

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.



P15 - 4315

Г. Н. Флеров

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

НОВЕЙШИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА.
ПЕРСПЕКТИВЫ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ПОИСКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1969

P15 - 4315

Г.Н.Флеров

**НОВЕЙШИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА.
ПЕРСПЕКТИВЫ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ПОИСКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Направлено в журнал "Общая химия" и в
Оргкомитет конференции ЮНЕСКО, посвященной 100-летию создания
таблицы Менделеева

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

Интуитивно чувствуя глубину и чрезвычайную важность причин, приводящих к ограничению числа элементов, Менделеев писал 70 лет назад в "Основах химии": .

"Убежденный в том, что исследование урана, начиная с его природных источников, поведет еще ко многим новым открытиям, я смело рекомендую тем, кто ищет предметов для новых исследований, особенно тщательно заниматься урановыми соединениями".

Надо вспомнить, что в момент открытия периодической системы элементов - одного из самых фундаментальных законов естествознания - Марии Склодовской-Кюри еще не было года. Открытие естественной, а затем и искусственной радиоактивности последовало многими годами позже. Мне кажется, что идея трансмутации элементов в то время могла бы в какой-то степени даже затруднить выявление тех закономерностей, которые Д.И.Менделеев обобщил в своем величайшем законе. Я хочу сегодня рассказать о том, какова ситуация в изучении всего разнообразия атомных ядер, и показать, что периодический закон природы призван играть выдающуюся роль в обеспечении прогресса в этой области.

Свойства ядер в значительной степени определяются их зарядом. В этом ядерная физика совпадает с химией. Столь же важно в ядерной физике, в отличие от химии, и изотопическое число - атомный вес. При изменении атомного веса от изотопа к изотопу свойства ядер существенно меняются.

Поэтому свойства ядер обычно систематизируют в зависимости от Z и A .

Рис. 1 дает ответ на вопрос о соотношении того, что уже сделано в изучении ядер, и того, что еще предстоит сделать.

Это своего рода карта изотопов, где по осям отложены Z -число протонов и N - число нейтронов в ядре. Черными клетками представлены стабильные изотопы, их число около 300.

После открытия искусственной радиоактивности, когда стало возможным создавать новые нестабильные изотопы, удалось, используя всевозможные ускорители и различные типы ускоренных частиц, создать еще свыше 1500 изотопов (заштрихованная область на рис. 1). Таким образом, число известных изотопов сейчас равно приблизительно 2000.

Анализ вопроса, сколько изотопов и элементов может существовать, приводит к выводу, что число изотопов различных элементов, которые живут тысячные доли секунды и более, составляет, по-видимому, около 5000 (область, ограниченная сплошными линиями на рис. 1).

Возникает естественный вопрос: заниматься ли дальше изучением уже синтезированных изотопов, уточняя наши знания об их свойствах, либо синтезировать новые? Мы в Дубне дали для себя следующий ответ. Ценность информации, полученной из исследования изотопа, находящегося далеко от области стабильности, значительно больше того, что мы узнаем, изучая изотопы, находящиеся вблизи этой области. Это - общий методологический подход, который используется и физиками, и химиками, - изучать свойства вещества в экстремальных условиях его существования. Изотопы, далекие от области β -стабильности, являются предельными в том отношении, что в одном случае, когда протонов мало и число нейтронов относительно велико, основную роль играют ядерные силы; в другом случае, когда имеется избыток протонов, весьма существенную роль играют кулоновские силы отталкивания, вплоть до того, что становится возможным радиоактивный распад ядер с испусканием протонов.

В связи с этим становится понятным наш особый интерес к изучению ядер трансурановых элементов, где кулоновские силы настолько велики, что преодолевают ядерные силы притяжения. Почти исчезает потенциа-

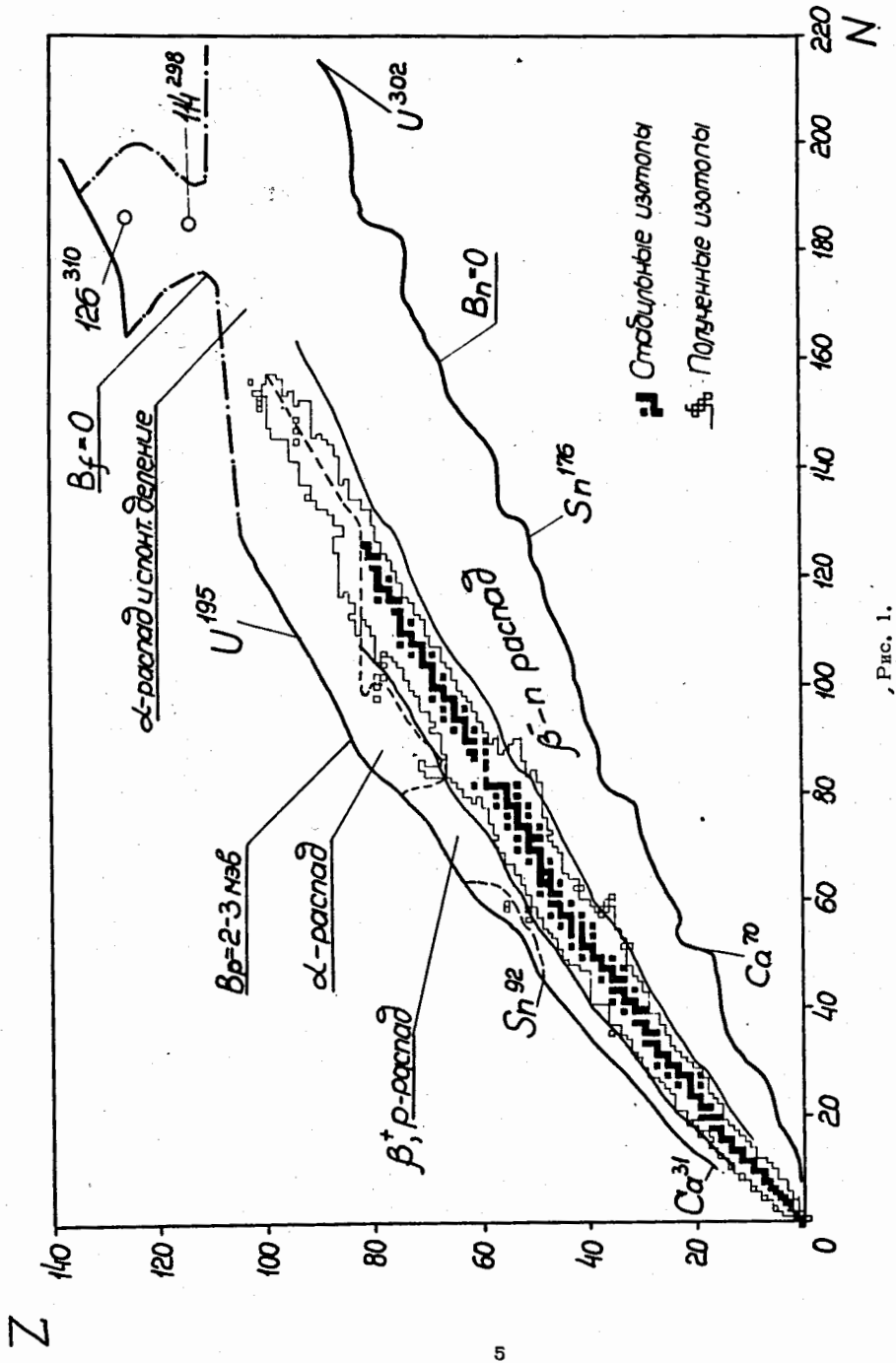


Рис. 1.

ный барьер, удерживающий в равновесии ядро как целое, и оно делится на осколки. В то же время специфически ядерные эффекты, связанные с внутренней структурой ядра, могут быть выражены чрезвычайно сильно. Именно в этой области элементов открыт новый вид ядерной изомерии — изомерия формы^{/2/}. Здесь же возможен ряд других интересных явлений, связанных, например, с наличием второго минимума в энергии деформации ядра.

Максимальные технические и научные возможности, которыми располагали учёные, всегда использовались для того, чтобы синтезировать и изучать новые элементы. К 1955 году в США были получены элементы от 93 до 101 включительно. Для этого использовались мощные реакторы, наземные, а затем и подземные ядерные взрывы, ускорители.

Необходимо подчеркнуть, что после синтеза элемента в ядерной реакции перед исследователем возникает сложнейшая задача: извлечь считанные атомы нового элемента из материала мишени, в которой, как правило, образуется смесь десятков элементов периодической системы. Масса вещества мишени, от которого нужно избавиться, в сотни миллионов раз больше, чем количество нового элемента. К этому добавляются трудности, связанные с тем, что соседние трансурановые элементы очень близки между собой по химическим свойствам. Чрезвычайно сложная задача химической идентификации новых элементов была успешно решена благодаря аналогии в свойствах между актинидным семейством и лантанидами. Поэтому название 101 элемента менделевием в честь Д.И. Менделеева было естественным признанием того, что без фундаментальных представлений о периодичности химических свойств элементов исследователям было бы значительно труднее справляться с той титанической и вместе с тем ювелирной работой, которую приходится выполнять при синтезе и изучении трансурановых элементов.

Элементы 99–100 были синтезированы в результате термоядерного взрыва "Майк", проведенного в 1952 году.^{/3/} Только через несколько месяцев после испытания один из американских теоретиков оценил выходы далеких элементов, образующихся в результате реакции последовательного захвата нейтронов, и предсказал, что в облаке, которое уже

не единожды обошло земной шар, стоит искать 99 и 100 элементы. Примерно две недели напряженного труда понадобилось, чтобы выловить из этого облака изотопы 99 и 100 элементов и определить их свойства.

В дальнейших исследованиях американцы надеялись путем увеличения плотности нейтронного потока и длительности его воздействия получить 104, 105, 106 и, возможно, даже 108 элементы. Для этого они провели серию подземных ядерных взрывов.

Нейтронный поток в центре такого взрыва измеряется буквально килограммами: через квадратный сантиметр проходит 10^{25} — 10^{26} нейтронов. Вскоре после взрыва начинали бурить скважину для взятия образцов расплавленной породы из эпицентра. Эти пробы доставлялись в "горячие" лаборатории, где из них пытались химически извлекать новые элементы. Для исследователей явилось неприятной неожиданностью, что после того, как они уже в 1952 году получили изотоп сотого элемента — фермия с массой 255, в 1966 году в результате специального особо мощного взрыва "Цикламен" все, что им удалось извлечь — был даже не новый элемент, а только более тяжелый изотоп того же самого 100 элемента с массовым числом 257^{/4/}. Последующие элементы в ядерных взрывах синтезировать пока не удалось, так как, очевидно, скорость распада промежуточных изотопов выше скорости их образования. Нужно было искать новые пути получения далеких элементов.

В 1954 году по инициативе академика И. Курчатова в Институте атомной энергии в Москве началась подготовка к синтезу новых элементов. Предполагалось, что вместо нейтронных потоков большой плотности для синтеза будут использоваться ускоренные на циклотроне тяжелые ионы (углерод, азот, неон, аргон). Слияние этих ядер с тяжелыми ядрами мишеней (уран, плутоний) приводит к образованию элементов 100–104 и более тяжелых. В этих целях в Дубне, в международном исследовательском центре социалистических стран был создан и в 1961 году запущен ускоритель тяжелых ионов (рис. 2). Вес магнита ускорителя равен 2000 тонн, мощность высокой частоты 1000 киловатт, мощность питания магнита также примерно 1000 киловатт, вакуумный объем 100 м^3 (давление $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.).

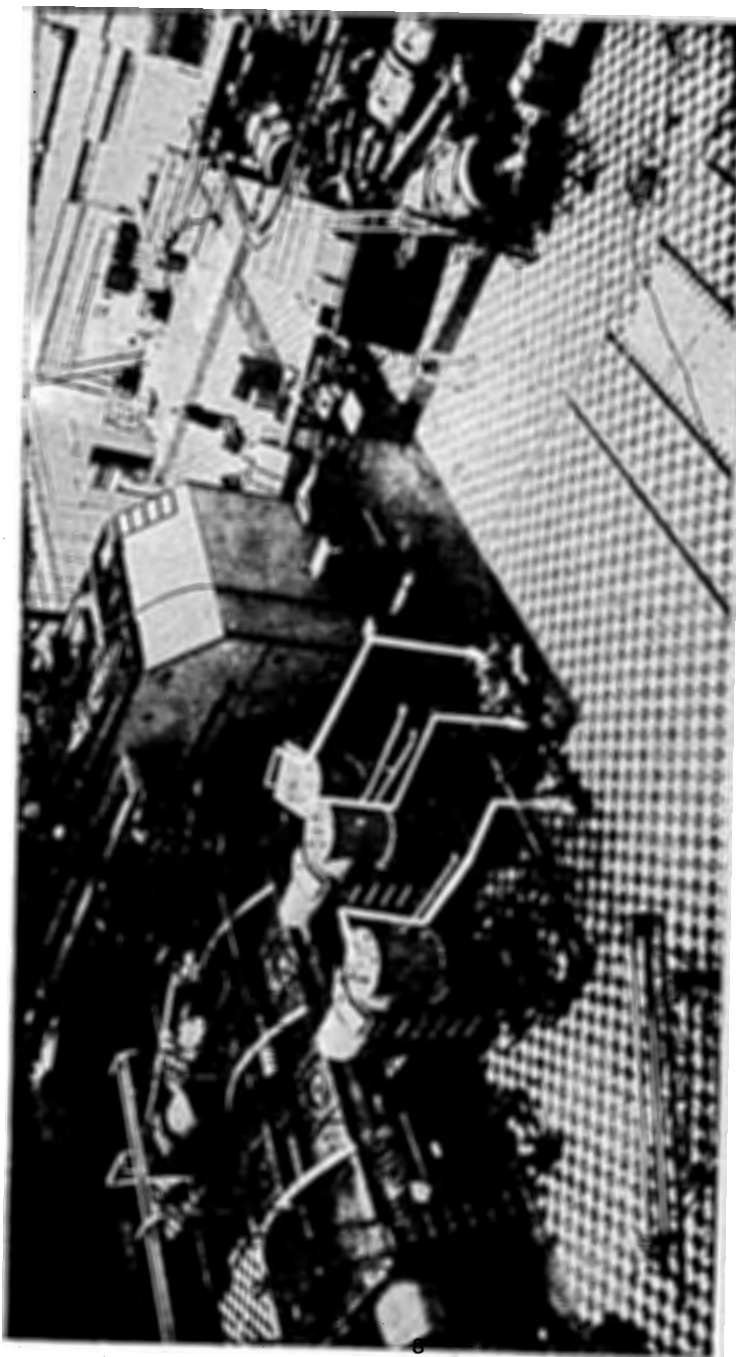


Рис. 2.

С 1961 года по сегодняшний день этот ускоритель остается самым мощным в мире среди ускорителей тяжелых ионов. Интенсивность его пучков в сотни раз больше того, что достигнуто в США, и даже в новых зарубежных проектах параметры ускорителей несколько уступают тому, что сегодня мы имеем в Дубне.

С помощью этой установки удалось ускорить такие частицы, как неон-22, являющийся основной частицей для облучения мишеней из тяжелых элементов. Нам изготовили около 100 л неона-22. Для этого пришлось разработать специальный метод разделения изотопов.

В первую очередь, мы намеревались получить элемент 104. Готовясь к его синтезу, необходимо было предварительно изучить свойства 102 элемента, и мы получили шесть его изотопов ^{5/}. Оказалось, что первые американские и шведские аналогичные работы по синтезу 102 элемента ошибочны ^{6,7/}. Перейдя к синтезу 104 элемента, мы увидели, что его выход по сравнению с элементом 102 резко падает. Время жизни также уменьшается в сотни, а иногда и тысячи раз. Даже при очень большой интенсивности пучка (десятки микроампер ионного тока) наблюдавшийся выход составлял приблизительно один атом в пять часов ^{8/}.

Полученный нами изотоп 104-го элемента живет 0,3 секунды. Несмотря на столь малый период полураспада, И.Зваре с группой химиков удалось выделить 104-й элемент из сложной смеси радиоактивных продуктов ядерных реакций, успешно применив разработанный ими газовый метод ^{8/}.

Метод основан на том, что атомы 104-го элемента путем реакции в газовой фазе переводятся в соединение с хлором, затем с газовым потоком проходят через систему адсорбентов для отделения от других атомов и в конце пути попадают в камеру со слюдяными детекторами, которые фиксируют их распад. Весь процесс нужно проводить за десятые доли секунды. Решение этой задачи потребовало нескольких лет напряженной работы. Химические опыты показали, что новый изотоп принадлежит элементу, летучий хлорид которого сходен с хлоридом гафния и резко отличается от хлоридов кюрия и калифорния, т.е. от хлоридов актинидных элементов. Таким образом, было доказано, что 104 элемент является экагафнием.

После этого мы приступили к синтезу 105-го элемента. Чтобы вести поиски более целенаправленно, мы решили прежде изучить свойства изотопов 103-го элемента, и далее, имея сведения о свойствах изотопов 102-го, 103-го и 104-го элементов, провести более уверенные экстраполяции. Нам удалось синтезировать 2 изотопа 103-го элемента с массовыми числами 256 и 257^{10/11}. Оказалось, что и в этом случае их реальные свойства не совпадают с теми, которые были им приписаны нашими американскими коллегами^{11/}.

В настоящее время мы, бомбардируя мишень из америция ионами неона, получили первые десять атомов 105-элемента и проводим дальнейшие опыты для того, чтобы уточнить его ядерно-физические свойства. Время его жизни составляет сотые доли секунды, а вероятность образования в реакции такова, что удавалось зарегистрировать один атом в течение суток.

Здесь ярко проявилась основная трудность экспериментов по синтезу новых химических элементов, а именно: все более низкие эффективные сечения образования элементов и все более короткие времена их жизни по мере возрастания атомного номера. Ясно, что получить таким же методом 106 и более тяжелые элементы — задача практически невыполнимая. Кажется, что дальнейшее продвижение в область трансурановых элементов невозможно ни одним из известных методов.

Однако в течение последнего года появились новые результаты, которые позволяют более оптимистически взглянуть на перспективы синтеза далеких трансурановых элементов.

Дело в том, что хотя уменьшение стабильности с увеличением заряда и массы ядра является общей тенденцией в свойствах нуклидов, эти свойства не меняются монотонно. Наблюдается картина, в определенном смысле аналогичная периодической системе Менделеева.

Периодичность химических свойств элементов отражает степень заполнения электронных оболочек атомов. В ядрах также существуют оболочки, замкнутые и незамкнутые, однако составлены они уже из двух сортов частиц — протонов и нейтронов. Другим осложнением является то обстоятельство, что размеры "орбит" нуклонов в ядре соизмеримы с размерами

самих частиц, и движутся они в силовом поле, которое создают сами. Поскольку вопрос о природе ядерных сил по сей день остается открытым, расчёты ядерных оболочек не отличаются большой точностью. Однако все известные экспериментальные сведения о свойствах ядер показывают, что эти свойства: форма ядра, его магнитный и механический моменты, спектры возбужденных состояний и, что для нас важно, устойчивость по отношению к различным видам распада обнаруживают резкие изменения вблизи определенных чисел протонов и нейтронов. Эти числа называются "магическими" и соответствуют заполненным оболочкам в ядре. Ядра, содержащие заполненную внешнюю оболочку, особенно устойчивы и отличаются большим временем жизни по сравнению с соседними изотопами или элементами.

Это обстоятельство дает основание надеяться, что на общем фоне уменьшения стабильности по мере продвижения в область далеких трансуранов могут возникать острова относительно устойчивых ядер, содержащих магические числа нуклонов. Вблизи урана известны магические числа 82 (по протонам) и 126 (по нейтронам). Для дальнейших экстраполяций необходимы экспериментальные данные о возможно более далеких трансурановых элементах.

Анализ свойств шести изотопов 102-го элемента, синтезированных и исследованных в Дубне, показал, что особо устойчивым является изотоп с массой 254, что соответствует $N = 152$ (рис. 3). В данном случае 152 нейтрона образуют так называемую подоболочку, также придающую ядру повышенную устойчивость. Существование подоболочки приводит к тому, что изотоп 102^{254} получается в значительно больших количествах и имеет время жизни по α -распаду и спонтанному делению существенно больше, чем его более легкие и более тяжелые соседи.

После этого теоретики нескольких стран (США, Швеции, Польши, Англии и СССР) проанализировали вопрос о существовании в сверхтяжелых ядрах, кроме подоболочек, настоящих оболочек и их влиянии на устойчивость ядер. Они пришли к выводу, что если 105 элемент живет так мало ($\approx 0,01$ сек), то с точки зрения капельной модели, ядра, скажем, 110-114-го элементов, где кулоновские силы, разрушающие

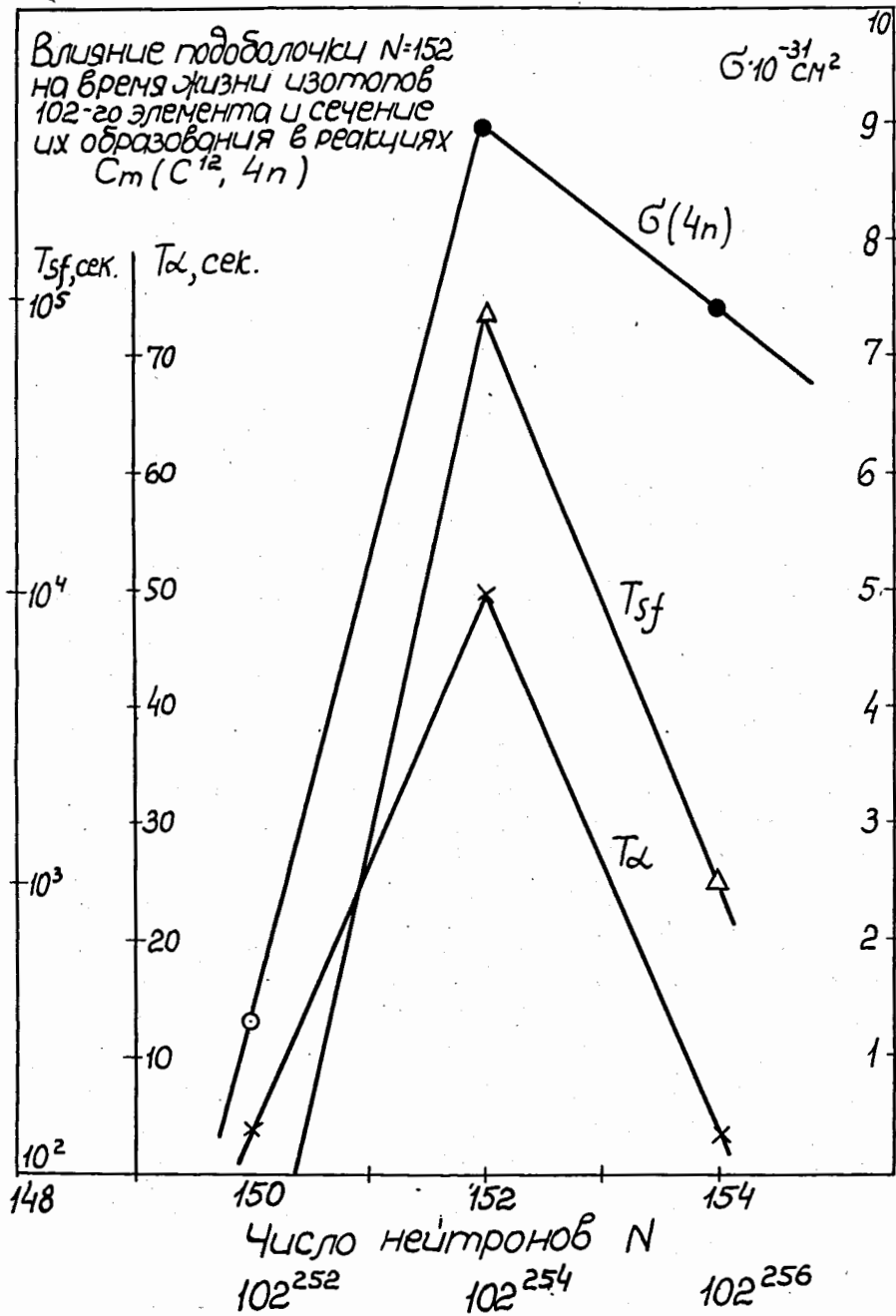


Рис. 3.

ядро, очень велики, должны жить всего 10^{-20} сек. Но если это не просто 110 или 114 элемент, а изотопы 110^{294} или 114^{298} с нейтронной оболочкой 184, то они должны жить существенно больше. На рисунке 4 приведены результаты весьма сложных расчетов, выполненных теоретиками на электронно-счётных машинах для различных изотопов элемента 114. Как вы видите, изотоп с массой 298, соответствующий $N = 184$, по спонтанному делению должен иметь период полураспада 10^{20} лет. По отношению к β -распаду он вообще стабилен, по α -распаду он должен жить также достаточно долго, по крайней мере, годы. Ясно, какие перспективы открывают подобные выводы.

Группа профессора Томпсона в США в течение года пыталась получить 114-й элемент. Американцы облучали мишень $^{248}_{98}\text{Cm}$ ионами $^{40}_{18}\text{Ar}$. Вначале результаты были как будто бы положительными, однако последующие контрольные опыты показали, что регистрировался фон от других продуктов реакций ^[12]. На этом американские опыты остановились.

Следует иметь в виду, что в этих экспериментах могли получаться ядра 114-го элемента с числом нейтронов ≈ 170 , т.е. на 14 единиц меньше, чем в замкнутой оболочке. На примере 102-го элемента было экспериментально показано, что с удалением от оболочки время жизни изотопов и вероятность их образования в реакции резко уменьшаются. С этой точки зрения отрицательный результат профессора Томпсона неудивителен. Поэтому мы у себя в Дубне решили пойти несколько иным путем, стараясь максимально приблизиться к замкнутой оболочке. Для этого надо облучать как можно более тяжелую мишень возможно более тяжелыми (нейтроноизбыточными) ядрами. Мы имеем возможность применить плутоний-244 в комбинации с кальцием-48. Хотя при этом могут получиться заведомо не очень долгоживущие изотопы, однако возможно, что их время жизни будет больше миллионной доли секунды. Этого будет достаточно для того, чтобы зарегистрировать образование нового элемента и измерить его период полураспада, что, в свою очередь, даст новые основания для дальнейших теоретических экстраполяций.

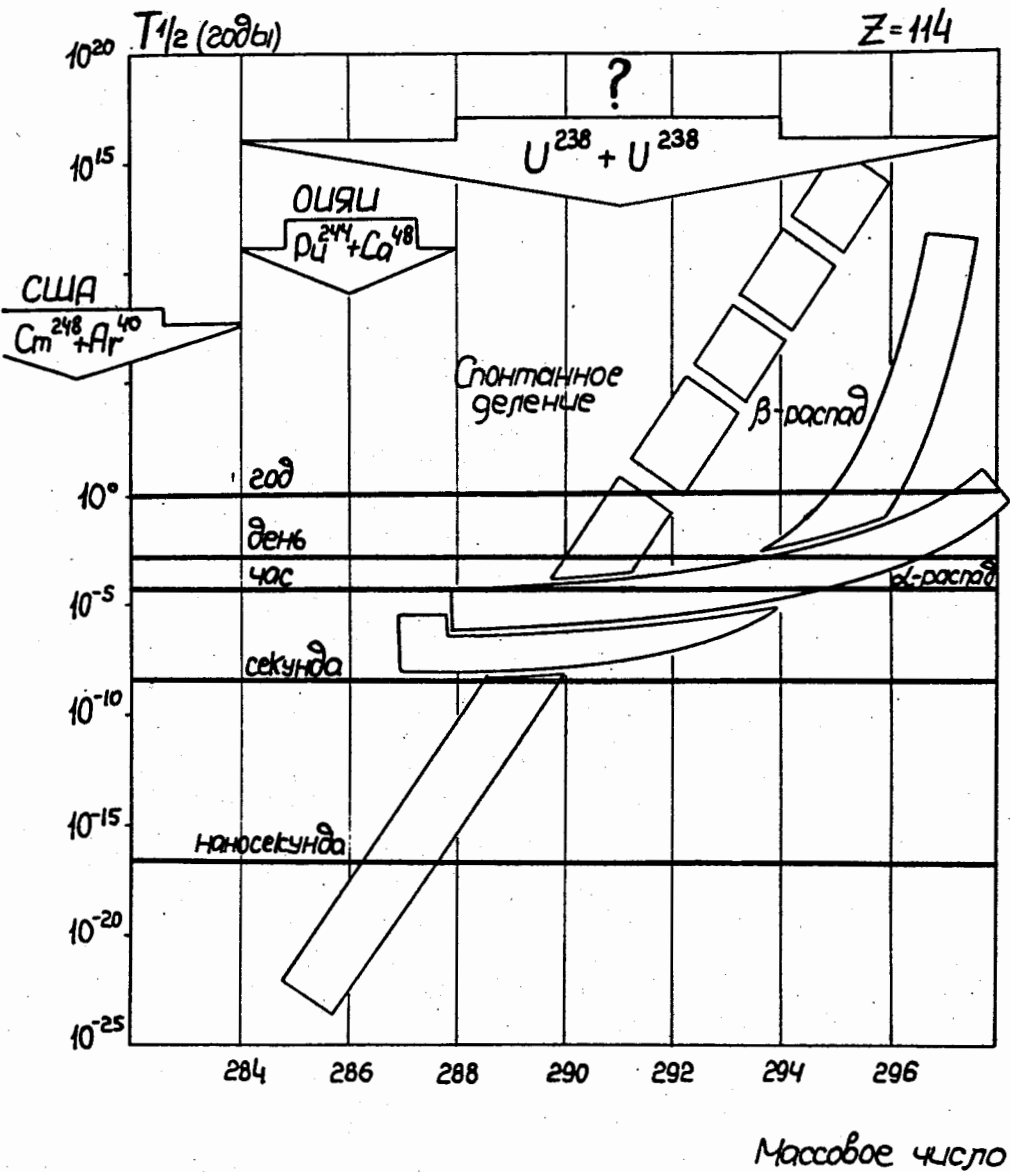


Рис. 4.

Примерно такая же ситуация ожидается и в области $Z = 126$, где также следует ожидать существования относительно стабильных ядер.

Возможно, что указанные экспериментальные трудности удастся преодолеть, если вместо реакций синтеза путем слияния использовать реакции деления. Здесь нужно объяснить, почему, скажем, при облучении урана неоном получается очень мало атомов 102 элемента. Дело в том, что возникающие при слиянии составные ядра возбуждены, и в процессе высвечивания - снятия избыточной энергии - происходит деление, вероятность которого в десятки миллионов раз больше, чем вероятность тех процессов, которые приводят к образованию 102 элемента. Деление, таким образом, мешает синтезу, и идея использования его для решения задачи может показаться несколько неожиданной.

Процесс деления приводит к продуктам широкого диапазона зарядов и масс. Если мы облучаем уран неоном, то получаются осколки деления в области $Z = 30-70$. Если бомбардировать уран ураном, то среди осколков деления будут трансурановые элементы, в том числе и далекие, и, что особенно важно, - достаточно обогащенные нейтронами. Пока мы еще не имеем пучка ускоренных ионов урана, но даже облучая уран аргоном, мы уже получаем плутоний. Будущее этого направления - дальнейшее увеличение размеров ускорителей, расширение их возможностей, ускорение ксенона и далее - урана, синтез самых тяжелых изотопов и изучение их свойств.

В свете всего изложенного представлялась логичной следующая программа работ по синтезу трансурановых элементов на ближайшее время: получение легких изотопов 114 и 126 элементов имеющимися средствами, а затем уже получение тяжелых изотопов с помощью ускоренных ионов тяжелее ксенона.

Однако в эти спокойные прогнозы неожиданно были внесены коррективы. Летом прошлого года английский физик профессор Пауэлл на общем собрании Академии наук СССР, при вручении ему Ломоносовской медали, рассказал об исследованиях с ядерными эмульсиями, которые 25 лет назад привели к открытию в космических лучах π -мезонов и дали много других важнейших результатов. В конце доклада он привел фотографии, по-

лученные его учеником профессором Фаулером, который в последнее время запускал шары-зонды с фотоэмульсиями на высоту до 40 км для изучения элементного состава космических излучений.

Ядер железа ($Z = 26$) в космических лучах очень много; значительно меньше ядер с $Z = 60-90$. Чем тяжелее частица, тем толще след, который она оставляет в фотоэмульсии (рис. 5). Просматривая большие площади фотопластинок, Фаулер наблюдал единичные очень толстые следы, которые он приписал урану.

Во второй серии опытов был обнаружен один след, который просматривался по большой длине и давал ионизацию намного более интенсивную, чем ядра с $Z = 90$. Эти фотографии приведены на рис. 5. Первоначально профессор Пауэлл приписал этой частице заряд 110. Однако позднее, тщательно взвесив все возможные ошибки эксперимента, он уменьшил это значение до 106 ("Вестник Академии наук СССР," № 9, 1969). Последующие наблюдения Фаулера, проведенные им совместно с тремя группами физиков США, подтвердили существование в космических лучах сверхтяжелой компоненты. Наблюдалось 15 следов с $Z > 80$; 3 следа с $Z > 100$; 1 след с $Z > 114$.

Определение заряда частицы по следу в фотопластинке — задача очень сложная, и трудно различить следы ядер со значениями $Z = 106, 110$ и 120 . Процессы, происходящие в фотоэмульсии при торможении столь тяжелых частиц, еще недостаточно изучены. Например, известно, что чувствительность фотоэмульсии сильно зависит от температуры. В то время как сами пластинки были холодными, вдоль пути частицы происходил нагрев эмульсии, и оценить его влияние можно лишь весьма приближенно.

Сейчас необходимо зарегистрировать как можно больше тяжелых частиц и построить зависимость выхода частиц от заряда. Элементы с Z от 84 (полоний) до 89 (актиний) не должны встречаться в космических лучах, поскольку они не имеют достаточно долгоживущих изотопов. Поэтому увеличение числа зарегистрированных случаев позволит указать, где начинается область $Z = 90$ и увереннее определить заряд более тяжелых частиц. Это, конечно, еще не будет открытием или получением элемента. Но если данные, сообщенные профессором Пауэллом, верны, то из них следуют очень существенные выводы.

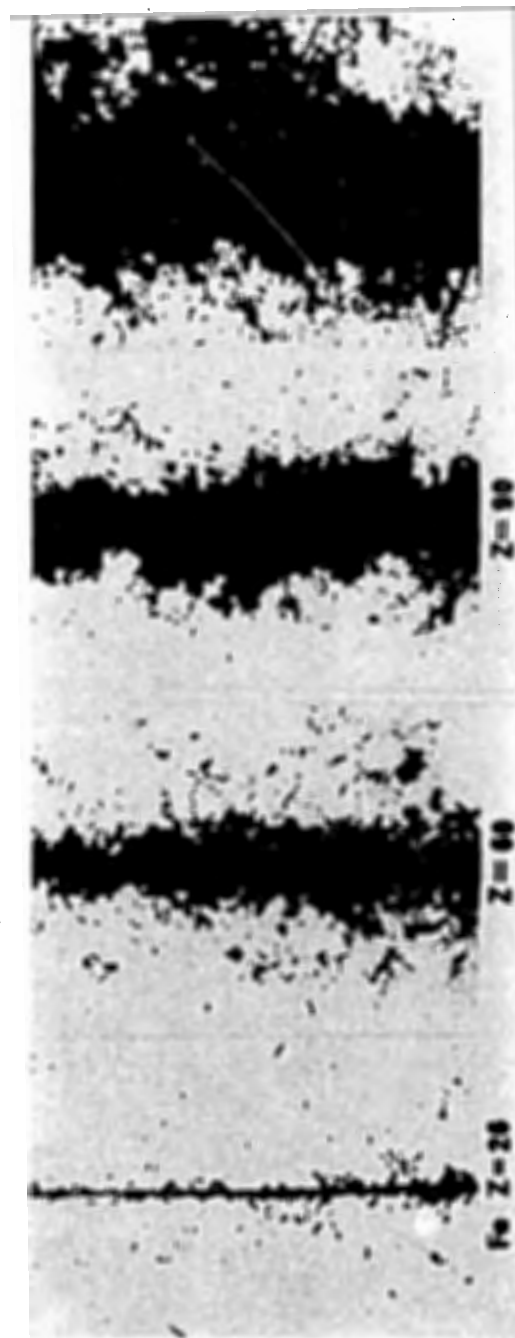


Рис. 5.

На квадратный метр земной поверхности падает в сутки 1 ядро с $Z > 92$, т.е. немногим меньше, чем ядер урана. Это значит, что время жизни этих ядер не менее десятков миллионов лет, потому что удельное содержание компоненты в космических лучах пропорционально ее времени жизни. Поэтому достаточно уверенно наблюдать несколько ядер, чтобы сказать, что в области $Z = 110-114$, 128 есть ядра, живущие десятки, а может быть сотни миллионов лет. Около них должна существовать плеяда, возможно, десятков изотопов, живущих несколько меньше. Если это так, то в таблице Менделеева, которая сейчас заканчивается 105 элементом, появится новая область, где будут и достаточно долгоживущие, и короткоживущие элементы.

Мы видим, таким образом, что теоретические экстраполяции и экспериментальные указания практически не ограничивают область значений периодов полураспада для элементов вблизи 114-го и 128-го. Это могут быть миллионы лет и миллионные доли секунды. Поэтому тем, кто надеется доказать существование этих элементов, приходится иметь дело с весьма разнообразной экспериментальной техникой.

Я уже рассказывал о попытке получить 114-й элемент на ускорителе, об экспериментальных возможностях и перспективах этого направления. Здесь лишь отмечу, что для синтеза на ускорителях доступен интервал времен жизни от миллисекунд до 10^9 лет (рис. 6).

Более длительные времена доступны в исследованиях космических лучей. Их возраст ограничен сверху величиной порядка $10^6 - 10^8$ лет. В этом случае можно попытаться обнаружить сверхтяжелые трансурановые элементы на поверхности Земли, куда они могут постоянно попадать из потока космических лучей. На 1 квадратный метр земной поверхности, как было сказано выше, падает в сутки 1 атом с $Z > 92$, т.е. приблизительно 70 микрограммов в год. Это ужасюще малое количество будет весьма трудно обнаружить, однако информация, которую при этом можно получить, столь важна, что нам придется попытаться это сделать.

Прежде всего необходимо предсказать химические свойства 110-114 элементов и затем попытаться извлечь их из тех отложений, в которых они могли оказаться в результате геохимических процессов. Химические

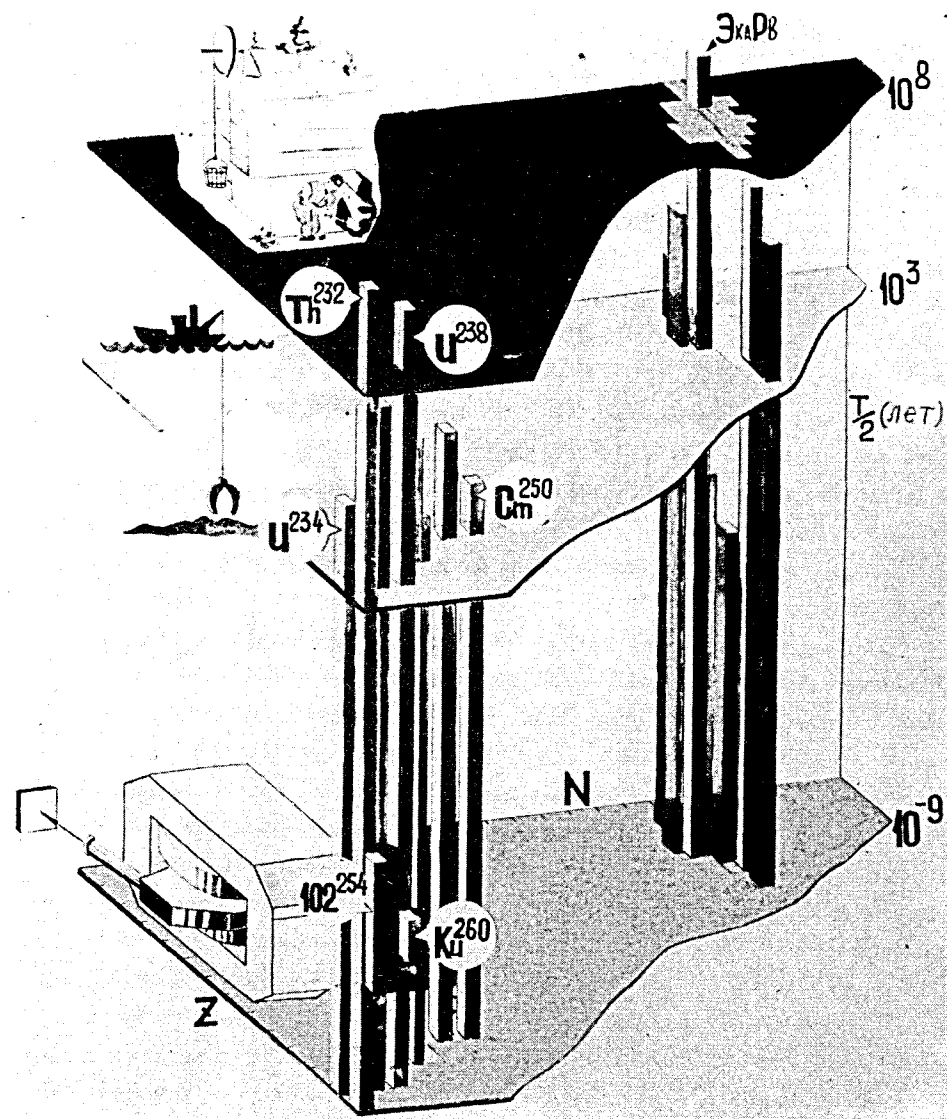


Рис. 6.

исследования курчатовия показали, что, начиная с $Z = 104$, заселяется внешняя электронная оболочка, т.е. курчатовий оказался уже не актинидом, а химическим аналогом гафния. Поэтому можно предполагать, что элементы 110-114 должны быть аналогами платины-свинца.

Космические пришельцы тормозятся на большой высоте, в верхних слоях стратосферы, главным образом, вблизи магнитных полюсов. Далее они разносятся атмосферными потоками и с осадками выпадают на поверхность Земли. Поэтому надо попытаться извлечь экасвинец и, возможно, другие элементы из воды озер и океанов и изучить их спонтанное деление и α -распад. Из морской воды экасвинец и другие новые элементы (экависмут и т.д.), соосаждаясь с гидроокисями, попадают в морские отложения, илы, где, очевидно, содержание этих элементов должно быть гораздо выше, чем в естественном свинце. С этой точки зрения представляет интерес разработка железно-марганцевых конкреций и других материалов. Весьма интересно также изучение метеоритов и поверхности Луны, которая, по-видимому, станет доступной для человека в ближайшее время.

Наконец, если времена жизни элементов, которые мы ищем, сравнимы с возрастом Земли, то естественно предположить, что они существуют в земной коре, поскольку образование элементов, входящих в состав Солнечной системы, происходило в процессах, аналогичных тем, в которых генерируется первичное космическое излучение. Тогда возникает задача: попытаться найти долгоживущие изотопы сверхтяжелых элементов в минералах и проанализировать возможности их извлечения для того, чтобы изучить физические и химические свойства, определить массу и виды радиоактивного распада.

Если экасвинец (т.е. 114 элемент) в результате геохимических процессов действительно осаждался со свинцом, и его время жизни достаточно мало, например, около 10^8 лет, то содержание экасвинца в свинце даже порядка 10^{-13} достаточно, чтобы его присутствие было обнаружено.

Мы в Дубне провели поиски спонтанного деления в свинце. Два квадратных метра тончайшей лавсановой пленки в течение длительного времени находились в контакте со свинцовой фольгой. Как я уже говорил, экасвинец должен быть α -активным и спонтанно делящимся элементом. Если в свинце содержатся ядра, способные делиться спонтанно, то пленка регистрирует следы осколков деления. Сам свинец практически не делится: его период полураспада должен составлять приблизительно 10^{40} лет. (Чтобы проиллюстрировать эту цифру, скажу следующее: в 1 кубическом километре свинца за тысячу лет произойдет два акта деления). Для защиты от космического радиоактивного фона "сэндвич" из лавсановой пленки и свинцовой фольги был опущен под землю на глубину 40 м. Через 100 дней в пленке было обнаружено 6 следов осколков деления. Расчеты показали, что если отнести эти осколки к свинцу, то его период полураспада будет не 10^{40} лет, как следует ожидать, а 10^{21} лет. Возможно, что кажущееся ускорение распада обусловлено примесью крайне малого количества экасвинца, который, однако, распадается много быстрее, чем свинец обычный.

Большая длительность и трудоемкость экспериментов со свинцовыми фольгами заставила нас обратиться к образцам, в которых в течение длительного времени происходила регистрация деления ядер, содержащихся в свинце. Такими образцами являются, во-первых, стекла, находившиеся в течение многих лет в контакте с металлическим свинцом, и, во-вторых, стекла, содержащие в своем составе соединения свинца.

При просмотре 10 см^2 поверхности стекла витража 14 века, находившейся в контакте со свинцом, и 80 см^2 поверхности стекла лейденской банки со свинцовой обкладкой, изготовленной в конце 19 века, не было найдено ни одного трека осколка. Этот результат соответствует кажущейся нижней границе периода спонтанного деления свинца $T_{1/2} \geq 2 \cdot 10^{22}$ лет для витража 14 века и $T_{1/2} \geq 10^{22}$ лет - для лейденской банки. Для сравнения можно указать, что эффект от деления ядер тория космическими лучами на уровне моря приводит к кажущейся нижней границе периода спонтанного деления тория $1,5 \cdot 10^{19}$ лет /13/. Отсутствие следов осколков на стеклах, находившихся в контакте со свинцом, свидетельствует,

по-видимому, в пользу того, что эффект от деления ядер свинца космическими частицами очень мал.

Другая серия экспериментов была проведена со стеклами, содержащими свинец. Для выявления треков осколков в объеме стекла применялось последовательное травление. При каждом травлении устранялся слой стекла толщиной до 20 мк. Специальные контрольные опыты показали, что следы осколков четко отличаются от случайных дефектов стекла.

В опыте со свинцовым стеклом, изготовленным в 1958 году (концентрация свинца 40%), в объеме стекла $0,7 \text{ см}^3$ было зарегистрировано 27 следов осколков деления. Наблюдаемый эффект соответствует кажущемуся периоду спонтанного деления для свинца, содержащегося в стекле:

$$T_{\text{ж}} = (2 \pm 0,7) \cdot 10^{20} \text{ лет.}$$

В опыте с хрустальной вазой, изготовленной в конце 18 века (концентрация свинца 7%), в объеме $0,27 \text{ см}^3$ был зарегистрирован 31 след осколков, что соответствует кажущемуся периоду спонтанного деления $T_{\text{ж}} = (3 \pm 1) \cdot 10^{20}$ лет.

Следует отметить, что вклад от деления тория, содержащегося в стекле, космическими частицами пренебрежимо мал. Опасной является концентрация тория на уровне 1% по весу. Специальные контрольные опыты показали, что содержание тория в этих стеклах не превосходит 10^{-5} г/г.

Фон, обусловленный спонтанным делением урана, содержащегося в этих стеклах (менее 10^{-7} г/г), не может превосходить 3% наблюдаемого эффекта.

Таким образом, в опытах со свинцовым стеклом и свинцовой фольгой, помещенной в контакт с лавсаном, был зарегистрирован эффект деления ядер, который не может быть обусловлен спонтанным делением содержащихся в этих образцах урана и тория или делением их космическими частицами.

Результаты, полученные на свинцовых стеклах, по-видимому, не могут быть обусловлены фоном от деления ядер свинца космическими частицами.

В настоящее время нельзя полностью исключить возможность существования спонтанно делящихся деформационных изомеров свинца, имеющих периоды полураспада, значительно меньшие, чем изотопы свинца в основном состоянии. Такие изомеры могут иметь периоды полурас-

пада больше 10^8 лет и содержаться в свинце с момента образования Солнечной системы. Однако современные представления о природе спонтанно делящихся изомеров приводят к выводу, что образование таких изомеров в результате α -или β -распада чрезвычайно маловероятно. Действительно, до настоящего времени такое явление экспериментально не наблюдалось.

Возможное объяснение наблюдаемого эффекта - предположение о существовании тяжелого химического элемента - аналога свинца или сопутствующего ему элемента, который имеет период спонтанного деления свыше 10^8 лет и содержится в образцах в очень малой примеси - 10^{-12} - 10^{-13} г/г.

Для более четкого ответа на этот вопрос нужно попытаться использовать возможное различие в химических свойствах свинца и экасвинца, чтобы разработать химическую методику их разделения. Достаточно обогащения в 100 раз для того, чтобы надежно проверить те данные, которые сегодня у нас имеются. Естественно, свинец надо брать из самых различных месторождений. Химические свойства экасвинца, по-видимому, будут довольно значительно отличаться от свойств свинца. Например, едва ли экасвинец имеет устойчивое четырехвалентное состояние. Он должен быть несколько амфотерен. Летучесть его соединений и растворимость хлоридов должна быть несколько выше, чем у свинца. Кроме того, несколько больший ионный радиус позволит применять ионообменную хроматографию для его выделения.

Различие эффектов, наблюдаемых на свинцовых стеклах и стеклах, находившихся в контакте с металлическим свинцом, может быть обусловлено различиями в химической технологии при производстве металлического свинца и его соединений, вводимых в состав стекол.

В дальнейшем, кроме обработки и просмотра новых образцов свинцовых стекол, целесообразно также провести поиски эффекта спонтанного деления в свинцовых минералах, которые были защищены от воздействия космического излучения толщей горных пород и имеют геологический возраст порядка десятков миллионов лет.

Наряду с этим мы у себя в Дубне будем заниматься синтезом 114 и 126 элементов на ускорителях с помощью тяжелых ионов Ca_{20}^{48} и Zn_{30}^{70} . Если эти эксперименты окажутся успешными, то мы сможем подтвердить пока предположительные выводы о существовании относительно стабильных сверхтяжелых элементов. Это, в свою очередь, заставит нас по-новому подойти ко многим вопросам структуры ядра и ядерных сил, действующих между нуклонами.

В заключение, перефразируя слова Менделеева, я хочу сказать, что исследование свинца и соседних с ним элементов, начиная с его природных источников, поведет еще ко многим новым открытиям, и я смело рекомендую тем, кто ищет предметов для новых исследований, особенно тщательно заниматься свинцовыми соединениями.

Л и т е р а т у р а

1. Д.И.Менделеев, "Основы химии", Госхимиздат, Москва-Ленинград, 1947г.
2. С.М.Поликанов и др. ЖЭТФ 42, 1464 (1962).
3. A.Ghiorso et al. Phys. Rev. 99, 1048 (1955).
4. D.C.Hoffman, "Nuclides Far off the Stability Line", Lysekil, Inter. Symp. 1966, p. 533, Stockholm, 1967.
5. Г.Н.Флеров и др. "Труды Международной конференции по физике тяжелых ионов" вып. 2, стр. 3, Дубна, 1966.
6. P.R.Fields et al. Phys. Rev. 107, 1460 (1957),
7. A.Ghiorso et al. Phys. Rev. Lett. 1, 18 (1958).
8. Г.Н.Флеров и др. АЭ 17, 310 (1964).
9. И.Звара и др. АЭ, 21, 83 (1966).
10. G.N.Flerov, Yu.Korotkin et al. Nucl.Phys. A106, 476 (1967).
11. A.Ghiorso et al. Phys.Rev.Lett. 6, 473 (1961).
12. H.R.Bowman et al. preprint UCRL - 17989 (1968).
13. А.В.Подгурская и др. ЖЭТФ 28, 503 (1955).

Рукопись поступила в издательский отдел

11 февраля 1969 года,