий осколков деления ^{235}U и ^{238}U .

Таблица. Средние значения и среднеквадратичные ширины распределений. Энергетические и массовые характеристики приводятся соответственно в МэВ и а.е.м. Для данной работы приводятся только стандартные отклонения средних значений.

	^{235}U деление тепловыми нейтронами			^{238}U спонтанное деление			
	Ковригин и Петржак	Касе	Данная работа	Юник	Ковригин и Петржак	Касе	Данная работа
E_{tot}	148,9	169,52	171,8±0,1	171,8	144,4	164,6	168,8±0,2
σ_e			10,7	10,3			10,5
\bar{E}_l	92,3±0,12	99,7	101,4±0,1	101,4	90,0±0,3	97,6±1,2	99,8±0,2
\bar{E}_h	56,6±0,15	69,78	70,4±0,1	70,4	54,4±0,4	67,0±1,2	69,0±0,2
\bar{M}_l			96,7±0,1	96,5			98,0±0,1
\bar{M}_h			139,3±0,1	139,5			140,0±0,1
σ_M			6,05	5,6			6,07

тяжелого осколков, полной кинетической энергии E_{tot} , среднеквадратичных ширин распределений полной кинетической энергии и масс осколков. Там же приводятся результаты, полученные в работах Ковригина и Петржака^{*/} и Касе и др.^{**/} В качестве эталонных данных для деления ^{235}U рассматриваются результаты Юника и др.^{***/}

Изучение спонтанного деления ^{238}U позволило выполнить полномасштабный эксперимент, в котором были проверены возможности установки. Набор статистики в этих измерениях продолжался более трех месяцев. Нестабильность амплитуды импульсов была связана, главным образом, с ухудшением качества рабочего газа. Смена газа один раз в 5 - 6 дней обеспечивала удовлетворительную стабильность амплитуд осколков деления. Многопараметровый характер измерений, а также конструктивные особенности камеры обеспечили низкий фон установки: около одного события в диапазоне $E_{tot} = 50 + 300$ МэВ за месяц. При поисках СТЭ в случае измерения образцов весом ~1 г (толщина слоя источника 300 мкг/см^2) чувствительность разработанной методики составит около $3 \cdot 10^{-11}$ г/г при времени измерения один месяц.

* /Ковригин П.С., Петржак К.А. АЭ, 1958, т.4, с.547-554.

** /Kase M. et al: Nucl.Instr.Meth., 1978, v.154, n.2, p.335-341.

*** /Unik J.P. et al. In: Proc. 3-rd IAEA Symp. Phys. Chem. Fission (Rochester, 1973) IAEA, Vienna, 1974, v. II, p.19-45.

В четвертой главе описывается установка для исследования характеристик спонтанного деления ядер, синтезируемых на пучке тяжелых ионов /6,7/. Установка (рис.9) включала: систему коллимации и измерения интенсивности пучка ионов, реакционную камеру, узел мишени, систему контроля энергии пучка, узел сборников ядер отдачи и две ионизационные камеры для регистрации совпадающих осколков деления. При бомбардировке мишени тяжелыми ионами ядра - продукты реакции вбивались в сборник (Al фольга толщиной 180 мкг/см^2). Осколки спонтанного деления этих ядер через окна, представляющие собой тонкие полимерные пленки на поддерживающей сетке, попадали в рабочие объемы ионизационных камер. Геометрические эффективности регистрации осколков составляли 25% и 15% соответственно для точечного источника и плоского источника диаметром 20 мм. Ионизационные камеры помимо экранных сеток содержали сетки для определения угла входа осколка в камеру, что позволяло вводить поправки на потери энергии осколков.

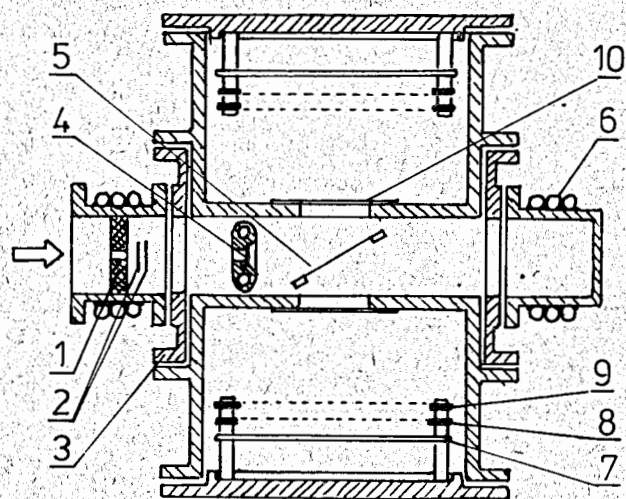


Рис.9. Схема установки для изучения спонтанного деления ядер, синтезируемых на пучке тяжелых ионов: 1 - графитовый коллиматор, 2 - поглотитель, 3 - реакционная камера, 4 - мишень, 5 - сборник ядер отдачи, 6 - цилиндр Фарадея, 7 - собирающий электрод, 8 - экранирующая сетка, 9 - θ -сетка, 10 - полимерная пленка на поддерживающей сетке.

При прохождении через мишень пучка ионов с потоком $\geq 10^{10} \text{ с}^{-1}$ нормальная работа ионизационных камер нарушалась из-за попадания в рабочий объем рассеянных ионов, легких заряженных частиц, электронов, рентгеновского излучения и т.д. Поэтому регистрация осколков производилась только в интервалах времени между импульсами пучка ионов. Длительность этих импульсов составляла около 1 мс, время регистрации - 7 мс. Быстродействие установки определялось в этом случае временем восстановления нормальной работы камер после окончания импульса пучка. В качестве рабочего газа камер был выбран метан при давлении $3 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Время восстановления в этом случае составляло $\sim 0,1 \text{ мс}$ при токах пучка $3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Была также изучена работа ионизационных камер при наполнении их пентаном. Использование многоатомного газа дает возможность уменьшить рабочее давление и соответственно толщину входных окон. Однако измеренное время восстановления камер в этом случае составило более 10 мс уже при потоках ионов $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

В качестве материалов для входных окон были исследованы пленки из поликарбоната и лавсана в диапазоне толщин от 0,1 до $0,45 \text{ мг/см}^2$. Наиболее приемлемыми для длительной работы в условиях сильной радиации оказались пленки из лавсана толщиной $0,45 \text{ мг/см}^2$, покрытые с одной стороны слоем свинца толщиной $0,08 \text{ мг/см}^2$.

Сигналы с собирающих электродов и сеток усиливались и формировались по длительности на предусилителях, имевших схему стабилизации постоянной составляющей на выходе, необходимую для работы камер в режиме сильных токовых перегрузок. Сигналы с предусилителей поступали на спектрометрические усилители, затем на нормально открытые линейные ворота и далее на амплитудно-цифровые преобразователи. Линейные ворота закрывались на время прохождения пучка. Для временной привязки совпадающих событий использовалось таймерное устройство. Полученная информация поступала на привод перфоратора и перфорировалась в соответствующем формате для последующей обработки на ЭВМ.

Для моделирования условий эксперимента на место сборника ядер отдачи помещалась мишень из ^{235}U толщиной 20 мкг/см^2 на подложке из Al толщиной 180 мкг/см^2 . Измерялись характеристики деления ^{235}U тепловыми нейтронами. Эти измерения проводились на пучке ионов с рабочей интенсивностью. Полученная ширина распределения на полувысоте полной кинетической энергии осколков деления составила $\sim 30 \text{ МэВ}$. Это соответствовало аппаратурному разрешению установки $\sim 14 \text{ МэВ}$. Отношение пик/провал в массовом распределении составило ~ 5 .

Для испытания разработанной методики были проведены эксперименты по изучению характеристик спонтанного деления изотопов ^{244}Fm и ^{246}Fm . Выбор этих нуклидов был мотивирован следующими причинами.

Во-первых, малое сечение образования ($\sim 10^{-32}$ см²) и короткое время жизни ^{244}Fm позволили произвести проверку работы установки в условиях максимально приближенных к ожидаемым при синтезе далеких трансфермиевых и сверхтяжелых нуклидов. Во-вторых, эти опыты имели самостоятельный интерес, который заключался в проверке различных гипотез, предложенных для объяснения эффекта симметричного спонтанного деления изотопов $^{258,259}\text{Fm}$.

Эксперименты проводились на пучке циклотрона У-300 ЛЯР ОИЯИ. Изотопы фермия получались в реакциях $^{239}\text{Pu} (^{12}\text{C}, 5\text{n})^{246}\text{Fm}$, $^{233}\text{U} (^{16}\text{O}, 5\text{n})^{244}\text{Fm}$, энергия бомбардирующих ионов составляла $E_C = 82$ МэВ и $E_O = 102$ МэВ, средняя интенсивность пучка ионов за время эксперимента: $2 \cdot 10^{12}$ с⁻¹. Было зарегистрировано около 50 событий для каждого изотопа. Показано, что изотопы ^{244}Fm , ^{246}Fm испытывают асимметричное деление, средние полные кинетические энергии совпадают с предсказанными по стандартной систематике и составляют соответственно 196,0 МэВ и 198,7 МэВ при точности измерения около 2%. Полученные данные указывают на то, что причиной аномалии при делении ^{258}Fm и ^{259}Fm являются, по-видимому, предпочтительное образование осколков вблизи дважды магического ядра ^{132}Sn .

Анализ полученных результатов показывает, что при исследовании спонтанного деления атомных ядер с $Z \geq 100$, применение описанной методики позволит определять полную кинетическую энергию осколков спонтанного деления при поперечных сечениях реакций синтеза $\geq 10^{-33}$ см². Чувствительность таких экспериментов может быть повышена на два-три порядка величины при условии предварительной сепарации синтезированных нуклидов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Изучены условия применения нейтронных детекторов с ^3He счетчиками с защитой в виде слоя бетона и полиэтиленового замедлителя для обнаружения редких событий спонтанного деления в массивных образцах, предложен и реализован метод снижения фона детектора, вызванного вторичными нейтронами от взаимодействий космических лучей с материалом защиты, обеспечена возможность массовых измерений спонтанного деления в геологических пробах с чувствительностью $\sim 10^{-13}$ г/г.

2. Проведены поиски событий спонтанного деления сверхтяжелого элемента в более чем 60 образцах из различных геологических объектов и в образцах, полученных из гидротерм Солтон Си и Атлантис II.

Установлены пределы для концентрации сверхтяжелых элементов соответственно $(2 + 5)10^{-13}$ г/г и $3 \cdot 10^{-12}$ г/г.

3. Разработана цилиндрическая ионизационная камера с площадью источника 4500 см² и разрешением 55 кэВ для контроля загрязненности образцов техногенными спонтанно делящимися нуклидами. Предел обнаружения альфа-активности в образцах составляет для излучателей с энергиями $E_\alpha = 5,5$ МэВ (^{241}Am) и $E_\alpha = 5,8$ МэВ (^{244}Cm) $1,5 \cdot 10^3$ α-частиц/г день. Измерены альфа-спектры ряда продуктов, полученных при химическом концентрировании сверхтяжелых элементов.

4. Создана двойная ионизационная камера с площадью источника 2700 см², которая позволяет производить электронную коллимацию осколков деления и вводить поправку на потери энергии осколков в слое образца и в подложке при эффективном телесном угле около 2π ср. Точность измерения суммарной кинетической энергии осколков спонтанного деления составила около 2%.

5. Получены массовые и энергетические распределения для 2800 событий спонтанного деления ^{238}U . Средняя полная кинетическая энергия осколков деления составляет 168,8 МэВ при среднеквадратичной ширине распределения 10,5 МэВ, средние массы тяжелых и легких осколков равны соответственно 140,0 и 98,0 а.е.м. при среднеквадратичной ширине распределений по массам 6,07 а.е.м. Измерен период полураспада ^{238}U относительно спонтанного деления $T_{sf} = (8,29 \pm 0,27)10^{15}$ лет.

6. Создана установка для измерения характеристик спонтанного деления ядер в линии на пучке тяжелых ионов. Установка позволяет изучать изотопы с периодами полураспада $\geq 0,1$ мс и поперечными сечениями образования $\geq 10^{-33}$ см².

7. Показано, что изотопы $^{244,246}\text{Fm}$ испытывают асимметричное спонтанное деление, средние полные кинетические энергии осколков деления составляют соответственно 196,0 МэВ и 198,7 МэВ.

ПУБЛИКАЦИИ

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Сокол Е.А., Фам Нгок Чьонг, Смирнов В.И., Иванов М.П., Тер-Акопьян Г.М., Челноков Л.П. Изучение методов снижения фона нейтронного детектора при регистрации редких событий спонтанного деления. - Дубна, 1983.-7с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: I3-83-227)

2. Иванов М.П., Тер-Акопьян Г.М., Шалаевский М.Р. Ионизационная камера с цилиндрическими электродами для альфа-спектрометрии и некоторые ее применения при поиске сверхтяжелых элементов. - Дубна, 1982.- I1с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: I3-82-860).

3. Флеров Г.Н., Тер-Акопьян Г.М., Иванов М.П., Сокол Е.А., Попеко Г.С., Смирнов В.И., Фам Нгок Чюнг, Рундквист Д.В., Бурков Ю.К., Жидков А.Я., Соболев О.А., Черепанов В.А. О поиске сверхтяжелых элементов в геологических объектах. Радиохимия, 1982, т. 24, №6, с.782-789.

4. Ter-Akopian G.M., Sokol E.A., Fam Ngoc Chuong, Ivanov M.P., Popeko G.S., Molzahn D., Lund T., Feige G., Brandt R. Search for Spontaneous Fission Activity in Salton Sea and Atlantis II Hot Brines. -Z.Phys., 1984, v.316A, p.213-215.

5. Иванов М.П., Тер-Акопьян Г.М., Сефилов Б.В., Воронин А.С. Изучение спонтанного деления ^{238}U с использованием двойной ионизационной камеры. Дубна, 1983.-Ис. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: I3-83-800).

6. Богданов Д.Д., Вакатов В.И., Воронин А.С., Иванов М.П., Попеко Г.С., Родин А.М., Тер-Акопьян Г.М. Исследование энергетических характеристик спонтанного деления изотопов $^{244,246}\text{Fm}$. -Дубна, 1981.-Ис. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.:PI5-81-706).

7. Bogdanov D.D., Ivanov M.P., Popeko G.S., Rodin A.M., Ter-Akopian G.M., Vakatov V.I., Voronin A.S. The Spontaneous Fission of ^{244}Fm and ^{246}Fm . -Phys.Lett., 1982, v.II3B, n.3, p.213-214.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 ноября 1984 года.