

Г-35



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.16:539.173.7

7-83-350

ТЕР-АКОПЬЯН
Гурген Мкртычевич

ИССЛЕДОВАНИЯ
ПО СИНТЕЗУ И ПОИСКУ В ПРИРОДЕ
СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1983

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В 60-х годах при изучении спонтанного деления были получены результаты, которые указывали на существование сложной структуры барьера деления ядра. Качественное объяснение этих данных и, в частности, предсказание двугорбой структуры барьеров деления ядер актинидов было сделано с помощью метода оболочечной поправки, допускающего вычисление энергии связи и энергии деформации ядра с учетом эффекта оболочек. Одним из наиболее существенных результатов, полученных на основе этого метода расчетным путем, была оценка возможной стабильности сверхтяжелых ядер, находящихся в районе дважды замкнутых оболочек $Z = 114$, $N = 184$. Таким образом, была выдвинута и приобрела широкую популярность гипотеза о существовании относительно стабильных сверхтяжелых элементов (СТЭ).

Большой интерес к этой гипотезе был вызван тем, что для ядер СТЭ предсказывались продолжительные времена жизни по отношению к спонтанному делению, даже превосходящие периоды полураспада тория и урана. Синтез СТЭ или их обнаружение в природе сделали бы доступной для изучения большую группу новых нуклидов, что имело бы особое значение для развития ядерной теории.

Для синтеза СТЭ наиболее перспективными представляются реакции полного слияния ионов ^{48}Ca с тяжелыми ядрами. Решающее значение имеет вопрос о том, удастся ли вести холодный синтез, то есть получать слабо возбужденные компаунд-ядра СТЭ, в которых будет сохраняться стабилизирующее действие замкнутых нуклонных оболочек. Таким образом, задача синтеза СТЭ тесно связана с другой проблемой, привлекающей пристальное внимание в ядерной физике, а именно, с исследованием макроскопических свойств ядерного вещества, проявляющихся в механизме реакции слияния.

Наибольшее число работ по СТЭ посвящено их поиску в земных образцах и в метеоритах. Это вызвано тем, что в случае обнаружения СТЭ в природе станет возможным изучение атомных ядер, находящихся в центре острова стабильности, и проводить исследования, имеющие принципиальное значение не только для ядерной физики, но и для других областей науки. Для поисков СТЭ актуальными являются вопросы обоснованного выбора объектов изучения и определения критериев оценки полученных данных. Важным условием явилось развитие новых ультрачувствительных методов детектирования редких нуклидов, существенно превосходящих по чувствительности ранее известные методы. Применение этих методов выходит за рамки поисков СТЭ и дает интересные возможности в других актуальных направлениях науки и техники.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

С.С.Герштейн

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

В.А.Карнаухов

Доктор химических наук, профессор

Ю.А.Шуколкин

Ведущее предприятие:

Физико-энергетический институт (г.Обнинск)

Защита диссертации состоится "5" января 1984 г.

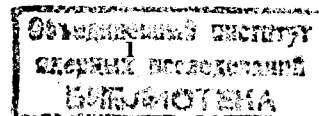
в "11" часов на заседании Специализированного совета Д.047.01.05. при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "2" декабря 1983 г.

Ученый секретарь Специализированного совета

Ю.В.Таран



Основная цель работы заключалась в проведении экспериментов по синтезу атомных ядер СТЭ и по их поиску в природе.

При синтезе СТЭ изучались реакции слияния ионов ^{48}Ca с различными тяжелыми ядрами. Для определения оптимальных условий холодного синтеза СТЭ изучались реакции слияния ионов с $A \geq 40$ в области сильно делящихся компаунд-ядер с $Z \geq 100$.

При поисках СТЭ в природе разрабатывались методы регистрации редких событий спонтанного деления и масс-спектрометрической идентификации сверхтяжелых атомных ядер. Проводилось изучение редких событий спонтанного деления в геологических объектах и в метеоритах.

Научная новизна работы

Впервые выполнены эксперименты по синтезу в реакциях полного слияния на пучке ионов ^{48}Ca атомных ядер СТЭ в диапазоне $Z = 108-116$.

Впервые изучены функции возбуждения реакций холодного синтеза тяжелых делящихся ядер и показано, что в них имеет место образование статистически равновесного компаунд-ядра. Показана возможность получения слабозбужденных компаунд-ядер при энергии бомбардирующих ионов с $A \geq 40$, меньшей по сравнению с высотой кулоновского барьера. Впервые измерены поперечные сечения ряда реакций полного слияния с бомбардирующими ионами с $A \geq 40$, ведущих к образованию атомных ядер с $Z \geq 100$. Обнаружен канал испарения одного нейтрона из компаунд-ядра в реакции $^{205}\text{Tl} (^{48}\text{Ca}, 1n)$. Обнаружено, что различие в форме барьеров деления компаунд-ядер с $Z = 100-104$, имеющих числа нейтронов в диапазоне $N = 144-154$, не влияет на вероятность их образования в реакциях с бомбардирующими ионами с $A \geq 40$.

Ряд новых результатов получен в исследованиях по поиску СТЭ в природе.

Предложен и развит новый метод детектирования и изучения редких событий спонтанного деления ядер, основанный на наблюдении множественной эмиссии нейтронов. Разработаны нейтронные детекторы, которые по чувствительности в 10^2-10^3 раз превосходят другие установки для поиска СТЭ, практически не уступая по вероятности регистрации нейтронов лучшим детекторам на основе жидких сцинтилляторов.

Предложено новое устройство масс-спектрометра и разработан его проект. Обоснованы принципы, позволяющие достигнуть при поиске и идентификации СТЭ чувствительности такого прибора в 10^2-10^3 раз большей по сравнению с лучшими действующими масс-спектрометрами.

На основании различных механизмов миграции и концентрирования редких элементов в земной коре проведен выбор геологических объектов поиска СТЭ. Изучение этих объектов и типичных пород земной коры

позволило впервые дать оценку порядка величины верхнего предела распространенности СТЭ в земной коре (10^{-13} г/г). Предложено и выполнено изучение спонтанного деления атомных ядер в каменных метеоритах, в результате чего впервые получен порядок величины верхнего предела распространенности СТЭ в Солнечной системе (10^{-14} г/г). В изученных метеоритах и в гидротермах полуострова Челекен обнаружено явление множественной эмиссии нейтронов, которое не может быть объяснено известными источниками фона. На основании гипотезы о присутствии в указанных объектах нового природного нуклида, принадлежащего СТЭ, сформулированы условия поиска геологических объектов с концентрацией этого нуклида $\geq 10^{-13}$ г/г и $\geq 10^{-14}$ г/г с использованием, соответственно, нейтронного детектора и ультрачувствительного масс-спектрометра.

Практическая ценность работы

Данные экспериментов по синтезу СТЭ на пучке ионов ^{48}Ca используются при подготовке и проведении экспериментов на ускорителях второго поколения. На их основе определяется необходимый поток ионов, делаются выводы о методике экспериментов. Существенным является вывод о целесообразности выбора энергии бомбардирующих ионов, меньшей по сравнению с кулоновским барьером или слегка превышающей его. Данные о поперечных сечениях и функциях возбуждения реакций полного слияния, полученные в диссертации, используются при теоретическом рассмотрении процесса слияния сложных ядер и для оценок поперечных сечений реакций синтеза тяжелых нуклидов с $Z \geq 104$.

Оценки верхних пределов содержания СТЭ в земной коре и в Солнечной системе, полученные в диссертации, существенно ограничивают возможные периоды полураспада наиболее долгоживущих СТЭ и (или) вероятность их образования в нуклеосинтезе. Данные о явлении множественной эмиссии нейтронов, обнаруженном в метеоритах и гидротермах, используются в экспериментах по химическому извлечению спонтанно делящегося нуклида из вещества метеорита Алленде и из гидротермальных рассолов. На их основании проводятся эксперименты по поиску геологических объектов, обогащенных по содержанию СТЭ.

Способ регистрации спонтанного деления по множественным нейтронным событиям и нейтронные детекторы, разработанные для его осуществления, используются при определении урана и трансурановых элементов, при изучении характеристик спонтанного деления различных нуклидов, при синтезе тяжелых атомных ядер, в анализах изотопного состава образцов, при разработке методов регистрации ядерных превращений с большим выделением энергии (распад нуклона, прохождение релятивистских частиц через вещество и др.).

Устройство ультрачувствительного масс-спектрометра значительно

увеличит экспрессность и информативность экспериментов по поиску СТЭ и позволит изучать новые геологические объекты. Масс-спектрометр будет иметь практическое значение для анализов редких изотопов, для определения примесей в чистых образцах, для повышения чувствительности и сокращения времени анализов в традиционной масс-спектрометрии.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Выполнены эксперименты по синтезу в реакциях полного слияния с ионами ^{48}Ca долгоживущих ($T_{1/2} > 1$ час) изотопов СТЭ с $Z = 114-116$ и нейтронодефицитных изотопов с $Z = 108-112$ ($T_{1/2} > 1$ мс). Исследованы реакции слияния ионов ^{48}Ca с мишенями ^{242}Pu , ^{243}Am , $^{246,248}\text{Cm}$, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{231}Pa , ^{233}U . Получены верхние пределы поперечных сечений $10^{-34}-10^{-35}$ см 2 .

2. Проведено изучение реакций полного слияния бомбардирующих ионов с $A \geq 40$ в области сильно делящихся компаунд-ядер: получена энергетическая зависимость поперечных сечений реакций ^{206}Pb (^{40}Ar , 2n), ^{207}Pb (^{40}Ar , 3n), измерены выходы продуктов реакций слияния ^{48}Ca с ядрами ^{205}Tl , ^{208}Pb , ^{209}Bi , определены поперечные сечения реакций $^{204}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$, $^{206}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$, $^{206}\text{Pb} + ^{50}\text{Ti}$, ведущих к образованию новых нуклидов ^{242}Fm и ^{254}Ku .

3. Показано, что имеет место процесс образования слабовозбужденных компаунд-ядер с $Z \geq 100$ при бомбардировке мишеней тяжелыми ионами с энергией, на 5-7 МэВ меньшей кулоновского барьера.

4. Показано, что различие в форме барьеров деления компаунд-ядер с $Z = 100-102$, имеющих числа нейтронов в диапазоне $N = 144-154$, не влияет на вероятность их образования в реакциях с бомбардирующими ионами с $A \geq 40$.

5. Предложен и развит новый способ детектирования и изучения редких событий спонтанного деления ядер, основанный на наблюдении актов множественной эмиссии нейтронов. Разработаны детекторы нейтронов, позволившие наблюдать события спонтанного деления в образцах весом в несколько десятков килограммов при скорости счета $\geq 0,002$ день $^{-1}$ кг $^{-1}$.

6. Предложено новое устройство и разработан проект ультрачувствительного масс-спектрометра, рассчитанного на идентификацию атомов СТЭ в образцах весом 100 мг с чувствительностью 1 атом на 10^{14} атомов основы.

7. Изучены редкие события спонтанного деления в геологических объектах, представляющих типичные породы земной коры и некоторые руды, и получена оценка порядка величины верхнего предела среднего содержания СТЭ в земной коре - 10^{-13} граммов на грамм (в предположении, что период полураспада СТЭ равен 10^9 лет).

8. В образцах метеоритов Саратов, Алленде, Ефремовка и гидротерм полуострова Челекен обнаружено явление множественной эмиссии нейтронов, которое не может быть объяснено известными источниками фона. Скорость счета кратных нейтронных событий - $0,02$ день $^{-1}$ кг $^{-1}$, обнаруженных в метеорите Алленде, отвечает порядку величины верхнего предела распространенности СТЭ в Солнечной системе, равному 10^{-14} граммов на грамм.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены автором на Международной конференции по физике тяжелых ионов (Дубна, 1971), на Европейской конференции по ядерной физике (Экс-ан-Прованс, Франция, 1972), на Международной конференции по ядерной физике (Мюнхен, ФРГ, 1973), на 4-й Международной конференции по транслутониевым элементам (Баден-Баден, ФРГ, 1975), на симпозиуме МАГАТЭ по физике и химии деления (Юлих, ФРГ, 1979), на Международном симпозиуме по синтезу и свойствам новых элементов (Дубна, 1980), на 3-й Всесоюзной конференции по масс-спектрометрии (Ленинград, 1981), на Втором рабочем совещании по применению радиоизотопов и радиационной обработки в промышленности (Лейпциг, ГДР, 1982), на заседаниях Комитета по физике тяжелых ионов в Дубне, на научных семинарах в ОИЯИ (Дубна), ГЕОХИ АН СССР (Москва), ГСИ (Дармштадт, ФРГ), Институте Макса Планка (Гайдельберг, ФРГ), Институте ядерной физики (Орсе, Франция), Национальных лабораториях США в Беркли и Ок-Ридже.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений, содержит 191 страницу машинописного текста (включая рисунки), 19 таблиц, 26 рисунков и список литературы из 288 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана аннотация работы. В нем показана актуальность проблемы СТЭ, изложено краткое содержание диссертации и приведены основные результаты, полученные автором.

В первой главе рассмотрены предсказания свойств СТЭ и экспериментальные возможности синтеза и поиска атомных ядер, принадлежащих новому острову стабильности.

Непрерывным условием стабильности пока неизвестных тяжелых элементов является существование достаточно высокого потенциального барьера, препятствующего делению их атомных ядер. Концепция барьера деления базируется на описании энергии деформации ядра в рамках модели жидкой капли. Однако эта модель не могла объяснить примерное

постоянство барьеров деления в широком диапазоне атомных ядер актиноидов. Ей противоречило наличие резких максимумов на кривых зависимости от числа нейтронов периодов полураспада ядер по отношению к спонтанному делению (см. рис. I). Необходимость пересмотра или усовершенствования жидкокапельного описания барьера деления ядра стала ощущаться особенно остро после открытия спонтанно делящихся изомеров.

Объяснение наблюдавшихся явлений было получено благодаря методу оболочечной поправки, с помощью которого было найдено, что оболочечные эффекты существуют не только в сферических, но и в деформированных ядрах, и они оказывают большое влияние на барьер деления.

Для развития проблемы СТЭ было существенным предсказание магичности протонных и нейтронных чисел $Z = 114$, $N = 184$. В целом ряде работ с помощью метода оболочечной поправки были вычислены большие барьеры деления для значительной группы нуклидов, располагающихся около этих магических чисел и образующих, таким образом, новый остров стабильности. Подчеркнем, что вычисленные барьеры деления ядер СТЭ обусловлены чисто оболочечными эффектами, так как их жидкокапельный барьер деления практически равен нулю. Расчеты дают времена жизни этих ядер по отношению к спонтанному делению в диапазоне от нескольких часов до времен, соизмеримых с периодом существования Солнечной системы (см. рис. I). Для предсказания полных времен жизни сверхтяжелых ядер проводились оценки вероятности их α - и β -распада.

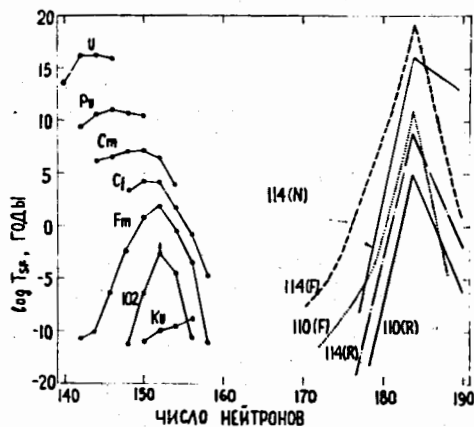


Рис. I. Систематика периодов полураспада по отношению к спонтанному делению и результаты расчетов для СТЭ.

Оценка ошибок, связанных с погрешностью вычисления высоты и формы барьеров деления и с погрешностью определения инерции ядра по отношению к делительной деформации, показывает, что расчетные периоды

полураспада $T_{5\%}$ (см. рис. I) могут отличаться от действительных на 10 порядков величины в большую или меньшую сторону. Ошибки предсказаний периодов α -распада могут составить 4-5 порядков величины. Однако большая неточность предсказаний периодов полураспада СТЭ не снижает актуальности задачи их синтеза и поиска в природе.

В ряде работ рассматривались характеристики спонтанного деления сверхтяжелых ядер. Для деления на два осколка предсказывались большие значения среднего числа мгновенных нейтронов ($\bar{\nu} \approx 10$). Однако анализ данных об известных спонтанно делящихся ядрах позволяет допустить, что величины $\bar{\nu}$ для СТЭ могут быть не столь большими. Невысокие оценки $\bar{\nu} \approx 2-4$, были получены для тройного деления, вероятность которого для ядер СТЭ может оказаться большой. В любом случае выделение энергии, превышающее более, чем на 50 МэВ то, что наблюдается у известных ядер, должно служить в качестве признака спонтанного деления СТЭ.

Эксперименты по поиску в природе и синтезу СТЭ проводились по трем основным направлениям: поиск атомных ядер СТЭ в галактических космических лучах, поиск СТЭ в веществе Солнечной системы (в метеоритах и земных объектах), эксперименты по синтезу ядер СТЭ на пучках тяжелых ионов.

Рассмотрение работ по поиску СТЭ в веществе земной коры и в метеоритах показывает, что для такого поиска необходимы ультрачувствительные, гибкие и универсальные методы обнаружения и идентификации неизвестных ядер. Необходим обоснованный выбор объектов изучения и определение критериев оценки полученных результатов.

Реакции полного слияния ионов ^{48}Ca с тяжелыми ядрами представляют практически единственное средство для синтеза СТЭ. Проведение таких экспериментов связано с проникновением в область неизвестных нуклидов, которое осложняется ограниченным временем использования уникального пучка ионов ^{48}Ca и низким и трудно предсказуемым выходом искомого продукта реакции. Оптимальные условия синтеза ядер СТЭ могут быть найдены при изучении реакций полного слияния ионов с $Z \geq 40$, ведущих к атомным ядрам с $Z \geq 100$, барьер деления которых обусловлен, главным образом, эффектом оболочек.

Во второй главе описаны экспериментальные методы обнаружения и идентификации СТЭ.

Наибольшая чувствительность поиска СТЭ в природных образцах была достигнута с помощью нейтронных детекторов, предназначенных для регистрации редких событий спонтанного деления. Способ наблюдения событий спонтанного деления по множественным нейтронным событиям был предложен и реализован нами в начале семидесятых годов [1, 2, 3]. Благодаря большой проникающей способности нейтронов удается исследо-

вать массивные образцы без их разрушения и специальной подготовки. Регистрация спонтанного деления имеет большое значение при поиске СТЭ, так как этот вид радиоактивного распада должен быть основным для атомных ядер, принадлежащих острову стабильности. С другой стороны, спонтанное деление испытывает только один известный природный элемент — уран, что значительно облегчает достижение низкого фона при поиске актов распада СТЭ.

В экспериментах по поиску СТЭ нами использовались нейтронные детекторы с ${}^3\text{He}$ -счетчиками, которые неоднократно совершенствовались [6,9,10,14,21,22,27]. В результате была достигнута чувствительность, позволяющая обнаружить СТЭ при концентрации $\geq 10^{-15}$ г/г^{*)}. Устройство детектора показано на рис. 2. Нейтроны, испущенные из образца, за-

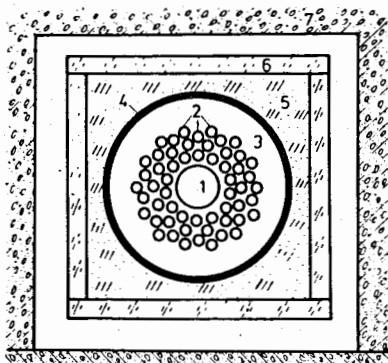


Рис. 2. Схема нейтронного детектора с защитой. 1 — образец, 2 — ${}^3\text{He}$ — счетчики, 3 — оргстекло, 4 — кадмий, 5 — полиэтилен, 6 — пластические сцинтилляторы, 7 — бетон толщиной 7 м.

медлялись в оргстекле (или парафине) и затем в течение характерного времени τ , составляющего несколько десятков мкс, диффундировали в замедлителе и либо поглощались в ${}^3\text{He}$ -счетчиках или оргстекле, либо покидали детектор. Для значительной доли событий спонтанного деления за промежуток времени $\sim 3\tau$ схема детектора регистрировала два или более нейтронов. Вероятность W_m регистрации m нейтронов (то есть события с кратностью m):

$$W_m(\epsilon, \bar{\nu}, \sigma_{\nu}^2) = \sum_{\nu \geq m} C_{\nu}^m \epsilon^m (1-\epsilon)^{\nu-m} P_{\nu}(\bar{\nu}, \sigma_{\nu}^2). \quad (1)$$

Здесь $P_{\nu}(\bar{\nu}, \sigma_{\nu}^2)$ — вероятность испускания ν нейтронов при спонтанном делении, характеризуемом средним числом $\bar{\nu}$ и дисперсией σ_{ν}^2 .

*) В предположении, что период полураспада искомого нуклида равен 10^9 лет.

ϵ — вероятность регистрации одиночного нейтрона, испущенного из образца, C_{ν}^m — число сочетаний из ν по m .

В случае детектора [27], показанного на рис. 2, $\epsilon = 0,48$ для центральной области чувствительного объема величиной 10 л. При уменьшении чувствительного объема до 0,3 л достигалась величина $\epsilon = 0,73$. По основным параметрам этот детектор практически не уступает нейтронным детекторам с жидким сцинтиллятором, на которых обычно достигается наивысшая вероятность регистрации нейтронов. В то же время детектор с ${}^3\text{He}$ -счетчиками имеет преимущество, которое заключается в низком уровне фона.

Электронная схема детектора вела поиск кратных нейтронных событий всякий раз, как с любого из ${}^3\text{He}$ -счетчиков поступал нейтронный сигнал. Наблюдение таких событий позволяло регистрировать редкие акты спонтанного деления ядер с вероятностью

$$W_{SF} = \sum_{m \geq 2} W_m(\epsilon, \bar{\nu}, \sigma_{\nu}^2), \quad (2)$$

которая при $\epsilon = 0,48$ равна 0,24 для ${}^{238}\text{U}$ и 0,6 для ${}^{252}\text{Cf}$. В результате измерений накапливалась информация о распределении зарегистрированных нейтронных событий по кратности, причем в этом распределении отсутствовали данные о числе событий с кратностью 0 и 1. На основании этой информации можно оценивать параметры $\bar{\nu}$ и σ_{ν}^2 , характеризующие множественность нейтронов спонтанного деления. Точность таких оценок оказывается невысокой при $\epsilon < 0,5$ и при малой статистике. Она быстро возрастает с увеличением ϵ и числа зарегистрированных событий. При $\epsilon \geq 0,7$ и числе событий ≥ 200 относительная погрешность $\Delta\bar{\nu}/\bar{\nu} \leq 0,1$.

Высокая чувствительность нейтронных детекторов достигалась при работе в помещениях, защищенных от космического излучения. На рис. 3

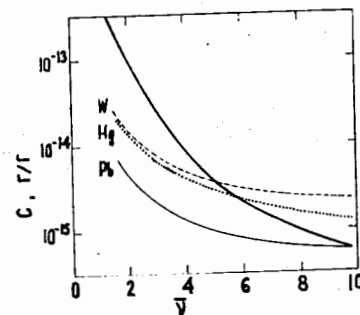


Рис. 3. Зависимость предела измеримой концентрации СТЭ от $\bar{\nu}$. Жирная кривая — расчет для стандартного образца (вес 25 кг, 20% Pb, 10^{-6} г/г U). Остальные кривые — экспериментальные пределы для W, Hg, Pb, полученные на глубине 1100 м в.з.

показана зависимость от \bar{Y} величины предельной обнаружимой концентрации спонтанно делящегося нуклида, которая была получена в измерениях, выполненных в соляной шахте на глубине 1100 метров водного эквивалента (м в.э.)^{6/}. На такой глубине при условии применения системы анти-совпадений из счетчиков Гейгера-Мюллера фон множественных нейтронных событий, вызванных взаимодействиями космического излучения, практически отсутствовал. Чувствительность определялась продолжительностью измерений и величиной фона спонтанного деления примеси урана в образцах.

Если целью экспериментов является изучение большого числа образцов, продолжительность измерения не может существенно превышать 1 день. Предельная чувствительность в таком случае соответствует наблюдению 2-3 множественных событий в день, что отвечает для образца весом около 10 кг концентрации искомого нуклида 10^{-13} г/г. Приемлемые условия по величине фона были получены нами с защитой, показанной на рис. 2^{27/},^{34/}.

В таблице I дано сравнение характеристик некоторых лучших нейтронных детекторов, применявшихся при поисках СТЭ.

Таблица I

E	Чувствительный объем, л	Защита, м в.э.	Образец	Вес, кг	Фон: число событий в день с кратностью m		
					m = 2	m = 3	m = 4
0,65 ^{*)}	10	600	-	0	$2 \cdot 10^4$	570	0,6
0,47 ^{*)}	2,5	40	-	0	11,6	I	
0,47 ^{*)}	2,5	40	Bi ₂ O ₃	0,5	18,2	2,7	0,6
0,38 ^{/14,21/}	10	1100	кварц(70%) +Fe ₃ O ₄ (30%)	10	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$
0,38 ^{/14/}	10	1100	Pb	100	$\leq 0,06$	$\leq 0,06$	$\leq 0,06$
0,48 ^{/27/}	10	15	Pb	25	4	1,8	$\leq 0,1$
0,48 ^{/27/}	10	15	Fe	5,7	1	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$

*) Детектор на основе жидкого сцинтиллятора с добавкой гадолиния

/Cheifetz E. et al, Phys. Rev., 1972, vol. C6, No.4, p.1348-1351/

)) Детектор на основе ³He -счетчиков

/Fireman E.L. et al, J. Inorg. Nucl. Chem., 1979, vol.41, No.5, p.613-615/

Большие возможности для идентификации искомым СТЭ может дать масс-спектрометрия. Однако ее применение при поисках СТЭ было

ограничено ввиду недостаточно высокой чувствительности ($\geq 10^{-11}$ атомов на атом). Нами было предложено устройство масс-спектрометра^{/26/}, принцип действия которого позволяет достигнуть существенного уменьшения фона заряженных молекул и рассеянных ионов основы, ограничивающего чувствительность в области массовых чисел $A > 250$. На базе этого устройства разработан проект ультрачувствительного масс-спектрометра ЛИДИА, который сооружается в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ^{/28,30,32/}. Схема масс-спектрометра ЛИДИА (рис. 4) включает лазерный плазменный источник ионов, газовую или паровую мишень, систему отбора ионов, испытавших перезарядку, и многоступенчатую систему для разделения ионов по массе.

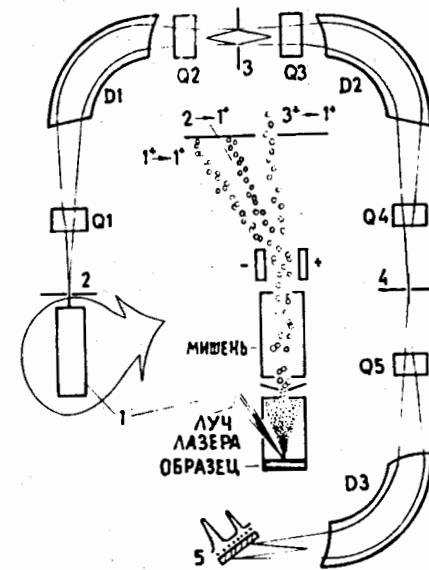


Рис. 4. Схема ультрачувствительного масс-спектрометра ЛИДИА.

D1, D2, D3 - дипольные магниты, Q1-Q5 - магнитные квадрупольные линзы.

Некоторые характеристики лазерного источника ионов были проверены на модельном варианте, работавшем с лазером на аллюминиево-иттриевом гранате в режиме модулированной добротности. При плотности мощности излучения $4 \cdot 10^9$ Вт /см² число ионов в сформированном пучке равнялось $1-3 \cdot 10^{11}$ на импульс лазера, что составляло 10^{-4} часть от числа атомов образца, испаренных в лазерном факеле. Происходило бесфракционное испарение вещества образца и ионизация атомов. Относительный выход ионов зависел только от их массового числа и был пропорционален $A^{-1/2}$. Относительные выходы ионов с зарядами 1+, 2+, 3+ могли

быть представлены пропорцией 0,5 : 0,4 : 0,08. Заряженные молекулы наблюдались только в токе однозарядных ионов; их выход мог быть уменьшен сравнительно простыми средствами до $< 5 \cdot 10^{-6}$ от полного тока ионов.

С целью дальнейшего уменьшения фона заряженных молекул для анализа используются ионы с начальным зарядом 3^+ , испытавшие перезарядку $3^+ \rightarrow 1^+$ на мишени (см. вставку на рис. 4). Вероятность перезарядки 0,3-0,4 достигается при толщине мишени $2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2}$, которая практически не влияет на угловые и энергетические характеристики пучка ионов.

Масс-анализатор ионов состоит из двух частей. Первая часть - ахроматическая система, которая дает изображение щели 2 в плоскости щели 4 (см. рис. 4) для ионов в заданном массовом диапазоне ($\Delta M/M \approx 0,05$). Вторая часть представляет собой магнитный спектрометр, создающий в плоскости 5 изображение массовых линий для ионов, прошедших через щель 4. При разрешении $M/\Delta M \approx 500$ система в целом обеспечивает 100% прохождение ионов в заданном массовом диапазоне и трехкаскадную сепарацию от ионов основы образца с фактором очистки 10^6-10^7 на один каскад. Дополнительная сепарация осуществляется по времени пролета ионов.

В системе регистрации, расположенной в фокальной плоскости 5, используются детекторы на основе микроканальных пластин. При экспозиции в 10^6 импульсов лазера время регистрации составляет 10 с. За такое короткое время собственный фон детектора не создает помехи для поиска слабых массовых линий.

Оценка наилучшей чувствительности, которая может быть достигнута на таком приборе, дает величину 10^{-14} атомов на атом. Время анализа составляет около одного часа, расход вещества - 100 мг.

Для анализа результатов многих работ, в которых проводился поиск СТЭ в природе, во второй главе рассмотрены другие методы, применявшиеся с этой целью. Лучшие из них уступают нейтронным детекторам по чувствительности на два-три порядка величины. Некоторые методы могут быть применены для идентификации СТЭ в случае получения образцов с высокой концентрацией искоемых нуклидов.

В конце второй главы описаны некоторые методы и устройства, которые были разработаны для экспериментов по синтезу СТЭ и изучению реакций полного слияния. Облучение радиоактивных (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{231}Pa , ^{233}U , ^{242}Pu , ^{243}Am , $^{246,248}\text{Cm}$) и легкоплавких (Te , Pb , Bi) мишеней проводилось пучками ионов ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{50}Ti при средней интенсивности $10^{12}-10^{13} \text{ с}^{-1}$. Мощность, выделяемая в мишени, достигала 100 Вт/см^2 . Для обеспечения приемлемой температуры мишеней применялось водяное охлаждение. Применялись также мишени, вращающиеся со скоростью 24000 об./мин. , ориентированные под малым

углом по отношению к пучку ионов. Продукты реакций с периодами полураспада от 100 мкс до одного года регистрировались, в основном, по спонтанному делению, а также по α -распаду. Идентификация осуществлялась по периоду полураспада, по энергии α -частиц, по зависимости сечений реакций от энергии бомбардирующих ионов, сравнением выходов в перекрестных реакциях, химическими методами.

Третья глава посвящена экспериментам по синтезу СТЭ и изучению реакций полного слияния в области сильно делящихся компаунд-ядер с $Z \geq 100$. Применение пучков бомбардирующих ионов ^{48}Ca в реакциях полного слияния дает ряд преимуществ по сравнению с другими ионами. Во-первых, благодаря значительному избытку нейтронов, ^{48}Ca позволяет в наибольшей степени приблизиться к центру острова стабильности. Во-вторых, большая энергия связи дважды магического ядра ^{48}Ca дает выигрыш в получении слабозбужденных компаунд-ядер. Это способствует холодному синтезу; то есть сохранению оболочечных эффектов, вызывающих стабильность ядер СТЭ, и повышает шансы их выживания в процессе перехода в основное состояние за счет уменьшения числа ступеней испарительного каскада. В-третьих, ионы ^{48}Ca позволяют испытать при синтезе СТЭ наиболее асимметричные комбинации сталкивающихся ядер, для которых в наименьшей степени может проявиться действие динамического барьера, препятствующего слиянию.

Расчетные времена жизни сверхтяжелых ядер - продуктов реакций $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$, $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$, $^{246,248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ могут находиться в диапазоне от одного часа до нескольких лет. Поэтому мы проводили эксперименты, в которых искали спонтанное деление и α -распад сравнительно долгоживущих ядер, образующихся в указанных реакциях $Z=101$. Энергия ионов ^{48}Ca на входе в мишень равнялась 267 МэВ при облучении смеси изотопов $^{246,248}\text{Cm}$ и 255 МэВ при облучении ^{242}Pu и ^{243}Am . Потери энергии в рабочем слое мишеней составляли 20-25 МэВ. После облучения проводилась радиохимическая переработка, рассчитанная на выделение химических элементов с $Z = \text{II4-II6}$ и вероятных продуктов их α - и β -распадов с $Z = \text{I08-III}$. За время регистрации (в среднем, 200 дней) в полученных фракциях не наблюдалось спонтанное деление или α -распад неизвестных нуклидов. Был отрицательным также результат эксперимента по поиску короткоживущих ($T_{1/2} > 0,1 \text{ с}$) спонтанно делящихся продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$.

В другой серии экспериментов $^{15,19,23}/$ ионами ^{48}Ca облучались мишени ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{231}Pa , ^{233}U с целью наблюдения продуктов реакций с $Z = \text{I08-II2}$ и дочерних ядер, образующихся при α - и β -распаде первичных продуктов. В этих экспериментах не наблюдались короткоживущие ($T_{1/2} > 1 \text{ мс}$) спонтанно делящиеся нуклиды или распад дочерних ядер ^{255}Fm и ^{256}Fm .

Верхние пределы поперечных сечений образования сверхтяжелых ядер, полученные в наших экспериментах, даны на рис. 5. Результаты экспериментов по синтезу СТЭ не могли быть объяснены однозначно. С одной

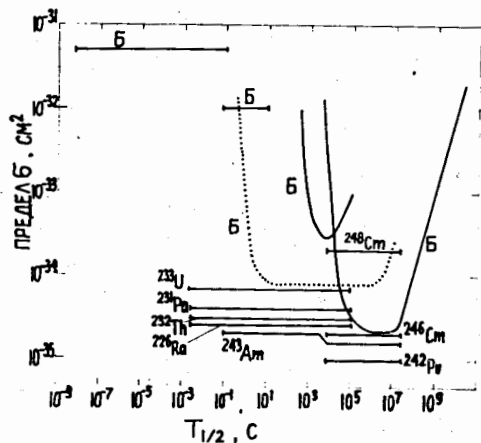


Рис. 5. Пределы поперечных сечений образования ядер СТЭ в зависимости от периода полураспада для реакций слияния с ионами ^{48}Ca . Б - результаты Беркли для реакции $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ (пунктирная кривая получена для СТЭ со свойствами благородного газа). Наши данные - горизонтальные линии с указанием мишеней, облучавшихся ионами ^{48}Ca .

стороны, искомые изотопы СТЭ могут иметь слишком короткие времена жизни, исключая их регистрацию в наших опытах. Однако не исключено, что поперечные сечения соответствующих реакций меньше пределов, указанных на рис. 5. Вопрос о поперечных сечениях слияния тесно связан с механизмом этой реакции, многие детали которого остаются пока невыясненными. Нельзя было исключить, что вероятность образования компаунд-ядер СТЭ оказывается исчезающе малой в силу причин, не допускающих холодное слияние. Имевшиеся данные и теоретические модели не позволяли дать определенного ответа на этот вопрос. Вместе с тем, некоторые закономерности, существенные для синтеза СТЭ, могли проявиться в процессе получения наиболее тяжелых делящихся ядер. Поэтому нами были выполнены эксперименты, целью которых было изучение закономерностей и оптимальных условий реакций холодного синтеза тяжелых ядер с $Z \geq 100$.

Для изучения были выбраны реакции $^{206}\text{Pb} (^{40}\text{Ar}, 2n) ^{244}\text{Fm}$ и $^{207}\text{Pb} (^{40}\text{Ar}, 3n) ^{244}\text{Fm}$. На рис. 6 показаны экспериментальные точки, отвечающие измеренным функциям возбуждения этих реакций $\sigma_{\text{в}}/I_{\text{т}}$. Они удовлетворительно описываются расчетами, в которых предполагается образование при слиянии ядер свинца и аргона статистически равновесных компаунд-ядер фермия. В таких расчетах с большой точностью определяется барьер слияния, который оказался равным $V_{\text{ц.м.}} = 162,3$ МэВ. Параметризуя барьер в виде простого соотношения

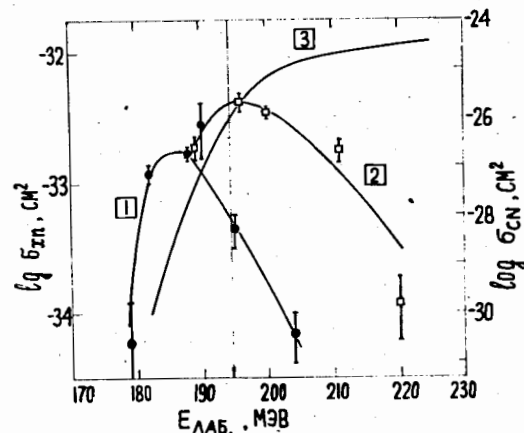


Рис. 6. Функции возбуждения реакций $^{206}\text{Pb} (^{40}\text{Ar}, 2n)$ - кривая I и $^{207}\text{Pb} (^{40}\text{Ar}, 3n)$ - кривая II. Кривая III - полное сечение реакции. Вертикальной линией со стрелкой показан барьер $V_{\text{лаб.}} = 194$ МэВ. Кривые I и II проведены через экспериментальные точки, кривая III - расчет.

$$V_{\text{ц.м.}} = Z_t Z_p e^2 / \epsilon_e (A_t^{1/3} + A_p^{1/3}), \quad (3)$$

где значки "t" и "p" относятся, соответственно, к ядрам мишени и бомбардирующего иона, находим параметр $\epsilon_e = 1,404$ фм. Особенностью функций возбуждения, показанных на рис. 6, является то, что значительная часть точек, включая максимум сечения реакции $2n$, находится при энергии ^{40}Ar ниже кулоновского барьера. Указанное обстоятельство может быть использовано для холодного синтеза ядер с $Z \geq 100$ (включая СТЭ).

Были изучены также реакции слияния ионов ^{48}Ca с ядрами ^{205}Tl , ^{208}Pb , ^{209}Bi /18,23/. С этой целью толстые мишени из Tl, Pb, Bi облучались ионами ^{48}Ca с начальной энергией $E_{\text{лаб.}} = 223, 224$ и 236 МэВ и измерялись интегральные выходы изотопов ^{248}Cf , ^{254}Fm , и $^{252, 255}\text{Fm}$ (Σ эксп.), приведенные в таблице 2. Анализ данных проводился в рамках статистического рассмотрения процесса деэвозбуждения компаунд-ядра. Расчетные величины максимальных поперечных сечений основных каналов реакций ($\sigma_{\text{макс.}}$) и интегральных выходов (Σ расч.) приведены в таблице 2. Из данных этой таблицы следуют выводы о поперечных сечениях ряда реакций полного слияния. В этих экспериментах в реакциях холодного синтеза впервые наблюдался канал испарения одного нейтрона $^{205}\text{Tl} (^{48}\text{Ca}, 1n)$, была обнаружена 10% вилка на электронный захват у изотопа $^{254}\text{102}$.

Таблица 2

Мишень	Продукт	Σ эксп мкбарн x МэВ	Канал реакции	σ макс расч мкбарн	Σ расч мкбарн x МэВ
ест ^{238}U	^{252}Fm	$0,20 \pm 0,05$	$1n$ $1p$	$0,035$ $0,004$	$0,19$
	^{246}Cf	$1,3 \pm 0,2$	$3n$ αn	$0,25$ $0,11$	$0,76$
^{208}Pb	^{254}Fm	$4,2 \pm 0,8$	$2n$	$2,1$	$1,5$
	^{246}Cf	$40,6 \pm 6,0$	$2n$	$2,1$	14
	$^{252}\text{Fm} + ^{255}\text{Fm}$	$1,2 \pm 0,2$	$1n$ 1α	$0,25$ $0,11$	$1,1$
^{209}Bi	$^{252}\text{Fm} + ^{255}\text{Fm}$	$0,93 \pm 0,16$	$1n$ αn	$0,068$ $0,037$	$1,3$
	^{246}Cf	$0,39 \pm 0,08$	$3n$	$0,034$	$0,32$

Учитывая согласие расчетных и экспериментальных данных (табл.2), мы применили этот метод расчета для оценки поперечных сечений реакций синтеза СТЭ. Для реакций $^{226}\text{Ra} (^{48}\text{Ca}, 2n)$ и $^{226}\text{Ra} (^{48}\text{Ca}, 3n)$ расчетные поперечные сечения оказались выше пределов, установленных экспериментально (см. рис. 5) при любых допустимых изменениях параметров расчета. Поэтому предпочтительно предположение, что изотопы ^{271}I , ^{272}I не наблюдались на опыте [15,23], так как их периоды полураспада по отношению к спонтанному делению < 1 мс. Из этих расчетов также следовал вывод о положении максимумов функций возбуждения реакций синтеза СТЭ на пучке ^{48}Ca .

Для рассмотрения вопроса о влиянии формы барьера деления компаунд-ядра на вероятность его образования в реакциях с ионами с $A \gg 40$ мы изучали реакции синтеза легких изотопов фермия и курчатовия, барьеры деления которых, по-видимому, существенно отличаются от тех, которые характерны для изотопов с $Z = 100-102$, $N \approx 152$. В этих экспериментах были идентифицированы новые спонтанно делящиеся изотопы: ^{242}Fm ($T_{1/2} = 0,8 \pm 0,2$ мс) и ^{254}Ku ($T_{1/2} = 0,5 \pm 0,2$ мс) и получены поперечные сечения реакций:

^{204}Pb	$(^{40}\text{Ar}, 2n)$	^{242}Fm	$1,6 \cdot 10^{-33}$	см^2
^{206}Pb	$(^{40}\text{Ar}, 4n)$	^{242}Fm	$2 \cdot 10^{-34}$	см^2
^{206}Pb	$(^{50}\text{Ti}, 2n)$	^{254}Ku	$7 \cdot 10^{-33}$	см^2

Полученные данные показывают, что различие барьеров деления компаунд-ядер, образующихся в указанных реакциях и в реакциях табл. 2, не отражается на поперечных сечениях слияния. Однако не исключено, что малая деформация в седловой точке и отсутствие жидкокапельного барьера деления могут вызвать резкое уменьшение вероятности образования компаунд-ядер СТЭ с $Z \geq 114$.

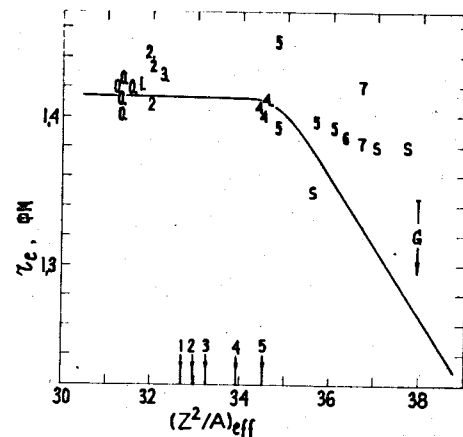


Рис. 7. Зависимость параметра барьера Z_c от параметра $(Z^2/A)_{\text{eff}}$. Символы 0-4, с точкой отвечают нашим данным. Остальные - данные других авторов. Стрелками показаны значения параметра $(Z^2/A)_{\text{eff}}$ для реакций ^{48}Ca с мишенями 1 - ^{226}Ra , 2 - ^{232}Th , 3 - ^{238}U , 4 - ^{248}Cm , 5 - ^{249}Cf .

На рис. 7 показана корреляция между параметром Z_c (см.(3)) и величиной $(Z^2/A)_{\text{eff}} = 4 Z_t Z_p / A_t^{1/3} A_p^{1/3} (A_t^{1/3} + A_p^{1/3})$, которая представляет отношение кулоновской силы расталкивания и противоположно направленной силы поверхностного натяжения для двух соприкасающихся сферических ядер. Кривая на рис. 7 следует из приближенного макроскопического описания процесса столкновения ядер, учитывающего силу трения в одностороннем приближении^{*)}. Она показывает, что при $(Z^2/A)_{\text{eff}}$, превышающем пороговое значение, барьер слияния оказывается выше кулоновского барьера. Соответствующая разница ("экстра-толчок", а для асимметричных комбинаций также "экстра-экстра-толчок") и пороговое значение $(Z^2/A)_{\text{eff}}$ плохо определяются в теории. Поэтому при рассмотрении реакций синтеза СТЭ целесообразно использовать экспериментальные данные рис. 7. Видно, что вплоть до $(Z^2/A)_{\text{eff}} \approx 38$ наблюдалось образование компаунд-ядер, причем барьер слияния мало отличался от кулоновского барьера ($Z_c \approx 1,40$ фм). Можно надеяться, что для реакций синтеза СТЭ на пучке ионов ^{48}Ca , для которых $(Z^2/A)_{\text{eff}} < 38$, параметр Z_c сохраняет

^{*)} Swiatecki W., Nucl. Phys., 1982, vol.A376, No.2, p.275-291.

указанное значение. Поэтому в новых экспериментах по синтезу СТЭ, наряду с увеличением чувствительности, необходимо обратить внимание на поиск короткоживущих продуктов. Наряду с реакциями синтеза ядер с $Z \geq 114$ целесообразно тщательное изучение реакций слияния ^{48}Ca с ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U . Помимо того, что компаунд-ядра, соответствующие этим реакциям, близки по параметрам барьера деления к уже изученным изотопам с $Z \leq 107$, для этих реакций почти нет сомнений в отсутствии или в минимальном значении динамического барьера типа "экстра-толчок" или "экстра-экстра-толчок".

В четвертой главе диссертации рассмотрены эксперименты по поиску СТЭ в природе. Существование СТЭ в природе зависит от возможности их нуклеосинтеза. Такой нуклеосинтез, по-видимому, мог иметь место в α -процессе, однако существует ряд факторов, связанных, главным образом, с делимостью тяжелых ядер, действие которых может обусловить очень низкий (в пределе - исчерпывающе малый) выход СТЭ. Низкая вероятность существования хотя бы одного долгоживущего нуклида представляет другое ограничение, резко уменьшающее возможность обнаружения СТЭ в веществе Солнечной системы. Поэтому необходимы эксперименты, рассчитанные на обнаружение ультрамалых количеств СТЭ в большом числе разнообразных природных объектов.

Нами с помощью нейтронных детекторов было изучено более сотни образцов, представлявших типичные породы земной коры и некоторые руды ^{133}I . Выбор объектов проводился по принципу наибольшей глубинности происхождения, а также наибольших концентраций элементов, которые могут быть аналогами СТЭ. Изучались разрезы массивов, приуроченных к разломам земной коры, характеризующихся наличием постоянного глубинного источника рудного вещества. Для всех образцов был получен лишь предел содержания СТЭ $\leq 1-3 \cdot 10^{-13}$ г/г.

Был проведен поиск СТЭ в природных образцах, способных концентрировать экасвинец - элемент с атомным номером 114 12,4,5,7 . Изучено около 60 образцов, выбор которых определялся возможностью сокристаллизации экасвинца с минералами-носителями. Изучались также промышленные возгоны каменного литья и возгоны высокотемпературных фуларов, в которых коэффициент обогащения свинца относительно исходных пород составлял 10^2-10^3 . Верхний предел концентрации СТЭ равнялся 10^{-12} г/г. Изучалась свинцово-цинковая руда, из пробы которой весом 800 кг выделялся свинец и фракция редких металлов (Hg , Te , Bi , Cu , Cd , In , As , Sb). Предел содержания СТЭ составил 10^{-13} г/г. Этот же предел был получен для железо-марганцевых конкреций, взятых со дна глубоководной центральной части Тихого океана 18 . Такие конкреции изучались ввиду их способности концентрировать тяжелые элементы, поступающие в придонные слои океанской воды за счет действия подводных вулканов и гидротерм.

Примитивные метеориты - углистые и неравновесные хондриты - представляют особый интерес для поисков СТЭ 14 , так как они относятся к наименее дифференцированным образованиям Солнечной системы. Нами для изучения были выбраны метеориты Саратов, Алленде и Ефремовка. Измерения на нейтронных детекторах выполнялись в соляной шахте на глубине 1100 м.в. 9,10,12,14 . За длительное время было зарегистрировано 42 множественных нейтронных события (см. табл.3). Скорость счета для образцов метеорита Алленде составила около $0,02$ день $^{-1}$ кг $^{-1}$.

Таблица 3

Образец	Вес, кг	$\bar{\epsilon}$	T, дни	Число событий с кратностью m		
				m = 2	m = 3	m = 4
Саратов	5,2	0,22	94	4	I	0
Алленде	3,9	0,22	40	3	0	0
Алленде	22,5	0,12	55	10	I	0
Ефремовка	11,7	0,12	106	14	I	0
Свинец	100	0,22	15	0	0	0
Фон	0	0,22	200	0	0	0
Алленде	10,5	0,3	45	5	2	I
Аналог	10	0,3	70	0	0	0
Свинец	150	0,3	5	0	0	0
Фон	0	0,3	50	0	0	0

Данные различных авторов о содержании урана в метеоритах и результаты наших измерений для представительной пробы метеорита Алленде показывают, что спонтанное деление примеси урана не вносит существенного вклада в наблюдаемые события. Были также проведены измерения для проверки и исключения загрязнений образцов метеоритов трансурановыми спонтанно делящимися элементами. Фон от взаимодействий космических мюонов учитывался в измерениях с пустым чувствительным объемом, с образцами свинца и аналога (образца, представлявшего смесь химически чистых реактивов, подобную по составу веществу каменных метеоритов). Указанными источниками фона можно было объяснить появление не более 2-3 множественных нейтронных событий из 42 зарегистрированных на опште.

Можно предположить, что эти события вызваны спонтанным делением содержащегося в метеоритах природного нуклида, по-видимому, относящегося к области СТЭ. Порядок величины концентрации этого нуклида: 10^{-14} г/г для метеорита Алленде. Принимая во внимание очень малую

скорость счета и возможность существования неучтенных источников фона, это предположение следует рассматривать в качестве рабочей гипотезы, которая должна быть проверена в независимых экспериментах. Величина 10^{-14} г/г может рассматриваться в качестве оценки верхнего предела распространенности СТЭ в Солнечной системе.

Возможности изучения множественных нейтронных событий в метеоритах ограничены. Поэтому представляло интерес обнаружение таких событий в химических фракциях, выделенных из геотермальных источников полуострова Челекен (Юго-Восточный Каспий) /21/. Результаты измерений таких фракций: анионно-обменной смолы, через которую пропусклась челекенская вода, и осадка гидроокисей, представлявшего минеральную фракцию, смытую со 170 кг насыщенной смолы, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Образец	Вес, кг	$\bar{\epsilon}$	Т, дни	Число событий с кратностью m				
				$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$
Насыщенная смола	9	0,27	88	31	10	1	0	0
Гидроокиси	6	0,38	10	28	14	1	0	1
- " -	-	0,4	7	23	9	3	1	0
- " -	-	0,54	6	17	6	2	1	0

В контрольных измерениях было показано, что множественные нейтронные события не могут быть объяснены известными источниками фона, включая спонтанное деление примеси урана и трансурановых элементов. Вместе с тем, полученное распределение событий по кратности подобно тому, что можно было ожидать для спонтанного деления ^{252}Cf . К сожалению, данные таблиц 3 и 4 позволяют лишь грубо оценить величины $\bar{\nu}$ и $\bar{\epsilon}^2$ и не дают возможности идентифицировать спонтанно делящийся нуклид.

В таблице 5 дана характеристика различных инструментальных методов поиска и идентификации СТЭ, о которых сообщалось в литературе /22/. Видно, что идентификация спонтанно делящегося нуклида, обнаруженного в метеоритах и в гидротермах, сильно затруднена из-за его низкой концентрации ($\sim 10^{-14}$ г/г в метеоритах и 10^{-16} - 10^{-15} г/г в гидротермах). Для получения более высокой концентрации необходима многоступенчатая химическая переработка десятков м³ исходного челекенского рассола. Для этого также целесообразен поиск геологических объектов, обогащенных по содержанию искомого нуклида в 10-100 раз по сравнению с веществом метеорита Алленде. Такой поиск с чувствительностью $\geq 10^{-13}$ г/г может быть выполнен с помощью нейтронных детекторов при условии предварительного отбора объектов изучения, основанного на анализе

предполагаемых природных механизмов миграции и обогащения ультрамалых количеств СТЭ в земной коре. Даже при этом условии потребуется изучить не менее тысячи геологических образцов /33/.

Таблица 5

Метод	Информация	Относит. чувствительность, г/г	Абсолютная чувствительность, атомы
Нейтронный детектор	$\bar{\nu}, \bar{\epsilon}^2$	10^{-15}	$3 \cdot 10^{10}$
Трековые детекторы	M_1, M_2	10^{-14}	10^{11}
Масс-сепаратор	A	10^{-12}	10^{10}
Ультравчувствительная система идентификации частиц на базе тандем-генератора	A	10^{-11}	10^6
Синхротронное излучение	Z	10^{-8}	10^9
Вынужденное деление на пучке ^4He	$\text{TKE} \sim Z^2/A^{1/3}$	10^{-10}	$2 \cdot 10^7$
- " -	Z	10^{-9}	$2 \cdot 10^8$
Ионизационная камера осколков деления с нейтронным детектором	$E_1, E_2, M_1, M_2, \bar{\nu}, \bar{\epsilon}^2$	10^{-10}	$3 \cdot 10^{10}$
Ультравчувствительный масс-спектрометр ЛИДИА	A	10^{-14}	10^6

Наибольшие перспективы при поисках и идентификации СТЭ имеет ультравчувствительный масс-спектрометр ЛИДИА (см. табл.5). На нем можно будет ставить эксперименты по непосредственной идентификации спонтанно делящегося нуклида в образцах, извлеченных химически из гидротерм (табл. 4) и, возможно, в метеоритах. Упростится химическая переработка гидротерм, которая будет проводиться на малом объеме рассола (несколько литров). На один порядок величины (от 10^{-13} до 10^{-14} г/г) будет повышен предел обнаружимой концентрации при поиске СТЭ в большом количестве геологических образцов. В исследование будут включены образцы с повышенным (по сравнению со средним для земной коры) содержанием урана, что существенно расширит диапазон излучаемых природных механизмов концентрирования СТЭ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведены эксперименты по синтезу в реакциях полного слияния с ионами ^{48}Ca долгоживущих ($T_{1/2} > 1$ ч) изотопов СТЭ с $Z = \text{II4-II6}$ и нейтронодефицитных изотопов с $Z = \text{I08-II2}$ ($T_{1/2} > 1$ мс). Исследованы реакции ^{48}Ca с мишенями: ^{242}Pu , ^{243}Am , $^{246,248}\text{Cm}$, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{231}Pa , ^{233}U . Получены верхние границы поперечных сечений 10^{-34} - 10^{-35} см².

2. Измерены функции возбуждения реакций ^{206}Pb (^{40}Ar , $2n$) ^{244}Fm и ^{207}Pb (^{40}Ar , $3n$) ^{244}Fm . Показано, что изотоп ^{244}Fm в обеих реакциях образуется в результате испарения нейтронов из компаунд-ядра, находящегося в состоянии статистического равновесия. Обнаружено, что существенная часть функций возбуждения, включая максимум функции возбуждения реакции ^{206}Pb (^{40}Ar , $2n$), отвечает энергии ^{40}Ar , на 5-7 МэВ меньшей высоты кулоновского барьера. Это должно учитываться при синтезе СТЭ для решения задачи получения компаунд-ядер с низкой энергией возбуждения.

3. Измерены выходы продуктов реакций слияния ^{48}Ca с ядрами ^{205}Te , ^{208}Pb , ^{209}Bi и определены поперечные сечения в максимуме функций возбуждения реакций: ^{205}Te (^{48}Ca , $1n$) - $\sigma = 3,5 \cdot 10^{-32}$ см²; ^{208}Pb (^{48}Ca , $2n$) - $\sigma = 6 \cdot 10^{-30}$ см²; ^{209}Bi (^{48}Ca , $3n$) - $\sigma = 3,4 \cdot 10^{-32}$ см². На основании этих данных выполнен анализ экспериментов по синтезу СТЭ в реакциях с ^{48}Ca . Сделан вывод о целесообразности проведения экспериментов по синтезу СТЭ в реакции $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ при энергии ионов ^{48}Ca < 245 МэВ.

4. В реакциях слияния ионов ^{40}Ar и ^{50}Ti получены новые спонтанно делящиеся изотопы ^{242}Fm ($T_{1/2} = 0,8$ мс) и ^{254}Ku ($T_{1/2} = 0,5$ мс). Получены оценки поперечных сечений в максимумах функций возбуждения реакций: ^{204}Pb (^{40}Ar , $2n$) ^{242}Fm - $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-33}$ см²; ^{206}Pb (^{40}Ar , $4n$) - $\sigma = 2 \cdot 10^{-34}$ см²; ^{206}Pb (^{50}Ti , $2n$) ^{254}Ku - $\sigma = 7 \cdot 10^{-33}$ см². Сделан вывод о том, что различие в форме барьеров деления компаунд-ядер с $Z = \text{I00-I02}$, имеющих числа нейтронов в диапазоне I44-I54 , не влияет на вероятность их образования в реакциях с бомбардирующими ионами с $A \geq 40$.

5. На основе современных представлений о механизме реакции слияния сложных ядер выполнен анализ экспериментальных данных. Получены следующие выводы:

а) Целесообразно проведение дальнейших экспериментов по синтезу СТЭ в реакциях $^{246,248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$, $^{244}\text{Pu} + ^{50}\text{Ti}$ и др. Однако не исключено, что отсутствие жидкокапельного барьера деления и малая величина деформации в седловой точке у ядер с $Z \geq \text{II4}$ приводят к очень малой вероятности их образования в реакциях слияния.

б) Следует обратить особое внимание на синтез ядер с $Z = \text{I08-II2}$ в реакциях слияния ^{48}Ca с мишенями ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U и др., в которых возможно образование нуклидов с периодами полураспада < 1 мс.

6. Предложен и развит новый метод детектирования и изучения событий спонтанного деления, основанный на наблюдении актов множественного испускания нейтронов из массивных образцов.

7. Разработаны детекторы нейтронов на базе счетчиков с ^3He , обеспечивающие регистрацию нейтронов делительного спектра с вероятностью, достигающей 0,73, и позволяющие детектировать события спонтанного деления при скорости счета - один акт деления за 15-20 суток в образцах весом в несколько десятков кг, что соответствует чувствительности поисков СТЭ, отвечающей концентрации 10^{-15} г/г.

8. Предложено устройство и разработан проект ультрачувствительного масс-спектрометра, рассчитанного на обнаружение и идентификацию атомов СТЭ в образцах весом около 100 мг с чувствительностью 1 атом СТЭ на 10^{14} атомов основы.

9. Проведено исследование событий спонтанного деления в геологических объектах, представляющих типичные породы земной коры и некоторые руды, в том числе мономинеральные и полиминеральные образования. Получена оценка порядка величины верхнего предела среднего содержания СТЭ в земной коре - 10^{-13} г/г.

10. Проведены эксперименты по поиску спонтанно делящихся СТЭ в примитивных метеоритах (Саратов, Алленде, Юрёмовка). В образцах метеоритов обнаружено явление множественной эмиссии нейтронов, которое не может быть объяснено источниками фона. Скорость счета множественных нейтронных событий, в среднем, $0,02$ день⁻¹ кг⁻¹, отвечает порядку величины верхнего предела распространенности СТЭ в Солнечной системе, равному 10^{-14} г/г.

Аналогичное явление множественной эмиссии нейтронов обнаружено для образцов, полученных в результате химической переработки гидротерм полуострова Челекен (Юго-Восточный Каспий).

II. Высказана гипотеза о присутствии в каменных метеоритах и гидротермах нового природного спонтанно делящегося нуклида, принадлежащего СТЭ. На основании этой гипотезы сформулированы условия экспериментов по поиску геологических объектов с концентрацией спонтанно делящегося нуклида $\geq 10^{-13}$ г/г и $\geq 10^{-14}$ г/г с использованием в качестве инструмента для анализа, соответственно, нейтронного детектора и ультрачувствительного масс-спектрометра.

В приложении к диссертации описаны эксперименты по определению периода полураспада ^{238}U по отношению к спонтанному делению, прове-

денные на основе предложенного нами способа /24,25/, и эксперименты по измерению множественности нейтронов спонтанного деления ^{238}U /13/. Рассмотрены применения нейтронного детектора при анализе примесей тяжелых элементов и изотопов ^{10}Be , ^{14}C и др. /31,3/ и возможность применения способа регистрации множественных нейтронных событий для поиска распада нуклона, связанного в атомном ядре /29/.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Тер-Акопьян Г.М., Иванов М.П., Попеко А.Г., Субботин В.Г., Фефилов Б.В., Воробьев Е.Д. Нейтронный детектор для поисков сверхтяжелых элементов в природе - Дубна, 1970 - 18 с (Сообщение/Объед.ин-та ядерн.исслед.): P13-5391.
2. Флеров Г.Н., Тер-Акопьян Г.М., Скобелев Н.К., Иванов М.П., Попеко А.Г., Субботин В.Г., Фефилов Б.В., Воробьев Е.Д. Поиск в природе сверхтяжелых элементов. - В кн.: Труды Межд. конф. по физике тяжелых ионов. (Дубна, 1971) - Дубна: ОИЯИ, Д7-5769, с.61-72.
3. Куш В., Чепигин В.И., Тер-Акопьян Г.М., Богданов Д.Д. Изучение слабых α -активностей летучих фракций свинцово-цинковой руды методом α -X-совпадений. - Атомная энергия, 1971, т.31, № 2, с.159-161.
4. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M., Popeko A.G., Skobelev N.K., Perelygin V.P., Otgonsuren O. Some Control Experiments on Search for Superheavy Elements in Nature. - In: Proc. Europ. Conf. on Nucl. Phys./Aix-en-Provence, France, 1982/. vol. 2, p.88.
5. Flerov G.N., Popeko A.G., Skobelev N.K., Ter-Akopian G.M., Chuburkov Yu.I. A Search for Superheavy Elements in Nature by Means of Spontaneous Fission. In: Proc. Int. Conf. on Nuclear Physics /Munich, FRG, 1973/. - Amsterdam: North-Holland, 1973, vol.2, p.615.
6. Флеров Г.Н., Тер-Акопьян Г.М., Скобелев Н.К., Попеко А.Г., Иванов М.П. Эксперименты по поиску в природе спонтанно делящихся нуклидов сверхтяжелых элементов. - Яд.физ., 1974, т.20, № 9, с.472-482.
7. Флеров Г.Н., Тер-Акопьян Г.М., Гецкин Л.С., Гончаров Г.Н., Попеко А.Г., Скобелев Н.К., Гвоздев Б.А., Циб П.П. Поиски тяжелого аналога свинца в свинцово-цинковых рудах и минералах. - Яд.физ., 1974, т.20, № 4, с.639-644.
8. Флеров Г.Н., Выропаев В.Я., Гецкин Л.С., Попеко А.Г., Скобелев Н.К., Тер-Акопьян Г.М., Циб П.П. Поиск сверхтяжелых элементов в железомарганцевых конкрециях. - Яд.физ., 1975, т.21, № 1, с.9-13.
9. Popeko A.G., Skobelev N.K., Ter-Akopian G.M., Goncharov G.N. Search for Superheavy Elements in Meteorites. - Phys. Lett., 1974, vol. B52, No. 4, p. 417-420.

10. Попеко А.Г., Тер-Акопьян Г.М., Скобелев Н.К., Гончаров Г.Н. Поиски сверхтяжелых элементов в метеоритах. - Яд.физ., 1975, т.21, № 6, с.1220-1224.
11. Ter-Akopian G.M., Iljinov A.S., Oganessian Yu.Is., Orlova O.A., Popeko G.S., Tretyakova S.P., Chepigin V.I., Shilov B.V., Flerov G.N. Synthesis of the New Neutron-Deficient Isotopes $^{250}\text{102}$, ^{242}Fm and ^{254}Ku . - Nucl. Phys., 1975, vol. A255, No. 2, p.509-522.
12. Ter-Akopian G.M., Results and Prospects of Searches for Superheavy Elements in Nature. - In: Proc. 4th Int. Transplutonium Elements Symp. /Baden-Baden, FRG, 1975/. - Amsterdam: North-Holland, 1976, p.359-366.
13. Попеко А.Г., Смирнов В.И., Тер-Акопьян Г.М., Фефилов Б.В., Челноков Л.П. Множественность мгновенных нейтронов при спонтанном делении ^{238}U . - Яд.физ., 1976, т.24, № 3, с.473-476.
14. Флеров Г.Н., Тер-Акопьян Г.М., Попеко А.Г., Фефилов Б.В., Субботин В.Г. Обнаружение нового спонтанно делящегося нуклида в некоторых метеоритах. - Яд.физ., 1977, т.26, № 3, с.449-454.
15. Оганесян Ю.Ц., Тер-Акопьян Г.М., Плева А.А., Чепигин В.И., Орлова О.А., Зайдель В., Селицкий Ю.А., Фунштейн В.Б., Брухертзайфер Х., Константинеску О., Шварценберг М., Гаврилов К.А., Коваленко С.С., Петржак К.А. Опыт по синтезу 108 элемента в реакции $^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$. - Дубна, 1978. - 15 с (Сообщение/Объед.ин-та ядерн.исслед. : P7-12054).
16. Oganessian Yu.Is., Bruchertseifer H., Buklanov G.V., Chepigin V.I., Choi Val Sek, Eichler B., Gavrillov K.A., Gaeggeler H., Korotkin Yu.S., Orlova O.A., Reetz T., Seidel W., Ter-Akopian G.M., Tretyakova S.P., Zvara I. Experiments to Produce Isotopes of Superheavy Elements with Atomic Numbers 114-116 in ^{48}Ca Ion Reactions. - Nucl. Phys., 1978, vol.A294, No.1/2, p.213-224.
17. Gaeggeler H., Iljinov A.S., Popeko G.S., Seidel W., Ter-Akopian G.M., Tretyakova S.P. A Study of Fusion Reactions between $^{206,207}\text{Pb}$ Nuclei and ^{40}Ar Ions near the Coulomb Barrier. - Z. Physik, 1979, vol.A289, No.4, p. 415-420.
18. Орлова О.А., Брухертзайфер Х., Музычка Ю.А., Оганесян Ю.Ц., Пустыльник Б.И., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., Чой Вал Сек. Изучение реакций слияния ионов ^{48}Ca с ядрами $^{203,205}\text{Te}$, ^{208}Pb и ^{209}Bi . - Яд.физ., 1979, т.30, № 3, с.618-625.
19. Тер-Акопьян Г.М., Брухертзайфер Х., Букланов Г.В., Орлова О.А., Плева А.А., Чепигин В.И., Чой Вал Сек. Эксперименты по синтезу нечетных нейтронодефицитных изотопов сверхтяжелых элементов в реакциях с ионами ^{48}Ca . - Яд.физ., 1979, т.29, № 3, с.608-614.

20. Попеко А.Г., Тер-Акопян Г.М. Анализ данных о множественности нейтронов при спонтанном делении нового природного нуклида, обнаруженного в некоторых метеоритах. - Яд. физ., 1979, т.29, № 3, с. 604-607.
21. Flerov G.N., Korotkin Yu.S., Ter-Akopian G.M., Zvara I., Oganessian Yu.Ys., Popeko A.G., Chuburkov Yu.I., Chelnokov L.P., Maslov O.D., Smirnov V.I., Gerstenberger R. Results of the Searches for Superheavy Nuclei in Cheleken Peninsula Geothermal Waters. - Z. Physik, 1979, vol. A292, No.1, p.43-48.
22. Флеров Г.Н., Тер-Акопян Г.М. Эксперименты по поиску сверхтяжелых элементов в природе. - Atomki Kbzlemyek, 1979, vol. 21, No.2, p.93-105.
23. Оганесян Ю.Ц., Орлова О.А., Тер-Акопян Г.М., Музыка Ю.А., Плева А.А., Пустыльник Б.И., Чепигин В.И., Флеров Г.Н. Исследование спонтанного деления изотопов некоторых тяжелых элементов и закономерностей реакций слияния в области сильно делящихся компаунд-ядер. - В кн.: Proc. IAEA Symp. on Physics and Chemistry of Fission /Jülich, FRG, 1979/. - Vienna: IAEA, 1980, vol.1, p.129-141.
24. Popeko A.G., Ter-Akopian G.M. Measurement of the ²³⁸U Spontaneous Fission Half-life by Detecting Prompt Neutrons. - Nucl. Instr. Meth., 1980, vol.178, No.1, p.163-169.
25. Попеко А.Г., Тер-Акопян Г.М. Способ определения константы спонтанного деления атомных ядер - Авт.свид.№ 728103 (СССР, 15.04.1980), - Бюллетень ОИПОТЗ, 1980, т.14, с.225.
26. Тер-Акопян Г.М., Богданов Д.Д. Масс-спектрометр - Авт.свид.№ 843027 (СССР, 30.06.1981), - Бюллетень ОИПОТЗ, 1981, т.24, с.263.
27. Ter-Akopian G.M., Popeko A.G., Sokol E.A., Chelnokov L.P., Smirnov V.I., Gorshkov V.A. A Neutron Multiplicity Detector for Rare Spontaneous Fission Events. - Nucl. Instr. Meth., 1981, vol.190, No.1, p.119-124.
28. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. The Physical and Chemical Aspects of the Search for Superheavy Elements. - Pure Appl. Chem., 1981, vol. 53, No.5, p.909-923.
29. Тер-Акопян Г.М. О возможном эксперименте по поиску распада нуклона. - Письма в ЖЭТФ, 1981, т.33, № 9, с.482-484.
30. Тер-Акопян Г.М., Богданов Д.Д., Родин А.М., Степанцов С.В., Альперт В.А., Арзуманян Г.М., Сильнов С.М., Биковский Ю.А., Флеров Г.Н. Трехступенчатый масс-спектрометр ЛИДИА. - В кн.: Третья Всесоюзная конференция по масс-спектрометрии: Тезисы докладов (Ленинград, 1981). - Л.: АН СССР, 1981, с.185.

31. Тер-Акопян Г.М., Попеко А.Г., Иванов М.П., Субботин В.Г., Бирулев М.С. Способ определения абсолютного содержания урана и спонтанно делящихся изотопов трансурановых элементов - Авт.свид.№ 450508 (СССР, 30.03.1982), - Бюллетень ОИПОТЗ, 1982, т.12, с.289.
32. Ter-Akopian G.M., Arzumanyan G.M., Bogdanov D.D., Bykovsky Yu.A., Kozlowski Z., Rodin A.M., Silnov S.M., Stepantsov S.V., Flerov G.N., Ultrasensitive Mass-Spectrometer LIDIA. - Dubna, 1982. - 4 p. /Report/JINR: E13-82-639/.
33. Флеров Г.Н., Тер-Акопян 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.И., Соболев О.А., Черепанов В.А. О поиске сверхтяжелых элементов в геологических объектах. - Дубна, 1982. - 12 с. (Препринт/Объед. ин-та ядерн.исслед.: P7-82-58).
34. Ter-Akopian G.M., Chelnokov L.P., Gorshkov V.A., Pham Ngoc Chuong, Popeko A.G., Smirnov V.I., Sokol E.A. Neutron Detectors for Study of the Rare Events of Nuclear Decay. - In: Proc. 2nd Working Meeting "Radioisotope Application and Radiation Processing in Industry". /Leipzig, GDR, 1982/. - Leipzig: Academy of Sciences of the GDR, 1982, p.159.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 мая 1983 года.