

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



3/11-75

Ф-716

P7 - 8407

779/2-75

Г.Н.Флеров

ПОИСКИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1974

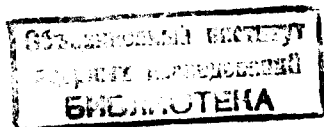
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P7 - 8407

Г.Н.Флеров

ПОИСКИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Доклад, представленный на Международную конференцию по реакциям между сложными ядрами, Нашвилл, США, 10-14 июня 1974 года.



Вопрос о существовании и свойствах сверхтяжелых элементов $Z=110-114$ тесно связан со многими фундаментальными проблемами физики. Затрагиваются такие глубокие проблемы, как физика ядерного деления, макроскопические и микроскопические аспекты динамики ядерной материи, нуклеосинтез, происхождение и состав галактических космических лучей и т.д. Можно сказать, что со сверхтяжелыми элементами связаны перспективы развития ядерной физики на ближайшие 10-15 лет, а возможно, и на более продолжительный срок. Естественно, что этот вопрос привлек внимание многих ученых. Прежде всего, им увлеклись теоретики, которые сумели внушить экспериментаторам небывалый и почти единодушный оптимизм относительно способности сверхтяжелых элементов к существованию. Менее определенны надежды на существование долгоживущих сверхтяжелых элементов в природе и предложения, касающиеся возможных путей их искусственного синтеза.

Поиски долгоживущих сверхтяжелых элементов в природных образцах

При экспериментальном подходе к сверхтяжелым элементам мы придаем большое значение поискам их в природе. Эти исследования имеют более чем пятилетнюю историю. Имеется исчерпывающий обзор Херманна^{1/}, в котором изложены результаты поисков. Аналогичный обзор сделан в недавно опубликованной нами статье^{2/}.

За это время в различных лабораториях были развиты радиометрические и другие методики, позволяющие получить исключительно высокую чувствительность и

надежность экспериментов. Наибольшее развитие получил метод поисков сверхтяжелых элементов по их спонтанному делению. Он обладает хорошей чувствительностью благодаря тому, что в природе известен пока только один спонтанно делящийся излучатель - уран. Оценки показывают, что фоном от техногенных спонтанно делящихся изотопов плутония, кюрия и калифорния, выпавших на поверхности Земли, в подавляющем большинстве случаев можно пренебречь. Таким образом, в первом приближении задача поисков сводится к регистрации редких актов спонтанного деления и выяснению вклада в наблюдаемую скорость счета от распада урана или других возможных источников фона. По-видимому, такая постановка задачи является достаточно универсальной. Действительно, если не сами долгоживущие нуклиды, то некоторые члены их цепочек распада должны испытывать спонтанное деление. Максимальная чувствительность при поиске "выживших" спонтанно делящихся элементов в природных образцах достигается, с учетом возраста Солнечной системы /около $4,7 \cdot 10^9$ лет/, для таких изотопов, у которых период полураспада близок по величине к $2 \cdot 10^9$ лет. Если самый долгоживущий изотоп из "острова стабильности" имеет период полураспада менее $2 \cdot 10^8$ лет, то обнаружить его в природе вряд ли возможно - его следует считать практически полностью "вымершим". Если же имеется изотоп с периодом полураспада существенно большим, чем 10^9 лет, например, $T_{1/2} = 2 \cdot 10^{11}$ лет, то чувствительность его обнаружения будет в 100 раз ниже. Однако в таком случае по соседству с этим изотопом должны существовать другие нуклиды, с более короткими временами жизни, среди которых будут и максимально удобные для обнаружения ядра с периодом полураспада, близким к 10^9 лет.

Среди различных способов обнаружения редких актов спонтанного деления предпочтительными являются методы непосредственной их регистрации. В нашей лаборатории с этой целью применяются пропорциональные счетчики с большой площадью исследуемых образцов / $1,5 \text{ м}^2$ / ^{2,3}, а также трековые детекторы - полимерные пленки ⁴. Последние применялись также Гейслером,

Филипсом и Уокером ⁵. Во всех случаях чувствительность метода была такова, что позволяла обнаружить в исследуемых образцах содержание сверхтяжелого элемента на уровне, соответствующем отношению $T/C = 10^{22}$ лет. /Здесь T - период полураспада искомого изотопа в годах, C - его концентрация в образце в граммах на грамм/. Рейст, Хан и фон Гунтен ⁶ использовали для регистрации осколков деления "спинеры" - счетчики, основанные на оригинальном принципе, и нашли пределы отношения $T/C \sim 2 \cdot 10^{22}$ лет для ряда образцов.

Высокой чувствительностью для обнаружения спонтанного деления в природных образцах обладают методы, основанные на регистрации мгновенных нейтронов деления. Гримм, Херрманн и Шюсслер ⁷, работая с детектором, регистрирующим нейтронные потоки, изучили более ста различных образцов на уровне чувствительности $T/C = 10^{20}$ лет, при условии, что для сверхтяжелого элемента среднее число мгновенных нейтронов деления $\bar{\nu} = 10$. Нами ^{2,8}, Чейфецем и др. ⁹ и Стоутоном и др. ^{10,11} применялись нейтронные детекторы для регистрации нескольких нейтронов в одном акте деления.

Для поисков спонтанного деления наиболее широко мы применяли две из названных методик: пропорциональные счетчики осколков деления и детекторы множественного испускания нейтронов. Трековые детекторы по чувствительности эквивалентны пропорциональным счетчикам, однако их просмотр очень трудоемок и поэтому пропорциональные счетчики более предпочтительны. Предельная чувствительность методики этих счетчиков определялась уровнем фона от спонтанного деления урана, а также фоном от вынужденного деления космическими лучами тория, висмута, свинца и других тяжелых элементов, входящих в исследуемые образцы и конструкционные материалы счетчиков. Концентрация урана в образцах надежно определялась по его вынужденному делению. С этой целью вплотную к корпусу пропорционального счетчика помещали источник нейтронов /калифорний-252 весом 100 мкг/ с блоком замедлителя. Большинство образцов, представлявших интерес для поисков сверхтяжелых элементов, имели содержание урана на

уровне 10^{-6} з/з или менее. Этим определялся предел измеримой концентрации сверхтяжелых элементов, соответствующий $T/C = 10^{22}$ лет /0,175 делений на 1 з образца в год/. Примерно такой же предел чувствительности определялся соображениями разумной длительности экспериментов: несколько делений в год на образец весом 50 з, который помещается в один счетчик. Заметим, что собственный фон аппаратуры не превышал одного импульса в год.

Фон от деления тория космическими лучами приводит к кажущемуся эффекту спонтанного деления ^{232}Th с $T_{\text{каж}} = 1,5 \cdot 10^{19}$ лет на уровне моря. Ввиду того, что концентрация тория в образцах не превышала 10^{-5} з/з, фон от его вынужденного деления можно было не учитывать.

Более существенный вклад в фон может дать вынужденное деление таких тяжелых металлов, как висмут, свинец, таллий, ртуть, входящих в некоторые образцы в больших количествах. Поэтому измерения с пропорциональными счетчиками проводились в защищенных помещениях, с толщиной перекрытий, эквивалентной 40 см, а в последующем 200 см бетона. Под защитой 40 см бетона еще обнаруживается кажущийся эффект спонтанного деления висмута /3,1 дел/год грамм $T_{\text{каж}} = 7 \cdot 10^{20}$ лет/ и свинца /1,6 дел/год грамм $T_{\text{каж}} = 1,5 \cdot 10^{21}$ лет/. Под слоем защиты 200 см этот эффект не был обнаружен /менее 0,2 дел/год грамм, $T_{\text{каж}} \geq 10^{22}$ лет/.

С помощью шести пропорциональных счетчиков, изготовленных в нашей лаборатории, на уровне чувствительности $T/C = 10^{22}$ лет было исследовано около двухсот образцов различного происхождения.

При разработке детектора событий множественного испускания нейтронов мы руководствовались тем, что для поисковой работы нужна методика, не слишком избирательная в отношении ожидаемой величины $\bar{\nu}$, характеризующей спонтанное деление сверхтяжелых элементов. Поэтому предпочтение было отдано детектору с ^3He - пропорциональными счетчиками, который обладает относительно высокой чувствительностью обнаружения

спонтанного деления в широком диапазоне величин $\bar{\nu}$, начиная с малых значений. Устройство таких детекторов подробно описано в литературе /2,8,10/. Поэтому здесь стоит указать только наиболее существенные параметры применяемой нами аппаратуры. Вокруг чувствительного объема, величина которого варьировалась в различных конструкциях от 10 до 30 л, в блоке замедлителя /парафин/ располагалось примерно 20 счетчиков с гелием-3. Электронная схема отбирала события множественной регистрации нейтронов. Ввиду того, что полная эффективность регистрации одиночных нейтронов в установке была 26%, в каждом событии могла наблюдаться только часть испущенных нейтронов. Эффективность детектора множественного испускания нейтронов сильно зависит от среднего числа мгновенных нейтронов спонтанного деления /см. рис. 1/.

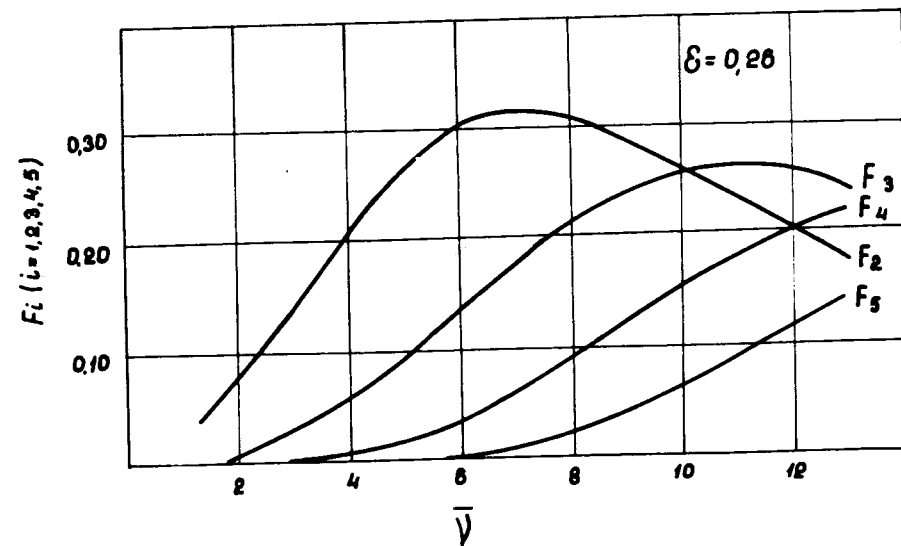


Рис. 1. Детектор событий множественного испускания нейтронов. Зависимость вероятности (F_i) регистрации событий различной кратности (i) от величины $\bar{\nu}$ - среднего числа мгновенных нейтронов, испускаемых при делении. Кривые рассчитаны для детектора, имеющего эффективность регистрации одиночных нейтронов $\epsilon = 26\%$.

Чувствительность экспериментов с нейтронным детектором определяется, в первую очередь, уровнем фона, который обусловлен взаимодействием космических лучей с материалом образца и с окружающими предметами. Ядерно-активную компоненту космических лучей удается подавить, применив сравнительно небольшую защиту в 10 м водного эквивалента /м.в.э./. Однако фон нейтронов от мюонной компоненты на небольших глубинах остается существенным. Нами были проведены фоновые измерения в подземных помещениях на глубине 10, 40, 320 и 1100 м.в.э. Приемлемые условия для работы оказались на глубине 1100 м.в.э., в соляной шахте, при использовании системы гейгеровских счетчиков, окружающих детектор нейтронов со всех сторон и включенных с ним на антисовпадения. Фон одиночных импульсов, обусловленный, главным образом, радиоактивными загрязнениями ^3He - счетчиков, для различных нейтронных детекторов составлял от 5 до 20 импульсов в час.

На рис. 2 показано, как зависит от $\bar{\nu}$ предельная величина T/C , которая могла быть измерена в наших экспериментах. При $\bar{\nu} < 4$ предельная чувствительность определялась в основном уровнем фона от спонтанного деления урана. Для излучателей с $\bar{\nu} \geq 4$ предел чувствительности определяется практически только соображениями разумной длительности опытов, которая нужна для получения статистически достоверного результата. На рис. 2 приведены также кривые, характеризующие предел возможного содержания сверхтяжелых элементов в образцах металлических свинца, ртути и вольфрама, полученные в наших экспериментах. Как можно видеть из этого рисунка и из табл. 1, чувствительность обнаружения спонтанно делящихся излучателей на нашей установке намного превышает чувствительность, достигнутую в опытах Стоутона и др. /10,11/ с аналогичным детектором, особенно при больших значениях $\bar{\nu}$. Этот успех определяется условиями работы на большой глубине, в соляной шахте, обеспечивающими надежную защиту от космических лучей. Установка Томпсона /9/ также помещается под массивной защитой, однако в ней нейтроны регистрируются по захватным гамма-лучам, которые детекти-

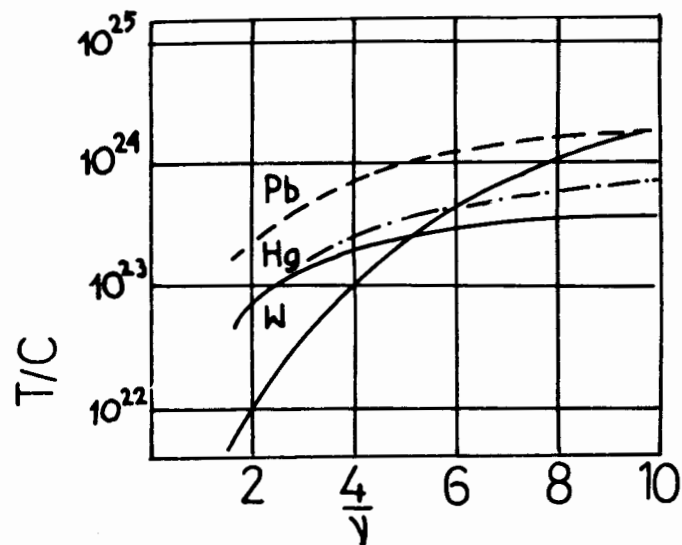


Рис. 2. Детектор событий множественного испускания нейтронов. Зависимость предельной измеримой величины T/C от $\bar{\nu}$, рассчитанная для стандартного образца /вес 20 кг, 20% тяжелого металла, $10^{-4}\%$ урана/ - жирная линия. Остальные три линии на рисунке показывают пределы содержания сверхтяжелых элементов в образцах свинца, ртути и вольфрама, полученные при измерениях на глубине 1100 м.в.э.

руются жидким сцинтиллятором и поэтому сколько-нибудь высокая чувствительность может быть достигнута только для излучателей с большим $\bar{\nu}$.

Таблица 1

Отношение чувствительности при поисках сверхтяжелых элементов для нейтронных детекторов Дубны и Окриджа /стандартный образец: вес 20 кг, 20% Pb, $10^{-4}\%$ U

$\bar{\nu}$	2	4	6	8	10
Дубна/Окридж	25	40	80	140	200

Немаловажным условием поддержания высокой чувствительности наших установок мы считаем систему мероприятий для предотвращения малейшего загрязнения лаборатории калифорнием-252. 3.10^4 атомов ^{252}Cf дают одно спонтанное деление в сутки и отношение вероятностей α -распада к спонтанному делению равно всего 25, что практически не дает возможности контролировать по α -счету "опасный" уровень загрязненности этим изотопом, как это возможно в случае с изотопами кюрия. Мы абсолютно исключили применение препаратов ^{252}Cf /кроме ампулированных источников нейтронов/.

Описанные выше методики представляют большие возможности для проведения широкого поиска сверхтяжелых элементов с высокой чувствительностью. Полученные до настоящего времени данные показывают, что если один из сверхтяжелых элементов существует в природе, то его концентрация в наиболее "удачных" объектах не превышает 10^{-12} г/г. Поэтому для концентрации этого элемента требуется проведение трудоемких химических операций в условиях, когда почти неизвестны химические свойства искомого элемента. Выбор наиболее подходящих природных образцов может значительно облегчить эту работу.

Особое внимание в связи с поисками сверхтяжелых элементов нами было уделено некоторым метеоритам, в частности, углистым и неравновесным хондритам. Химический состав этих метеоритов, по-видимому, близок составу протопланетной туманности. Поэтому они должны отражать некий "средний" уровень содержания сверхтяжелых элементов в Солнечной системе. Летучие элементы - индий, висмут, таллий, ртуть, свинец, йод, бром и др. - находятся в углистых и неравновесных хондритах в значительно более высоких концентрациях, чем в земной коре. Это, по-видимому, характерно и для сверхтяжелых элементов с $Z = 112-115$, которые должны быть химическими аналогами ряда Hg-Vi. Заметим, что Андерс и Хейманн ^{/12/} выдвинули гипотезу о связи между аномалией типа Ренаццо в содержании тяжелых изотопов ксенона в углистых и неравновесных хондритах и спонтанным делением сверхтяжелых эле-

ментов. Несмотря на ряд слабых сторон, эта гипотеза может быть принята в качестве дополнительной отправной точки для проведения поисков сверхтяжелых элементов в метеоритах.

Данные о некоторых метеоритах, представляющих интерес для поисков сверхтяжелых элементов, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Метеорит	Класс	Избыток $^{136}\text{Xe}^f$ 10^{-12} см ³ /г	Концентрация урана 10^{-8} г/г
Ефремовка	C3	108	4
Алленде	C3	45	1,62
Мигей	C2	97	1,64
Оргей	C1	54	2,4
Грозная	C3	41	-
Саратов	L4	27	0,87
Ренаццо	C3	14	1,15
Ивуна	C1	41	0,95
Лансе	C3	27	1,62

С помощью детекторов множественных нейтронных событий нами были исследованы образцы метеоритов Саратов, Ефремовка и Алленде из коллекции комитета по метеоритам АН СССР. Еще один образец метеорита Алленде весом 22,5 кг был нам любезно предоставлен Национальным музеем естественной истории США. Во всех случаях наблюдался только очень слабый счет событий, в которых регистрировались два или три одновременно испущенных нейтрона, но все же этот счет определенно превышал известные нам источники фона. На рис. 3 показаны измеренные в этих опытах величины T/C в зависимости от предположений о $\bar{\nu}$. Зарегист-

рировав 33 события при средней скорости счета - одно событие в неделю, мы еще раз критически подошли ко всем возможным источникам фона. Например, можно предположить, что опубликованные данные о содержании урана в исследованных нами метеоритах не исключают наличия в них локализаций, сильно обогащенных ураном. Такой случай, естественно, маловероятен, если учесть хотя бы относительное постоянство эффекта в различных образцах метеоритов. К сожалению, получение представительных проб изученных метеоритов было невозможно

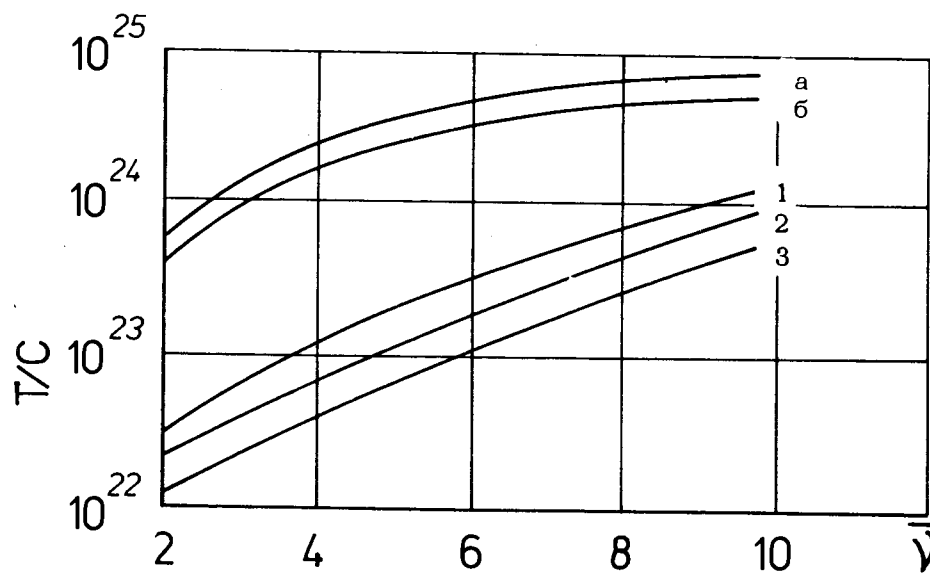


Рис. 3. Зависимость от \bar{v} величины T/C , характеризующей содержание сверхтяжелых элементов в метеоритах Саратов /1/, Алленде /2/ и Ефремовка /3/, по данным измерений на нейтронном детекторе множественных событий. Показаны также кривые, характеризующие пределы измеримых отношений T/C , которые обусловлены фоном от спонтанного деления урана /а/ и от ядерных взаимодействий космических мюонов в образце свинца /б/ на глубине 1100 м.в.э.

из-за их уникальности. Поэтому мы все же не можем сделать окончательного вывода относительно наблюдения сверхтяжелых элементов в метеоритах. Однако интерпретация полученных результатов в свете гипотезы Андерса и Хейманна представляет определенный интерес.

Мы намерены в дальнейшем провести также измерения с метеоритами совсем других типов, в частности, железными, которые представляют результат химической дифференциации исходного вещества Солнечной системы. Они обогащены так называемыми сидерофильными элементами, а элементы с атомными номерами 111, 110... как аналоги Au, Pt должны принадлежать именно этому геохимическому классу.

Данные, полученные при изучении метеоритов типа углистых хондритов, на наш взгляд, следует рассматривать как некоторое указание на возможное присутствие долгоживущих сверхтяжелых элементов в телах Солнечной системы. Однако концентрация этих элементов в среднем не превышает $10^{-14} - 10^{-15}$ г/г. Поэтому сами углистые хондриты из-за малых количеств вещества, доступного экспериментированию, не могут быть подвергнуты химической переработке. Для химических экспериментов остаются только земные образцы, среди которых можно попытаться найти наиболее удачные, обогащенные искомым элементом за счет тех или иных геохимических механизмов.

При поисках тяжелого аналога свинца - элемента с порядковым номером 114, нами было исследовано около 60 образцов, выбор которых определялся возможностью изоморфной сокристаллизации экасвинца с минералами-носителями /13/. В число этих образцов входили сульфидные руды, обогащенные галенитом, а также сульфосолями свинца, мышьяка и сурьмы: геокронитом, джемсонитом, цинкенитом, гетероморфитом. Исследовались алюмосиликаты, обогащенные редкими щелочными элементами и таллием - микроклин, мусковит, лепидолит, поллуцит. Были изучены также промышленные возгоны каменного литья и возгоны высокотемпературных фумарол Ключевской сопки, в которых коэффициент обогащения свинца относительно исходных базальтов составлял от

ста до тысячи. Минеральные образцы отбирались из широкого интервала по времени образования месторождений от 40 млн. лет до 3,5 млрд. лет.

В большинстве изученных образцов не была обнаружена какая-либо избыточная активность. В некоторых свинцово-цинковых сульфидных рудах из месторождений с "низкотемпературной" ассоциацией минералов наблюдался эффект, который в несколько раз превышал возможный фон от спонтанного деления примеси урана. Этот эффект, измеренный с помощью пропорциональных счетчиков осколков деления, мог соответствовать содержанию в рудах сверхтяжелого элемента на уровне отношения $T/C = 4.10^{21}$ лет. Однако результаты, полученные для этих же руд на детекторе нейтронов, могли быть согласованы с данными пропорциональных счетчиков только в предположении, что такая активность спонтанного деления сопровождается испусканием очень малого числа мгновенных нейтронов ($\bar{\nu} \approx 1,5$). Целый ряд химических методов, нацеленных на выделение сверхтяжелых элементов, не дал положительного результата, несмотря на то, что химическим процедурам подвергались большие массы руды /до нескольких сотен килограммов/.

В дальнейшем основное внимание было уделено поиску образцов, для которых мог быть предложен определенный механизм естественного обогащения экаталлия. Среди целого ряда образцов, которые в настоящее время изучаются и относительно которых пока рано делать определенные выводы, отметим геотермальные водные источники южного Каспия /п/о Челекен/. Естественно предположить, что высокотемпературные возгоны, поднимающиеся по глубинным разломам земной коры, имеющим контакт с верхними слоями мантии, должны быть обогащены летучими компонентами. Эти возгоны растворяются в глубинных термальных водах, к которым относятся и гидротермы Челекена. Челекенские воды обогащены легколетучими металлами, такими как кадмий, таллий, свинец и др. Следовательно, весьма вероятно, что они значительно обогащены и летучими сверхтяжелыми элементами. Оценки показывают, что коэффициент обогащения минеральной фракции этих вод может достигать

величины 10-100 по сравнению с вмещающими породами. При определенных условиях из рассолов выпадают осадки, которые, в свою очередь, могут быть обогащены по сравнению с водой в $10^4 - 10^5$ раз.

Подобные осадки сульфидов железа, содержащие около одного процента таллия, проявили на опыте активность спонтанного деления, в несколько раз превышающую уровень фона от урана / $T/C = 4.10^{21}$ лет/. Однако и в этом случае измерения на детекторе нейтрона свидетельствовали о малом значении $\bar{\nu} \approx 1,5$. В настоящее время проводятся эксперименты с целью обогащения указанной активности. Эта задача представляется непростой, так как речь идет об изучении активности, уровень счета которой пока не превышает одного деления за 20-30 суток на 50 г вещества. Тем не менее, гидротермальные воды, на наш взгляд, представляют один из наиболее благоприятных объектов для химических экспериментов, так как не требуют растворения больших масс вещества. Некоторые эксперименты находятся в стадии выполнения. Так, проведено извлечение тяжелых элементов из Челекенского рассола на ионообменные смолы. Через одну тонну смолы было пропущено 2.10^6 литров рассола. Полученный сорбент в настоящее время исследуется.

Резюмируя результаты описанных выше экспериментов, следует отметить, что пока мы не располагаем однозначными доказательствами существования сверхтяжелых элементов в природе. Некоторые полученные результаты, в особенности данные опытов с метеоритами, указывают на присутствие неизвестной природной активности спонтанного деления, которая характеризуется очень малым значением числа $\bar{\nu}$. Однако это обстоятельство вряд ли сможет помешать идентификации указанной активности как одного из изотопов сверхтяжелых элементов, если будут когда-нибудь получены определенные доказательства в пользу такой идентификации.

Отметим, что и в опытах других авторов были получены указания на существование не известных ранее природных активностей спонтанного деления. Наиболее

категорические утверждения на этот счет были сделаны в недавно появившейся работе Малы и др. ^{/14/}, в которой заявляется об обнаружении трех различных природных активностей спонтанного деления, выделенных в химических экспериментах из технической двуокиси гафния. Другое указание на существование сверхтяжелых элементов было получено Стефаном и др. /см. в работе ^{/14/} /, которые выделяли на масс-сепараторе из природных материалов частицы с массами 270-310. В этой фракции наблюдалось деление под действием тепловых и реакторных нейтронов. Правда, эти результаты еще не столь определенно могут быть отнесены к сверхтяжелым элементам, так как в указанную область масс могли попасть также некоторые молекулы, включающие уран или торий.

Результаты, изложенные в сообщении Малы и др. ^{/14/}, представляют, очевидно, большой интерес, так как в этой работе речь идет об очень высоком уровне обнаруженных активностей спонтанного деления $\lambda/T/C = 3 \cdot 10^{19}$ лет/, а также получены определенные сведения об их химических свойствах. Некоторые эксперименты, которые были проведены у нас с образцами, содержащими гафний, пока не дали каких-либо указаний на присутствие в них новых активностей спонтанного деления $\lambda/T/C \geq 10^{21}$ лет/. В этих экспериментах были изучены образцы химически чистой двуокиси гафния, а также концентрат, полученный в качестве побочного продукта переработки циркона и содержащий 6% гафния и $10^{-2}\%$ урана.

Поиски ядер сверхтяжелых элементов в космических лучах

Одно из наиболее перспективных направлений поисков сверхтяжелых элементов связано с исследованием состава тяжелой компоненты первичного космического излучения. Как известно, первые подобные эксперименты были выполнены Фаулером с сотрудниками в 1967 году ^{/15/} с помощью ядерных фотоэмульсий, экспонированных в верхних слоях атмосферы. В результате им удалось обнаружить след сверхтяжелой частицы, заряд которой

был оценен как $Z \approx 106$ ^{/16/}. Однако дальнейшие исследования ^{/17, 18/}, как с помощью ядерных эмульсий, так и полимерных пленочных материалов, до сих пор не дали однозначного подтверждения этого результата. Было обнаружено лишь несколько следов атомных ядер из области $Z = 90-96$. По этим данным, верхняя граница интенсивности потока сверхтяжелых ядер в первичном космическом излучении составляет менее 1 ядра на m^2 в год. Для надежного обнаружения такого потока потребовалось бы экспонировать в околоземном пространстве не менее одной тонны ядерной эмульсии и полимерных пленок в течение одного года.

Нами был избран другой путь, который, на наш взгляд, должен дать не менее надежные результаты и в то же время открывает большие возможности для увеличения статистики. Речь идет об изучении следов релятивистских ядер в минералах, входящих в метеориты, которое впервые проводилось Мореттом и др. в 1968 году ^{/19/}. Известно, что многие минералы являются прекрасными детекторами тяжелых ядерных частиц. Радиационный возраст метеоритов составляет в среднем не менее 10 млн. лет. За это время в них накапливается громадная информация о зарядовом спектре тяжелой компоненты космических лучей, которая может быть извлечена в результате анализа длин следов остановок этих частиц. Простой подсчет показывает, что один грамм метеоритного минерала эквивалентен в этом смысле тонне эмульсии или пластиков, выдержанных в течение года на околоземной орбите.

Проанализировав опыт работы с подобными минералами, накопленный различными авторами, мы выбрали в качестве объектов исследования оливины, входящие в железокаменные метеориты - палласиты. Содержание оливинов в палласитах достигает 40-70% по объему, кристаллы имеют форму прозрачных однородных зерен размерами до 5-8 мм. Изучение механизма образования следов в оливинах, включающее разработку методов травления, калибровочные измерения с ускоренными тяжелыми ионами вплоть до ксенона, а также расчеты тормозных способностей оливина для самых тяжелых атомных ядер,

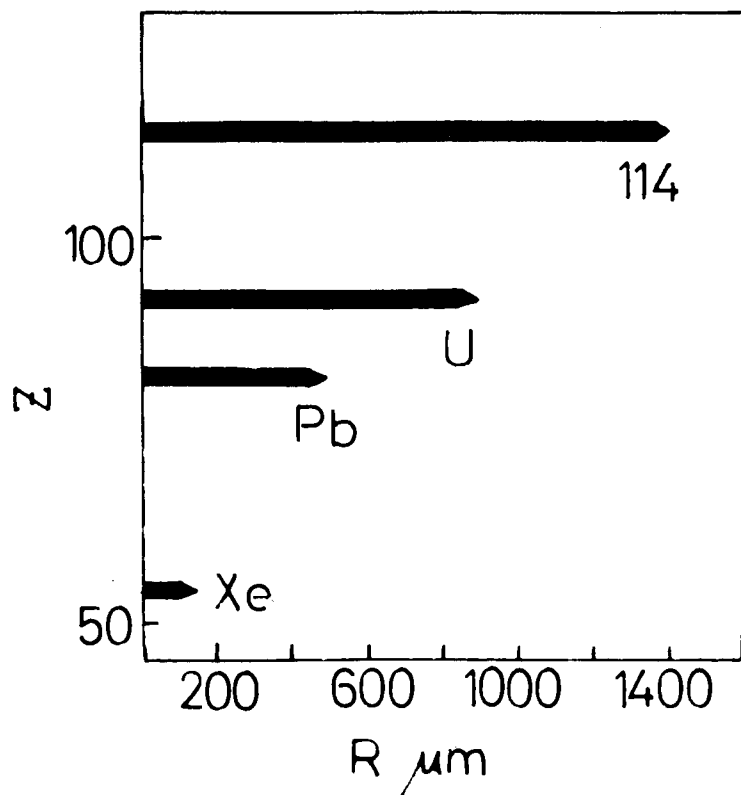


Рис. 4. Относительная длина следов отдельных ядер в оливинах /расчет/.

позволяет нарисовать зависимость длины следа от заряда ядра. Эта зависимость представлена на рис. 4, из которого видно, что длина следов ядер сверхтяжелых элементов должна быть исключительно большой - около 1,5 мм - и превышает почти в два раза следы ядер урана.

На деле ситуация оказывается несколько более сложной из-за возможной регрессии скрытого изображения, в результате облучения минералов большими потоками космических лучей или из-за длительного воздействия солнечной радиации, приводящего к нагреву метеоритов.

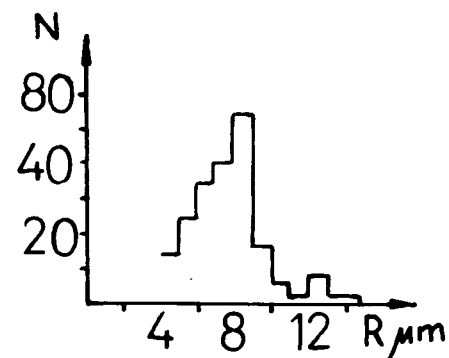


Рис. 5. Распределение длин следов космических ядер группы железа в оливине из метеорита "Липовский хутор".

Специальные опыты /20/, в которых оливины облучались большими интегральными потоками релятивистских протонов до $4,5 \cdot 10^{15} \text{ I/cm}^2$, показали, что регрессией следов, вызванной данной причиной, можно пренебречь. Эффект термической регрессии сводится, как показывает опыт, к повышению порога выявления треков в минералах, и, следовательно, к сокращению длин треков тяжелых атомных ядер $^{48}/$. На рис. 5 показан спектр следов ядер группы железа в оливинах из метеорита "Липовский хутор" /20/. Вид этого спектра позволяет заключить, что спектры ядер тяжелее железа в результате регрессии лишь несколько смещаются и размываются. Максимальное сокращение длин следов в области $Z > 36$ может составлять до 20-25%. Скорее всего, качественно, регрессия следов должна преобразовать картину, проиллюстрированную на рис. 6а, в то, что показано на рис. 6б. В пользу такого вывода говорят также результаты контрольных опытов по длительному отжигу следов в оливинах, облученных ионами Ar , Ge , Kr и Xe . При крайнем допущении о непрерывном уменьшении длин следов, кажущемся нам весьма неправдоподобным, спектры отдельных

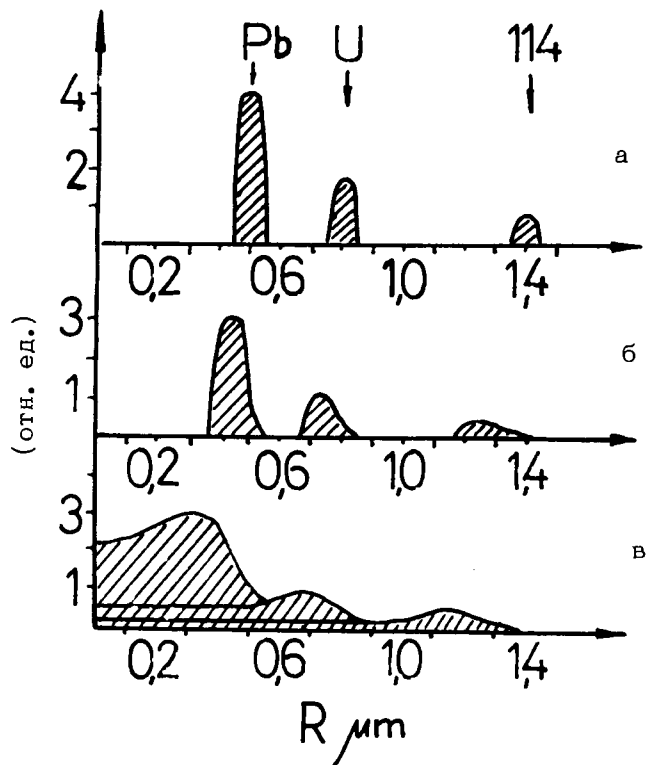


Рис. 6. Воздействие отжига на спектры длин следов ядер Pb, U и 114 элемента; а - расчетные спектры без учета регрессии; б - учет эффекта регрессии, имевшей место в метеорите "Липовский хутор"; в - непрерывное уменьшение длин следов с течением времени.

групп ядер (Pb, U, SHE) должны перекрыться /см. рис. 6в/. Однако и в этом случае возможен поиск протяженных следов ядер сверхтяжелых элементов, не успевших подвергнуться регрессии, которая могла бы привести к их нивелировке со следами группы урана.

Ответственным моментом во всей обсуждаемой задаче является выбор подходящей локализации минералов. Из-за сильного нагрева и отжига поверхности при входе в атмосферу минералы, расположенные вблизи поверх-

ности метеоритов, непригодны для исследования. В то же время из-за ограниченного пробега космических ядер, в особенности ядер наиболее тяжелых элементов, не имеет смысла изучение минералов, слишком удаленных от доатмосферной поверхности метеоритов. По-видимому, оптимальным для поисков следов сверхтяжелых ядер является слой, находящийся на глубине 4-6 см. Идентификация этого слоя представляет собой нетривиальную задачу. Нами было исследовано несколько сотен образцов из различных метеоритов типа палласитов. Отбор приемлемых локализаций минералов проводился по максимальной плотности следов ядер группы железа. Наиболее удачными оказались оливины из метеоритов "Липовский хутор" и "Марьялахти". В этих образцах плотность следов ядер группы железа составляла $/2-6 \cdot 10^6 \text{ 1/см}^2/$ в остальных случаях она колебалась в пределах $10^2 - 10^5 \text{ 1/см}^2/$. К настоящему времени

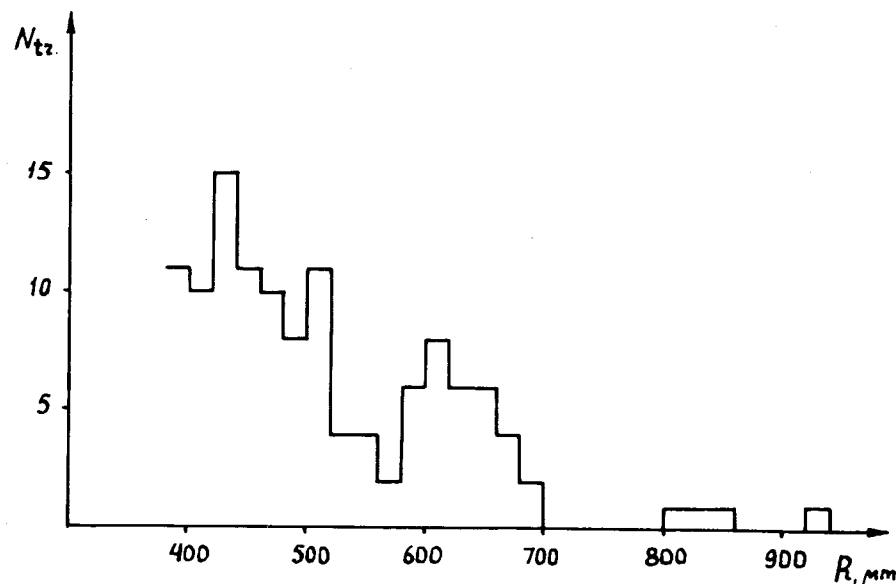


Рис. 7. Спектр длин наиболее протяженных следов космических ядер. Оливины из метеоритов "Липовский хутор" и "Марьялахти".

проведен просмотр 70 мм^3 оливин. Особое внимание уделялось анализу наиболее протяженных следов. Спектр длин этих следов представлен на рис. 7. Заметим, что по накопленной статистике этот спектр в 5 раз превышает информацию, полученную в экспериментах Фаулера с сотрудниками. Однако, как видно из рис. 7, пока не зарегистрировано ни одного следа длиной 1 мм или более, т.е. указания на присутствие в первичных космических лучах потоков ядер сверхтяжелых элементов в наших экспериментах отсутствуют. Зарегистрировано значительное число /40/ следов, длина которых находится в интервале 550-950 мкм.

Нам представляется важным дальнейшее значительное увеличение объема просмотренных минералов. Реальным является увеличение этого объема в 10 раз. Значительно увеличит ценность и надежность информации, полученной в этих экспериментах, проведение калибровочных измерений с ускоренными ионами тяжелых элементов, включая уран; возможность таких калибровок будет возникать по мере ввода в строй новых ускорителей.

Эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов в реакциях полного слияния тяжелых ядер

Результаты более чем пятилетних усилий многих групп по поискам сверхтяжелых элементов в природе можно оценивать по-разному, но в любом случае предстоит еще продолжительная и трудная работа, итог которой вряд ли можно предсказать. Поэтому эксперименты, нацеленные на искусственный синтез сверхтяжелых элементов, являются весьма актуальными.

Нам представляется, что есть два пути для приближения к решению этой проблемы. В обоих случаях требуются интенсивные пучки тяжелых ионов. Во-первых, для получения сверхтяжелых элементов можно применить традиционный метод, основанный на полном слиянии двух взаимодействующих тяжелых ядер с образованием составного ядра. Другой путь, в общих чертах, состоит в получении сверхтяжелых ядер в качестве осколков,

образующихся при мгновенном делении очень тяжелых возбужденных ядерных систем.

Очевидный недостаток метода синтеза в реакции полного слияния состоит в том, что продукты таких реакций всегда являются нейтронодефицитными. Так, наиболее тяжелые синтезированные изотопы курчатовия и нильсбория / $Z = 104$ и 105 / отстоят от линии β -стабильности на 10-15 нейтронов. Наиболее устойчивый в отношении спонтанного деления /по предсказаниям/ изотоп $^{298}_{114}$ не может быть получен этим методом в любой реальной комбинации мишень-частица.

В разное время было предпринято несколько попыток синтезировать сверхтяжелые элементы, используя реакции полного слияния с ускоренными ионами $^{40}_{18}\text{Ar}/^{21}/$, $^{66,68}_{30}\text{Zn}/^{22}/$, $^{74,76}_{32}\text{Ge}/^{23}/$ и $^{84}_{36}\text{Kr}/^{24}/$. Наиболее серьезная из них относится к 1973 году, когда в нашей лаборатории в Дубне были исследованы реакции $^{232}_{90}\text{Th} + ^{74,76}_{32}\text{Ge}$ и $^{238}_{92}\text{U} + ^{76}_{32}\text{Ge}/^{23,25}/$. Святецкий $^{126}_{54}\text{Xe}$ и Никс $^{127}_{54}\text{Xe}$ в результате анализа свойств сверхтяжелых ядер, которые могут быть получены в различных комбинациях мишеней и бомбардирующих частиц, пришли к выводу, что реакция $^{232}_{90}\text{Th} + ^{76}_{32}\text{Ge}$ наиболее перспективна для синтеза сверхтяжелых элементов. Действительно, изотопы $^{302-306}_{122}$, получающиеся в реакциях, наиболее близки к центру острова стабильности среди прочих доступных нуклидов. Особенности их радиоактивного распада, рассмотренные в работе Файзета и Никса $^{128}_{54}\text{Xe}$, таковы, что в итоге после цепочки α -распадов должно наблюдаться спонтанное деление с периодом полураспада от 1 мсек до 1 года. Этот вывод является устойчивым даже при ошибке в оценке периодов спонтанного деления в 10^{10} раз. Что касается поперечных сечений образования продуктов реакции полного слияния, то в работе Святецкого и Цанга $^{129}_{54}\text{Xe}$ была сделана оценка $\sigma = 10^{-30} \text{ см}^2$ /верхняя граница/.

Наши эксперименты с ионами германия проводились на пучке тандем-циклотрона с плазменным источником ионов. Были получены пучки $^{74}_{32}\text{Ge}$ и $^{76}_{32}\text{Ge}$ с энергией около 600 МэВ и интенсивностью 10^{11} ионов/сек. Мишени из тория и урана облучались ионами ^{74}Ge и ^{76}Ge в диапазоне

энергий от 370 до 600 МэВ/лаб. система/. Регистрировались продукты спонтанного деления, имеющие период полураспада от 1 мсек до 1 года. Результаты этих экспериментов были отрицательными. Установлена лишь верхняя граница сечения образования искомых элементов на уровне 10^{-34} см^2 .

Такая граница в $10^2 - 10^5$ раз ниже тех пределов, которые достигнуты в более ранних попытках синтеза сверхтяжелых элементов с ионами аргона, цинка и криптона и в 10 раз ниже величины, полученной в оценках Святецкого и Цанга. Последнее обстоятельство требует специального обсуждения, так как оно могло бы свидетельствовать о резком уменьшении поперечного сечения образования составного ядра при переходе к таким тяжелым бомбардирующим частицам, как германий. Проблема механизма взаимодействия двух тяжелых ядер и связанный с ней вопрос о величине поперечного сечения реакции полного слияния заслуживает самого пристального внимания. Этой проблеме было посвящено немало теоретических и экспериментальных исследований. Нам представляется, что на данной стадии отрицательный результат опытов по синтезу сверхтяжелых элементов с ионами германия не требует предположения о резком уменьшении поперечного сечения образования составного ядра в реакции типа $\text{Th} + \text{Ge}$. Имеется другая, более тривиальная причина сильного уменьшения вероятности образования ядер сверхтяжелых элементов в результате этой реакции. Эта причина заключается, очевидно, в том, что при переходе к таким тяжелым ионам, как Ge, процесс слияния оказывается энергетически менее выгодным по сравнению с другими каналами реакции. Это наглядно видно из рис. 8, взятого из работы ^{30/}, где представлены энергетические зависимости сечений образования тяжелых осколков /изотопы золота/ и продуктов реакций передач, полученных при облучении ^{232}Th ионами ^{74}Ge в широком диапазоне энергий. Вследствие повышения кулоновского барьера реакции слияния минимальное значение энергии возбуждения составного ядра $^{306}122$ составляет около 40-50 МэВ вместо 15-20 МэВ, как это предсказывалось на основании простых оценок по формуле масс ядер. Это

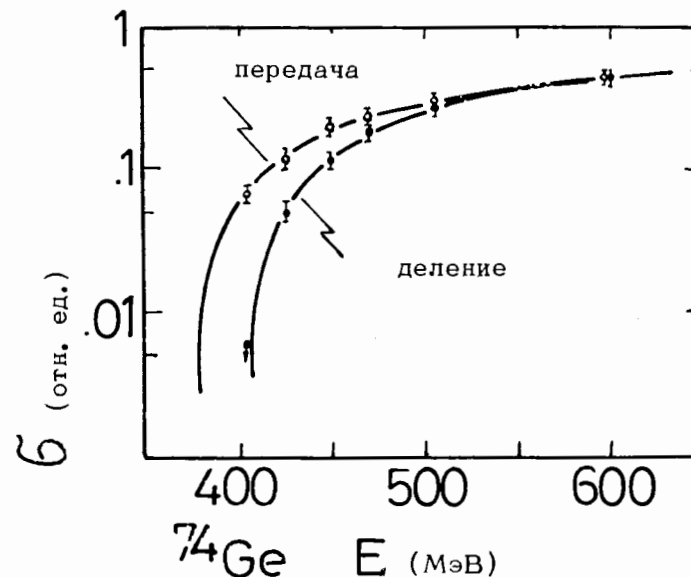


Рис. 8. Зависимости от энергии ионов ^{74}Ge выходов продуктов реакции $^{232}\text{Th}(^{74}\text{Ge}, f)$ /изотопы золота/ и реакций передачи от одного до пяти нуклонов, полученные при облучении ^{232}Th ионами ^{74}Ge .

может существенно уменьшить вероятность образования сверхтяжелых ядер в основном состоянии, вследствие конкуренции со стороны мгновенного деления. Из составного ядра должно испариться 4-5 нейтронов в условиях, когда барьер деления, обусловленный оболочечными эффектами, полностью исчезает из-за высокой энергии возбуждения.

Учитывая указанные соображения, следует думать, что среди реакций полного слияния для синтеза сверхтяжелых элементов более приемлемыми окажутся такие, в которых комбинация мишень - бомбардирующая частица более асимметрична, чем в случае $\text{Th} + \text{Ge}$. Наибольшие надежды возлагаются на реакции с ионами ^{48}Ca , такие, как $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$, $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ и другие.

С целью приближения к возможно асимметричным комбинациям мишени и бомбардирующей частицы нами было

предпринято изучение реакций с ускоренными ионами ^{40}Ar , $^{48,50}\text{Ti}$, $^{52,54}\text{Cr}$ и ^{55}Mn . С помощью плазменного источника тяжелых ионов, предназначенного для работы с твердыми веществами, на циклотроне У-300 были получены пучки этих частиц с энергией 5,5 - 6 МэВ/нуклон и с интенсивностью около 10^{12} частиц/сек.

В отдельных опытах /31/ было показано, что при переходе к таким ионам, как ^{40}Ar и ^{52}Cr , не происходит резкого увеличения кулоновского барьера слияния в сравнении с классическими расчетами с применением параметров, полученных на более легких ионах /C, O, Ne/. Действительно, как видно из рис. 9, взятого из работы /31/, барьеры реакций деления $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, f)$ и $^{238}\text{U}(^{40}\text{Ar}, f)$ совпадают с барьерами реакций передачи нескольких нуклонов. Переход от ^{40}Ar к более тяжелым бомбардирующим ионам ^{52}Cr не приводит к существенному изменению характера взаимодействия. В двух перечисленных реакциях, а также в реакции $^{208}\text{Pb}(^{52}\text{Cr}, f)$ / см. рис. 10/ были получены одни и те же значения $r_{\text{эфф}} = 1,44 f$.

Синтез изотопов фермия и трансфермиевых элементов

В последующих экспериментах, проведенных Оганесяном с сотрудниками, исследовался синтез изотопов фермия и трансфермиевых элементов при облучении мишеней из разделенных изотопов свинца и висмута ионами ^{40}Ar , $^{48,50}\text{Ti}$, $^{52,54}\text{Cr}$ и ^{55}Mn . Облучаемая мишень в виде тонкого слоя наносилась на поверхность диска, скорость вращения которого могла варьироваться от 24000 до нескольких оборотов в минуту. Это позволяло изучать образующиеся ядра, имеющие времена жизни от 50 мксек до нескольких секунд. Регистрация продуктов реакций проводилась по их спонтанному делению, с этой целью вблизи поверхности вращающегося диска располагались слюдяные детекторы.

Результаты подобных экспериментов представляют интерес для решения проблемы сверхтяжелых элементов по двум соображениям. С одной стороны, в них изучается образование в реакциях полного слияния таких ядер, барьер

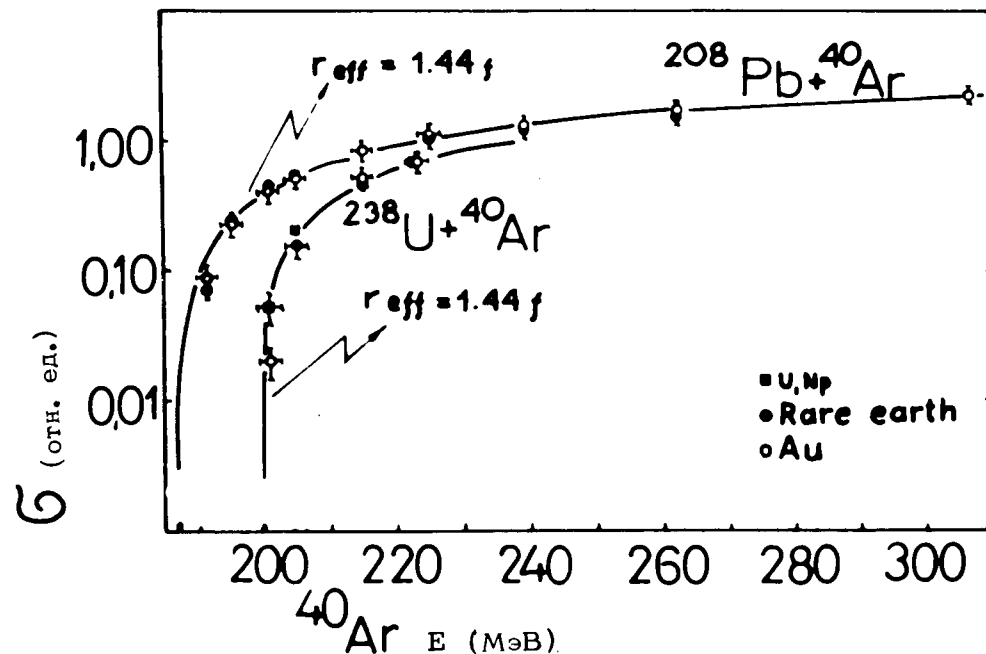


Рис. 9. Энергетическая зависимость поперечных сечений реакций деления и передачи. Круглые светлые точки соответствуют сечениям, определенным по выходам изотопов золота, образующихся в реакциях $^{238}\text{U}(^{40}\text{Ar}, f)$ Au и $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, f)$. Квадратные точки соответствуют изотопам U и Np, образованным в результате реакций передачи на урановой мишени.

деления которых по современным представлениям почти целиком обусловлен оболочечными эффектами. С другой стороны, последовательный синтез изотопов 106-108 элементов позволит приблизиться к "острову стабильности" и сделать определенные выводы относительно реальности его существования.

В качестве модельного эксперимента исследовалось образование изотопов $^{244}\text{Fm} / T_{1/2} = 3,3$ мсек, 100% сп.дел/ и $^{246}\text{Fm} / T_{1/2} = 1,3$ сек, 10% сп.дел/ в реакциях $^{206}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 2n)^{244}\text{Fm}$, $^{207}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 3n)^{244}\text{Fm}$, $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 2n)^{246}\text{Fm}$.

изотопы /вблизи $N = 152$ /, имеющие для элементов 106-108 очень короткие времена жизни. Однако при этом в полную силу работает наш метод идентификации новых изотопов по спонтанному делению, являющемуся здесь основным видом радиоактивного распада. При работе с такими мишенями, как свинец и висмут, на много порядков уменьшаются источники фона спонтанного деления. В частности, оказывается возможным изучение новых спонтанно делящихся изотопов с периодами полураспада в несколько миллисекунд и менее, так как сечения образования спонтанно делящихся изомеров, имеющих подобные времена жизни, оказываются исчезающе малыми. К сожалению, при этих временах жизни неприменим замечательный метод газовой струи, предложенный и разработанный Макфарланом^{/32/} и давший так много при синтезе 102-105 элементов.

С учетом специфики работы с короткоживущими изотопами нами разрабатываются сейчас физические методы их идентификации. Помимо метода регистрации рентгеновских квантов от осколков деления весьма полезны, по-видимому, установки типа "SASSY" и "REDUNDATRON", развитые в Беркли и Дармштадте. Для наиболее долгоживущих изотопов элементов 106 и 107, по-видимому, удастся осуществить химическую идентификацию и определить свойства некоторых их соединений^{/33/}.

Эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов на пучке ионов ксенона

Идея синтеза сверхтяжелых элементов в ядерных реакциях, происходящих при столкновении двух очень тяжелых ядер / $U+U$, $U+Xe$ / была высказана нами впервые в 1964 году^{/34/}. Если предположить, что при столкновении двух тяжелых ядер образуется система, которая затем претерпевает деление, то можно ожидать, что осколки деления будут иметь широкие распределения по массе, заряду и по энергии возбуждения. Ввиду того, что осколки деления обычно имеют некоторый избыток

σ (мбарн)

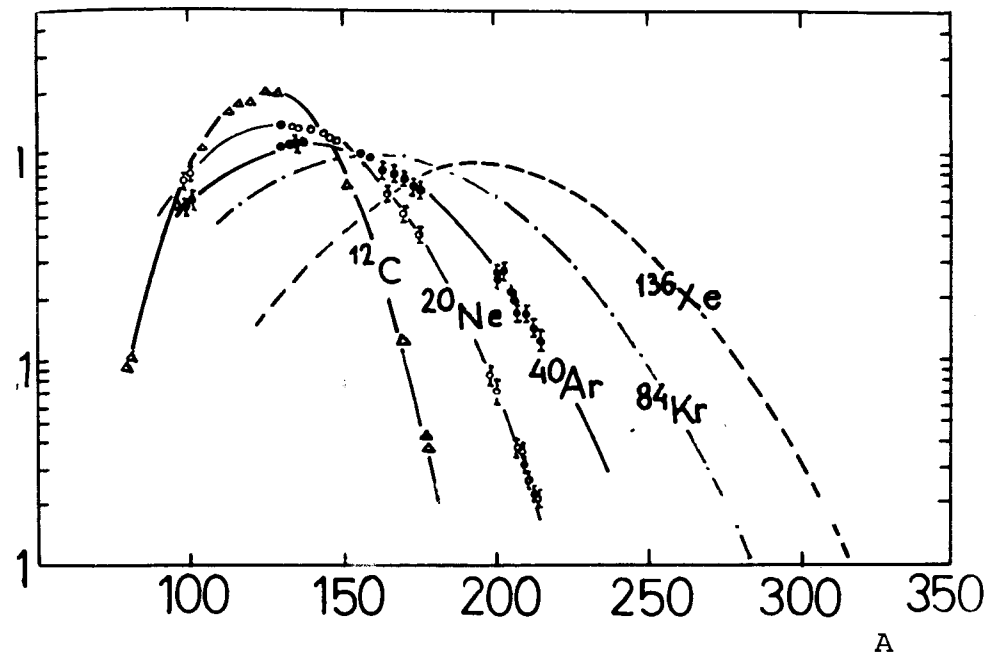


Рис. 11. Массовые распределения осколков деления, полученные при облучении ^{238}U ионами ^{12}C , ^{20}Ne и ^{40}Ar и результаты экстраполяции этих распределений для реакций $^{238}\text{U} + ^{84}\text{Kr}$ и $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$.

нейтронов, они могут включать ядра с $Z = 110-114$ и $N=184$.

В течение длительного времени в нашей лаборатории^{/35-37/} проводилось изучение реакций деления с тяжелыми ионами с целью оценки перспективности процесса для синтеза сверхтяжелых элементов. Полученные при облучении урана ионами углерода, кислорода, неона и аргона массовые и зарядовые распределения осколков подчиняются статистическим закономерностям, которые должны управлять делением возбужденных составных ядер /см. рис. 11/. Экстраполяция этих данных на более тяжелые бомбардирующие частицы позволяет рассчитывать, что при облучении урана ионами ^{136}Xe асимметрич-

изотопы /вблизи $N = 152$ /, имеющие для элементов 106-108 очень короткие времена жизни. Однако при этом в полную силу работает наш метод идентификации новых изотопов по спонтанному делению, являющемуся здесь основным видом радиоактивного распада. При работе с такими мишенями, как свинец и висмут, на много порядков уменьшаются источники фона спонтанного деления. В частности, оказывается возможным изучение новых спонтанно делящихся изотопов с периодами полураспада в несколько миллисекунд и менее, так как сечения образования спонтанно делящихся изомеров, имеющих подобные времена жизни, оказываются исчезающе малыми. К сожалению, при этих временах жизни неприменим замечательный метод газовой струи, предложенный и разработанный Макфарланом^{/32/} и давший так много при синтезе 102-105 элементов.

С учетом специфики работы с короткоживущими изотопами нами разрабатываются сейчас физические методы их идентификации. Помимо метода регистрации рентгеновских квантов от осколков деления весьма полезны, по-видимому, установки типа "SASSY" и "REDUNDATRON", развитые в Беркли и Дармштадте. Для наиболее долгоживущих изотопов элементов 106 и 107, по-видимому, удастся осуществить химическую идентификацию и определить свойства некоторых их соединений^{/33/}.

Эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов на пучке ионов ксенона

Идея синтеза сверхтяжелых элементов в ядерных реакциях, происходящих при столкновении двух очень тяжелых ядер / $U+U$, $U+Xe$ / была высказана нами впервые в 1964 году^{/34/}. Если предположить, что при столкновении двух тяжелых ядер образуется система, которая затем претерпевает деление, то можно ожидать, что осколки деления будут иметь широкие распределения по массе, заряду и по энергии возбуждения. Ввиду того, что осколки деления обычно имеют некоторый избыток

σ (мбарн)

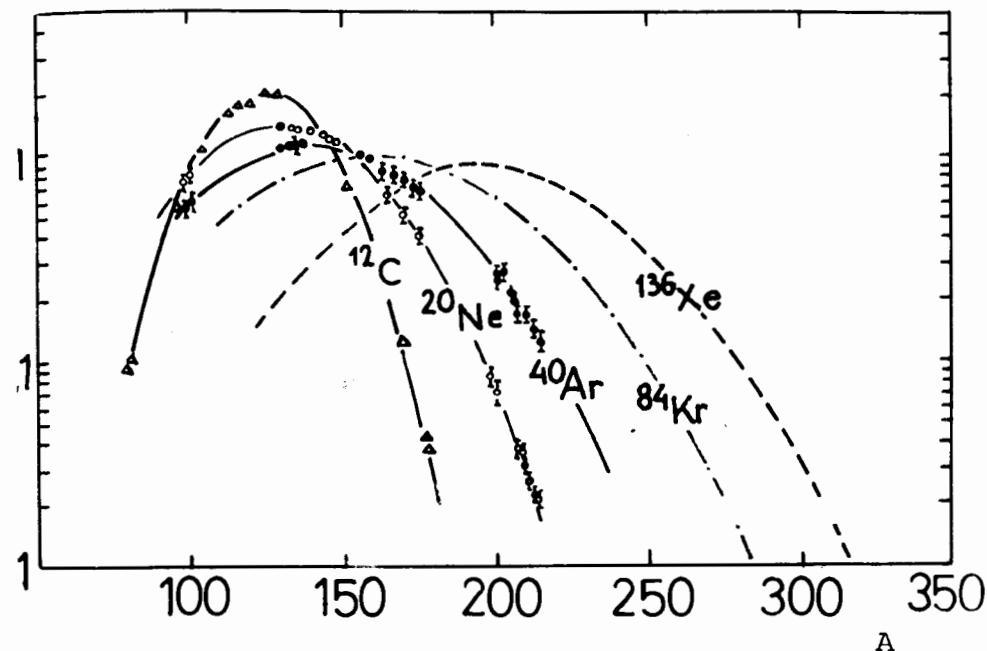


Рис. 11. Массовые распределения осколков деления, полученные при облучении ^{238}U ионами ^{12}C , ^{20}Ne и ^{40}Ar и результаты экстраполяции этих распределений для реакций $^{238}\text{U} + ^{84}\text{Kr}$ и $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$.

нейтронов, они могут включать ядра с $Z = 110-114$ и $N=184$.

В течение длительного времени в нашей лаборатории^{/35-37/} проводилось изучение реакций деления с тяжелыми ионами с целью оценки перспективности процесса для синтеза сверхтяжелых элементов. Полученные при облучении урана ионами углерода, кислорода, неона и аргона массовые и зарядовые распределения осколков подчиняются статистическим закономерностям, которые должны управлять делением возбужденных составных ядер /см. рис. 11/. Экстраполяция этих данных на более тяжелые бомбардирующие частицы позволяет рассчитывать, что при облучении урана ионами ^{136}Xe асимметрич-

ное деление составной системы $^{378}_{146}$ будет приводить, в небольшой доле случаев, к образованию осколков деления с массами около 300 и с числом протонов около 114.

В 1971 году в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ с помощью тандем-циклотрона $^{38/}$ впервые были получены пучки ионов ксенона с энергией для ^{136}Xe около 900 МэВ и интенсивностью $3 \cdot 10^{10}$ ионов/сек. Один из первых экспериментов $^{39/}$, в котором радиохимически определялся выход изотопов золота при облучении толстой урановой мишени ионами ^{136}Xe , показал, что поперечное сечение образования $^{194-196}\text{Au}$ составляет для отдельных изотопов $2-5 \cdot 10^{-28}$ см². Полученные изотопы золота легче ^{238}U примерно на 40 единиц и тяжелее бомбардирующей частицы ^{136}Xe на 60 единиц. Сечение их образования существенно превышает то, что можно было ожидать для обычной многонуклонной реакции передачи. В то же время оно согласуется с предсказаниями относительно поперечных сечений реакции деления, которые могут быть сделаны на основе экстраполяции экспериментальных кривых /рис. 11/.

Детальное изучение выходов различных продуктов реакций было проведено при облучении ионами ^{136}Xe мишени из $^{181}\text{Ta}^{40/}$. В этих экспериментах радиохимически выделялись четыре группы осколков, которые не могут относиться к продуктам реакций передачи. Это изотопы иттрия $/Z = 39/$, редкие земли от Рm до Ho $/60 \leq Z \leq 68/$, изотопы золота $/Z = 79/$ и изотопы тяжелых элементов Ra и Ac $/Z = 88, 89/$. Полученные по данным выхода 24 изотопов массовые и изотопные распределения показаны на рис. 12. Приведенные кривые имеют статистический характер и близки к тем, которые можно было ожидать при делении возбужденного составного ядра, образующегося при полном слиянии взаимодействующих ядер $^{40,25/}$.

Последний вывод эквивалентен утверждению, что при столкновении ионов ксенона с тяжелым ядром мишени образуется система, которая достигает равновесия относительно делительных степеней свободы. Это важное обстоятельство, которое установлено экспериментальным путем, служит основой для прямых экспериментов, направленных на синтез сверхтяжелых элементов. С указан-

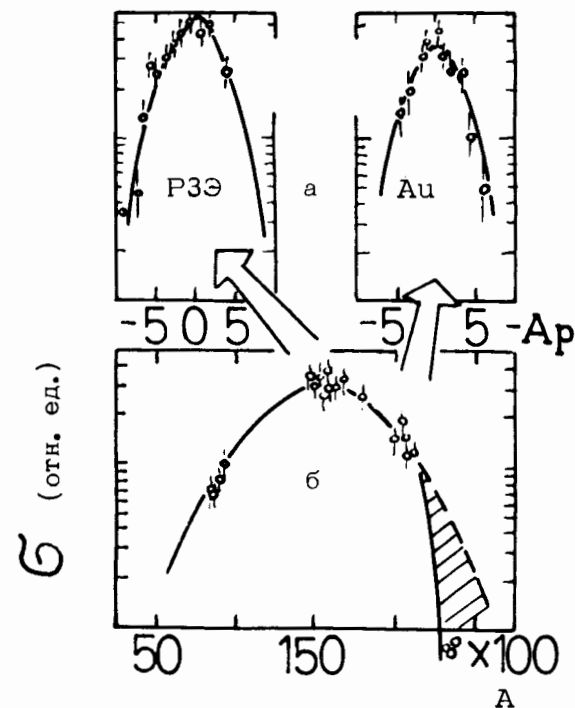


Рис. 12. Изотопные /а/ и массовые /б/ распределения ядер, образующихся в реакции $^{181}\text{Ta} + ^{136}\text{Xe}$, построенные по выходам 24 изотопов, удаленных от продуктов реакций передачи. Пунктир - распределение, исправленное на каскадное деление тяжелых осколков.

ной точки зрения метод синтеза с применением реакции деления имеет очевидное преимущество перед реакцией полного слияния, так как, вообще говоря, не требует образования сферически симметричного составного ядра. Изучение более тонких деталей взаимодействия тяжелых ядер представляет, несомненно, важную физическую проблему и должно способствовать лучшему пониманию процессов, ведущих к образованию самых тяжелых продуктов реакций, к которым принадлежат изотопы сверхтяжелых элементов.

В этой связи представляют значительный интерес результаты изучения взаимодействия ионов Kr с различными ядрами, которое было предпринято в Орсе /41,42/. Продолжение подобных экспериментов в более широком диапазоне энергий бомбардирующих ядер позволит получить ценную информацию о барьерах различных каналов взаимодействия между сложными ядрами.

Важные выводы можно сделать из полученных радио-химическим методом выходов тяжелых продуктов деления. Изотопные распределения ядер золота, образующихся при облучении ^{181}Ta ионами ^{40}Ar , ^{84}Kr и ^{136}Xe /см. рис. 13/, свидетельствуют о том, что с увеличением массы иона резко возрастает выход нейтронообогащенных изотопов /43/, которые образуются, очевидно, в реакциях асимметричного деления. Аналогичный результат был получен и для двух изотопов калифорния: ^{246}Cf и ^{254}Cf . При облучении урана ионами ^{136}Xe отношение выходов ^{254}Cf и ^{246}Cf на несколько порядков превышало это отношение, полученное в случае $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$.

Отметим, что выходы осколков с массой более 220 оказываются, как это видно из рис. 12, заниженными ввиду их нестабильности относительно деления, приводящей к "каскадному делению" /44/. В этих условиях наблюдение в реакции $\text{U} + \text{Xe}$ тяжелого изотопа ^{254}Cf , представляющего собой сильно делящееся ядро, барьер деления которого в существенной части обусловлен эффектами оболочек, свидетельствует о больших возможностях указанной реакции для синтеза сверхтяжелых ядер. Заметный выход ^{254}Cf можно объяснить тем, что наряду с широкими массовыми и зарядовыми распределениями осколки деления должны иметь также широкий спектр энергий возбуждения. Тогда определенная часть ядер может иметь достаточно низкую энергию возбуждения и будет с большей вероятностью переходить в основное состояние. Это обстоятельство является существенным для образования сверхтяжелых ядер. Если высота барьера деления ядра $^{298}\text{114}$ составляет 10-15 МэВ и имеет тенденцию уменьшаться с ростом энергии возбуждения вследствие исчезновения эффекта оболочек, то сечение образования этих ядер в основном состоянии будет определяться низко-

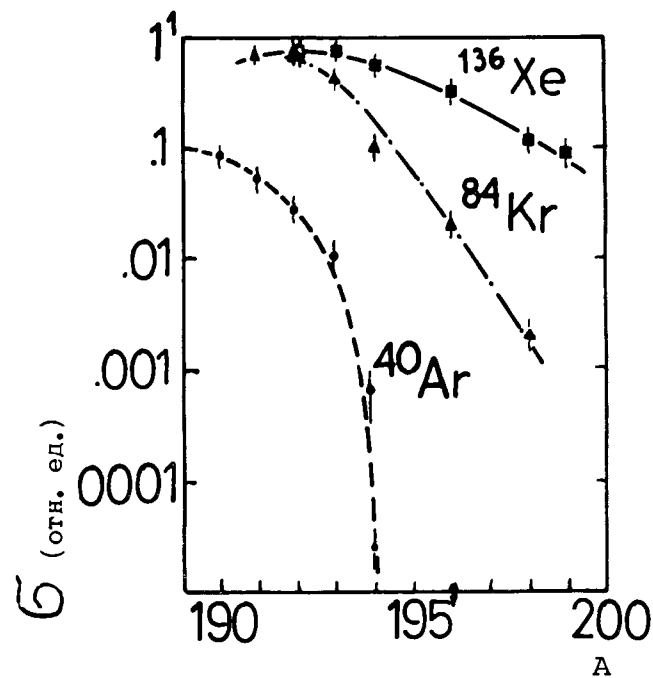


Рис. 13. Изотопные распределения ядер золота, полученные при облучении мишени ^{181}Ta ионами ^{40}Ar , ^{84}Kr и ^{136}Xe .

энергетичной частью спектра энергий возбуждения осколков / $E^* \leq 20 \text{ МэВ}$ /. Малой энергии возбуждения должна также соответствовать малая деформация осколка, что является важным обстоятельством, так как вершины барьеров деления сверхтяжелых ядер соответствуют относительно малым деформациям.

Таким образом, можно прийти к заключению, что вероятность образования сверхтяжелых ядер в основном состоянии в значительной степени определяется структурой их барьеров деления. Если принять во внимание, что с ростом барьера увеличивается стабильность ядра относительно спонтанного деления, то можно предполагать, что наибольшее сечение образования следует ожидать для наиболее долгоживущих изотопов.

Основываясь на этих соображениях, мы нацелили эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов в реакции $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$ на получение относительно долгоживущих ядер с периодами полураспада более одного дня. Было проведено несколько серий облучений длительностью от трех до десяти суток, в которых использовалась либо радиохимическая методика разделения продуктов реакций, либо проводилось измерение активности продуктов реакций с применением метода сбора ядер отдачи на тонкие фольги.

В химических опытах измерялась активность спонтанного деления двух фракций: фракция, в которую выделялись элементы семейства актинидов ($89 \leq Z \leq 103$) и фракция сульфидов тяжелых металлов от осмия до висмута ($76 < Z < 83$). Во всех случаях проводился тщательный контроль за содержанием урана. И везде примесь его в исследуемых образцах могла дать не более одного события спонтанного деления за 10 лет.

Полученные химические фракции либо фольги с ядрами отдачи наносились на стекла, которые являлись детекторами осколков деления и помещались в объем пропорциональных счетчиков, также предназначенных для регистрации осколков деления. Внутри счетчиков напротив стекол с исследуемыми образцами располагались другие стекла - детекторы осколков. Несколько пропорциональных счетчиков одновременно располагались внутри чувствительного объема нейтронного детектора с ^3He -счетчиками, который при появлении импульсов осколков деления от пропорциональных счетчиков фиксировал нейтроны, испущенные из образца. Каждое событие спонтанного деления устанавливалось по наблюдению электрического сигнала от пропорционального счетчика и подтверждалось путем травления и просмотра соответствующего стеклянного детектора.

Часть опытов была проведена с измерением энергии пары осколков деления при помощи ионизационной камеры или кремниевых поверхностно-барьерных детекторов.

Результаты экспериментов заключаются в следующем:

1. При облучении урана ионами ^{136}Xe с энергией около 900 МэВ наблюдалось образование спонтанно делящихся нуклидов. Всего было зарегистрировано около 40 событий спонтанного деления. Поперечное сечение образования этой активности составляет примерно 10^{-33} см^2 .

2. Химически указанная активность выделялась вместе с фракцией сульфидов тяжелых металлов. Активность спонтанного деления фракции элементов актинидного ряда, в которую входил ^{254}Cf , была в несколько раз ниже.

3. Обнаруженный эффект, по крайней мере, в 50 раз превышает уровень фона от спонтанного деления урана и известных трансурановых элементов.

4. Наблюденные события спонтанного деления распределены в интервале времени около 500 сут. после конца облучения. Это распределение характерно для распада одного изотопа, имеющего период полураспада около 150 дн. За последующий отрезок времени продолжительностью более одного года не было зарегистрировано ни одного события спонтанного деления. Это является дополнительным свидетельством надежности полученных результатов.

5. Среднее число мгновенных нейтронов, сопровождающих спонтанное деление этой активности, не очень велико: $1,5 \leq \bar{\nu} \leq 3,5$. Среди зарегистрированных событий спонтанного деления не наблюдалось таких, которым могло быть приписано $\bar{\nu}$ большее, чем в указанном диапазоне.

6. Суммарная кинетическая энергия осколков деления, определенная по пяти событиям, превышает 200 МэВ.

Полученные результаты можно, по нашему мнению, интерпретировать как наблюдение спонтанного деления одного из изотопов сверхтяжелых элементов или дочернего продукта, образующегося после цепочки α -распадов, проходящей через несколько таких изотопов. В пользу такого вывода свидетельствует тот факт, что активность наблюдалась во фракции сульфидов тяжелых металлов, являющихся химическими аналогами элементов из "острова стабильности". Кроме того, кинетическая энергия осколков деления данного изотопа приближается к значе-

нию, которое можно ожидать для изотопов сверхтяжелых элементов. Полученное значение $\bar{\nu}$ заметно меньше, чем можно было ожидать для сверхтяжелых ядер по расчетам ^{45,46}, основанным на простой экстраполяции делительных свойств известных атомных ядер. Однако вряд ли такие экстраполяции могут претендовать на категорические выводы. С другой стороны, не исключено, что в наших опытах наблюдалось спонтанное деление относительно легких ядер ($Z \approx 100$), получающихся в результате цепочки α -распадов. Родоначальником такой цепочки может быть сверхтяжелый изотоп с нечетным числом протонов или нейтронов. Из-за сильных запретов в отношении спонтанного деления /возможные факторы запрета, как известно, могут достигать величины $10^3 - 10^7$ / такие изотопы могут испытывать, в основном, α -распад, пока не будет получен в цепочке изотоп, испытывающий с большой вероятностью спонтанное деление.

Принимая во внимание существование спонтанно делящихся изомеров среди ядер с $Z = 92-96$, можно было бы приписать полученный эффект спонтанному делению какого-либо изомера из этой области. Однако против такого предположения свидетельствуют данные о химических свойствах наблюдаемой активности, результаты измерений кинетической энергии осколков деления, а также большой период полураспада. По двум последним соображениям должно быть также исключено и предположение, объясняющее наблюдаемый эффект явлением запаздывающего деления ⁴⁷.

Мы придаем исключительно большое значение дальнейшему исследованию полученной активности, считая, что на этом пути возможно, если не открытие сверхтяжелых элементов, то, во всяком случае, обнаружение какого-то качественно нового явления. Подобное уже однажды имело место в нашей лаборатории, когда на пути к синтезу курчатовия было открыто явление спонтанного деления изомеров. Ближайшие эксперименты, которые находятся в стадии подготовки, будут посвящены попыткам наблюдения с помощью чувствительных трековых детекторов следов нескольких α -частиц и осколков деления, исходящих из одной точки. Помимо этого, мы намерены ре-

гистрировать в совпадении с импульсами осколков деления КХ-лучи от обоих осколков, что позволит установить атомный номер делящегося ядра.

Характеризуя коротко состояние проблемы синтеза и поисков сверхтяжелых элементов, можно сказать, что эксперимент находится в самом начале пути, на котором предстоит еще многое сделать. Очевидно, в качестве исходных пунктов для продолжения исследований следует принять те эффекты, которые наблюдались до настоящего времени и с той или иной степенью вероятности могут иметь отношение к элементам из "острова стабильности". В первую очередь это относится к спонтанно делящемуся излучателю с периодом полураспада 150 дн, который обнаружен нами в реакции $U + Xe$. Новые экспериментальные возможности, появляющиеся с запуском ускорителей в Беркли, а затем в Дармштадте, позволяют надеяться, что свойства этого излучателя будут уточнены совместными усилиями в ближайшем будущем.

Литература

1. G.Herrmann. *MTP Intern. Review of Science, Ser. 2, Radiochemistry.*
2. Г.Н.Флеров, Г.М.Тер-Акопьян, Н.К.Скобелев, А.Г.Попеко, М.П.Иванов. *ОИЯИ, Р6-7588, Дубна, 1973.*
3. Г.Н.Флеров, Н.К.Скобелев, Г.М.Тер-Акопьян, В.Г.Субботин, Б.А.Гвоздев, М.П.Иванов. *ОИЯИ, Д6-4554, Дубна, 1973.*
4. Г.Н.Флеров, В.П.Перелыгин, О.Отгонсүрэн. *АЭ, 33, 979 /1972/.*
5. F.H.Geisler, P.R.Philips and R.M.Walker. *Lab. of Space Physics, Washington University Report SPP-48, 1973.*
6. K.Behringer et al. *Phys.Rev., CD, 48 (1974).*
7. W.Grimm, G.Herrmann and H.D.Schüssler. *Phys.Rev.Lett., 26, 1040, 1408 (1971).*
8. Г.М.Тер-Акопьян, М.П.Иванов, А.Г.Попеко, В.Г.Субботин, Б.В.Фефилов, Е.Д.Воробьев. *ОИЯИ, Р13-5394, Дубна, 1970.*
9. E.Cheifetz, R.C.Jared, E.K.Giusti and S.G.Thompson. *Phys. Rev., C6, 1348 (1972).*
10. R.L.Macklin et al. *Nucl.Instr. & Meth., 102, 181 (1972).*
11. R.W.Stoughton et al. *Nature Phys. Sci., 146, 26 (1973).*
12. E.Anders and P.Heymann. *Science, 164, 821 (1969).*

13. Г.Н.Флеров, Г.М.Тер-Акопьян, Б.А.Гвоздев, Л.С.Гецкин, Г.Н.Гончаров, А.Г.Попеко, Н.К.Скобелев, П.П.Цыб. ОИЯИ, Р- 7759, Дубна, 1974.
14. J.Maly, J.Merinis, Y.Ledoux and G.Boussieres, INP Orsay Report (1974).
15. P.H.Fowler, R.A.Adams, V.G.Cowen and J.M.Kidd. Proc. Royal Soc., A301, 39 (1967).
16. С.Ф.Пауэлл. Вестник АН СССР, 9, 5 /1968/.
17. D.O.Sullivan, P.V.Price, E.K.Shirk, P.H.Fowler, J.M.Kidd, E.J.Kobetich and R.Torne. Phys.Rev.Lett., 26, 463 (1971).
18. P.V.Price, P.H.Fowler, J.M.Kidd, E.J.Kobetich and G.E.Nicols. Phys. Rev., D3, 815 (1971).
19. M.Maurette, P.Tro, R.Walker and R.Webbik. Meteor. Res., 12, 286 (1969).
20. О.Отгонсүрэн, В.П.Перелыгин. ОИЯИ, Р7- 7406, Дубна, 1973.
21. S.G.Nilsson, S.G.Thompson and S.F.Tsang. Phys.Lett., 28B, 458 (1969).
22. А.Г.Демин, В.Куш, М.Б.Миллер, А.С.Пасюк, А.А.Плеве, Ю.П.Третьяков. Международная конференция по физике тяжелых ионов, 1971, Дубна, ОИЯИ, Д7- 5769, стр. 166.
А.А.Плеве, А.Г.Демин, В.Куш, М.Б.Миллер, Н.А.Данилов. ОИЯИ, Р7- 7279, Дубна, 1973.
23. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, Ю.В.Лобанов, А.А.Плеве, Г.М.Тер-Акопьян, А.Г.Демин, С.П.Третьякова, В.И.Чепизин, Ю.П.Третьяков. ОИЯИ Р7- 7409, Дубна, 1973.
24. R.Bimbot et al. Nature, 234 (1971).
P.Colombani et al. Europ. Conf. on Nuclear Physics, Aix-en-Provence, v. II, p. 91, 1972.
25. Yu.Ts. Oganessian. Intern. Conf. on Nuclear Physics, Munich, v. 2, p. 351, 1973.
26. W.J.Swiatecki. Intern. Conf. on Reactions Induced by Heavy Ions, North Holland, p. 729, 1971.
27. M.Nurmia, T.Sikkeland, R.Silva and A.Ghiorso. Phys.Lett., 26B, 78 (1967).
28. E.O.Fiset and J.R.Nix. Nucl.Phys., A193, 647 (1972).
29. W.J.Swiatecki and C.F.Tsang. Nucl.Chem.Div. Annual Report, LBL-666, p. 138 (1972).
30. Ю.Ц.Оганесян, Д.М.Надкарни, Нгуен Так Ань, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник. ЯФ 19, 486 /1974/.
31. Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, К.А.Гаврилов, Ким Де Ен. ОИЯИ Р7- 7863, Дубна, 1974.
32. R.Macfarlane, R.A.Gough, N.S.Oakey and D.F.Torgerson. Nucl. Instr. & Meth., 73, 285 (1969).

33. I.Zvara. Preprint JINR E12-7547 (1973).
34. G.N.Flerov and V.A.Karnaikhov. Comptes Rendus du Congres International de Physique Nucleaire 1964, Paris, v. I, p. 373.
35. Yu.Ts.Oganessian. Intern. Symposium on Nuclear Structure IAEA, Vienna, p. 489, 1968.
36. С.А.Карамян, Ф.Нормуратов, Ю.Ц.Оганесян. ЯФ 8, 690 /1968/.
37. С.А.Карамян, Ю.Ц.Оганесян. ЯФ 9, 715 /1969/.
38. И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, Б.А.Загер, С.И.Козлов, И.В.Колесов, А.Ф.Линев, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, Ю.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. ОИЯИ Р9- 6062, Дубна, 1971.
39. Ю.Ц.Оганесян, О.А.Орлова, Ю.Э.Пенионжкевич, К.А.Гаврилов, Ким Де Ен. ЯФ 12, 249 /1972/.
40. G.N.Flerov, Yu.Ts.Oganessian. JINR Preprint E7-6838, Dubna, 1972.
41. B.Tamain, M.Lefort, C.Ngo and J.Peter. Europ. Conf. on Nuclear Physics, Aix-en-Provence, v. 2, p. 30, 1972.
42. M.Lefort, C.Ngo, J.Peter and B.Tamain. Nucl.Phys., A216, 166 (1973).
43. Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Нгуен Так Ань, Д.М.Надкарни, К.А.Гаврилов, Ким Де Ен, М.Юссонуа. ОИЯИ Р7- 7168, Дубна, 1973.
44. Ю.А.Музычка, Ю.Ц.Оганесян, М.И.Пустыльник, Г.Н.Флеров. ЯФ 6, 306 /1967/.
45. J.R.Nix. Phys.Lett., 30B, 1 (1969).
46. H.W.Schmitt and U.Mosel. Nucl.Phys., A186, 1 (1972).
47. Н.К.Скобелев, В.И.Кузнецов. ЯФ 5, 1136 /1967/.
48. V.P.Perelygin, N.H.Shadieva, S.P.Tretiakova, R.Boos, R.Brandt. Nucl.Phys., A127, 577 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел
28 ноября 1974 года.