

Ф-716

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Д7-6013

3332/71  
12



Г. Н. Флеров, И. Звара

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
ВТОРОЙ СОТНИ

1971

Д7-6013

Г.Н. Флеров, И. Звара

**ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
ВТОРОЙ СОТНИ**

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
I. ХАРАКТЕР ЯДЕРНЫХ СВОЙСТВ .....	3
II. МЕТОДЫ СИНТЕЗА, ИДЕНТИФИКАЦИИ И ИЗУЧЕНИЯ .....	5
2.1. Ядерные реакции синтеза .....	5
2.2. Ускорительная техника .....	7
2.3. Получение препаратов для измерения .....	9
2.4. Ядернофизические способы идентификации изотопов .....	11
2.5. Методы химической идентификации новых элементов .....	15
III. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ИЗУЧЕНИЯ .....	17
3.1. Элемент I01 .....	18
3.2. Элемент I02 .....	19
3.3. Элемент I03 .....	24
3.4. Элемент I04 .....	28
3.5. Элемент I05 .....	35
3.6. Элемент I06 .....	37
3.7. Элемент I07 .....	37
3.8. Критерии открытия .....	39
IV. СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ .....	41
4.1. Теоретические предсказания .....	41
4.2. Синтез в ядерных реакциях с тяжелыми ионами .....	45
4.3. Поиски в природе .....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	54
ЛИТЕРАТУРА .....	58

В Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, международном исследовательском центре социалистических стран, в Лаборатории ядерных реакций на протяжении многих лет проводятся интенсивные исследования по получению и изучению ядерных и химических свойств элементов с атомными номерами выше 100. Эти большие усилия увенчались открытием нескольких новых элементов. Настоящее сообщение посвящено рассмотрению работ, выполненных в основном после Третьей Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. Обсуждаются также перспективы развития этих исследований. Мы пытались дать по возможности полное представление о дубненской программе исследования новых элементов, не описывая, однако, всех деталей. Они могут быть найдены в других работах обзорного характера<sup>/1-6/</sup>.

## I. ХАРАКТЕР ЯДЕРНЫХ СВОЙСТВ

Существование и распространенность тех или иных элементов определяется главным образом свойствами атомных ядер и закономерностями их образования на некоторых стадиях эволюции звезд. Из элементов, открытых до настоящего времени химиками при изучении природных материалов, наиболее сложный атом имеет уран (номер 92), являющийся слабо радиоактивным элементом. Известные сейчас трансурановые элементы распадаются значительно быстрее урана и по этой причине не дожили до наших дней со времени образования вещества солнечной системы. Они были впервые открыты в лабораторных условиях с помощью ядерных реакций. Позднее,

нептуний и плутоний все же были найдены в ничтожных количествах в природе, так как они непрерывно образуются из урана под действием редких освобождающихся нейтронов. Однако реальным источником накопления трансуранов служат по-прежнему искусственные ядерные превращения, которые в особенно больших масштабах проводятся в ядерных реакторах.

К настоящему времени почти все искусственные химические элементы с атомными номерами до 100 (фермий) получены в количествах, которые можно увидеть и взвесить. Этого пока нельзя сказать ни об одном из элементов второй сотни, которые в реакторе не удастся получить. Синтез этих элементов в ядерных реакциях с тяжелыми ионами (см. § 2.1) дает лишь невесомые "следовые" количества или даже всего единичные атомы. Они все-таки могут быть обнаружены радиометрическими методами, так как имеют сравнительно короткие периоды полураспада. Проникновение в трансфермиевую область непрерывно продолжается, и стремление исследователей к открытию все новых элементов несколько не ослабевает. Это объясняется тем, что радиоактивные свойства могут изучаться и на следовых количествах; некоторые важнейшие химические характеристики элементов также удастся определить, имея в распоряжении лишь считанные атомы. Интерес представляют и закономерности образования элементов в ядерных реакциях, позволяющие судить о некоторых свойствах ядерной материи. Подобные данные о свойствах наиболее тяжелых элементов дают качественно новый материал для теоретической ядерной физики и химии.

В ряду известных трансурановых элементов наблюдается общая тенденция к постепенному уменьшению времени жизни ядер относительно  $\alpha$ -распада и особенно спонтанного деления. По этой причине, по-видимому, элементы второй сотни будут в своем большинстве настолько короткоживущими, что никогда не удастся накопить

их в весовых количествах. Более того, можно ожидать, что выше какого-то атомного номера времена жизни ядер станут короче времени, необходимого для самых быстрых и элементарных химических взаимодействий и затем даже меньше времени формирования атомной электронной оболочки ( $10^{-14}$  сек). Тогда не будет больше смысла говорить о химических элементах. Наконец, еще более тяжелые капельки ядерной материи вообще не смогут существовать дольше одного периода собственных колебаний ( $10^{-21}$  сек). Тем не менее имеются серьезные основания для предположения (см. § 4.1), что раньше, чем наступит такая "катастрофа", монотонное падение периодов полураспада нарушится, и мы встретим по крайней мере один небольшой "островок стабильности". Первый ожидается где-то в области элементов 110-126. Наиболее устойчивые изомеры этих будущих элементов, которые пока называют "сверхтяжелыми", должны быть, по-видимому, значительно более долгоживущими, чем изучаемые сейчас "тяжелые" элементы в области номеров 104-107. Возможно, что они даже сохранились в природе подобно урану и их можно химически выделить. Такая перспектива представляется необычайно интересной и важной для ядерных наук. По мере того как открываются и изучаются все новые трансфермиевые элементы, надежность предсказания свойств островков стабильности возрастает и создается методическая база для синтеза и поиска сверхтяжелых элементов.

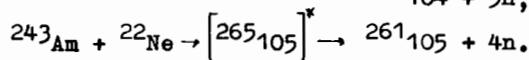
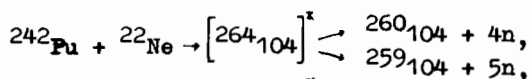
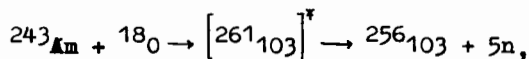
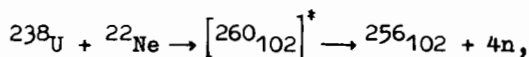
## II. МЕТОДЫ СИНТЕЗА, ИДЕНТИФИКАЦИИ И ИЗУЧЕНИЯ

### 2.1. Ядерные реакции синтеза

Трансурановые элементы вплоть до менделевия (номер 101) были впервые получены в США Мак-Милланом, Сиборгом, Томпсоном, Гиорсо и др. в основном в период интенсивной разработки научных основ ядерной техники<sup>/7/</sup>. Синтез был осуществлен в результате об-

лучения урана нейтронами (Np и Am), бомбардировки тяжелых элементов ускоренными дейтронами (Pu) и ионами гелия (Sm, Bk, Cf, Md) и, наконец, воздействием на уран мгновенным чрезвычайно высоким потоком нейтронов при термоядерном взрыве (Cs, Fm). Возможности этих методов почти исчерпаны, и они не применялись в открытии элементов тяжелее менделевия.

На протяжении последних примерно пятнадцати лет интенсивно развивается новое направление — использование ускоренных "тяжелых ионов". Так называют многозарядные атомарные ионы элементов более тяжелых, чем гелий. Синтез осуществляют за счет полного слияния бомбардирующей частицы с ядром мишени<sup>8/</sup>. Энергия тяжелого иона должна быть достаточной для преодоления кулоновского барьера, а это значительно больше энергии, поглощаемой при слиянии. Поэтому составные ядра получаются в возбужденном состоянии (десятки Мэв), в большинстве случаев мгновенно делятся, и лишь очень малая доля их полностью "остывает" за счет испарения нейтронов и испускания гамма-квантов. Примерами могут служить реакции, которые использовались в Дубне при открытии новых элементов:



Их можно в общем виде обозначить как реакции (HI, xn). Эффективное сечение реакции образования составного ядра близко к геометрическому, т.е.  $10^{-24}$  см<sup>2</sup>, в то время как элементы 102-105 получаются с сечениями в  $10^8$ - $10^{10}$  раз меньшими.

Таким образом оказывается, что можно увеличить порядковый

номер ядра мишени скачком на несколько единиц без всяких промежуточных ступеней. Но это достигается ценой низкого выхода нового элемента. В то же время по другим каналам взаимодействия, не проходящим через стадию составного ядра, образуются многие нежелательные ядра. В продуктах облучения наблюдаются, например, почти все тяжелые элементы с порядковыми номерами ниже, чем у составного ядра, особенно изотопы, близкие к ядру-мишени. Они могут оказаться серьезными помехами ("фоном") при поисках  $\alpha$ -излучения или спонтанного деления нового элемента. Необходимо также отметить, что с помощью тяжелых ионов получают нейтронодефицитные изотопы, обладающие, как правило, короткими периодами  $\alpha$ -распада.

Все это потребовало прежде всего создания ускорителей для получения интенсивных пучков различных тяжелых ионов на энергии, достаточные для преодоления кулоновского барьера тяжелых ядер. Нижний предел требуемой энергии составляет на практике примерно 6 Мэв на атомную единицу массы тяжелого иона. Далее необходимо было разработать высокочувствительные и селективные экспрессные методы обнаружения, идентификации и изучения физических и химических свойств элементов.

## 2.2. Ускорительная техника

Пучки ионов углерода, азота и кислорода небольшой интенсивности были впервые получены на циклотронах, сконструированных для ускорения протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц. Такие попытки делались в пятидесятых годах в Беркли, Стокгольме и в Москве, и это позволило накопить первые сведения о закономерностях реакций, вызываемых тяжелыми ионами. Однако достаточно интенсивные пучки были получены лишь на специально сконструированных для этой цели линейных ускорителях, таких, как NCLAS (Беркли), и циклотронах



(Дубна, Орск, Ок Ридж). Два циклических ускорителя, имеющиеся в Дубне, продолжают непрерывно совершенствоваться и в настоящее время являются наиболее эффективными машинами по интенсивности пучков, энергии частиц и диапазону масс ускоряемых ионов. Это классический циклотрон У-300 (запущен в 1960г.)<sup>/9/</sup> и изохронный циклотрон У-200 (работает с 1968г.)<sup>/10/</sup> с диаметром полюсных наконечников 310 и 200 см соответственно. "Большая" машина ускоряет частицы с отношением массы к заряду (в ат.единицах) в пределах от 4,5 до 6,5. Она оборудована уникальным газоразрядным источником многозарядных ионов<sup>/11/</sup>, в который можно либо подавать газообразные элементы и соединения, либо испарять прямо в источнике твердые вещества<sup>/12/</sup>. Последнее усовершенствование позволило ускорить ионы таких элементов, как кальций, фосфор и цинк. Ниже (§ 4.4) будет рассказано о совместном использовании двух дубненских ускорителей в виде тандемной системы для ускорения ионов ксенона.

В табл. 1 приведены параметры пучков тяжелых ионов ускорителей У-300 и У-200, а также проектные параметры четырехметрового циклотрона У-400<sup>/13/</sup>, который будет создан путем реконструкции У-300.

На ускорителе НИЛАС в Беркли для получения трансфермиевых элементов используются ионы не тяжелее кислорода. В Дубне такие исследования проводят с ионами вплоть до кремния и фосфора. Это дает дубненской лаборатории возможность вести синтез элемента 107 с урагной мишенью, в то время как в Беркли для этой цели пришлось бы использовать высокорadioактивный эйнштейний. Хотя применение более легких мишеней и более тяжелых бомбардирующих частиц приводит к несколько меньшему выходу реакций синтеза, большим преимуществом таких комбинаций является низкая радиоактивность мишени и более благоприятный состав "фоновых активностей".

Как атомный ( $Z$ ), так и массовый ( $A$ ) номера нуклида можно в принципе определить ядернофизическими методами. Атомный номер можно также идентифицировать химическими способами. В истории открытия отдельных искусственных элементов удельный вес ядернофизических и химических доказательств был различным в зависимости от методов синтеза, радиоактивных свойств и других обстоятельств<sup>/14/</sup>. Мы коснемся в первую очередь некоторых характерных физических экспериментальных методов и приемов, которые обеспечивают выполнение отмеченных выше требований экспрессности, высокой чувствительности и селективности обнаружения.

### 2.3. Получение препаратов для измерения

Отделение продуктов ядерных реакций от вещества мишени является, пожалуй, единственной задачей, которая при работе с тяжелыми ионами решается легче и быстрее, чем при других способах синтеза ядер. За счет большого импульса тяжелого иона атомы нового элемента летят почти строго вперед, и их пробег в веществе мишени составляет примерно 0,5 - 1 мг/см<sup>2</sup>. Применяя мишень толщиной не более величины пробега, можно обеспечить полное выбивание. Из мишени, к сожалению, вылетает также значительная доля нежелательных ядер.

При использовании выбивания облегчается и доставка продуктов облучения к детекторам излучения, которые размещаются на некотором удалении от области облучаемой мишени, так как она является источником интенсивного гамма- и нейтронного излучения.

Когда детектирование идет по спонтанному делению, то обычно используют энергию отдачи, чтобы внедрять атомы в поверхность механического транспортера - сборника, движущегося непрерывно или по заданному временному графику. На рис. 1 приведена схема одной из применявшихся установок.

При измерении  $\alpha$ -излучения для полного использования разрешающей способности детекторов необходимо, чтобы слой на поверхности сборника, в котором находятся атомы, был **очень тонким**. В таком случае атомы отдачи предварительно затормаживаются полностью в атмосфере какого-либо газа в объеме за мишенью. Они будут диффундировать к поверхности сборника и адсорбироваться на ней. Этот процесс можно ускорить, если сформировать ультразвуковую струю, выпуская газ через узкое сопло в откачиваемый объем. Когда такая струя бьет в твердую поверхность, тяжелые атомы эффективно высаживаются. Этот метод "газовой струи" был предложен Макферленом<sup>/15/</sup> и впервые применен для изучения трансурановых элементов в Дубне<sup>/16/</sup>. С его помощью можно не только собирать атомы за времена порядка 1 мсек, но и транспортировать их предварительно на значительное расстояние. На рис. 2 приведена схема аппаратуры, основанной на этом принципе.

Еще одним способом получения очень тонких источников является фильтрация газа с заторможенными атомами отдачи через тонкие слои высокоэффективных аэрозольных волокнистых фильтров<sup>/17/</sup>. Этот метод успешно применяется в Дубне<sup>/18/</sup> (см. рис. 3).

Для регистрации излучения в случае спонтанного деления повсеместно применяются твердотельные трековые детекторы осколков деления<sup>/19/</sup>, такие, как полимерные пленки, стекла и слюды. Осколки деления, вбиваясь в поверхность детекторов, оставляют в этих материалах каналы, которые могут быть химическим травлением увеличены до размеров, видимых с помощью оптического микроскопа. В Дубне были отработаны методы обработки природной слюды и фосфатного стекла, которые позволили снизить собственный фон детекторных устройств в опытах по синтезу новых элементов до уровня одного следа осколка за несколько десятков суток непрерывной работы аппаратуры. Слюдяные детекторы могут работать при температуре до

400° и в химически агрессивной газовой среде<sup>/20,21/</sup>, что чрезвычайно важно при химической идентификации (§ 2.5).

$\alpha$ -излучение регистрируют поверхностно-барьерными кремниевыми детекторами, разрешение которых достигает сейчас 20 кэв.

#### 2.4. Ядернофизические способы идентификации изотопов

Классический метод перекрестных облучений редко удается последовательно применить при синтезе изотопов трансформируемых элементов. С одной стороны, набор доступных материалов мишеней и бомбардирующих частиц ограничен и новый изотоп иногда можно получить лишь в одной комбинации мишень-тяжелый ион. С другой стороны, при наличии фона и "плохой статистике" отсутствие изотопа, когда он не должен образовываться, не всегда может быть установлено с достаточной достоверностью. Поэтому результаты перекрестных облучений составляют только часть аргументов, подтверждающих открытие нового элемента.

Реакции, протекающие через образование составного ядра и испарение нейтронов, отличаются характерным видом зависимости выхода от энергии бомбардирующей частицы или же "кривой возбуждения", т.е. зависимости эффективного сечения от энергии возбуждения составного ядра. Это колоколообразные кривые с шириной на половине высоты максимума около 10 Мэв (см.рис.4). Данные по синтезу изотопов фермия в реакциях  $^{238}\text{U} (^{18}\text{O}, \text{xn})\text{Fm}$  (светлые кружки) представляют характерный пример того, в каком соотношении находятся эффективные сечения в зависимости от числа испаряемых нейтронов и от энергии бомбардирующей частицы. Сейчас имеются полуэмпирические методы расчета этих кривых<sup>/23/</sup>, позволяющие довольно надежно предсказать положение максимума, абсолютную величину эффективного сечения в максимуме и форму кривой. В основе расчетов лежит представление о том, что эффективное сечение ре-

акций ( $NI, \chi n$ ) является произведением трех величин: сечения образования составного ядра (зависит от энергии бомбардирующей частицы), вероятности испарения из составного ядра данного числа нейтронов  $\chi$  (функция энергии возбуждения составного ядра) и фактора, учитывающего конкуренцию между испусканием нейтронов и делением  $\left(\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f}\right)^\chi$ . Последний резко уменьшается с увеличением числа нейтронов. Если параметры экспериментальных кривых близки к расчетным, то это является веским аргументом в пользу правильности идентификации изотопа. Максимумы выходов реакций с  $\chi=3,4$  и 5 (рис.4) лежат в довольно узком интервале энергий бомбардирующей частицы, что иногда делает определение массового числа несколько более трудной задачей, чем подтверждение атомного номера.

Из реакций, которые могут протекать через образование составного ядра, реакции с испарением одних только нейтронов имеют заведомо много большее сечение, чем процессы с испусканием других частиц. Это верно, во всяком случае, при не слишком высоких энергиях возбуждения, с которыми имеют дело при синтезе элементов. Таким образом, если доказать, что данный нуклид образуется в реакции слияния, то практически также доказывается, что его атомный номер равен номеру составного ядра.

Атомы отдачи из реакции ( $NI, \chi n$ ) вылетают из мишени в пределах угла в несколько градусов, так как малые импульсы от испаряющихся нейтронов не могут существенно изменить направление движения, которое имело составное ядро. Угловое распределение продуктов взаимодействия по другим каналам значительно шире. Друин и др.<sup>/24/</sup> показали, как использовать это явление для идентификации атомного номера нового элемента. Они применили простой способ "роллимации" атомов отдачи. На рис.5 показано, как падает доля атомов, выбиваемых в газовый объем за мишенью, если в ре-

шетке, на которой закреплена мишень, увеличивать отношение глубины отверстий к их диаметру. Это отношение определяет максимальный угол, под которым атомы могут вылетать из мишени.

Видно, что кривая для продуктов реакций ( $HI, \chi n$ ) сильно отличается от такой же зависимости для ядер, получающихся при взаимодействиях других типов.

Есть все основания утверждать, что совокупность данных по перекрестным облучениям, кривым возбуждения и угловым распределением атомов отдачи позволяет надежно определить  $Z$  и  $A$  изотопов, получаемых по реакциям ( $HI, \chi n$ ), независимо от того, идет ли их регистрация по  $\alpha$ -распаду или по спонтанному делению.

Для  $\alpha$ -активных изотопов существуют, кроме того, специфические методы идентификации  $Z$  и  $A$ . В работах Гиорсо и др.<sup>/26/</sup> и Донца и др.<sup>/27/</sup> был воскрешен остроумный классический метод "двойной (и вообще многократной) отдачи", применявшийся в 1909 году Ханом и другими исследователями для идентификации изотопов в цепочках распада эманаций. На рис.6 приведена принципиальная схема установки, на которой в Дубне были при открытии элементов 102 и 103 идентифицированы изотопы  $^{256}_{102}$ ,  $^{254}_{102}$  и  $^{256}_{103}$  путем установления их генетической связи с известными изотопами  $^{250}_{Fm}$  и  $^{252}_{Fm}$ . Продукты облучения мишени отделялись за счет отдачи и адсорбировались из газа на непрерывно движущемся сборнике. Когда ядро испытывает  $\alpha$ -распад, положительно заряженные атомарные ионы дочернего изотопа отрываются от поверхности и могут быть собраны из газа на отрицательно заряженном вторичном сборнике (или же вбиты в него за счет своей отдачи). Достаточно долгоживущие изотопы фермия были идентифицированы на коллекторе радиохимически и по свойствам излучения. Распределение числа атомов фермия вдоль неподвижного сборника отражает период полураспада материнской активности. Дальнейшее развитие этот принцип получил в Дубне<sup>/16/</sup>, а затем в Беркли

в работах последних лет. В них в качестве второго коллектора используется поверхность полупроводниковых детекторов. Это позволяет вести идентификацию также по короткоживущим дочерним или внучатым активностям при условии, что они могут быть однозначно опознаны только по свойствам  $\alpha$  - распада.

Друин и др.<sup>/28/</sup> используют в поисках  $\alpha$  - радиоактивных изотопов новых элементов, предполагаемые  $\alpha$  - активные дочерние продукты которых известны, более простой принцип "задержанных совпадений"  $\alpha$  - частиц. После того как в доставленном препарате детектор зарегистрировал  $\alpha$  - частицу, имеется значительная вероятность зарегистрировать также  $\alpha$  - распад дочернего ядра, если взять достаточно большое время ожидания (обычно 2-3 периода полураспада дочернего изотопа). Это также позволяет более четко выделять генетически связанные активности при наличии значительного фона.

При попытках обнаружения  $\alpha$  - частиц нового элемента проблема фона является часто очень серьезной вследствие того, что этот вид распада в отличие от спонтанного деления очень распространен у всех известных трансурановых элементов. Кроме того, взаимодействие тяжелых ионов с возможными примесями свинца, ртути и т.п. в мишени приводит к образованию изотопов в области Po - Ac и эти продукты излучают  $\alpha$  - частицы в широком диапазоне спектра<sup>/29,30/</sup>.

Ко всему, что было сказано о ядернофизических способах идентификации, следует добавить, что имеются полуэмпирические систематические данные о ядерных свойствах трансурановых элементов, которые позволяют с некоторой точностью заранее оценить свойства распада искомого изотопа. Однако эти предсказания недостаточно точны, чтобы их использовать для идентификации. Их роль состоит только в том, чтобы обеспечить "разумную" постановку опыта, т.е. сосредоточить внимание на каком-то интервале энергий регистрируемого излучения и времени жизни изотопов.

## 2.5. Методы химической идентификации новых элементов

Большие возможности ядернофизических методов несколько не умаляют значения химической идентификации, которая по отношению к первым дает полностью независимое доказательство правильности определения атомного номера и является также отправным пунктом для дальнейшего изучения химических свойств нового элемента. Поэтому в Дубне с самого начала выполнения программы по трансфермиевым элементам уделялось большое внимание разработке методов их химического выделения<sup>/14/</sup>. Можно было предвидеть, что, как правило, придется иметь дело с короткоживущими изотопами. Поэтому отбирались принципы, обеспечивающие возможность добиться высокой экспрессности. В результате основное внимание было сосредоточено на газовой хроматографии безводных хлоридов и других летучих неорганических соединений. Это определилось тем, что наиболее актуальной задачей была идентификация 104-го и последующих за ним элементов. Если элемент 103 является последним членом семейства 5f ("актиноиды"), тогда из закономерностей Периодической системы следует, что элементы 104, 105 и т.д. должны быть химическими аналогами Hf, Ta, W, Re ... Все эти элементы образуют сравнительно летучие хлориды, а некоторые также летучие оксихлориды. Можно было надеяться на успех разделения с помощью газовой хроматографии, в частности, в ее газоадсорбционном варианте. Аппаратура, которая применялась в первых опытах по химии 104-го элемента, показана на рис.7. Наиболее существенные черты схемы опыта на этой установке сохраняются и до настоящего времени в исследованиях по химии более тяжелых элементов. Они состоят в следующем:

Атомы отдачи тормозятся в небольшом объеме за мишенью в потоке азота и транспортируются газом в стеклянную хроматографическую колонку. На входе в колонку в газ вводятся пары сравнительно



летучих хлоридов, например  $\text{SOCl}_2$ ,  $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{NbCl}_5$  или  $\text{ZrCl}_4$ . Такого рода компоненты являются хлорирующими агентами и "носителями" для атомов отдачи. Адсорбируясь на поверхности колонки, они постоянно обезвоживают ее и модифицируют адсорбционные свойства стекла. Нужно добиться такой степени модификации, т.е. снизить теплоту адсорбции хлорида нового элемента настолько, чтобы рабочая температура хроматографической колонки не должна была превышать  $300-400^\circ$ . Этим требованием в основном определяется выбор хлорирующих компонентов и их концентрации.

Разделение проводится с помощью двух вариантов хроматографии:

1) Фронтальная хроматография на изотермической колонке.

Эта техника применялась в первых опытах по идентификации элемента  $104^{31-33/}$ , когда основная задача состояла в отделении этого элемента как гафния от элементов семейства  $5f$ , которые имеют редкоземельный характер. Поскольку последние образуют низкотеплотные хлориды, то оказалось возможным создать такие условия, при которых в режиме фронтальной хроматографии они не появляются на выходе из колонки даже при продолжительности опыта в 2-3 суток. В это же время атомы гафния, как было показано прямыми измерениями, проходят через колонку за время меньше одной секунды. (Задержка складывается из времени, затрачиваемого на хлорирование атома, первоначально адсорбированного на поверхности начального участка колонки, и времени удерживания молекулы хлорида). Элемент 104 регистрировался на выходе из колонки по осколкам спонтанного деления в длинной камере со слюдяными детекторами, что в принципе позволяло контролировать период полураспада (см. § 3.4).  $\alpha$ -активные изотопы также могут быть идентифицированы химически этим методом при условии, что они дают долгоживущие дочерние или внучатые продукты, принадлежащие элементам с нелетучими хлоридами. Для этого нужно на выходе из колонки установить ловушку для задержания

соединений элемента 104 и затем проанализировать ее содержание радиохимическими способами на дочерние активности<sup>/33/</sup>.

2) Фронтальная термохроматография на колонке с градиентом температуры. В этом случае вдоль колонки температура понижается, и разные элементы в зависимости от свойств их хлоридов адсорбируются на стенках в разных интервалах температуры, т.е. на различных участках колонки. Чтобы определить положение зоны короткоживущего спонтанно делящегося элемента, необходимо прямо в колонку закладывать детекторы спонтанного деления (пластинки слюды - см. § 2.3).

Этот метод применялся для идентификации 104-го и 105-го элементов<sup>/34,35/</sup> и перспективен для элементов, последующих за ними.

### III. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ИЗУЧЕНИЯ

Этап истории новых элементов, связанный с использованием тяжелых ионов для синтеза ядер, явился новым не только по ускорительной технике, методам исследования и способам аргументации и доказательств, но также и в том отношении, что область синтеза новых элементов перестала быть доступной одной лаборатории или одной стране и в исследования включились и продолжают включаться новые группы из различных стран. Развивается международное сотрудничество и, естественно, также и соперничество. Открытие каждого нового элемента требует больших интеллектуальных усилий и материальных затрат. Поэтому понятно, что исследователи, считающие себя открывателями нового элемента, стремятся к тому, чтобы научная общественность признала за ними приоритет открытия.

Не является секретом, что идет полемика вскруг авторства открытия элементов от 102-го до 105-го и начинают появляться спорные сообщения об открытии сверхтяжелых элементов. Такое по-

ложение вещей обусловлено несколькими разнородными причинами. Прежде всего, в первых работах по трансфермиевым элементам были допущены серьезные ошибки при идентификации элементов и изотопов (что в общем неизбежно в такой сложной и новой работе). В ряде этих сообщений, к сожалению, недостаточно подробно излагались экспериментальные результаты и обоснование выводов. В настоящее время не существует согласованных критериев открытия элемента. Видимо поэтому, некоторые авторы считают себя вправе произвольно, по-новому толковать свои результаты и претендуют на авторство открытия элементов на основании работ, первоначальные выводы из которых не подтвердились. Положение осложняется тем, что Комиссия по номенклатуре неорганической химии ИЮПАК, которая занимается названиями элементов, не считает обязательным выявлять действительных авторов открытия и вырабатывать свои рекомендации с учетом их предположений. Широкая научная общественность незнакома с детальной историей каждого элемента, и поэтому в ее сознании авторы, назвавшие элемент, будут почти автоматически отождествляться с авторами открытия.

Все это заставляет нас не только обсуждать данные о свойствах элементов и изотопов и доказательства правильности их идентификации, но и высказать свою точку зрения в споре о приоритете. В заключение этого раздела мы попытаемся сформулировать некоторые критерии.

### 3.1. Элемент 101.

Американские авторы рассматривают как открытие менделевия работу Гиорсо и др. /36/ 1955 года. Облучалось  $10^9$  атомов  $^{253}\text{Es}$  пучком ионов гелия. При разделении актиноидной фракции полученных продуктов на катионидной колонке с  $\alpha$ -оксиизобутиратом аммония в качестве элюента в первых каплях, предшествовавших выходу фермия, было зарегистрировано пять спонтанно делящихся атомов.

Оценив период полураспада этой активности по 6 отсчетам, авторы пришли к выводу, что он близок к периоду полураспада  $^{256}\text{Tm}$  (3,5 часа). Учитывая возможность реакции  $(\alpha, n)$  и то, что "только самые тяжелые элементы спонтанно делятся с такими короткими периодами полураспада", авторы предположили, что получен  $^{256}_{101}$ , переходящий электронным захватом с периодом полураспада "порядка получаса" в  $^{256}\text{Tm}$ . В 1958 году Филлипс и др.<sup>/37/</sup> получили несколько сотен атомов  $^{256}_{101}$  и показали, что его период равен 1,5 часам.

В Дубне менделевий впервые синтезировался с помощью тяжелых ионов. В 1962 году и позже были получены сотни атомов по реакции  $^{238}\text{U} (^{22}\text{Ne}, p3n) ^{256}\text{Md}/38/$  для химических исследований по экстракции и ионнообменному поведению<sup>/39/</sup>. В последующие годы по реакции  $^{238}\text{U} (^{19}\text{F}, 5n) ^{252}\text{Md} /22/$  был получен этот новый нуклид. Изотопы менделевия с массами 254-258 были синтезированы в США - в основном облучением изотопов эйнштейния ионами гелия (см., например, работу<sup>/40/</sup>).

### 3.2. Элемент 102

Это первый элемент, который с самого начала получали по реакциям  $(\text{HI}, xn)$ . Его история сложна и изобилует неожиданными результатами и ошибками. Она в деталях освещается с разных точек зрения в обзорах<sup>/2,7,43,44/</sup>. Не вызывает никакого спора, что впервые правильные (как в смысле определения массы чисел изотопов, так и их радиоактивных свойств) данные об этом элементе были получены в Дубне в 1963-66 годах. Полные списки этих работ можно найти в обзорах<sup>/43-46/</sup>. Были синтезированы изотопы с массами 252-256, изучен их  $\alpha$ -распад, измерена вероятность спонтан-

---

\* В то время никто и не подозревал о существовании спонтанно делящихся изомеров<sup>/41,42/</sup>, иначе этот аргумент был бы действительным.

ного деления  $^{254}_{102}$  и  $^{256}_{102}$ . Идентификация основывалась на перекрестных облучениях, причем каждый изотоп был получен в двух или трех комбинациях мишень-частица, и на снятии кривых возбуждения (см., например, рис.4). В случае  $^{256}_{102}$ ,  $^{254}_{102}/^{27}/$  и  $^{253}_{102}/^{16}/$  использовался также метод двойной отдачи (§ 2.4, рис. 6, 8). После опубликования этих результатов, в 1967 году те же нуклиды были синтезированы в Беркли<sup>/45/</sup> путем облучения изотопов кюрия ионами  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ . Их свойства полностью подтвердились. Изотоп 251 был найден независимо в Беркли<sup>/45/</sup> и в Дубне<sup>/47/</sup>, в США были обнаружены изотопы 257 и 259. В табл.2 приведены основные свойства изотопов элемента 102.

В 1967 году в Дубне были предприняты первые опыты по химии элемента 102 методом фронтальной хроматографии хлоридов на ионо-термической колонке<sup>/48/</sup>. Работа проводилась на установке для химической идентификации элемента 104 с изотопом  $^{256}_{102}$ , получаемым по ядерной реакции  $^{238}\text{U} (^{22}\text{Ne}, 4n)$  или  $^{242}\text{Pu} (^{18}\text{O}, 4n)$ . Поведение 102-го элемента прослеживалось по распределению на колонке его дочернего продукта распада -  $^{252}\text{Fm}$ . После длительного опыта фермий смывался с секций аппаратуры, и радиохимическими методами количественно измерялось его содержание (см. рис.9). Было найдено, что 102-ой элемент образует нелетучий хлорид - его фронт двигался по колонке очень медленно, подобно лантаноидным элементам, кюрию и самому фермию. Поведение последнего изучалось в специальных опытах. Это показало, что степень окисления элемента 102 не выше 3+ и, что, следовательно, он имеет характер актиноида. Впоследствии в Беркли были выполнены некоторые работы по водной химии этого элемента<sup>/49/</sup> со сравнительно долгоживущим изотопом  $^{255}_{102}$  ( $T_{1/2} = 3$  мин), впервые синтезированным в Дубне. Было показано, что в водных растворах устойчиво состояние  $(2+)$  и окисление не дает состояния выше 3+.

В свете данных табл.2 результаты работ 1957-61 годов, выполненных в различных странах, нельзя признать открытием элемента 102.

В известных стокгольмских опытах 1957 года<sup>/50/</sup> (облучение смеси изотопов кюрия ионами  $^{12}\text{C}$ ) был обнаружен 10-минутный "нобелий" с энергией  $\alpha$ -частиц  $8,5 \pm 0,1$  Мэв, которому приписывалось массовое число 253 или 251, а затем и  $255^{51/}$ . Сообщалось, что идентификация выполнена химически - ионнообменной хроматографией. По-видимому, в этой работе имела место недостаточная химическая очистка актиноидной фракции продуктов облучения и активность принадлежала изотопу значительно более легкого элемента. Ни один из названных и других известных изотопов 102-го элемента не обладает такими свойствами.

В московских работах 1957-58 годов<sup>/52/</sup> (облучение  $^{241}\text{Pu}$  ионами  $^{16}\text{O}$ ) сообщалось о получении  $\alpha$ -активного  $^{252}\text{102}$  с периодом полураспада в пределах  $2 \text{ сек} < T_{1/2} < 40 \text{ сек}$  и  $E_{\alpha} = 8,9 \pm 0,4$  Мэв. Фактически это означало, что  $E_{\alpha} = 8,5 \pm 0,4$ , так как энергия  $\alpha$ -частиц была завышена в результате неточного знания в то время энергии  $\alpha$ -частиц  $^{211}\text{Po}$  и  $^{212}\text{Po}$ , которые использовались для калибровки ядерных фотоэмульсий. Авторы этой работы полностью сознавали опасность продуктов реакций на примесях свинца в мишени и тщательно учли этот фон. Анализ московской работы, проведенный после получения дубненских данных, показал<sup>/2,44/</sup>, что в ней несомненно наблюдались  $\alpha$ -частицы 102-го элемента, а именно, изотоп  $^{252}\text{102}$  (см. табл.2).

Берклиевская группа, показав неправильность стокгольмских результатов, сообщила<sup>/26/</sup> в 1958-1959 годах о синтезе 3-секундного  $^{254}\text{102}$  с  $E_{\alpha} = 8,3$  Мэв, распадающегося в 30% случаев спонтанным делением, а в 1961 году в работе<sup>/53/</sup>, посвященной элементу 103, вскользь упоминалось об обнаружении  $^{255}\text{102}$  с  $T_{1/2} = 15 \text{ сек}$

и  $E_{\alpha} = 8,3$  Мэв. В Дубне в самом начале исследований по элементу 102 было затрачено много времени на попытки воспроизведения этих результатов по  $^{254}_{102}$  и  $^{255}_{102}$ , которые, однако, также оказались неправильными (сравни табл.2). Тем не менее берклиевская группа продолжает настаивать на том, чтобы ее данные 1958-1961 годов считались открытием элемента  $102^{43/}$ . Поэтому мы вынуждены обсудить их несколько подробнее.

Первый аргумент американских авторов состоит в том, что в 1958 году было доказано присутствие элемента в продуктах облучения: при использовании метода двойной отдачи (§ 2.4) на поверхности второго сборника радиохимическими методами были обнаружены атомы  $^{250}_{102}$  Fr.

Во-вторых, подчеркивается, что несмотря на неправильную идентификацию все же было зарегистрировано излучение 102-го элемента, а именно, что, если судить по сходству свойств, в работе<sup>/26/</sup> наблюдался не  $^{254}_{102}$ , а  $^{252}_{102}$ , и в работе<sup>/53/</sup> не  $^{255}_{102}$ , а  $^{257}_{102}$ .

Прежде всего заметим, что упоминая о получении  $^{255}_{102}$ <sup>/53/</sup> в реакции C: (B, p, n), а реакции этого малоизученного типа до сих пор не применялись при открытии элементов и изотопов, американские авторы не привели фактически никаких количественных данных в пользу правильности идентификации Z и A и не описали условия опытов. Поэтому эти эксперименты нельзя повторить в другом месте и альтернативную трактовку их результатов "задним числом" > нельзя не считать произвольной. Может быть, действительно наблюдалось излучение изотопов 102-го элемента. Но они были другими, чем предполагалось первоначально, и тогда надо иметь в виду, что аргументы в пользу идентификации Z, приведенные в оригинальной статье<sup>/26/</sup>, недействительны. Если и наблюдался элемент 102, то это произошло по случайным обстоятельствам. Сами американские авторы, например, считают<sup>/43/</sup> "невозможным с уверенностью опреде-

лить причины, по которым произошли ошибки", допущенные в работе<sup>/26/</sup>, и предлагают только "разумные гипотезы, согласующиеся с имеющимися в настоящее время фактами". Что касается доказательства присутствия  $^{254}_{102}$  методом двойной отдачи по дочернему  $^{250}_{\text{Fm}}$ , то необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства. Указанный метод в этой же работе<sup>/26/</sup> дал вместо правильной величины  $T_{1/2} \approx 1$  мин значение  $T_{1/2} = 3$  сек. В этой связи интересно отметить, что в недавних опытах в Беркли<sup>/54/</sup> было обнаружено необычное поведение атомов  $^{250}_{\text{Fm}}$ , высаженных на сборнике из газа. Оно было весьма правдоподобно объяснено: оказалось, что у  $^{250}_{\text{Fm}}$  существует изомерное состояние и что явления отдачи, сопровождающие изомерный переход, приводят к отрыву атомов  $^{250}_{\text{Fm}}$  от поверхности, причем  $T_{1/2}$  изомера равен  $\sim 2$  сек.

Но независимо от степени достоверности, с которой было доказано присутствие атомов  $^{254}_{102}$  в продуктах облучения, нас беспокоит другое. Американские авторы выдвигают такую всеобъемлющую трактовку (правда, только в случае элементов 102 и 103), согласно которой открытием элемента является факт наблюдения распада его атомов или же простое установление присутствия атомов элемента в продуктах облучения. Но, если последовательно применять такие "критерии открытия", тогда можно ограничиться снятием спектра излучения суммы продуктов бомбардировки и после того, как другими авторами будет установлено, какая из линий принадлежит новому элементу, претендовать на авторство открытия. Следуя по этому пути, мы можем прийти и к следующему. В Дубне имеются интенсивные пучки тяжелых ионов и можно получать ядра вплоть до  $Z=113$ . На основании известных закономерностей в эффективных сечениях реакций ( $\text{HI}$ ,  $\text{хп}$ ), проводя облучение в мишени, мы можем быть уверены, что в продуктах облучения присутствуют атомы новых элементов. Для этого не нужно добавочных доказательств. Согласится ли



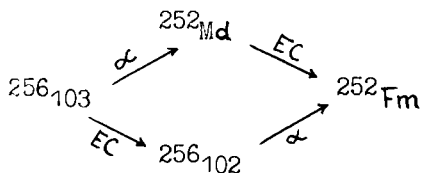
научная общественность признать это открытием?

Исходя из подобных представлений, мы считаем, что авторы дубненских работ 1963–1967 годов имеют полное основание считать себя открывателями элемента 102 и название жолиотий, предложенное ими в 1967 году для этого элемента, должно быть признано.

### 3.3. Элемент 103

В 1961 году берклиевская группа сообщила<sup>/53/</sup> о получении "лоуренсия"-257,  $\alpha$  - активного изотопа с  $T_{1/2} = 8$  сек и  $E_{\alpha} = 8,6$  Мэв, при облучении смеси изотопов калифорния ионами  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{B}$ . Именно эта работа рассматривается ими как открытие элемента (до этого группа два раза сообщала о наблюдении других активностей, возможно, принадлежащих 103-му элементу).

В 1965 году Донец и др.<sup>/55/</sup> в Дубне получили  $^{256}_{103}\text{Cz}$  по реакции  $^{243}_{101}\text{Am} (^{18}\text{O}, 5n) ^{256}_{103}\text{Cz}$  и правильно идентифицировали его, применив метод двойной отдачи (рис.6) и сняв кривую возбуждения. На втором сборнике собирались атомы  $^{252}_{101}\text{Fm}$ , так как этот изотоп является внучатым продуктом распада по двум возможным цепочкам с одним  $\alpha$  - распадом в каждой из них:



Фермий со сборника выделялся и идентифицировался радиохимическими методами. По его выходу была также построена кривая возбуждения  $^{256}_{103}\text{Cz}$ , которая послужила еще одним подтверждением правильности определения  $Z$  и  $A$ . Распределение  $^{252}_{101}\text{Fm}$  вдоль сборника дало для  $^{256}_{103}\text{Cz}$  значение  $T_{1/2} = 45 \pm 10$  сек. В 1967 году две дубненские группы<sup>/56,57/</sup> измерили энергию  $\alpha$  - частиц (опыты проводились на установке, изображенной на рис.8) и получили согласован-

ные данные: изотоп имеет сложный спектр излучения в области 8,35 - 8,5 Мэв, с наиболее интенсивной линией 8,43 Мэв. Лучшим значением  $T_{1/2}$  считают 35 сек. Берклиевская группа получила  $^{256}_{103}$  в своей лаборатории только в 1968 году по реакции  $^{249}_{94}\text{Cf} (^{11}\text{B}, 4n)^{256}_{103}$  и подтвердила найденные в Дубне свойства. В 1969 году в Дубне был синтезирован 20-секундный  $^{255}_{103}$  по реакции  $^{243}_{85}\text{Am} (^{16}\text{O}, 4n)^{255}_{103}$ . Наиболее интенсивная группа  $\alpha$ -частиц имеет энергию 8,4 Мэв<sup>/3,59/</sup>. Эти свойства были позже также полностью подтверждены в Беркли<sup>/60/</sup>.

С несколькими сотнями атомов  $^{256}_{103}$  были в нашей лаборатории в 1968 году выполнены первые химические эксперименты<sup>/61/</sup> в условиях, аналогичных опытам с элементом 102 (§ 3.2, рис.9). При фронтальной хроматографии хлоридов поведение атомов  $^{256}_{103}$ , получаемых облучением  $^{243}_{85}\text{Am}$  ионами  $^{18}\text{O}$ , прослеживалось по распределению на колонке внучатого  $^{252}_{88}\text{Fr}$ . Было показано, что хлорид 103-го элемента движется по колонке очень медленно подобно хлоридам редкоземельных элементов (рис.9), а, следовательно, является очень низколетучим. Это указывает на окислительное состояние не выше 3+ и доказывает актиноидные свойства этого элемента. В 1970 году была опубликована берклиевская работа<sup>/58/</sup> по экстракции  $^{256}_{103}$  из водных растворов теноилтрифторацетонам. Было показано, что элемент 103 в водных растворах устойчив в состоянии 3+.

Вернемся к вопросу об открытии элемента 103. В свое время дубненские группы провели ряд опытов по синтезу  $^{257}_{103}$  и пришли к однозначному выводу, что этот изотоп не обладает свойствами, приписанными ему в 1961 году<sup>/56,59/</sup>. В связи с этим противоречием американские авторы<sup>/7,63/</sup>, не публикуя никаких новых экспериментальных результатов, отказались от выводов работы 1961 года и заявили, что на самом деле ими наблюдался или  $^{258}_{103}$ , или  $^{259}_{103}$ . Новая интерпретация, однако, несовместима с важнейшим из тех немно-

гих сведений, приведенных в работе<sup>/53/</sup>, которое состояло в том, что кривые возбуждения этой активности были "по необходимости очень широкие" (изотоп ввиду сложного состава мишени должен был образовываться одновременно по нескольким реакциям. Авторы обзора<sup>/62/</sup> показали, что это утверждение было бы верным для  $^{257}_{103}$ , но в случае наблюдения изотопов с массой 258 или 259 кривые возбуждения должны были быть узкими, так как, несмотря на сложный изотопный состав мишени, столь тяжелые изотопы могли образоваться лишь путем немногих реакций. Только почти 10 лет спустя после своей экспериментальной работы и через несколько лет после ревизии ее выводов берклиевские авторы опубликовали новые экспериментальные данные<sup>/60/</sup>, которые, по их мнению, все же оставляют за ними право претендовать на авторство открытия элемента 103. Они повторно получили изотопы 255 и 256 и сообщили также о синтезе изотопов с массами 257-260. Идентификация выполнялась перекрестными облучениями и по кривым возбуждения. Использовались моноизотопные мишени. По их данным,  $^{258}_{103}$  имеет энергию  $\alpha$  - частиц (основная группа) 8,62 Мэв и период полураспада 4,2 сек. Это будто бы доказывает, что 8-секундный "лоуренсий" 1961 года был именно этим изотопом. В то же время, однако, не сделан какой-либо анализ тех сведений и аргументов, которые приводились в 1961 году, с точки зрения совокупности новых данных.

Мы вынуждены обратить внимание хотя бы на следующее. В суммарном спектре  $\alpha$  - частиц "из опытов номер 139-148"<sup>/53/</sup>, который является единственным графическим и вообще количественным материалом в этой статье, имеется четкая линия "лоуренсия" - 8,6 Мэв и примерно такой же интенсивности линия 8,2 Мэв, которая приписывалась  $^{255}_{102}$ , а сейчас -  $^{257}_{102}$  (§ 3.2). В этом спектре почти нет  $\alpha$  - частиц с промежуточными энергиями. Если принять берклиевскую интерпретацию этих линий, тогда как же можно объяс-

нить, что в новой работе<sup>/60/</sup> среди многочисленных спектров, которые были получены при бомбардировке моноизотопных мишеней со значительно меньшим содержанием свинца, нет ни одного столь "чистого" спектра, как в работе 1961 года? В этих спектрах линии изотопов  $^{258}_{103}$  и  $^{257}_{102}$  всегда сопровождаются сравнимыми с ними по активности линиями  $^{256}_{102}$ ,  $^{255}_{103}$ ,  $^{256}_{103}$ , которые дают  $\alpha$ -частицы в диапазоне 8,2–8,6 Мэв. Эти изотопы должны эффективно регистрироваться при любом временном графике движения сборника мимо детекторов, нацеленном на изучение  $^{266}_{103}$  и  $^{257}_{102}$ , так как имеют близкие по величине периоды полураспада.

Если мы все же согласимся с тем, что линия 8,6 Мэв принадлежала элементу 103, нас призывают считать открытием простое наблюдение распада элемента. При этом признают, что изотоп был неправильно идентифицирован, но не доказывают, что новая интерпретация прежних результатов совместима с прежней аргументацией в пользу открытия. Ведь опять же сходство свойств двух активностей нельзя автоматически считать доказательством их идентичности. Здесь мы снова сталкиваемся с исключительно свободной трактовкой вопроса о том, что можно считать открытием элемента.

Дубненские авторы работ по изотопу  $^{256}_{103}$  считают, что авторство открытия принадлежит им. В 1967 году они обратились в Комиссию по номенклатуре неорганической химии ИЮПАК с предложением не применять для 103-го элемента названия лоуренсий. Они ожидали, что группа из Беркли ответит на критику и обоснует свою новую интерпретацию открытия лоуренсия новыми экспериментальными данными и анализом работ. Этого не произошло, и поэтому авторы дубненских работ имеют, по нашему мнению, все основания предложить свое название для элемента 103.

### 3.4. Элемент 104

В 1962 году в Дубне были начаты опыты, направленные на синтез спонтанно делящегося изотопа элемента 104 в реакции  $^{242}\text{Pu} (^{22}\text{Ne}, 4n)^{260}\text{104}$ . Мишень облучалась на внутреннем пучке циклотрона У-30), чтобы максимально использовать имевшуюся тогда интенсивность. Аппаратура схематически изображена на рис.1. В начальный период работы вместо трековых детекторов для регистрации осколков деления применялись пропорциональные счетчики. В первых же опытах была обнаружена новая спонтанно делящаяся активность с  $T_{1/2} = 14$  мсек, которая привлекала к себе внимание. Перекрестные облучения и измерение кривой возбуждения показали, что это не изотоп 104-го элемента, а изомерное состояние ядра какого-то значительно более легкого элемента<sup>/41/</sup>. Сейчас известно, что это был  $^{242m}\text{Am}$ . Это означало открытие нового явления — изомерных уровней особой природы, распадающихся спонтанным делением с периодом полураспада на  $> 20$  порядков величины более коротким, чем у основного состояния (см. обзорную работу<sup>/42/</sup>). Заметим, что это открытие было сделано именно благодаря разработке методики для обнаружения элемента 104 по спонтанному делению, которая была для того времени уникальной по чувствительности и экспрессности.

Затем эксперименты были продолжены на внутреннем пучке ускорителя на установке, в которой вместо диска применялся сборник в виде бесконечной конвейерной ленты, вдоль которой можно было установить большое число детекторов и таким образом перекрыть больший диапазон времен жизни. Аппаратура такого же типа

сейчас применяется при работе на выведенном пучке циклотрона<sup>/25/</sup> и изображена на рис.10. В 1964 году эксперименты увенчались открытием элемента 104<sup>/64/</sup>. В продуктах облучения были обнаружены три спонтанно делящихся нуклида с периодами полураспада

да 14 мсек (см. выше),  $\sim 0,3$  сек и несколько секунд. Было показано, что активность с  $T_{1/2} \approx 0,3$  сек является искомым изотопом  $^{260}_{104}$ . Такая величина  $T_{1/2}$  резко отличалась от теоретических расчетов Юханссона<sup>/65/</sup>, выполненных в Беркли, которые давали в  $\sim 10^6$  раз более низкое значение. Было зарегистрировано около 150 распадов изотопа. Атомный номер и массовое число были определены прежде всего по кривой возбуждения, которая соответствовала реакции полного слияния с испарением 4 нейтронов. Другим доказательством явилось отсутствие активности в продуктах облучений, которые не могли приводить к  $^{260}_{104}$ , например, в комбинациях  $^{238}_{92}\text{U} + ^{22}_{10}\text{Ne}$  и  $^{242}_{94}\text{Pu} + ^{20}_{10}\text{Ne}$ .

Эти опыты были повторены в 1968–1970 годах при работе на внешнем пучке ускорителя (рис. 10). Новые результаты, которые были подытожены в работах Оганесяна и др.<sup>/25,66/</sup>, полностью согласуются с данными 1964 года. Было подтверждено, что, кроме  $^{260}_{104}$ , в продуктах облучения имеются активности с периодами полураспада, равными 14 мсек и несколько секунд. Для последней  $T_{1/2}$  был найден равным  $4,5 \pm 1,5$  сек. Период полураспада  $^{260}_{104}$  смог быть уточнен благодаря большому числу зарегистрированных актов распада. Отсутствовал также фон от вынужденного деления урана в детекторах под действием нейтронов, который был заметным при работе аппаратуры внутри камеры циклотрона. Уточненное значение составляет  $T_{1/2} = 0,1$  сек (рис. 11). Повторно была снята зависимость эффективного сечения от энергии ионов  $^{22}_{10}\text{Ne}$ . При этом за счет охвата более широкого диапазона энергий и меньшего фона удалось выявить, что активность с  $T_{1/2} = 4,5$  сек также является изотопом 104-го элемента. Его массовое число равно 259, так как энергетическая зависимость выхода соответствует ядерной реакции  $^{242}_{94}\text{Pu} (^{22}_{10}\text{Ne}, 5n) ^{259}_{104}$  (рис. 12). Кроме того, при энергии ионов  $^{22}_{10}\text{Ne}$  выше 125 Мэв наблюдалось преимущественное образование спонтанно

делящегося нуклида с временем жизни в несколько часов (по-видимому,  $^{256}\text{Fm}$ ). Был подтвержден порядковый номер обоих изотопов элемента 104 путем измерения углового распределения атомов отдачи с помощью коллиматоров. Данные, показывающие, что продукты с  $T_{1/2} = 0,1$  сек и  $T_{1/2} = 4,5$  сек получают через полное слияние, приведены на рис.13 (сравни рис.5).

Как выяснилось (см.ниже), изотоп  $^{259}\text{104}$  впервые наблюдался в опытах дубненской группы<sup>/35/</sup> по химической идентификации элемента 104.

Химические опыты проводились с 1965 года. Работа велась по методу фронтальной хроматографии на внутреннем пучке циклотрона (рис.7)<sup>/32/</sup>. В качестве носителя использовались пары  $\text{ZrCl}_4$  (0,05 мм рт.ст) и  $\text{NbCl}_5$  (0,15 мм рт.ст.). Время прохождения газа-носителя мишени к детекторам составляло 0,2 сек. Хроматографическая колонка имела длину 4 м, и детекторы спонтанного деления размещались вне камеры циклотрона, что полностью исключало наличие какого-либо фона. О результатах опытов кратко сообщалось в 1966 году<sup>/31/</sup>, и затем был опубликован полный отчет<sup>/32/</sup> с описанием всех деталей эксперимента и подробной аргументацией. Эти опыты показали, что при облучении  $^{242}\text{Pu} + ^{22}\text{Ne}$  ( $\sim 114$  Мэв) в продуктах имеется спонтанно делящаяся активность, которая быстро проходит через колонку в условиях, благоприятных для прохождения гафния (для него путем прямых измерений было найдено время  $\leq 0,4$  сек). Каждый опыт длился 2-3 суток. На детекторах не было обнаружено более 2 % атомов долгоживущих изотопов Sc, Cm и Cf, образовавшихся в опыте. Таким образом, спонтанно делящаяся активность не могла принадлежать актиноидному элементу или другому элементу, образующему в условиях опыта нелетучие хлориды. Это было еще раз подтверждено в этой же работе, когда энергия ионов  $^{22}\text{Ne}$  была увеличена до 128 Мэв, что приводит к возрастанию выхода всех продук-

тов с  $Z < 104$ . В этом опыте детекторами на выходе колонки не было зарегистрировано ни одного спонтанно делящегося атома. Все это позволило сделать однозначный вывод о химической идентификации элемента 104 как экагафния. На рис. 14 приведено распределение актов деления, зарегистрированных в камере с детекторами. Оно не противоречило величине  $T_{1/2} = 0,3$  сек, известной в то время <sup>64/</sup> для  $^{260}_{104}$ .

В последующие годы были выполнены дальнейшие исследования, результаты которых были опубликованы в 1969 году <sup>33/</sup>. Были проведены опыты с мишенями из  $^{242}\text{Pu}$  и  $^{243}\text{Am}$ , которые облучались ионами  $^{18}\text{O}$ . Эти комбинации приводят соответственно к ядрам с  $Z \leq 102$  и  $Z \leq 103$ . Спонтанно делящаяся активность со свойствами экагафния в продуктах не была обнаружена. Повторно проводилось облучение  $^{242}\text{Pu}$  при энергии  $^{22}\text{Ne}$  выше 125 Мэв, которое также дало отрицательный результат. В то же время при облучении этой мишени ионами  $^{22}\text{Ne}$  с энергией в пределах 114–118 Мэв снова наблюдался экагафний; в общей сложности было зарегистрировано свыше 60 распадов.

На основании исследований с многими известными элементами было установлено, что существует отчетливая корреляция между временем удерживания или теплотой адсорбции следовых количеств хлорида элемента на хроматографической колонке и энтальпией испарения макроколичеств соответствующего хлорида (рис. 14). Это позволило показать, что  $(104)\text{Cl}_4$  несколько менее летуч, чем  $\text{HfCl}_4$ , но значительно более летуч, чем  $\text{ThCl}_4$ . Его "температуру кипения" можно оценить приблизительно в  $450^\circ$ . В опытах на колонке со стенками, покрытыми хлористым калием, было показано, что  $(104)\text{Cl}_4$  подобно  $\text{HfCl}_4$  прочно связывается  $\text{KCl}$ .

Авторы химических опытов сознавали, что путем измерения распада 104-го элемента в длинной камере с детекторами можно полу-



чить истинную кривую распада (по распределению треков вдоль камеры) только в том случае, когда нет заметного хроматографического эффекта "удерживания" молекул при прохождении через камеру. При работе с новым элементом отсутствие удерживания нельзя проверить. Поэтому можно лишь утверждать, что истинное значение периода полураспада равно наблюдаемому или выше его. В различных сериях экспериментов были получены оценки от  $T_{1/2} \geq 0,2$  сек до  $T_{1/2} \geq 1$  сек. Последнее значение получено в серии с наибольшим числом зарегистрированных актов деления (рис.16)<sup>/33/</sup>. После упомянутого выше уточнения периода полураспада  $^{260}_{104}$  до 0,1 сек<sup>/25/</sup> стало ясным, что активность 104-го элемента, которая регистрировалась в химических опытах, не могла быть целиком обусловлена  $^{260}_{104}$ . Он имеет слишком малое время жизни и должен был в значительной степени распадаться до попадания в камеру с детекторами. Еще в работе<sup>/33/</sup> было высказано предположение о присутствии  $^{259}_{104}$ , спонтанное деление которого до того времени не изучалось. После того, как это было сделано в Дубне в 1970 году<sup>/66/</sup> (см.рис. 11,12), были поставлены новые химические опыты<sup>/35/</sup>. На этот раз 104 элемент выделялся методом термохроматографии. Условия облучения и режим хроматографического процесса были выбраны так, чтобы они были оптимальными для  $^{259}_{104}$ . На рис.17 приведен результат выделения этого изотопа вместе со следовыми количествами гафния на термохроматографическом участке колонки, часть которой работала в режиме фронтальной хроматографии. В начале изотермического участка была зарегистрирована еще одна группа осколков деления. Она находилась в пределах зоны хлорида скандия, которая, как было также показано, совпадает с зоной Cm и Cf. Эти осколки, по-видимому, обусловлены распадом  $^{256}_{Fm}$ . Время движения газа от мишени до градиентной части колонки было выбрано так, чтобы  $^{260}_{104}$  распадался большей частью до того, как он мог попасть на участок

колонки с детекторами спонтанного деления. Это послужило дополнительным подтверждением выделения именно изотопа с массой 259. Таким образом установлено, что в химических опытах, начиная с 1966 года, в основном регистрировался изотоп 259. То, что для периода полураспада элемента  $^{104}$  получались значения, промежуточные между  $T_{1/2}$  для  $^{260}_{104}$  и  $^{259}_{104}$ , было, несомненно, результатом эффекта хроматографического удерживания  $^{259}_{104}$  в камере с детекторами и наложения кривых распада двух изотопов.

Следовательно, в 1964 году в Дубне был открыт и идентифицирован ядернофизическими методами изотоп  $^{104}$  элемента с массой 260. В 1966 году этот элемент был выделен химически и, в сущности, повторно открыт, так как его химическая идентификация комбинировалась с перекрестными облучениями и локализацией кривой возбуждения. Это дало авторам физических и химических работ полное право обратиться в 1967 году в Комиссию по номенклатуре неорганической химии ИЮПАК с предложением присвоить элементу  $^{104}$  название курчатовий.

На протяжении ряда лет Гиорсо с сотрудниками пытались поставить под сомнение правильность дубненских данных о свойствах  $^{260}_{104}$ . Эксперименты по элементу  $^{104}$  ими не проводились, и критика основывалась на одной из возможных графических систематик периодов полураспада четно-четных изотопов относительно спонтанного деления<sup>/43,67/</sup>. Простой экстраполяцией этих графиков для  $^{260}_{104}$  предсказывается период полураспада порядка  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  сек. Так как эта систематика не имеет теоретического обоснования, то, на наш взгляд, следует, скорее, обсуждать, насколько правомочна ее экстраполяция. В систематике, в частности, нет места для островков стабильности, что находится в противоречии с общепризнанными теоретическими предсказаниями. Данные по  $^{260}_{104}$  и последние ре-

зультаты по спонтанному делению других изотопов элементов 104 и 105, скорее всего, указывают на то, что начинают проявляться признаки близости этих островков.

Лишь в 1969 году появилось первое сообщение об опытах по синтезу элемента 104 в США<sup>/67/</sup>. Утверждалось, что при облучении  $^{246}\text{Cm}$  ионами  $^{80}\text{O}$  и  $^{248}\text{Cm}$  ионами  $^{16}\text{O}$  не образуется 0,1-секундная спонтанно делящаяся активность и что это показывает ошибочность дубненских данных о  $^{260}\text{104}$ . Следует, однако, отметить, что на самом деле было только показано, что эффективное сечение образования изотопа составляет не более 10 % от величины, ожидаемой по расчету. Кроме того, облучение проводилось лишь при одной энергии каждой частицы. В работе не приводятся сведения о выходе и природе других спонтанно делящихся продуктов.

Американские авторы изучали далее  $\alpha$  - распад изотопов с массовыми числами 257, 259 и 261, для которых они нашли периоды полураспада соответственно 4,5 сек, 3 сек и 1 мин<sup>/67,68,69/</sup>. Работы содержали некоторые неясные моменты в экспериментальных данных, на которые было обращено внимание дубненскими авторами<sup>/3,29/</sup>. В ответ на это в новой работе берклиевской группы<sup>/54/</sup> сообщается о выполнении дополнительных экспериментов.

Если вернуться к вопросу об авторстве открытия элемента 104, то необходимо отметить следующее. Выводы берклиевской группы о неправильной идентификации  $^{260}\text{104}$  никак нельзя считать достаточно обоснованными ни теоретически, ни экспериментально. Кроме того, они не имеют отношения к идентификации  $^{259}\text{104}$  химическим методом, наоборот, для периода полураспада этого изотопа в обеих лабораториях получены согласующиеся данные.

Таким образом, в Дубне в 1964 и 1966 годах были обнаружены два изотопа и элемент 104 курчатовий был выделен химически. Поэтому нет никаких оснований применять для элемента 104 название

резерфордий, предложенное американскими авторами после того, как лишь в 1969 году они получили этот элемент в своей лаборатории и в 1970 году провели предварительные химические опыты с 15 атомами<sup>/70/</sup>.

### 3.5. Элемент 105

С 1968 года в Дубне проводятся работы по поиску элемента 105 в продуктах облучения  $^{243}\text{Am}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$ . Первые опыты<sup>/28/</sup> были нацелены на обнаружение  $\alpha$  - активных изотопов с использованием аппаратуры, изображенной на рис.3, и измерениями задержанных совпадений  $\alpha$  - частиц ( § 2.4). Наблюдалось небольшое число частиц короткоживущих излучателей с  $E_\alpha$  около 9,4 и 9,7 Мэв. Эти энергии соответствовали предсказаниям для  $^{261}_{105}$  и  $^{260}_{105}$ , и было высказано предположение<sup>/28/</sup>, что наблюдаются именно эти изотопы. Эффективное сечение образования, однако, было значительно ниже расчетного, и это наводило на мысль<sup>/71,72/</sup>, что наиболее интенсивные линии этих излучателей лежат в более мягкой области спектра, благодаря переходам на возбужденные уровни дочерних ядер. Однако в этой части спектра имел место заметный фон, происходящий от примесей свинца в мишени.

По этой причине в конце 1969 года были предприняты поиски 105-го элемента по спонтанному делению. Опыты на установке с ленточным конвейером (рис.10) при энергии ионов неона 115 Мэв были успешными. В феврале 1970 года сообщалось<sup>/71/</sup> о наблюдении спонтанно делящегося нуклида с периодом полураспада  $\sim 2$  сек (рис.18). Интегральное угловое распределение атомов отдачи оказалось близким к кривой для продуктов полного слияния (рис.13), что с большой степенью достоверности указывало на  $Z = 105$ . Только ядра 104-го и 103-го элементов, возникающие по реакциям ( $^{22}\text{Ne}, p, n$ ) и ( $^{22}\text{Ne}, \alpha, n$ ) соответственно, могли бы, по-видимому, иметь такое же (в пределах ошибок измерения) угловое распределение, как про-

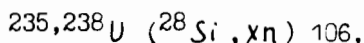
дукты реакции ( $^{22}\text{Ne}, xn$ ). Но эффективное сечение образования 2-секундного нуклида было много больше, чем возможное сечение реакции ( $^{22}\text{Ne}, pxn$ ), а возможность того, что он имеет  $Z=103$ , была исключена путем синтеза различных изотопов 103-го элемента при облучении америция ионами кислорода; спонтанное деление у них не было обнаружено. Таким образом было надежно показано, что открыт изотсп элемента 105 с массой 260 или 261. В течение последующих трех месяцев были получены следующие новые данные: снова измерен период полураспада ( $1,8 \pm 0,6$  сек), снята кривая возбуждения (рис.19), которая указала на массовое число  $261^{/72/}$ , были измерены спектры  $\alpha$  - распада при использовании мишени, тщательно очищенной от свинца, и показано, что линии с  $E_\alpha = 8,9$  и  $9,1$  Мэв относятся к элементу 105. Наконец, были выполнены химические опыты<sup>/34/</sup> методом фронтальной термохроматографии; было найдено, что зона адсорбции хлорида элемента 105 (зарегистрировано 18 атомов) находится при температуре более низкой, чем зона хлорида гафния, но более высокой, чем зона хлорида ниобия. Такие свойства летучести хлорида соответствуют предсказываемым свойствам экатантала.

Почти одновременно с опытами по спонтанному делению элемента 105 в Дусне, синтез этого элемента проводился также в Беркли, но поиск шел по  $\alpha$  -излучению. В апреле 1970 года была направлена в печать работа<sup>/74/</sup>, в которой сообщается об изотопе  $^{260}_{105}$  с  $T_{1/2} = 1,6 \pm 0,3$  сек и  $E_\alpha = 9,06$  Мэв (основная группа), полученном в реакции  $^{249}\text{Cf} (^{15}\text{N}, 4n) ^{260}_{105}$ . Идентификация проводилась по методу двойной отдачи и по кривой возбуждения. В работе по элементу  $103^{/60/}$  коротко упоминается о том, что получен также  $^{261}_{105}$  с  $T_{1/2} \approx 2$  сек и  $E_\alpha = 8,93$  Мэв. Нетрудно видеть, что эти данные по периодам полураспада находятся в согласии с дубненским открытием и энергии  $\alpha$  - частиц также совпадают.

Берклиевская группа представила свою работу<sup>/74/</sup> как открытие элемента 105 и предложила для него название ганий. Позже американские авторы признали<sup>/75/</sup>, что в этой заявке они сознательно умолчали о том, что до направления своей работы в печать они имели в своих руках сообщение об обнаружении 105-го элемента в Дубне. Таким образом, вопрос о приоритете открытия не может больше быть предметом спора и элемент 105 должен получить наименование нильсборий, предложенное авторами дубненских работ.

### 3.6. Элемент 106

В Дубне в настоящее время проводятся поиски спонтанно делящихся изотопов этого элемента на аппаратуре с ленточным транспортером (см. рис. 10) и их  $\alpha$ -распада на установке со сбором на фильтрах и измерением по задержанным совпадениям (рис. 3). Для синтеза используются изотопы урана, облучаемые ионами кремния



что позволяет искать изотопы с массовыми числами  $A \leq 262$ , а также взаимодействие



для получения изотопов вплоть до массы 264.

С атомами вольфрама были выполнены модельные химические опыты. Они показали возможность химической идентификации элемента 106, если его свойства достаточно близки к вольфраму. Последний в виде летучих хлорокисей надежно отделяется фронтальной термохроматографией (рис. 16) от тантала гафния, лантаноидов и многих других элементов, причем на процесс отделения затрачивается время порядка 0,1 сек.

### 3.7. Элемент 107

Поиски этого элемента ведутся в Дубне на той же аппаратуре, что и в случае элемента 106. Для синтеза облучают изотопы урана ионами фосфора

235,238 U ( $^{31}\text{P}$ , xn) 107.

Были выполнены химические опыты с атомами рения. Хлориды и хлорокиси рения достаточно летучи. Некоторую трудность представляет разделение рения и вольфрама. Было показано, что рений может быть очень селективно выделен из продуктов облучения, если на вход колонки подавать не хлорирующие компоненты, а кислород.

Приведенный выше материал показывает, что большая часть экспериментальных работ по трансформированным элементам была выполнена в двух лабораториях - Дубне и Беркли. В обоих местах поиск проводился как по  $\alpha$ -распаду, так и по спонтанному делению. В Беркли почти целиком делается упор на синтез и изучение  $\alpha$ -активных изотопов. Дубненская лаборатория считает более перспективной ориентацию на спонтанное деление, хотя одновременно достаточно широко ведутся работы и по  $\alpha$ -распаду. Это направление было принято в самом начале выполнения программы, исходя из перспективы, что с возрастанием атомного номера спонтанное деление должно постепенно становиться преобладающим способом распада. Эффективный поиск сверхтяжелых элементов также возможен прежде всего по спонтанному делению (см. § 4.2).

Применение в Дубне мишеней со сравнительно высоким атомным номером и тяжелых бомбардирующих частиц приводит к низкому выходу мешающих спонтанно делящихся активностей. Как указывалось в § 2.1, среди побочных продуктов облучения с наибольшим эффективным сечением образуются продукты деления составных ядер; но это почти целиком  $\alpha$ -активные изотопы. Из остальных процессов с наибольшим выходом идет передача небольшого числа нуклонов ядру мишени или же, наоборот, отрыва от него комплекса частиц. Эти реакции приводят к нуклидам с  $Z$  и  $A$ , близкими к изотопу-

мишени. Они имеют значительно большее эффективное сечение, чем реакции (HI, хп). При облучении U, Np, Pu и Am<sup>m</sup> реакции передачи<sup>1</sup> дают изотопы, которые испытывают фактически только α-распад, β-распад или К-захват. Некоторые из них, правда, спонтанно делятся из изомерного состояния, но такие изомеры образуются с гораздо меньшим выходом, чем ядра в основном состоянии /76/. К тому же, за исключением <sup>242m</sup>Am (T<sub>1/2</sub> = 14 мсек), они имеют периоды полураспада меньше 1 мсек.

С другой стороны, на тяжелых мишенях (Cf, Es), которые применяются в Беркли, реакции передачи могут приводить к легким изотопам фермия, 102-го и последующих элементов, которые в заметной степени испытывают спонтанное деление из основного состояния и имеют периоды полураспада в широком диапазоне времени. Этим, по-видимому, объясняется преимущественная ориентация берклиевской группы на α-активные изотопы.

Многолетняя традиция и опыт исследований по спонтанному делению /77/, применение высокочувствительных бесфоновых детекторов осколков деления, более благоприятные условия фона, разработка аппаратуры для детального снятия сложных кривых распада, последовательное и комбинированное применение универсальных ядернофизических и химических методов идентификации - все это сделало возможным открытие в дубненской лаборатории 104-го и 105-го элементов по спонтанному делению их ядер и позволяет вести опыты по синтезу еще более тяжелых элементов.

### 3.8. Критерии открытия

При рассмотрении истории отдельных элементов мы исходили из следующих критериев.

1) "Элемент" есть прежде всего понятие из области химии и атомной физики. Если изучаются только радиоактивные свойства изотопов и применяются ядернофизические доказательства правильности



идентификации, работу можно считать открытием элемента только в том случае, когда выводы как об атомном номере, так и о массовом числе не подвергаются ревизии в последующих исследованиях. Нужно помнить, что, как правило, определение радиоактивных свойств не представляет ценности для ядерной физики, когда ошибочно определено массовое число.

2) Если порядковый номер установлен химическими способами или средствами атомной физики (рентгеновская спектроскопия и др.), тогда даже без ядернофизической идентификации работу следует признать открытием. В этом случае массовое число изотопа вообще может оставаться неизвестным.

Такие критерии, как нам кажется, применимы не только на современном этапе синтеза элементов с помощью тяжелых ионов, но и при использовании более широкого круга методов синтеза и поисков новых элементов. Некоторые из них будут обсуждаться в последующих параграфах.

Мы считаем, далее, что печатные работы, посвященные открытию нового элемента, должны содержать изложение "Экспериментальной части" в форме, возможно близкой к протокольной. В них должен быть однозначно определен порядковый номер элемента и изменены свойства распада изотопов с точностью, соответствующей хорошему современному уровню экспериментальной техники. Должна обсуждаться возможная неоднозначность в определении массового числа.

Краткий очерк истории открытия трансфермиевых элементов показывает, что рассмотрение конкурирующих заявок на открытие элемента с точки зрения установления авторства не может быть обязанностью Комиссии по номенклатуре неорганической химии ИХПАК. Характер проблемы требует привлечения специалистов по различным от-

расширению знаний: ядерной физике и химии, атомной физике, а в будущем, возможно, и по геохимии, некоторым разделам астрономии и т.п. Мы и наши коллеги в Дубне полагаем, что можно было бы создать комиссию из представителей различных международных научных союзов для систематического квалифицированного рассмотрения работ по новым элементам. Заключение этой комиссии создавало бы основу для дальнейшей работы специализированных номенклатурных органов.

Нам кажется, что обсуждение и затем принятие согласованных критериев и организационных мер предотвратило бы бесплодные полемике об авторстве открытий и названиях новых элементов и дало бы возможность исследователям сосредоточиться на положительной работе в интересах прогресса в этой чрезвычайно увлекательной области ядерных исследований.

#### IV. СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

##### 4.1. Теоретические предсказания

В ряде обзоров последнего времени<sup>/2,78-82/</sup> подробно обсуждается содержание многочисленных теоретических работ, опубликованных за последние годы, которые посвящены проблеме сверхтяжелых элементов. Мы здесь поэтому только кратко отметим основные этапы развития этих идей.

В 1958 году Вернер и Уилер<sup>/83/</sup> рассмотрели вопрос о числе возможных будущих элементов, исходя из простой капельной модели ядра. Они пришли к выводу, что очень тяжелые изотопы (для которых значение параметра  $Z^2/A$  существенно ниже критического) элементов вплоть до  $Z \approx 150-160$  могли бы иметь периоды полураспада больше  $10^{-4}$  сек. Эти исследователи предсказывали существование длинного "мыса" стабильности. До настоящего времени, однако, не было предложено никаких способов получения ядер с необходимым по этой теории огромным избытком нейтронов.

По мере накопления экспериментальных данных о периодах полураспада спонтанно делящихся ядер все отчетливее обнаруживались большие отклонения от предсказаний капельной модели. В 1961 году авторы обзора<sup>/84/</sup> отметили, что простая экстраполяция экспериментальных данных о периодах полураспада четно-четных изотопов трансурановых элементов приводит к гораздо более пессимистическим оценкам числа элементов, которые можно надеяться открыть в будущем с помощью известных способов синтеза. В то же время они не исключали, что возможные эффекты ядерных оболочек могут изменить эту ситуацию к лучшему.

Решающим шагом в понимании того, как влияет оболочечная структура ядра на спонтанное деление, стала работа Майерса и Святеки<sup>/85/</sup>. Эти авторы рассмотрели потенциальную энергию ядра, которая является функцией  $Z$ ,  $N$  и формы ядра, с точки зрения капельной модели с "оболочечными поправками". Они пришли к полумпирическому выражению для энергии ядерной деформации, которое, кроме жидкокапельной части, содержало оболочечные поправки, причем последние исчезали по мере увеличивающегося отклонения от сферической формы. Они смогли вывести отсюда зависимость равновесной деформации ядра и массы основного состояния от  $Z$  и  $N$  и вычислить высоту барьера деления. Заметим, что в простой капельной модели все ядра рассматривались как сферические, что противоречит опытным данным.

Майерс и Святеки отметили, что оболочечные поправки к высоте барьера деления настолько существенны, что дважды магические ядра в области сверхтяжелых элементов (они указывали на  $^{310}_{126}$ ), которые вследствие большого значения  $Z^2/A$  должны как будто быть абсолютно неустойчивыми относительно спонтанного деления, могут на самом деле иметь барьер деления около 10 Мэв.

Эти чрезвычайно интересные выводы были в основном качественными, так как было только указано на увеличение высоты барьера деления. Вторым важнейшим шагом в развитии теории стабильности сверхтяжелых ядер стал "метод Струтинского". Этот автор<sup>/86/</sup> нашел способ расчета детальной формы барьера деления, т.е. изменения оболочечных поправок по мере деформации ядра в процессе деления. Для расчета используются схемы одночастичных уровней, которые еще раньше были введены Нильссоном для интерпретации данных по ядерной спектроскопии деформированных ядер. Плодотворность метода Струтинского была продемонстрирована на примере спонтанно делящихся изомеров (см. § 3.4): на барьере деления, рассчитанном по новой теории, обнаруживается неглубокий минимум при деформации большей, чем у основного состояния. Это является серьезным обоснованием предположения<sup>/87/</sup> о том, что спонтанно делящиеся изомеры являются изомерами формы.

Метод Струтинского дал возможность подойти к реалистическим расчетам времен жизни относительно спонтанного деления,  $\alpha$ -распада в области сверхтяжелых ядер. Дубненские теоретики внесли существенный вклад в эти исследования<sup>/88-91/</sup>.

К сожалению, модели ядра являются приближенными и, к тому же приходится экстраполировать их параметры, так же как и параметры динамики процесса деления, на удаленную область  $Z$  и  $N$ . Вследствие этого разные авторы приходят к сильно различающимся результатам расчетов. Даже для ближайших и магических чисел предсказываются неодинаковые значения ( $Z$  от 114 до 126;  $N$  от 164 до 228), хотя в большинстве работ и называется  $Z = 114$  или 126 и  $N = 184$ . Еще более неопределенными являются предсказания того, какие ядра из островков стабильности будут иметь наибольший общий период полураспада, так как при учете других видов распада, помимо спонтанного деления, максимум устойчивости смещается от дважды магического ядра.

Что касается абсолютных оценок времени жизни дважды магического ядра относительно спонтанного деления, то они колеблются в пределах от микросекунд до  $10^{14}$  лет<sup>/82/</sup>. Несколько более "точными" являются расчеты времени жизни по отношению к  $\alpha$  - распаду, но и здесь различные ядерные модели и наборы параметров приводят к отличиям в пределах 6-8 порядков величины<sup>/91/</sup>.

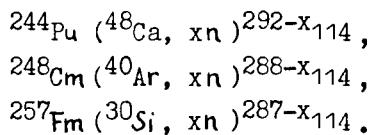
В такой ситуации, как нам кажется, слово за экспериментаторами. Намечаются два пути к сверхтяжелым элементам. Короткоживущие изотопы нужно попытаться синтезировать в ядерных реакциях. В то же время, как полагают некоторые авторы<sup>/92/</sup>, периоды полураспада наиболее устойчивых изотопов в районе  $Z = 110-114$  могут превысить даже  $2 \cdot 10^8$  лет. Такие ядра могли сохраниться на Земле со времени возникновения вещества солнечной системы, и их следует искать в природных материалах, руководствуясь геохимическими гипотезами (элементы 110-114 должны быть химическими аналогами Pt, Au, Hg, Tl, Pb). Если в пределах нашей Галактики непрерывно протекают процессы синтеза сверхтяжелых элементов, тогда ядра с периодами полураспада  $> 10^4$  лет могут находиться в составе космических лучей и, в конечном счете, также концентрироваться в некоторых природных средах и объектах.

Надо подчеркнуть, что неопределенность в количественных предсказаниях ставит экспериментаторов в чрезвычайно трудные условия. Опыт можно нацелить на синтез изотопов только в какой-то узкой области  $Z$  и  $A$ , и радиометрические и химические методики для обнаружения новых ядер могут охватить лишь ограниченный интервал времен жизни. Поиски в природе можно проводить только имея представление о химическом характере элемента. Несмотря на эти трудности, в Дубне были предприняты широкие исследования по обоим отмеченным направлениям. Ниже, при обсуждении экспериментальных

исследований, мы будем исходить из предположения, что магическими числами являются  $Z = 114$  или  $126$  и  $N = 184$  (сривни рис.24).

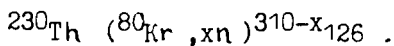
#### 4.2. Синтез в ядерных реакциях с тяжелыми ионами

Логическим продолжением опытов по синтезу трансфермиевых элементов являются попытки получения сверхтяжелых элементов в реакциях полного слияния. Этим путем, по-видимому, доступна область около элемента  $126$ , но не островок вблизи  $Z = 114$ . Причина заключается в том, что в дважды магическом  $^{298}_{114}$  отношение  $N/Z$  соответствует линии  $\beta$  - стабильности, а реакции полного слияния, как отмечалось в 2.1., неизбежно приводят к ядрам с дефицитом нейтронов. Любые комбинации имеющихся мишеней с тяжелыми ионами не дают изотопов 114-го элемента с числом нейтронов, достаточно близким к  $184$ . Это можно проиллюстрировать следующими примерами:



Практически можно осуществить реакции с  $x = 3, 4, \dots$ , и это приводит к  $N \leq 175$ .

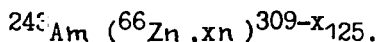
$^{310}_{126}$  является нейтронодефицитным изотопом и в реакциях полного слияния получается нужное массовое число. Так, например, в Орсе (Франция) начаты эксперименты по облучению тория ионами криптона<sup>/93/</sup>. Примером может служить реакция



Энергетический баланс слияния ядер тория и криптона таков, что при энергии ионов Kr, близкой к кулоновскому барьеру, энергия возбуждения составного ядра очень низка. Поэтому не исключены даже реакции с  $x=0$ . Тогда и вероятность деления составного ядра

будет очень мала, и эффективное сечение образования искомым сверхтяжелых изотопов может достигать относительно большой величины. Есть основания надеяться, что и реакции с  $x=0$  не будут сильно подавлены за счет конкурирующего деления: вместе с увеличением барьера деления ядра в основном состоянии возрастает также вероятность снятия возбуждения путем испарения нейтронов<sup>/94/</sup>, т.е. фактор  $\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f}$  (см. § 2.1). Поэтому можно сделать попытку синтезировать элементы вблизи атомного номера 126, несмотря на то, что имеющиеся интенсивности пучков соответствующих тяжелых бомбардирующих частиц пока относительно малы.

В Дубне проводятся эксперименты по облучению америция ионами цинка<sup>/95/</sup>:



Здесь уместно напомнить, что изотопы с нечетным  $A$  или нечетно-нечетные изотопы имеют, как правило, большие периоды полураспада (относительно  $\alpha$ -распада и спонтанного деления), чем ближайшие четно-четные ядра, из-за "фактора запрета". Эти соображения повлияли на выбор приведенной комбинации. Следует отметить, что в любом случае в области  $^{310}\text{126}$  общие периоды полураспада четно-четных изотопов не могут превышать малых долей секунды<sup>/91/</sup>. Какова бы ни была степень стабилизации ядер относительно спонтанного деления, эти нейтронодефицитные изотопы будут иметь большие энергии  $\alpha$ -распада и, следовательно, короткие времена жизни относительно этого вида радиоактивности (сравни рис.24).

Интенсивность пучка ионов  $\text{Zn}^{10+}$  в Дубне достигает  $10^9 - 10^{10}$  частиц/сек. Методика позволяет регистрировать спонтанно делящиеся ядра сверхтяжелых элементов с  $T_{1/2} > 10^{-9}$  сек. Для этого за мишенью размещены детекторы таким образом, чтобы регистрировать распад ядер отдачи на лету, а также и после того, как они вбились в сборник. В настоящее время выясняются возможные источ-

ники фона при использовании этой методики.

В 1964 году в Дубне было предложено использовать деление возбужденных составных ядер, получаемых в реакциях с тяжелыми ионами, для получения изотопов и элементов (в т.ч. сверхтяжелых) в качестве осколков деления<sup>8,96/</sup>. Такая возможность основана на большой ширине массового и зарядового распределений продуктов деления. Были выполнены систематические исследования деления составных ядер<sup>97/</sup>, и полученные зависимости параметров зарядового и массового распределения от массы и энергии тяжелых ионов позволили провести некоторые оценки для еще более тяжелых бомбардирующих частиц. На рис. 20 приведены некоторые экспериментальные данные по массовым распределениям первичных осколков деления и оценки для случая взаимодействия ксенона и урана. Видно, например, что выход в области масс 250–260 падает всего в десять раз по сравнению с выходом осколков симметричного деления.

При более детальном рассмотрении проблемы оказалось необходимым учесть, что первичные осколки будут получаться в возбужденном состоянии и за счет этого будут делиться. Следовательно, выход изотопов тяжелых элементов будет меньше выхода первичных осколков соответствующих масс. Некоторые расчетные данные, полученные Оганесяном и др.<sup>98/</sup>, приведены на рис. 21. Благодаря слабой делимости дважды магических ядер, выход  $^{298}_{114}$  может быть существенно больше выхода изотопов в области фермия – его эффективное сечение образования было оценено в  $10^{-30}$  см<sup>2</sup>. В таком случае достаточно пучка ионов ксенона с интенсивностью  $10^9$  частиц/сек, чтобы попытаться получить сверхтяжелые элементы.

В настоящее время в дубненской лаборатории проводятся опыты по ускорению ионов ксенона с использованием тандемной работы двух циклотронов, связанных ионопроводом длиной 70 м. Ионы  $\text{Xe}^{8+}$  ускоряются на циклотроне У-300 на третьей гармонике основной частоты



до энергии несколько меньше 1 Мэв/нуклон. Ток пучка  $\text{Xe}^{8+}$  на конечном радиусе ускорителя достигает 1 мка. Частицы вводятся в центр ускорителя У-200, где пропускаются через металлическую фольгу для "обдирки" электронов. Ионы с зарядом от 24+ до 29+ можно ускорить на У-200 до энергии  $\sim 7$  Мэв/нуклон. Ожидаемая интенсивность пучка составляет около  $10^{10}$  частиц/сек.

#### 4.3. Поиски в природе

Поиски сверхтяжелых элементов в природных средах имеют примерно трехлётнюю историю /5,6,99,100/.

Атомный номер, а следовательно, и химическая природа сверхтяжелого элемента, который мог сохраниться со времени образования Земли, точно не известны. Поэтому при попытках обнаружения долгоживущих изотопов мы нацеливаемся по возможности на все элементы островка, обусловленного дважды магическим ядром  $^{298}_{114}$ . С этой целью в первую очередь создавались высокочувствительные радиометрические установки для обнаружения новых природных активностей. Меньшее внимание пока уделяется попыткам предварительного химического концентрирования сверхтяжелых элементов в лабораторных условиях.

Изотопы сверхтяжелых элементов должны, по-видимому, испытывать спонтанное деление или  $\alpha$  - распад. Начиная с 20-х годов в литературе время от времени появлялись сообщения об обнаружении в различных природных объектах новых  $\alpha$  -излучателей. Внимание привлекли прежде всего работы групп Шинтельмейстера (Германия), Чердынцева (СССР) и Адамса (США). В них сообщалось об активностях с  $E_{\alpha} = 4,4-4,6$  Мэв, которые по некоторым данным обнаруживали химические свойства, подобные свойствам осмия. Возникал вопрос о их возможной принадлежности экаосмию - элементу 108. После появления гипотезы об островках стабильности в Дубне и, несколь-

ко нам известно, также в других местах были предприняты попытки воспроизведения этих работ. Они не привели к положительным результатам. Нам представляется, что поиск сверхтяжелых элементов по  $\alpha$ -излучению является в настоящее время очень трудной задачей главным образом из-за загрязнения земной поверхности (а также большинства ядерных лабораторий) техногенными трансурановыми  $\alpha$ -излучателями.

По нашему мнению, наиболее вероятно обнаружить сверхтяжелые элементы по спонтанному делению. Если сам долгоживущий изотоп испытывает не спонтанное деление, а другой вид распада, то в цепочке его распада обязательно должен встретиться спонтанно делящийся нуклид. Это с неизбежностью следует из тех соображений, которые приводят к предсказанию островков стабильности. Радиометрические методики для обнаружения спонтанного деления обладают большой чувствительностью, так как акты деления можно регистрировать с высокой эффективностью при очень низком уровне фона.

В нашей лаборатории систематически применяются следующие высокочувствительные детекторы спонтанного деления.

1) Трековые детекторы осколков деления. Лучшим материалом в данном случае являются полимерные пленки, которые содержат очень мало урана, единственного известного сейчас природного спонтанно делящегося элемента. В Дубне применяется методика, по которой исследуемый образец размельчают, наносят в виде пасты слоем толщиной в несколько микронов на полимерную пленку (площадь образца около  $4 \text{ м}^2$ ) и покрывают другой пленкой. Спонтанное деление в образце приводит к появлению совпадающих по координате следов в обеих пленках. Просмотр детекторов поддается автоматизации. При экспозиции в несколько десятков суток можно достигнуть чувствительности, соответствующей кажущемуся периоду полураспада образца около  $10^{22}$  лет. (Кажущийся период полураспада

равен истинному периоду полураспада сверхтяжелого элемента, деленному на атомную долю элемента в образце. При истинном  $T_{1/2} = 10^9$  лет указанное значение чувствительности соответствует примерно содержанию  $10^{-13}$  г элемента/г образца).

2) Большие пропорциональные счетчики осколков деления (рис. 22)/101/. Чувствительность счетчика достигает такого же порядка величины, как и в случае трековых детекторов.

При измерении образцов, содержащих тяжелые элементы (Pb, Bi), обязательным условием является защита счетчиков, так же как и трековых детекторов, от космических лучей, которые вызывают деление ядер этих элементов. Для этого счетчики помещают под бетонную защиту толщиной не менее 2 метров, а трековые детекторы экспонируют в подземных шахтах.

3) Детекторы мгновенных нейтронов деления (рис. 23)/102/. Это в принципе установка для определения среднего числа мгновенных нейтронов деления -  $\bar{\nu}$ . Число нейтронных счетчиков в установке - 14.

Ожидают, что для сверхтяжелых элементов  $\bar{\nu} \geq 8/80,103/$ . Поэтому имеется большая вероятность зарегистрировать акт деления как совпадение трех или большего числа нейтронов. Если считать только события с такой кратностью отсчетов, то фон от спонтанного деления примесей урана ( $\bar{\nu} = 2$ ) исчезающе мал.

В настоящее время аппаратура располагается в шахте в соляных залежах на глубине 1100 метров водяного эквивалента для защиты от нейтронных вспышек, вызываемых космическими лучами. Для полного исключения этого источника фона аппаратура имеет защиту из слоя Г.М.- счетчиков, включенных на антисовпадения. Благодаря большому весу образцов (до 50 кг), которые можно разместить в замедлителе, детектор обладает очень высокой чувствительностью - до  $10^{24}$  лет по кажущемуся периоду полураспада.

В нашей лаборатории разрабатываются также различные варианты использования масс-сепараторов, например, выделение из образцов большого веса определенной фракции массовых чисел с последующей регистрацией спонтанного или вынужденного деления на сборнике после масс-анализа. Этот метод является очень трудоемким и будет применяться только для отдельных образцов, отобранных на основании радиометрических измерений.

Чувствительность современной масс-спектрометрической аппаратуры позволяет, по-видимому, получить указания на присутствие сверхтяжелого элемента в древних породах и минералах по изотопному составу ксенона в образце. Мы имеем в виду количественную увязку данных о содержании и изотопном составе ксенона со скоростью счета актов деления, наблюдаемой с помощью какого-либо из названных выше детекторов.

С применением трековых детекторов, пропорциональных счетчиков и счета мгновенных нейтронов в Дубне было проанализировано несколько сотен различных образцов. Основными типами препаратов, которые изучались до настоящего времени, были:

- чистые препараты отдельных элементов,
- галениты и другие минералы тяжелых элементов,
- полиметаллические руды и фракции их металлургической переработки,
- отложения современного вулканизма,
- подземные воды, обогащенные тяжелыми элементами,
- океанские донные отложения и др.

Напомним, что элемент 114 должен обладать химическими свойствами экасвинца. Одни из первых работ были посвящены различным стеклам, содержащим в своем составе большие количества тяжелых элементов (Pb, Bi, Tl и др.)<sup>/104, 105/</sup>. Так как стекло само является трековым детектором, проводилось постепенное травление образцов с по-

верхности, с подсчетом следов осколков деления в определенном объеме материала.

В большинстве образцов было обнаружено такое число треков, которое объяснялось спонтанным делением микропримесей урана в стекле. Исключением явились два образца свинцового стекла, в которых было обнаружено заметно больше следов, чем ожидалось по результатам анализа на уран. Эти наблюдения, сделанные на начальной стадии поисков сверхтяжелых элементов, стимулировали разработку в лаборатории других методик детектирования и исследования большого числа образцов руд, минералов и других материалов, обогащенных свинцом. Сейчас ясно, что заметный процент ( $\sim 30\%$ ) следов в упомянутых стеклах следовало отнести к делению свинца космическими лучами. К сожалению, из-за ограниченного количества материала его не удалось достаточно детально исследовать.

С помощью пропорциональных счетчиков наблюдалась избыточная активность в полиметаллической руде из двух месторождений СССР, а также в подземных водах одного месторождения<sup>/101,107/</sup>. В настоящее время делаются попытки сконцентрировать эту активность химическими методами.

Необходимо отметить, что обнаруженные эффекты находятся на пределе возможностей пропорциональных счетчиков. Речь идет о кажущихся периодах полураспада близких к  $10^{22}$  лет. Каждое измерение продолжается несколько десятков суток. Химическое обогащение препаратов осложняется из-за необходимости переработки больших количеств материала сложного химического состава. Поэтому, прежде чем приступить к химической переработке в больших масштабах, необходима тщательная проверка результатов, полученных на пропорциональных счетчиках. Измерения "подозреваемых" образцов на детекторе мгновенных нейтронов (рис.23) дали число отсчетов гораздо меньше ожидаемого<sup>/107/</sup>. Анализ показал, что данные нельзя объяснить примеся-

ми урана в образце, однако, в предположении, что  $\bar{v} > 1$ , следовало ожидать в десятки раз большей скорости счета многократных совпадений нейтронов. Возможная интерпретация состоит в том, что число мгновенных нейтронов при делении наблюдаемой активности мало ( $\bar{v} \approx 1,5$ ). При определении изотопного состава ксенона в этих образцах не были обнаружены аномалии.

Идея поиска изотопов с периодом полураспада в пределах  $10^4$ – $10^6$  лет, которые, возможно, синтезируются в Галактике и попадают на Землю из космического пространства, базируется не только на умозрительных заключениях о механизмах и процессах синтеза. Имеются наблюдения Фаулера и др.<sup>/108/</sup>, которые сообщили об обнаружении следов сверхтяжелых ядер при изучении химического состава космических лучей с помощью ядерных эмульсий. Хотя эти выводы подвергались сомнению, пока нет основания окончательно отвергнуть эти данные.

Исходя из представления о дальнейшей судьбе ядер, затормозившихся в верхних слоях атмосферы, можно оценить относительную концентрацию соответствующих атомов в различных слоях атмосферы, атмосферных осадках, в воде и в донных отложениях водоемов<sup>/3,6/</sup>. Мы пришли к выводу, что при благоприятном стечении обстоятельств, возможности эксперимента позволяют обнаружить искомые активности. Для этого необходимо химически переработать такие объекты, как глубоководные красные глины и железомарганцевые конкреции Тихого океана<sup>/109/</sup> и донные илы более мелких водоемов в арктической и антарктической областях. Высокая концентрация частиц космического происхождения в этих средах обусловлена тем, что в указанных районах Земли донные отложения накапливаются с минимальной скоростью, благодаря очень малому приносу балластного вещества с морскими течениями и ветром.

Железомарганцевые конкреции являются селективным поглотителем для большинства химических аналогов сверхтяжелых элементов. Если конкреции растут равномерно, они должны служить эффективным коллектором атомов сверхтяжелых элементов, поступающих из космоса. К сожалению, предположение о равномерном росте по мере изучения этих своеобразных природных образований становится все менее бесспорным. Летом 1970 года экспедиционное судно АН СССР "Витязь" добыло несколько тонн конкреций из различных точек Тихого океана. Сейчас эти материалы анализируются.

Мы обрисовали в этом разделе только основные идеи и направления исследований по поискам сверхтяжелых элементов в природных средах. Детальное описание методик и изложение данных, полученных в нашей лаборатории, а также в других местах, можно найти в докладах конференции, состоявшейся в 1971 году в Дубне<sup>/107/</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы из дубненских работ за рассматриваемый период, прошлое, настоящее и будущее этих исследований можно подытожить следующим образом (см. также рис. 24).

1) В 1963–1966 годах в Дубне были впервые правильно идентифицированы пять изотопов 102-го элемента и изучены их радиоактивные свойства ( $\alpha$  – распад и спонтанное деление). В химических опытах, выполненных в 1967 году, было получено доказательство актиноидного характера этого элемента. Тщательные попытки воспроизведения данных, приведенных в сообщении берклиевской группы об открытии 102-го элемента в 1958 году, были безуспешными и показали ошибочность этой работы. Поэтому претензии американских исследователей на приоритет в открытии элемента 102 необоснованны. Они получили правильные данные об изотопах элемента 102 в своей лаборатории лишь в 1967 году. Таким образом, элемент 102 был от-

крыт в Дубне, и по предложению авторов открытия его следует называть не нобелием, а холиотием.

2) В 1965 году в Дубне был правильно идентифицирован изотоп 103-го элемента с массовым числом 256 и были изучены свойства его  $\alpha$ -распада. В 1969 году был с достоверностью открыт и изучен изотоп  $^{255}_{103}$ . В 1968 году проводились первые химические опыты с этим элементом, показавшие, что он является актиноидом.

Были затрачены большие усилия на попытки подтверждения свойств "лоуренсия", об открытии которого сообщалось в США в 1961 году, но данные американских авторов оказались ошибочными. Лишь в 1969 - 1970 годах в Беркли были впервые получены дальнейшие сведения о свойствах этого элемента. Поэтому элемент 103 не должен называться лоуренсием, и дубненские авторы открытия вправе предложить новое название.

3) В 1964 году в Дубне был идентифицирован спонтанно делящийся изотоп 104-го элемента с массовым числом 260. В 1966 году этот элемент был выделен из смеси продуктов облучения химическим путем благодаря летучести его хлорида. Это показало, что он обладает свойствами экаактиния и явилось независимым доказательством получения элемента 104. В исследованиях последующих лет были полностью воспроизведены и подтверждены прежние результаты и получены новые данные о реакциях синтеза и свойствах изотопов  $^{260}_{104}$  и  $^{259}_{104}$ . Дубненские авторы дали элементу 104 название курчатовий (символ  $Ku$ ).

В Беркли лишь в 1969 году были также получены изотопы элемента 104. Поэтому заявление об открытии 104-го элемента в США и попытки ввести для него другое название полностью безосновательны.



4) В 1970 году в Дубне был идентифицирован спонтанно делящийся изотоп 105-го элемента с массовым числом 261. Были изучены закономерности реакции синтеза. Элемент был также выделен химическим путем из смеси продуктов облучения благодаря летучести его хлористого соединения, которая соответствует ожидаемым свойствам соединения экатантала.

Работы по 105-му элементу велись параллельно в Дубне и в Беркли. Дубненские результаты были опубликованы раньше и были известны американской группе еще до того, как та направила в печать свою работу по элементу 105.

По праву первооткрывателей дубненские авторы предложили для элемента 105 название нильсборий (символ  $Ns$ ).

5) Разработка надежных методов синтеза, обнаружения и ядернофизической радиохимической идентификации спонтанно делящихся изотопов привела к открытиям изомерных состояний новой природы и двух новых элементов. Эта экспериментальная база позволяет проводить в настоящее время опыты по получению спонтанно делящихся изотопов элементов 106 и 107 и сверхтяжелых элементов с  $Z \approx 126$  в реакциях типа  $(HI, \alpha)$ . Перспектива получения новых элементов позволяет надеяться, что появится возможность увековечить в их названиях имена таких видных естествоиспытателей, как Э. Резерфорд, О. Ган и др.

6) Исследования по делению тяжелых мишеней многозарядными ионами привели к выводу, что сверхтяжелые элементы в области 114-го (а также очень тяжелые изотопы известных трансурановых элементов) могут быть получены в качестве осколков деления. Для этого необходимо ускорить столь тяжелые ионы, как ионы ксенона. С помощью тандемной системы из двух циклотронов в Дубне получен пучок ионов ксенона с необходимой энергией, что позволяет начать в ближайшее время эти исследования.

7) Впервые в широком масштабе были предприняты поиски сверхтяжелых элементов в природе. Были предложены и разработаны разнообразные высокочувствительные радиометрические установки, а также методы, основанные на других принципах, для обнаружения спонтанно делящихся активностей. Это дало возможность провести разными методами анализ сотен различных препаратов. В нескольких образцах были зарегистрированы акты деления ядер, источник которых не известен. Пока нет полной уверенности в том, что они обусловлены именно присутствием сверхтяжелых элементов. Экспериментальные усилия в этом направлении будут продолжаться.

## Л и т е р а т у р а

1. Г.Н.Флеров. Усп.физич.наук, 95, 25 /1968/; Ат.энергия, 26, 138 /1969/; Вестн.Акад.Наук, №8, 43 /1969/; Maria Sklodowska-Curie. Centenary Lectures. IAEA, vienna, 1968; p.104.
2. Г.Н.Флеров, В.А.Друин. Усп.физич.наук, 100, 45 /1970/; Atomic Energy Rev., 8, №2, 255 /1970/.
3. I. Zvára, in Proc.R.A.Welch Found. conferences on Chemical Research, XIII. The Transuranium Elements-The Mendeleev Centennial. nov.17-19, 1969, Houston, Texas; p.153.
4. G.Flerov, in Proc.Internat.Conf. Properties of Nuclear States, Montreal, 1969; p.175.
5. Г.Н.Флеров. ОИЯИ, P7-4199, Дубна, 1968; in "Future of Nuclear Studies", IAEA, Vienna, 1969; p.II.
6. I.Zvára, in Proc.Internat.Conf.Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, 15-18 July, 1969, Heidelberg; p.784.
7. G.T.Seaborg. Actinide Rev., 1, 3 /1967/.
8. G.N.Flerov and V.A.Karnaukhov, in C.Rendus du Congrès Internat. de Physique Nucléaire, 2-8 July, 1964; vol. I, p.373.
9. В.С.Алфеев и др. ОИЯИ, P-2693, Дубна, 1966.
10. И.А.Шелаев и др. ОИЯИ, P-3988, Дубна, 1968; Приб.тех.эксп., №3, 53 /1970/; ОИЯИ, P9-5048, Дубна, 1970; IEEE Trans.NS-16, 802 /1969/.
11. А.С.Пасюк и др. Приб.тех.эксп., №5, 23 /1963/.
12. Ю.П.Третьяков и др. Ат.энергия, 28, 75 /1970/.
13. И.А.Шелаев и др. Ат.энергия, 30, 514 /1971/; Nucl.Instr.Meth., 93, 557 /1971/.
14. Г.Н.Флеров, И.Звара, в сб. Сто лет периодического закона химических элементов, М., Наука, 1969; с. 115.
15. K.D.Griffioen and R.D.Macfarlane. Phys.Rev., 132, 1373 /1964/.  
K.D.Macfarlane et al. Nucl.Instr.Meth., 73, 285 /1969/.
16. В.А.Загер, М.В.Миллер, В.Л.Михеев, С.М.Поликанов, А.М.Сухов, Г.Н.Флеров, Л.Г.Челноков. Ат.энергия, 20, 230 /1966/.
17. A.M.Friedman and W.C.Mohr. Nucl.Instr.Meth., 17, 78 /1962/.
18. В.А.Друин, Н.К.Скобелев, Г.Я.Сун-Цзин-Ян. ОИЯИ, 13-3975, Дубна, 1968.
19. P.V.Price and R.M.Walker. Phys.Rev.Lett., 3, 113 /1962/.
20. A.Kapuscik, V.P.Perelygin, S.P.Tretiakova and N.H.Shadieva, in Proc.Int.Conf.Corpusscular Photography, florence, 1966; p.458.
21. А.Капусцик и др. Приб.тех.эксп., № 1, 43 /1968/.
22. Е.Д.Донец, В.А.Шеголев, В.А.Ермаков. Ядерн.физика, 2, 1015 /1965/.

23. T. Sikkeland et al. Phys.Rev., 172, 1232 /1968/.
- ✓24. В.А.Друин, Д.В.Лобанов, Д.И.Харитонов. Ат.энергия, 29, 132 /1970/.
25. Д.Ц.Оганесян и др. Ат.энергия, 28, 393 /1970/.
26. A.Ghiorso, T.Sikkeland, J.K.Walton and G.T.Seaborg. Phys.Rev. Lett., 1, 18 /1958/.
27. Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков. Ат.энергия, 16, 195 /1964/; Ат.энергия, 20, 223 /1966/.
28. Г.Н.Флеров и др. ОИЯИ, Р7-3808, Дубна, 1968.
29. V.A.Druin, in Proc.Internat.Conf.Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, 15-18 July, 1969, Heidelberg; p.657.
30. E.K.Hude et al. Phys.Rev., 176, 1377 /1968/; *ibid.*, 18, 2115/1970/.
31. И.Звара, Ю.Т.Чубурков, Р.Цалетка, Т.С.Зварова, М.Р.Шалаевский, В.В.Шиллов. Ат.энергия, 21, 83 /1966/; J.Nuclear Energy, 21, 601 /1967/.
32. И.Звара, Ю.Т.Чубурков, Р.Цалетка, М.Р.Шалаевский. ОИЯИ, Р7-3783, Дубна, 1968; Радиохимия, 11, 163 /1969/.
33. И.Звара, Ю.Т.Чубурков, В.З.Белов, Г.В.Букланов, В.В.Захватаев, Т.С.Зварова, О.Д.Маслов, Р.Цалетка, М.Р.Шалаевский. ОИЯИ, Д7-4542, Дубна, 1969; Радиохимия, 12, 565 /1970/; J.Inorg.Nucl.Chem., 32, 1885 /1970/.
34. И.Звара, В.З.Белов, Ю.С.Короткин, М.Р.Шалаевский, В.А.Щеголев, М.Юссонуас, В.А.Загер. ОИЯИ, Р12-5120, Дубна, 1970.
35. И.Звара, В.З.Белов, Л.П.Челноков, В.П.Доманов, М.Юссонуас, Ю.С.Короткин, В.А.Щеголев, М.Р.Шалаевский. ОИЯИ, Д12-5845, Дубна, 1971; Inorg.Nucl.Chem.Lett., in press.
36. A.Ghiorso, B.G.Harvey, G.R.Choppin, S.G.Thompson and G.T.Seaborg. Phys.Rev., 98, 1518 /1955/.
- ✓37. L.Phillips, R.Gatti, A.Chesne, L.Muga and S.G.Thompson. Phys. Rev.Lett., 1, 215 /1958/.
38. V.A.Druin. Nukleonika, 7, 462 /1962/.
39. K.A.Gavrilov, E.Gwózdź, J.Stary and W.T.Seng. Talanta, 13, 471 /1966/.
40. P.R.Fields et al. Nucl.Phys., 154A, 407 /1970/.
41. С.М.Поликанов и др. Ж.эксп.теор.физ., 42, 1464 /1962/.
42. S.Bjornholm, in Proc.R.A.Welch Found.Conferences on Chemical Res., XIII.The Transuranium Elements.Nov.17-19, 1969, Houston; p.447.
43. A.Ghiorso and T.Sikkeland. Physics Today, 20, №9, 25 /1967/.
44. Г.Н.Флеров. Ат.энергия, 24, 5 /1968/; Ann.Phys., 2, 311 /1967/.
45. A.Ghiorso et al. Phys.Rev.Lett., 18, 401 /1967/.
46. Г.Н.Флеров и др., в Трудах Междунар.конф.по физике тяжелых ионов, Дубна, октябрь 1966, ОИЯИ, Д7-3548, Дубна, 1966, вып.2, с.3.
47. Г.Н.Акапьев и др. ОИЯИ, Е7-3261, Дубна, 1967.

- √48. Ю.Т.Чубурков, Р.Цалетка, М.Р.Шалаевский, И.Звара. ОИЯИ, Р6-3076, Дубна, 1966; Радиохимия, 9, 637 /1967/.
49. J.Malý, T.Sikkeland, R.Silva and A.Ghiorso. Science, 160, III4
50. P.R.Fields et al. Phys.Rev., 107, 1460 /1957/. /1968/.
51. P.R.Fields et al. Ark.Fys., 15, 225 /1959/.
52. Г.Н.Флеров и др. Докл.Акад.Наук, 120, 73 /1958/; Ж.эксп.теор.физ., 38, 82 /1960/.
- (53) A.Ghiorso, T.Sikkeland, A.E.Larsh and R.M.Latimer. Phys.Rev. Lett., 6, 473 /1961/.
54. A.Ghiorso, M.Nurmia, J.Harris, K.Eskola and P.Eskola. Nature, 229, 603 /1971/.
55. Е.Д.Донец, В.А.Шеголев, В.А.Ермаков. Ат.энергия, 19, 109 /1965/.
56. G.N.Flerov, Yu.S.Korotkin, V.L.Mikheev, M.B.Miller, S.M.Polikarov and V.A.Schegolev. Nucl.Phys., 106A, 476 /1967/.
57. Г.Н.Флеров, Г.Н.Акапьев, А.Г.Демин, В.А.Друин, Ю.В.Лобанов, В.В.Фефилов. ОИЯИ, Р7-3556, Дубна, 1967.
58. R.Silva, T.Sikkeland, M.Nurmia and A.Ghiorso. Inorg.Nucl.Chem. Lett., 6, 733 /1970/.
59. В.А.Друин. Ядерн.физика, 12, 268 /1970/.
60. K.Eskola, P.Eskola, M.Nurmia and A.Ghiorso. UCRL-20442, Berkeley, 1971.
61. Ю.Т.Чубурков, В.З.Велов, Р.Цалетка, М.Р.Шалаевский, И.Звара. ОИЯИ, Д7-4085, Дубна, 1968; Радиохимия, 11, 394 /1969/; J.Inorg.Nucl. Chem., 31, 3113 /1969/.
62. Е.Д.Донец, В.А.Друин, В.Л.Михеев. Ат.энергия, 25, 87 /1968/; Ann.Phys., 3, 331 /1968/.
63. A.Ghiorso. Private communic.in Table of Isotopes by C.M.Lederer et al., 6th Edition. J.Willey and Sons, 1967.
64. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, Ю.В.Лобанов, В.И.Кузнецов, В.А.Друин, В.П.Перельман, К.А.Гаврилов, С.П.Третьякова, В.М.Плотко, Ат. энергия, 17, 310 /1964/; Phys.Lett., 13, 73 /1964/.
65. S.A.E.Johansson. UCRL-10474, Berkeley, 1962.
66. Г.Н.Флеров, Ю.А.Лазарев, Ю.В.Лобанов, Ю.Ц.Оганесян, С.П.Третьякова, в Трудах Междунар.конф.по физике тяжелых ионов, Дубна, 1971. ОИЯИ, Д7-5739, Дубна, 1971, с.125.
67. A.Ghiorso, in Proc.R.A.Welch Found.Conferences on Chemical Res., XIII. The Transuranium Elements-The Mendeleev Centennial. Nov. 17-19, 1969, Houston, Texas; p.107.
68. A.Ghiorso, M.Nurmia, J.Harris, K.Eskola and P.Eskola. Phys.Rev. Lett., 22, 1317 /1969/.
69. A.Ghiorso, M.Nurmia, K.Eskola and P.Eskola. Phys.Lett., 32B, 95 /1970/.
70. R.Silva, J.Harris, M.Nurmia, K.Eskola and A.Ghiorso. Inorg.Nucl. Chem.Lett., 6, 871 /1970/.

71. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, Ю.В.Лобанов, Ю.А.Лазарев, С.П.Третьякова. ОИЯИ, P7-4932, Дубна, 1970.
72. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, Ю.В.Лобанов, Ю.А.Лазарев, С.П.Третьякова, И.В.Колесов, В.М.Плотко. Ат.энергия, 29, 243 /1970/; Nucl.Phys., 160A, 181 /1971/.
73. В.А.Друин и др. ОИЯИ, P7-5161, Дубна, 1970; Ядерн.физика, 13, 251 /1971/.
74. A.Ghiorso, M.Nurmi, K.Eskola, J.Harris and P.Eskola. Phys. Rev. Lett., 24, 1498 /1970/.
75. G.N.Flerov. Science, 170, 15 /1970/.
- A.Ghiorso. Science, 171, 127 /1970/.
76. С.М.Поликанов. Усп.физич.наук, 94, 43 /1968/.
77. К.А.Петржак, Г.Н.Флеров. Докл.Акад.Наук, 28, 530 /1940/; J.Phys., 2, 275 /1940/.
78. G.T.Seaborg. Ann.Rev.Nucl.Sci., 18, 53 /1968/.
79. W.J.Swiatecki, in Proc.Internat.conf. Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, 15-18 July, 1969, Heidelberg; p.729.
80. J.R.Nix, in CERN 70-30, Geneva, 1970, p.605; LA-DC-12488, 1971.
81. V.M.Strutinsky, in Proc.R.A.Welch Found. Conferences on Chemical Research, XIII. The Transuranium Elements- The Mendeleev Centennial. Nov. 17-19, 1969, Houston, Texas; p. 83 .
82. S.G.Nilsson, in Proc. R.A.Welch Found. Conferences on Chemical Research, XIII. The Transuranium Elements- The Mendeleev Centennial. Nov. 17-19, 1969, Houston, Texas; p.43 .
83. F.G.Werner and J.A.Wheeler. Phys.Rev., 109, 126 /1958/.
84. К.А.Петржак, Г.Н.Флеров. Усп.физич.наук, 73, 655 /1961/.
85. W.D.Myers and W.J.Swiatecki. Nucl.Phys., 81, 1 /1966/.
86. В.М.Струтинский. Ядерн.физика, 3, 614 /1966/; Nucl.Phys., 95A, 420 /1967/.
87. Г.Н.Флеров, В.А.Друин. ОИЯИ, P-2539, Дубна, 1966.
88. В.М.Струтинский, Ю.А.Музычка, в Трудах Междунар.конф.по физике тяжелых ионов, октябрь 1966, ОИЯИ, Д7-3548, Дубна, 1966, вып.2, с.51.
89. Ю.А.Музычка, В.В.Пашкевич, В.М.Струтинский. Ядерн.физика, 8, 716 /1968/.
90. Yu.A.Musychka. Phys.Lett., 28B, 539 /1969/.
91. Ю.А.Музычка. Ядерн.физика, 11, 105 /1970/.
92. S.G.Nilsson, S.G.Thompson and C.F.Tsang. Phys.Lett., 28B, 458 /1969/.
93. M.Lefort et al., in Proc.Internat.conf.Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, 15-18 July, 1969, Heidelberg; p.795.
94. T.Sikkeland. Ark.Fys., 36, 539 /1966/.

95. А.Г.Демин и др., в Трудах Международн.конф.по физике тяжелых ионов, Дубна, февраль 1971. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971, с.169.
96. Г.Н.Флеров. ОИЯИ, Р7-3617 /1967/; J.Phys.Soc.Jap.Suppl., 24, 237 /1968/.
97. Yu.Ts.Oganessian, in "Nuclear Structure", IAEA, Vienna, 1968; p. 489.
98. С.А.Карамян, О.Ц.Оганесян. ОИЯИ, Р7-4339, Дубна, 1969.
99. Г.Н.Флеров, С.А.Карамян. ОИЯИ, Р6-4902, Дубна, 1970; Atti del Convegno Mendeleeviano, Torino-Roma, 15-21 Sept., 1969; p.73.
100. Г.Н.Флеров. Ат.энергия, 28, 302 /1970/.
101. Г.Н.Флеров и др. ОИЯИ, Д6-4554, Дубна, 1969.
102. Г.М.Тер-Акопян и др. ОИЯИ, Р13-5391, Дубна, 1970.
103. E.Cheifetz et al. Phys.Rev., 33, 2071 /1971/.
104. Г.Н.Флеров, Е.П.Перельгин. Ат.энергия, 26, 520 /1969/; in Proc. Internat.Conf.Nuclear Tracks registration, Clermont-Ferrand, May 6-9, 1969; vol. 2, p. 74.
105. Э.Цесляк. ОИЯИ, Р15-4738, Дубна, 1969.
106. О.Отгонсурэн и др. ОИЯИ, Р7-5814, Дубна, 1971.
107. Международная конференция по физике тяжелых ионов, Дубна, февраль 1971. Сборник материалов. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971.
108. P.N.Fowler et al. Proc.Roy.Soc.L., 318A, I /1970/.
109. О.Отгонсурэн, В.П.Перельгин, Г.Н.Флеров. Докл.Акад.Наук, 189, 1200 /1969/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 августа 1971 года.

Таблица 1

Параметры пучков ускорителей У-300 и У-200, а также проектируемого У-400<sup>9,10,13/</sup>

	Ускоряемый ион	Интенсивность внутреннего пучка, частица/сек	Энергия ионов	
			МэВ/нуклон	полная, МэВ
У-300	$^{11}\text{B}^{2+}$	$6 \cdot 10^{14}$	8,2	90
	$^{12}\text{C}^{2+}$	$6 \cdot 10^{14}$	7	83
	$^{16}\text{O}^{3+}$	$1,7 \cdot 10^{14}$	8,8	140
	$^{22}\text{Ne}^{4+}$	$1,5 \cdot 10^{14}$	8,2	180
	$^{28}\text{Si}^{5+}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	7,9	220
	$^{31}\text{P}^{5+}$	$9 \cdot 10^{13}$	6,5	202
	$^{64}\text{Zn}^{10+}$	$5 \cdot 10^9$	6,1	390
У-200	$^3\text{He}^{1+}$	$8 \cdot 10^{14}$	17	52
	$^4\text{He}^{1+}$	$1 \cdot 10^{15}$	9,9	39
	$^{12}\text{C}^{4+}$	$4 \cdot 10^{13}$	17,5	210
	$^{14}\text{N}^{5+}$	$8 \cdot 10^{12}$	20	280
	$^{16}\text{O}^{5+}$	$4 \cdot 10^{12}$	15	245
	$^{20}\text{Ne}^{5+}$	$4 \cdot 10^{12}$	9,7	195
	У-400	$^{20}\text{Ne}^{2+}$	$9 \cdot 10^{14}$	6,2
$^{22}\text{Ne}^{3+}$		$4 \cdot 10^{14}$	11,6	255
$^{40}\text{Ar}^{5+}$		$6 \cdot 10^{13}$	9,8	392
$^{64}\text{Zn}^{7+}$		$2,5 \cdot 10^{13}$	7,5	480
$^{84}\text{Kr}^{9+}$		$1,3 \cdot 10^{12}$	7,2	605
$^{132}\text{Xe}^{13}$		$10^{11}$	6,1	805



Таблица 2

Свойства изотопов элемента 102

Массовое число	Реакция получения	T <sub>1/2</sub> сек	E, Мэв	Спонт. дел.	Место и год получения
				α-распад	
251	$^{238}\text{Pu} (^{16}\text{O}, 4n)$	0,5-1,0	8,6		Дубна, 1967
	$^{244}\text{Cm} (^{12}\text{C}, 5n)$	0,8±0,3	8,60		Беркли, 1967
252	$^{239}\text{Pu} (^{18}\text{O}, 5n)$	4,5±1,5	8,41		
253	$^{242}\text{Pu} (^{16}\text{O}, 5n)$	95±10	8,01		
	$^{233}\text{Pu} (^{18}\text{O}, 4n)$				
254	$^{243}\text{Am} (^{15}\text{N}, 4n)$	65±10	8,11	$\frac{1}{1800}$	Дубна, 1963-1966
	$^{242}\text{Pu} (^{16}\text{O}, 4n)$				
	$^{233}\text{U} (^{22}\text{Ne}, 6n)$				
255	$^{238}\text{U} (^{22}\text{Ne}, 5n)$	180±10	8,09		
	$^{242}\text{Pu} (^{18}\text{O}, 5n)$				
256	$^{238}\text{U} (^{22}\text{Ne}, 4n)$	3,7±0,5	8,42	$\frac{1}{200}$	
	$^{242}\text{Pu} (^{18}\text{O}, 4n)$				
257	$^{246}\text{Cm} (^{13}\text{C}, 4n)$	23±2	8,23(50%)		Беркли, 1967
	$^{246}\text{Cm} (^{12}\text{C}, 3n)$		8,27(50%)		
258	$^{246}\text{Cm} (^{13}\text{C}, 5n)$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	спонтанное деление		Беркли, 1968, предварительная идентификация.
259	$^{248}\text{Cm} (^{18}\text{O}, 3n)$	1,5±0,5ч.	7,5		Ок. Ридж, 1970

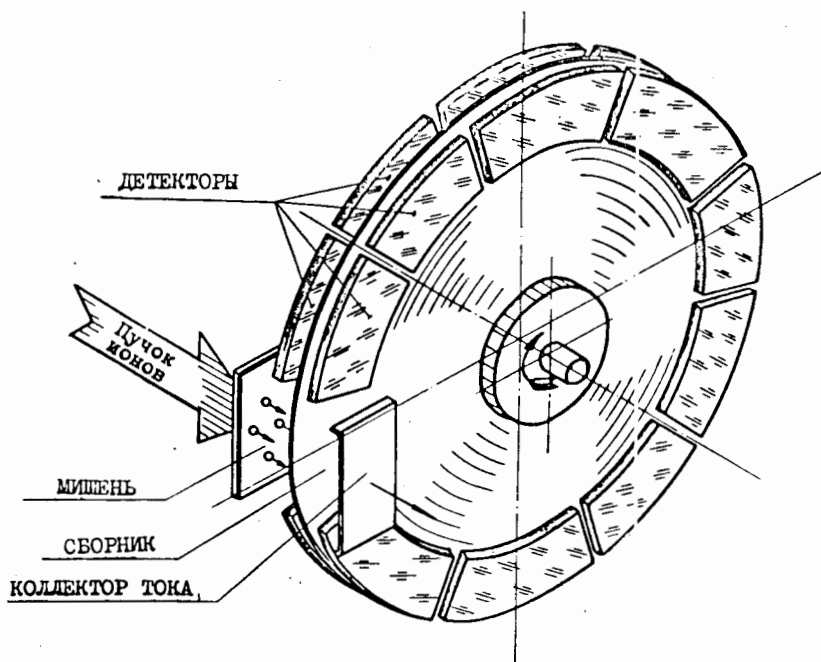


Рис.1. Опыт по обнаружению спонтанно делящихся продуктов облучения.

Атомы отдачи вбиваются в непрерывно вращающийся тонкий алюминиевый диск. Осколки деления регистрируются трековыми детекторами, расположенными по периферии диска. Распределение числа следов по детекторам позволит построить кривую распада.

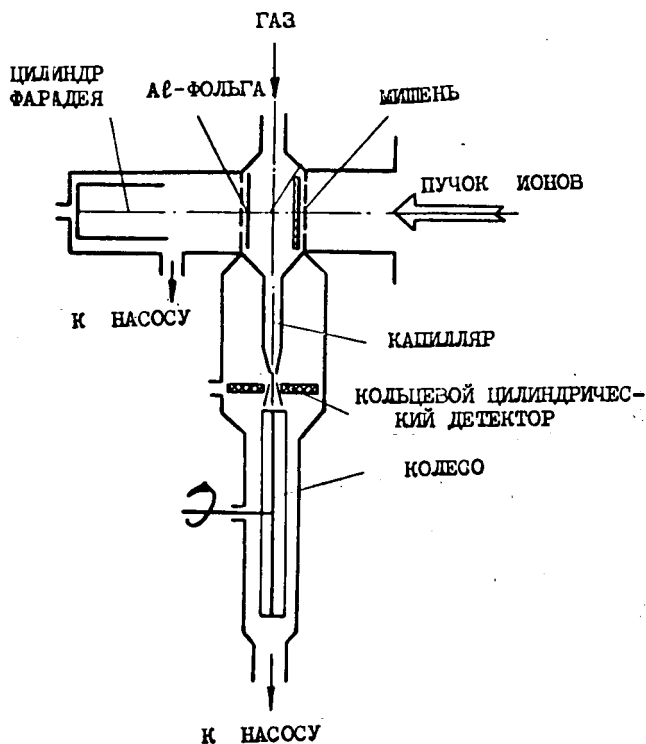


Рис.2. Схема аппаратуры для наблюдения  $\alpha$ -активных продуктов облучения с использованием газовой струи для транспортировки и собирания атомов отдачи.

Атомы высаживаются из газа на обод легкого колеса. Кольцевой детектор служит для эффективного измерения наиболее короткоживущих активностей. По окружности колеса через равные промежутки размещены другие детекторы, к которым продукты облучения доставляются периодически поворотами колеса на необходимый угол по заданному временному графику.

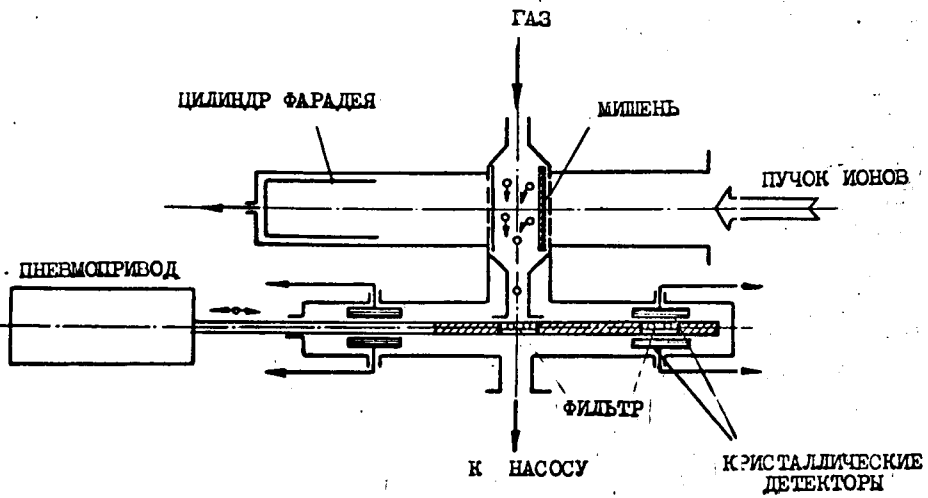


Рис.3. Собираение продуктов облучения на тонком фильтре для последующего анализа  $\alpha$  - излучения.

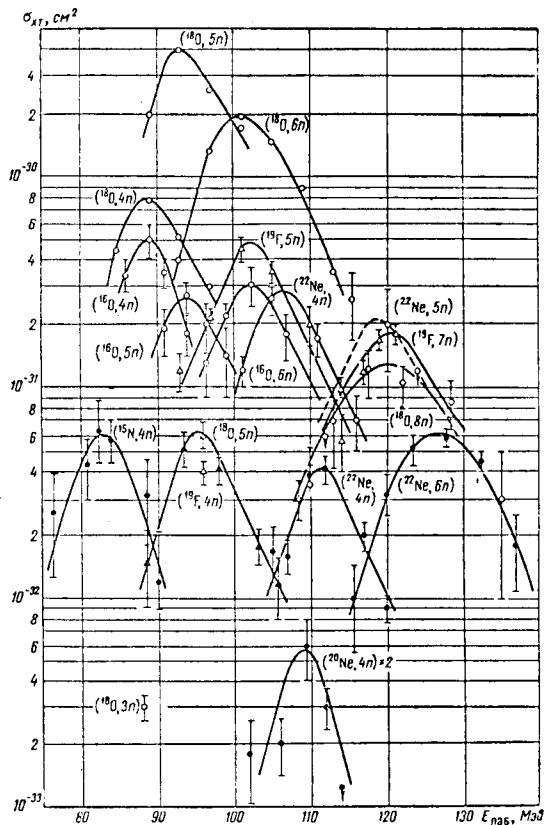


Рис.4. Кривые возбуждения при синтезе тяжелых элементов в реакциях с тяжелыми ионами (мишени не указаны)<sup>/22/</sup>.

Обозначения: о - синтез изотопов фермия,  $\Delta$  - менделевия,  $\bullet$  - элемента 102,  $\blacktriangle$  - элемента 103.

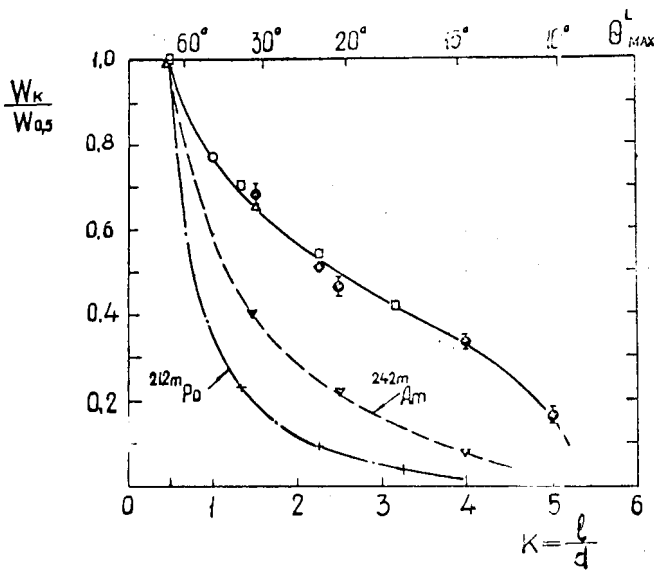
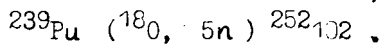
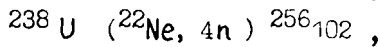
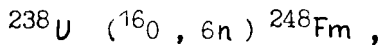
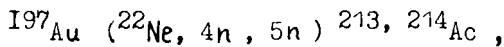
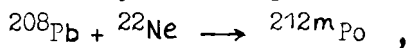


Рис.5. "Интегральные" угловые распределения атомов отдачи<sup>/25/</sup>.  
 ( $l$  - глубина отверстия решетки,  $d$  - диаметр отверстия,  
 $W_K$  - доля атомов отдачи, вылетающих при данном  $K = \frac{l}{d}$ ).

Продукты реакций полного слияния:



Реакции многонуклонных передач:



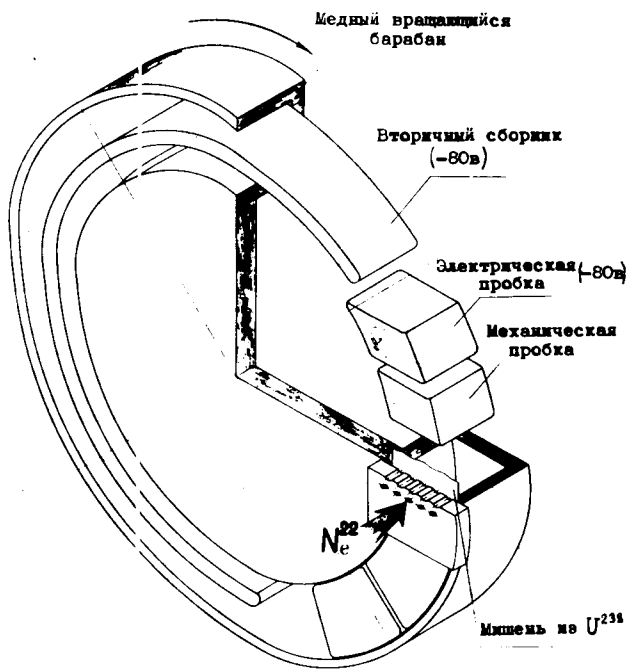


Рис.6. Идентификация  $^{256}_{102}$  и определение его периода полураспада по методу двойной отдачи  $^{227}_{11}$ .

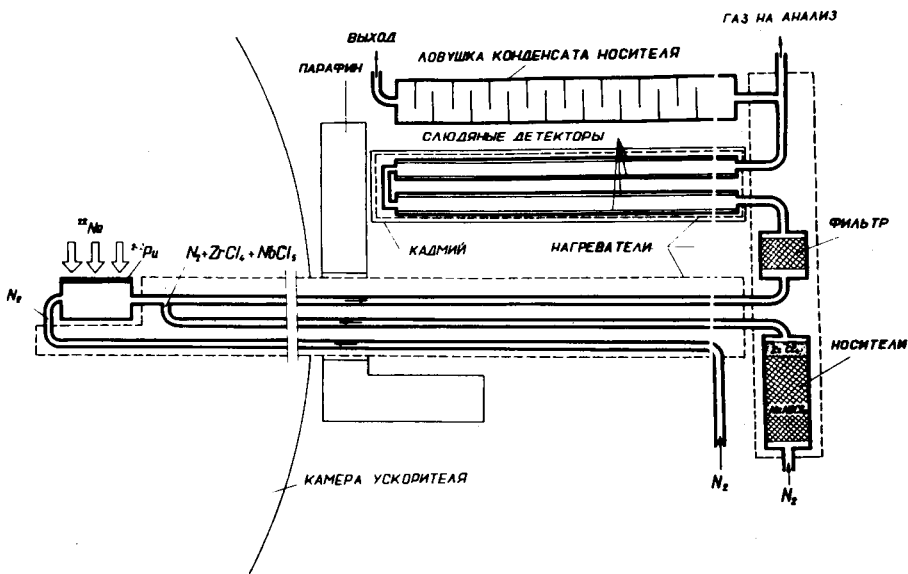


Рис. 7. Установка для экспрессной фронтальной хроматографии хлористых соединений продуктов ядерных реакций при работе на внутреннем пучке ускорителя У-300.

Часть потока азота насыщалась парами хлоридов носителей в термостатируемом сосуде с твердыми  $ZrCl_4$  и  $NaNbCl_6$  (при нагреве разлагается на  $NaCl$  и  $NbCl_5$ ) и подавалась на вход колонки. На выходе из колонки перед камерой с детекторами устанавливался фильтр для задержания возможных аэрозолей.



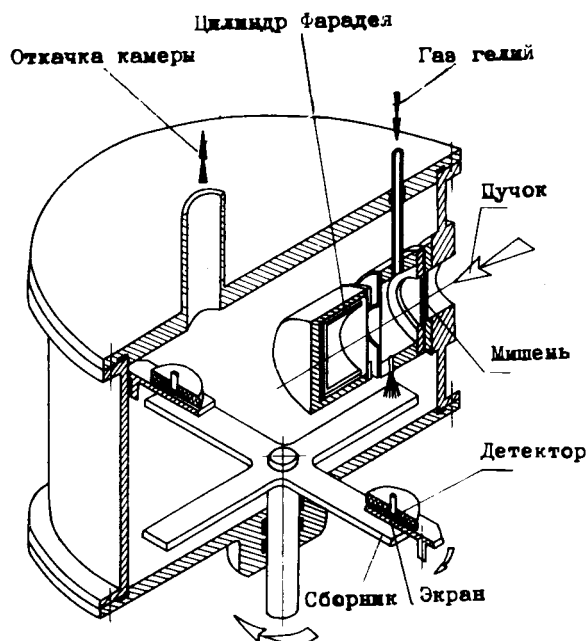


Рис.8. Аппаратура для прямого наблюдения короткоживущих  $\alpha$ -излучателей в опытах по изучению изотопов элементов 102 и 103.

Атомы собираются из газовой струи на плече крестообразного сборника, который периодически поворачивается на  $90^\circ$ , перенося продукты облучения к детекторам  $\alpha$ -частиц. Детектор может быть отделен от препарата шторкой, чтобы регистрировать распад атомов, которые попали на его поверхность за счет отдачи при распаде материнской активности.

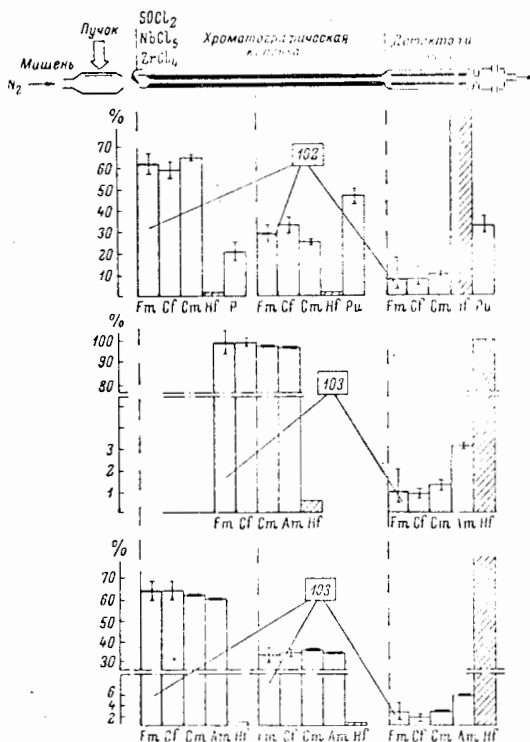


Рис.9. Сравнение летучести хлоридов 102-го и 103-го элементов с хлоридами актиноидных элементов и гафния.

Диаграмма показывает, какая доля от полного числа атомов данного элемента была обнаружена на отдельных частях колонки и на выходе из нее после окончания опыта длительностью 20-40 часов.

Прохождение незначительного процента атомов актиноидов в камеру с детекторами и в камеру носителей объясняется неспецифическим переносом продуктов облучения с частицами аэрозолью.

Ядра  $^{252}\text{Fm}$  более чем на 50% являлись продуктами распада  $^{256}\text{102}$  или же  $^{256}\text{103}$ . Остальная доля, подобно изотопам  $^{242}\text{Cm}$  и  $^{246}\text{Cf}$ , получалась в качестве побочных продуктов облучения. Изотопы  $^{170,171}\text{Hf}$  синтезировались за счет введения в мишень примесей  $\text{Sm}$  или  $\text{Gd}$ .

Температура колонки и детекторов 310-330°, парциальное давление паров хлоридов носителей:  $\text{SOCl}_2$  - 60 мм рт.ст.,  $\text{NbCl}_5$  - 0,05 мм рт.ст.,  $\text{ZrCl}_4$  - 0,01 мм рт.ст.

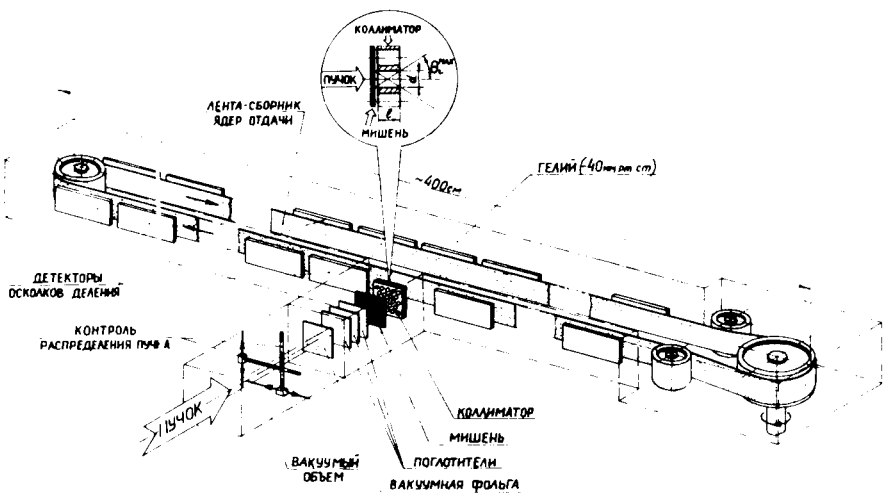


Рис.10. Установка для регистрации короткоживущих спонтанно делящихся ядер – продуктов реакций с тяжелыми ионами – на выведенном пучке У-300.

Скорость движения ленты может меняться в широких пределах. Детекторами являются пластинки фосфатного стекла, конвейерная лента никелевая, толщиной 50 мк. Для опыта подбираются партии материалов с минимальным содержанием примесей урана.

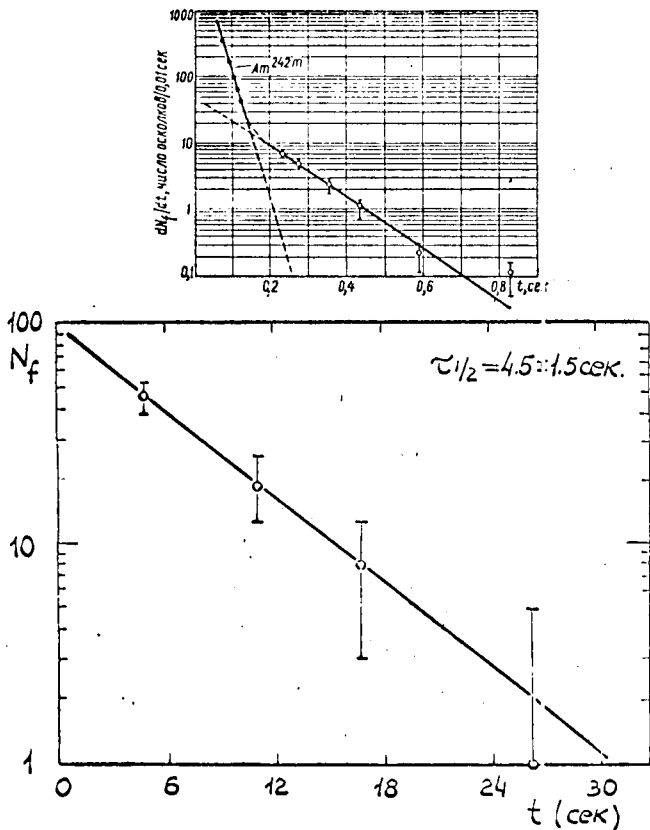


Рис.11. Временное распределение актов деления при облучении  $^{242}Pu$  ионами  $^{22}Ne$  :

- а) энергия 109 Мэв;
- б) энергия 120 Мэв.

Активность с  $T_{1/2}=0,1$  сек принадлежит  $^{260}_{104}$ ,  
 активность с  $T_{1/2}=4,5$  сек - изотопу  $^{259}_{104}$ .

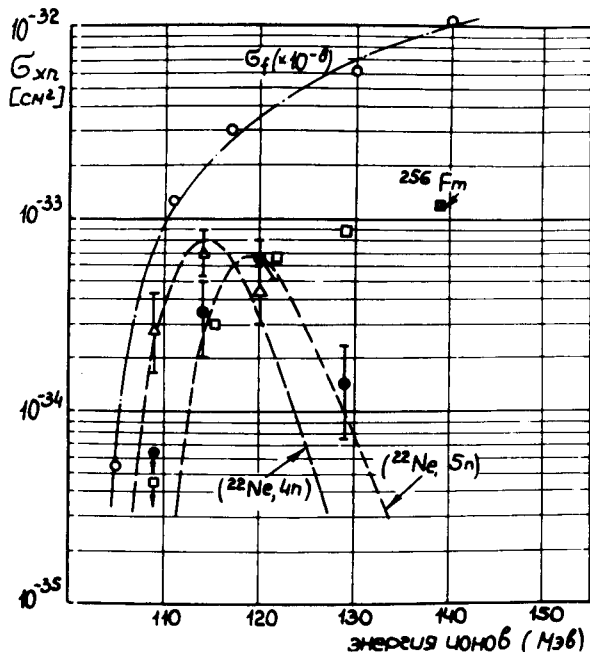
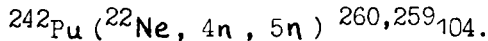


Рис. 12. Зависимость эффективного сечения образования спонтанно делящихся нуклидов от энергии ионов  $^{22}\text{Ne}$  при облучении  $^{242}\text{Pu}$  с целью синтеза элемента 104.

Пунктирные кривые - расчет для реакций



Экспериментальные точки:

$\Delta$  - активность с  $T_{1/2} = 0,1$  сек,

$\bullet$  - активность с  $T_{1/2} = 4,5$  сек,

$\square$  - активность с  $T_{1/2} = 5$  сек (по-видимому,  $^{256}\text{Fm}$ ).

Показаны также расчетные и экспериментальные значения (кружки) эффективного сечения деления.

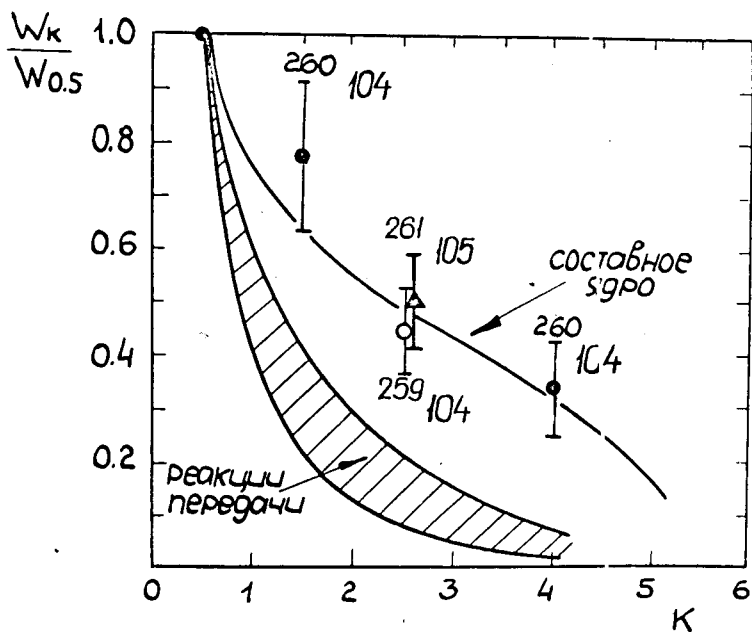


Рис.13. Интегральное угловое распределение ядер отдачи в опытах по синтезу элементов 104 и 105.

Кривые для составных ядер и продуктов реакций передачи приведены по данным рис.5.

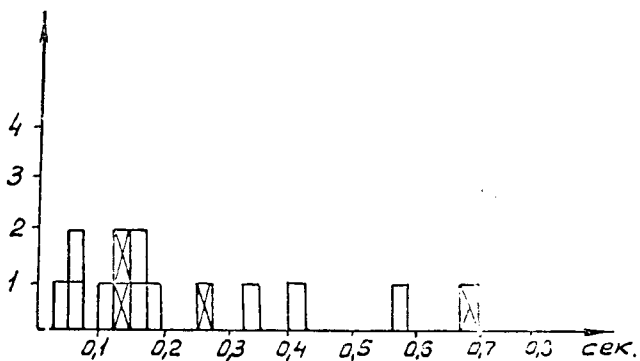


Рис.14. Распределение актов деления вдоль камеры с детекторами (см.рис.7) в первых химических опытах с элементом I04. Временная шкала рассчитана по скорости движения газаносителя. Крестиками обозначены акты деления, зарегистрированные по обоим осколкам.

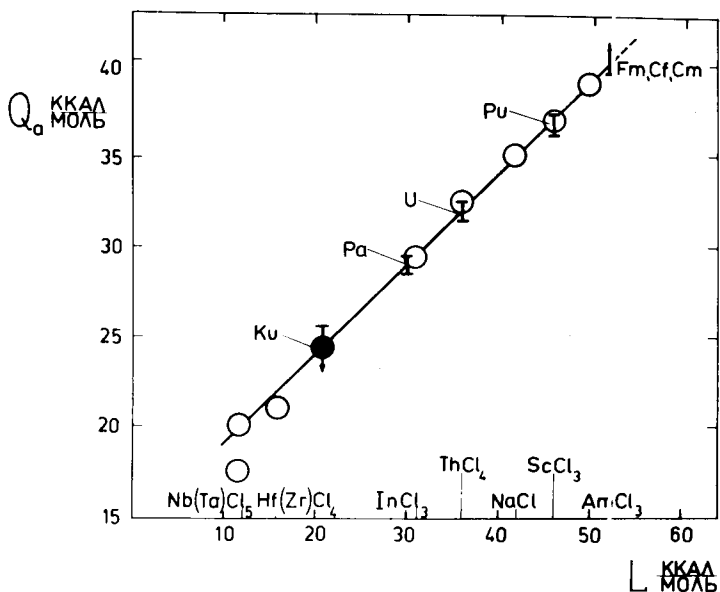


Рис.15. Корреляция между экспериментальными значениями теплоты адсорбции хлоридов (кружки) и энтальпии испарения этих веществ.

Значения  $Q_a$  относятся к условиям опытов (состав газовой фазы, температура) с элементом 104.

Для Pa, U и Pu нельзя с уверенностью указать на форму нахождения в газовой фазе, поэтому значения помещены на экспериментальную кривую, чтобы показать положение этих элементов в "адсорбционном ряду".



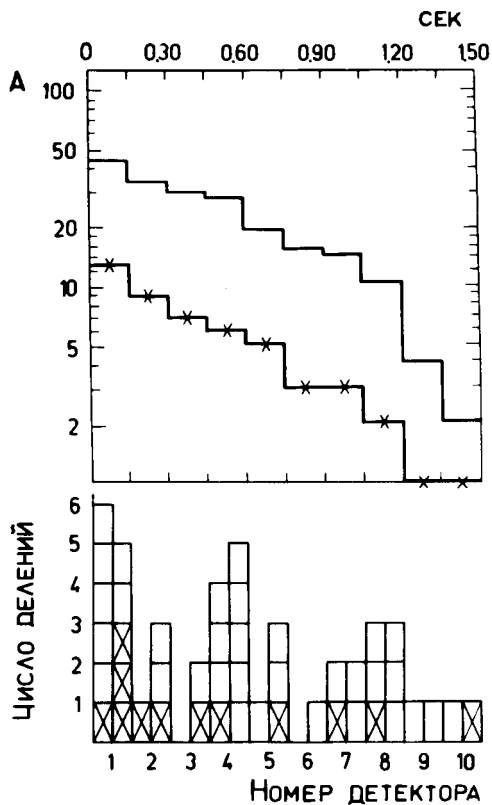


Рис.16. Низ: Распределение актов деления элемента 104 вдоль камеры с детекторами (рис.7) в опытах 1969 года (сравни с рис.14).

Верх: "Кривая распада". А – суммарное число распадов, зарегистрированных дальше заданной границы в камере по ходу газа.

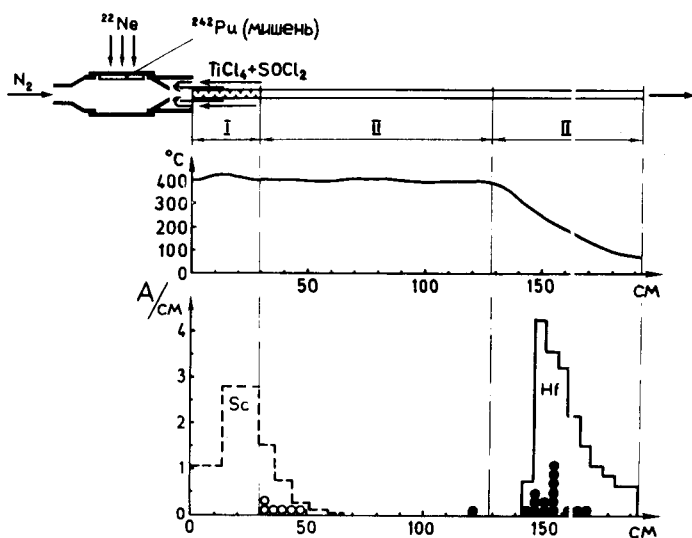


Рис.17. Верх: Принципиальная схема экспериментальной аппаратуры для химического выделения  $^{259}_{104}$ .  
 Середина: Температурный режим хроматографической колонки.  
 Низ: Распределение следов осколков деления (точки и кружки) вдоль колонки в опытах с курчатовием по сравнению с распределениями  $^{44m}_{Sc}$  и  $^{170,171}_{Hf}$  (мониторы поведения актиноидов и экагафния соответственно). Детекторы осколков деления (пластинки слюды) были вложены в колонку вдоль оси по всей ее длине за исключением начального участка.

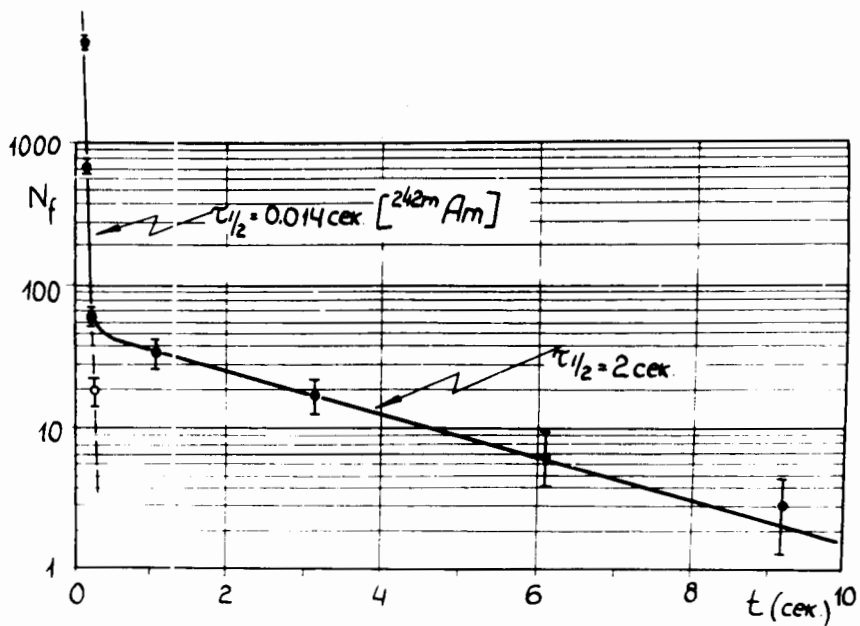


Рис. 18. Временное распределение актов деления ядер, образующихся при облучении  $^{243}\text{Am}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$  (114 Мэв). Активность с  $\tau_{1/2} \sim 2$  сек принадлежит  $^{261}_{105}$ .

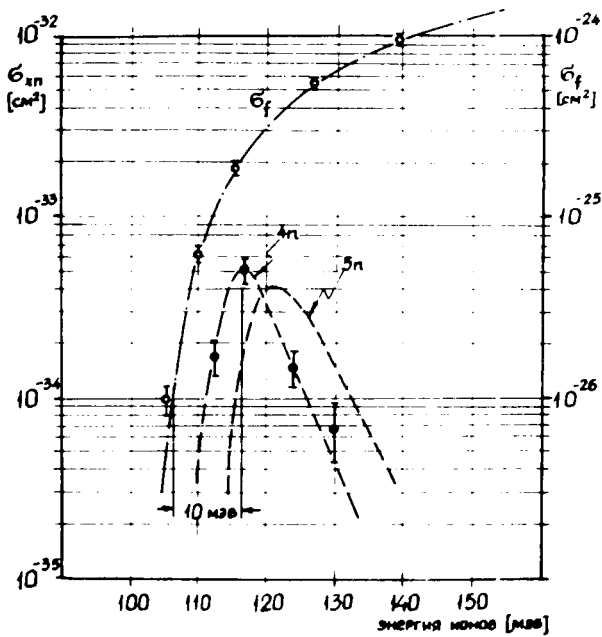


Рис.19. Зависимость эффективного сечения образования спонтанно делящегося нуклида с  $T_{1/2} \sim 2$  сек от энергии ионов  $^{22}\text{Ne}$  при облучении  $^{243}\text{Am}$  с целью синтеза элемента 105.

Пунктирные кривые – расчет для реакций  $^{243}\text{Am} (^{22}\text{Ne}, 4n, 5n) ^{261,260}105$ . Точки – эксперимент. Показаны также расчетные и экспериментальные значения (кружки) эффективного сечения деления.

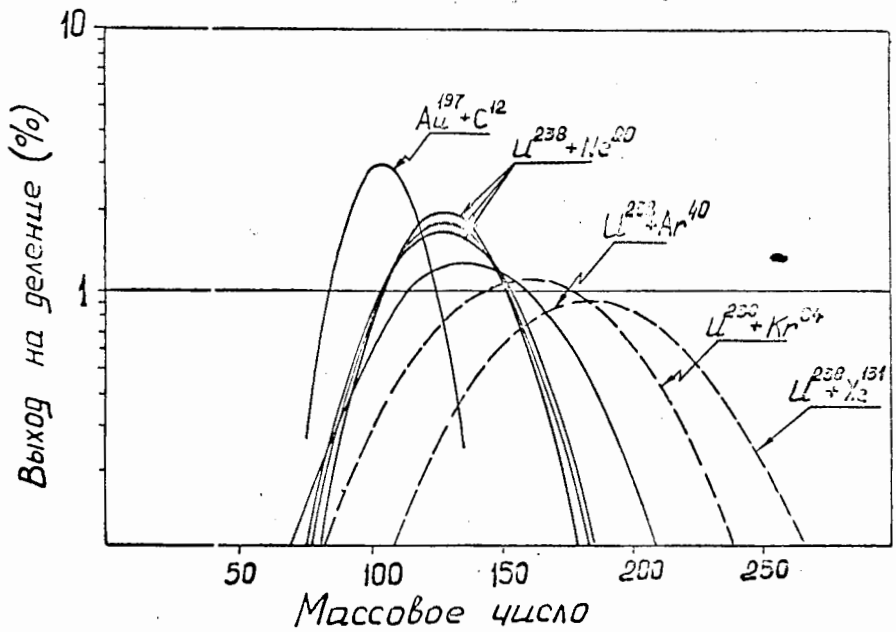


Рис.20. Выходы масс первичных осколков деления при облучении урана тяжелыми ионами.  
 Сплешные кривые - экспериментальные данные.  
 Пунктир - теоретические оценки.

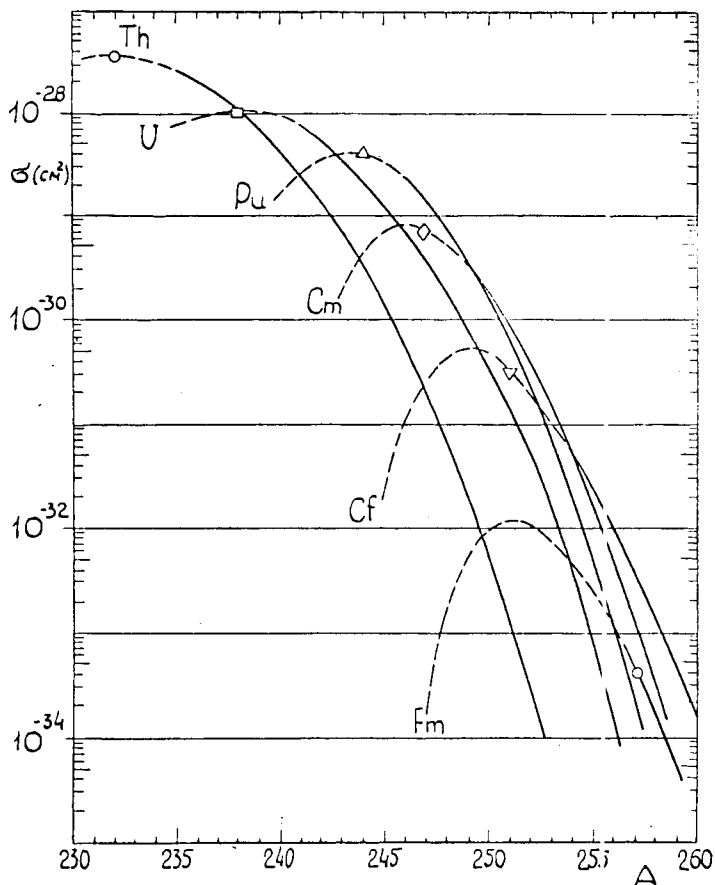


Рис.21. Оценки выхода изотопов трансураниевых элементов при облучении урана ионами ксенона.

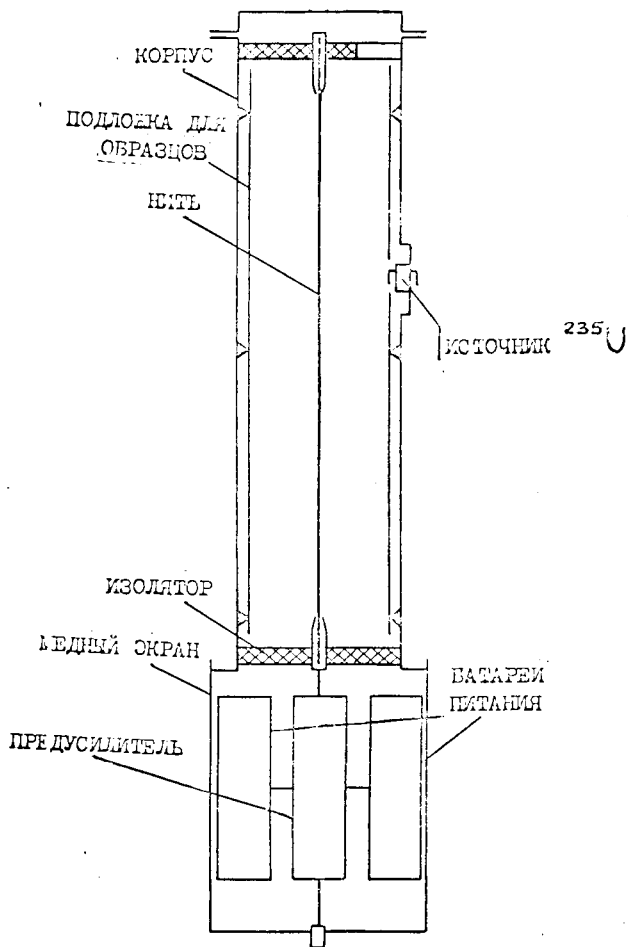


Рис.22. Высокочувствительный пропорциональный счетчик для регистрации осколков деления.

Размеры: длина - 2 м, диаметр - 0,26м,  
площадь образца - 1,4 м<sup>2</sup>.

Небольшой препарат урана служит для периодической калибровки счетчика по осколкам вынужденного деления <sup>235</sup>U нейтронами.

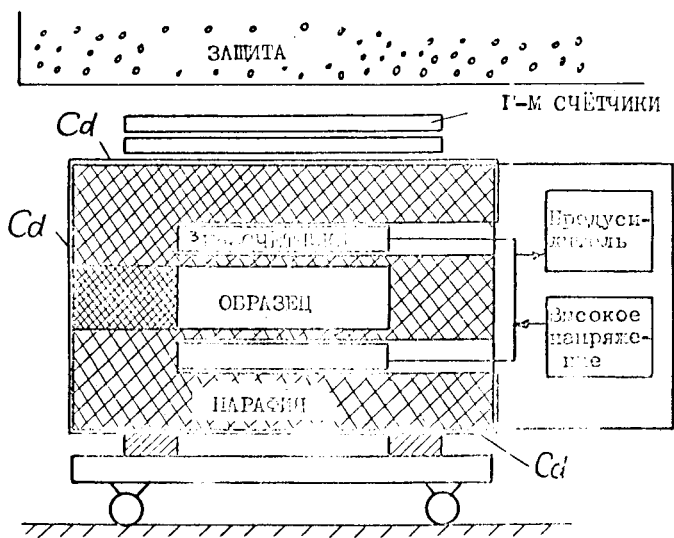


Рис.23. Установка для регистрации спонтанного деления сверхтяжелых элементов по мгновенным нейтронам деления. Парафин служит замедлителем. Нейтроны детектируются пропорциональными счетчиками, наполненными  $^3\text{He}$ .



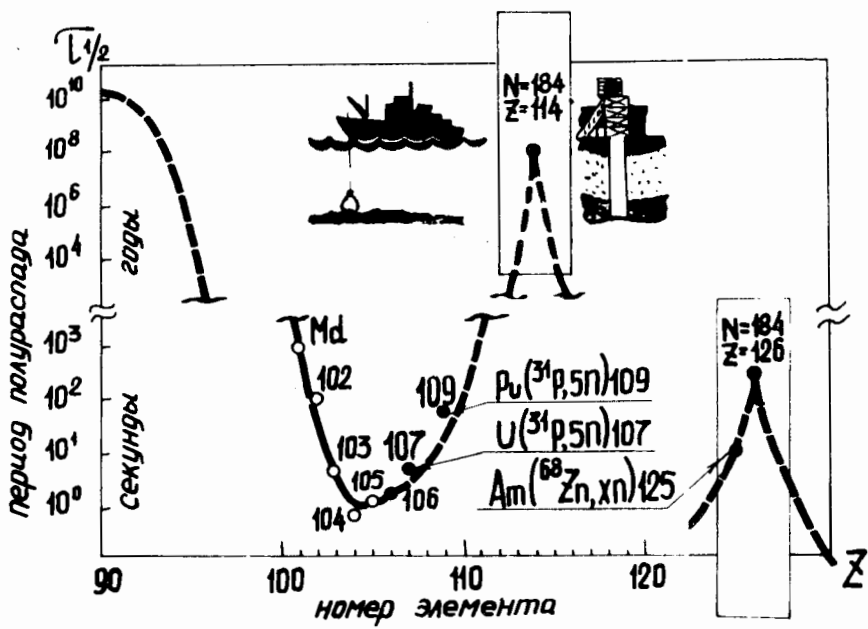


Рис.24. Современные направления поисков новых тяжелых и сверхтяжелых элементов.