

Ф. 216

Анн. Энергия, 1968,  
Т. 24, в. 1, с. 5-17

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

D7 - 3444



Г.Н. Флеров

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ  
102-ГО ЭЛЕМЕНТА  
(Обзор)

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

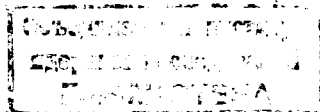
1967.

D7 - 3444

5194/3 мп.

Г.Н. Флеров

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ  
102-ГО ЭЛЕМЕНТА  
(Обзор)



В течение последних 25 лет было синтезировано 12 трансурановых элементов от нептуния ( $Z=93$ ) до курчатовия ( $Z=104$ ), а общее число известных ныне изотопов в заурановой области близко к 100.

С каждым новым элементом возрастали трудности его искусственного получения и изучения свойств. На смену старым появлялись новые методы синтеза, изменялись критерии и усложнялись способы идентификации нового элемента. И связано это, в первую очередь, со свойствами самих элементов, с их сильной и все увеличивающейся нестабильностью по мере перехода в область более тяжелых ядер.

Особенно резкие изменения претерпел подход к решению задачи идентификации в 1956–1957 г.г., когда экспериментаторы приступили к получению элемента 102. Именно в этот период основным способом синтеза стали ядерные реакции, вызываемые ускоренными многозарядными ионами, а основным методом идентификации – экспрессный физический метод, состоящий в быстром улавливании ядер-продуктов реакции, изучении их свойств радиоактивного распада и закономерностей образования в ядерных реакциях.

Синтез большинства известных изотопов трансурановых элементов до фермия включительно осуществлялся путем облучения урана или плутония нейтронами в ядерных реакторах или при взрывах ядерных устройств. Все попытки получить этими методами элементы с  $Z > 100$  не привели к желаемому результату. Неудачи синтеза в ядерных реакторах обусловлены малым временем жизни промежуточных изотопов и недостаточной плотностью нейтронных потоков. Эти обстоятельства несущественны при использовании импульсных нейтронных потоков

(взрывов). Однако в этом случае имеются свои трудности, связанные с малым временем жизни изотопов новых элементов и большой продолжительностью технологического процесса их выделения.

Следует, однако, отметить, что к 1966 году в реакторах были накоплены в весовом количестве все трансурановые элементы до эйнштейния ( $Z=99$ ) включительно. Появилась возможность изготавливать мишени даже из таких тяжелых элементов как калифорний ( $Z=98$ ) и эйнштейний для облучения их заряженными частицами на ускорителях. В начале 1955 года в Беркли (США) этим способом был впервые синтезирован менделевий (элемент 101) в ядерной реакции  $\text{Es}^{253}(\alpha, n)\text{Md}^{256} / 1/$ . Однако количество использованного в качестве мишени эйнштейния было настолько мало ( $10^9$  атомов  $\text{Es}^{253}$  или  $5 \cdot 10^{-7}$  мкг), что несмотря на значительную величину сечения ( $\approx 10^{-27}$  см<sup>2</sup>) ядерной реакции

( $\alpha, n$ ) выход менделевия составил 1 атом в час. Экспериментаторы впервые встретились с огромной трудностью, которая затем стала характерной для трансфермиевой области, — идентификацией элемента по считанному числу атомов. В целом в первых опытах было зарегистрировано только 17 атомов менделевия. Для его идентификации использовались традиционные химические методы, разработанные в течение многих предшествующих лет, — это прежде всего ионно-обменная хроматография. Они довольно медленные, но, к счастью, изотоп менделевия  $101^{258}$  оказался достаточно долгоживущим, и применение этого метода было успешным. Правда, малость эффекта явилась причиной неточного определения периода полураспада нового элемента в первых опытах 1955 года, когда было получено значение для  $T_{1/2} = 30$  мин. В дальнейшем в 1958 году было установлено, что в действительности период полураспада в 3 раза больше и равен  $90$  мин<sup>1/2/</sup>.

Получить 102-й элемент аналогичным способом не представлялось возможным, поскольку для этого не было и нет соответствующих мишеней: долгоживущий изотоп фермия  $\text{Fm}^{257}$  ( $T_{1/2} = 80$  дн) даже в настоящее время имеется в очень малом количестве, недостаточном для приготовления мишени, а у менделевия не обнаружено сравнительно долгоживущих изотопов.

Единственная возможность, которая здесь оставалась, — это использование более тяжелых, чем гелий, ускоренных частиц (углерод, кислород, неон и др.), что позволяло применять в качестве мишеней более легкие элементы, имеющиеся

в весовом количестве, и увеличивать заряд исходного ядра (урана или его ближайших соседей) сразу на несколько единиц.

Однако практическое осуществление принципиальной возможности синтеза 102 и более тяжелых элементов в ядерных реакциях с многозарядными ионами представляло собой чрезвычайно трудную экспериментальную задачу. При существовавших в то время интенсивностях пучков тяжелых ионов можно было ожидать, что выход трансуранов составит несколько атомов в сутки, поскольку сечения реакций очень малы ( $10^{-30}$  —  $10^{-32}$  см<sup>2</sup> для изотопов 102-го элемента). Многие вопросы, которые теперь представляются очевидными, были еще не решены экспериментаторами, когда начинались первые опыты по синтезу 102-го элемента. В частности, возникала трудность, связанная с малыми временами жизни образующихся изотопов. Быстрый распад полученных атомов затрудняет, а иногда делает и совсем невозможным изучение нового элемента обычными химическими методами. Необходимо было создать новые экспрессные методы идентификации. И, наконец, третья весьма существенная трудность обусловлена опасностью  $\alpha$ -радиоактивного фона с близкими к трансурановым элементам свойствами. Сложные ядерные реакции передачи большого числа нуклонов, обнаруженные впервые в ОИЯИ<sup>3,4/</sup>, а также ядерные реакции, вызываемые тяжелыми ионами на микропримесях Вi, Рb и более легких элементов в веществе мишени, приводят к образованию  $\alpha$ -активных ядер-продуктов в области полония-тория с сечениями в тысячи и миллионы раз большими, чем сечение образования 102 элемента. Раньше казалось, что значительные преимущества перед  $\alpha$ -распадом могло бы дать изучение спонтанного деления изотопов 102. Однако в 1961 году в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ было обнаружено ускоренное спонтанное деление ядер с  $Z < 100$  в изомерном состоянии. Такие ядра-изомеры также образуются в реакциях с многозарядными ионами и создают, в свою очередь, заметный фон в экспериментах по исследованию спонтанного деления как 102, так и более тяжелых элементов.

Для успешного решения проблемы синтеза 102 необходимо было создать мощные ускорители для получения пучков тяжелых ионов большой интенсивности (микроамперы и десятки микроампер ионов углерода, кислорода, неона), хорошей монохроматичности и достаточно высокой энергии (8–10 мэв на нуклон). Нужно было разработать прецизионные бесфоновые детекторы  $\alpha$ -частиц и осколков

спонтанного деления, добиться высокой чистоты используемых материалов (мишень, детали установок и пр.) от примесей В, Рб, Нг и др.

Что же произошло на самом деле?

Первые работы по синтезу элемента 102 были начаты в экспериментальных условиях, не удовлетворявших большинству из этих требований. Это обстоятельство привело к тому, что в некоторых ранних работах были сделаны недостаточно обоснованные выводы, а иногда и попросту допущены ошибки.

Окончательное решение проблемы идентификации изотопов 102-го элемента затянулось на много лет, и только в 1968 году эксперименты, выполненные в Дубне, позволили получить надежную информацию об истинных свойствах многих изотопов этого элемента. В сложную и запутанную 10-летнюю историю была, наконец, внесена ясность.

В этой статье нам хотелось бы сопоставить результаты различных работ по изотопам элемента 102, известных в настоящее время, хотя это и нелегкая задача, поскольку анализ результатов первых работ по синтезу элемента 102 весьма затруднителен из-за отсутствия в публикациях детального описания как экспериментальных установок, так и полученных результатов.

Прежде всего остановимся на двух работах, которые проводились аналогичным образом, но в которых были получены совершенно различные результаты. Это — совместная американско-англо-шведская работа, выполненная в Нобелевском институте физики в Стокгольме в 1957 году<sup>/5/</sup>, и американская работа, выполненная в Радиационной лаборатории им. Э. Лоуренса в Беркли в 1958 году<sup>/6/</sup>. И в той и в другой работах была предпринята попытка идентифицировать 102-й элемент, используя метод разделения, основанный на ионно-обменной хроматографии, т.е. химический метод, применявшийся при идентификации предыдущих трансурановых элементов. Мишени из смеси изотопов кюрия ( $\text{Cm}^{244}$  — 95%,  $\text{Cm}^{245}$  — 1%,  $\text{Cm}^{246}$  — 4%) облучались пучком ионов  $\text{C}^{13}$ . Получавшиеся в ядерных реакциях продукты выбивались из мишени за счет большого импульса, внесенного бомбардирующими ионами, и собирались на сборниках, которые после получасового облучения подвергались химической обработке. Выделенные продукты анализировались в ионизационной камере с целью обнаружить альфа-активность, связанную с распадом 102-го элемента.

В стохгольмских опытах во фракции, соответствующей на хроматограмме 102-му элементу, была обнаружена альфа-активность с энергией  $8,5 \pm 0,1$  мэв и периодом полураспада около 10 мин. Всего было зарегистрировано около 20 событий. Именно тот факт, что химические свойства полученных атомов совпадали с ожидаемыми свойствами 102-го элемента, послужил для авторов основанием приписать наблюдавшиеся радиоактивные свойства одному из изотопов 102-го элемента. Делалось предположение, что это либо изотоп  $102^{253}$ , либо  $102^{251}$ , либо  $102^{255}$ , которые могли получаться в реакциях  $\text{Cm}^{244} (\text{C}^{13}, 4 \text{ н})$ ,  $102^{253} \text{Cm}^{244} (\text{C}^{12}, 6 \text{ н})$ ,  $102^{251}$  и  $\text{Cm}^{246} (\text{C}^{13}, 4 \text{ н})$ ,  $102^{255}$ . Такой вывод был сделан, чтобы объяснить относительную "долгоживучесть" полученной альфа-активности, так как только изотопы с нечетными массовыми числами могут иметь задержку при альфа-распаде по сравнению со своими четно-четными соседями. По оценкам авторов "незапрещенный" распад для изотопа 102-го элемента с  $E_{\alpha} = 8,5$  мэв соответствует периоду полураспада около 10 сек, и, следовательно, фактор запрета для указанных изотопов равен 60. Авторы также не исключали, что наблюдаемая ими альфа-активность принадлежит короткоживущему изотопу менделевия ( $Z = 101$ ), получающемуся из 102-го элемента в результате электронного захвата с  $T_{1/2} = 10$  мин.

После пуска линейного ускорителя тяжелых ионов в Беркли А. Гиорсо и др.<sup>/6/</sup> попытались повторить стохгольмские результаты с целью их подтверждения, пользуясь аналогичной методикой. Однако поиски альфа-активности, о которой сообщалось в первой работе, оказались безуспешными.

Следует сказать, что условия, в которых проводилась американская работа, были гораздо лучше по сравнению с условиями стохгольмских опытов. Если интенсивность пучка в 225-см циклотроне не превышала 0,1 мка, то на линейном ускорителе она была не менее 0,2 мка. Если энергетический спектр ускоренных ионов на шведском циклотроне был очень "размазанным" (от 70 до 100 мэв с центром тяжести около 90 мэв), то на линейном ускорителе в Беркли имелся монохроматический пучок. Облучения были проведены как ионами  $\text{C}^{13}$ , так и ионами  $\text{C}^{12}$  в диапазоне энергий от 60 до 100 мэв. Анализ фракции активных элементов начинался через 8 минут после конца каждого облучения. Но ни в одном из опытов, которые велись в течение нескольких месяцев, альфа-активности с  $E_{\alpha} = 8,5$  мэв и  $T_{1/2} = 10$  с мин не было обнаружено. Отрицательные результаты опытов, проведенных в Беркли, поставили под сомнение тот факт, что в Стокгольме был получен 102-й элемент.

В Москве в 1957 году<sup>17/</sup> было показано, насколько опасны примеси свинца, висмута и других элементов в материале мишени. Как видно из описания стокгольмских опытов, очистка от таких примесей авторами не проводилась. При рассмотрении результатов стокгольмской работы обращает на себя внимание тот факт, что эффект наблюдался только на трех мишенях из шести, которые имелись в распоряжении экспериментаторов. Это могло служить указанием на то, что реакция, приводящая к появлению нового излучателя с энергией  $\alpha$ -частиц 8,5 мэв, возникает не на юрии. К сожалению, авторы не приводят альфа-спектр продуктов, получавшихся в опытах, в которых не использовалось химическое разделение и даже не упоминают, делались ли эти опыты вообще. Отсутствие таких данных не дает возможности представить, насколько чисто были сделаны эти опыты.

Неудачные попытки синтеза и идентификации 102-го элемента традиционными химическими методами из-за малого времени жизни его изотопов направили внимание исследователей на создание физических методов идентификации.

Один из них был впервые разработан и использован в опытах по получению 102-го элемента в Институте атомной энергии в Москве в 1957-1958 г.г.<sup>17,8/</sup>. Суть этого метода состоит в быстром механическом переносе ядер-продуктов реакции, вылетевших из мишени, к детекторам излучения, регистрирующим  $\alpha$ -частицы или осколки спонтанного деления исследуемого изотопа.

В московских опытах ядра вбивались в алюминиевый сборник, который за 1,5-2 сек перемещался из зоны облучения на расстояние 2 метра, где располагались ядерные фотоэмульсии, служившие детекторами  $\alpha$ -частиц.

Энергия ядер отдачи такова, что они способны проникать вглубь сборника на 1-1,5 микрона, и это приводит к потере точности при определении энергии  $\alpha$ -частиц, вылетающих из сборника в результате распада исследуемых изотопов. Другое неприятное обстоятельство связано с прохождением пучка тяжелых ионов через алюминиевый сборник. При этом ускоренные ионы, во-первых, активируют материал сборника, создавая значительный  $\beta$ -,  $\gamma$ -, и даже  $\alpha$ -фон (на тяжелых примесях в алюминии), и, во-вторых, нагревают сборник за счет больших удельных потерь на ионизацию. Оба эти эффекта существенным образом влияют на качество работы детекторов  $\alpha$ -частиц, ухудшая их разрешающую способность.

В московских опытах мишени из изотопов плутония  $Pu^{241}$  и  $Pu^{239}$  облучались ускоренными до энергии 100 мэв моноэнергетическими ионами кислорода  $O^{16}$ .

Основная трудность, с которой пришлось столкнуться экспериментаторам, заключалась в возникновении  $\alpha$ -радиоактивного фона на примесях свинца и более легких элементов в материалах мишени и сборника. При взаимодействии кислорода со свинцом образуется большое число  $\alpha$ -активных изотопов в области полония и выше за счет различных реакций передачи. Так, в Москве впервые были обнаружены группы  $\alpha$ -частиц с энергией 11,85 и 8,87 мэв, которые обусловлены, как выяснилось несколько позже, распадом изомеров полония  $Po^{211m}$  и  $Po^{212m}$ . Точность измерения энергии  $\alpha$ -частиц с помощью ядерных фотоэмульсий не позволяла разрешить ряд других  $\alpha$ -групп, о существовании которых теперь хорошо известно. Вопросам фона в московских опытах было уделено очень большое внимание. С этой целью был разработан высокочувствительный активационный метод анализа мишеней и сборников на содержание свинца, были разработаны методы очистки материала мишени от посторонних примесей. Результаты этой работы явились базой для многих последующих экспериментов, приведенных позднее как в Дубне, так и в США.

В работе 1958 года в Москве использовались две плутониевые мишени: первая содержала  $180 \text{ мкг/см}^2 Pu^{241}$ , вторая  $100 \text{ мкг/см}^2 Pu^{241}$ . С первой мишенью была проделана серия опытов (40 облучений по 3 часа каждое), в которой время экспозиции под пучком и около фотопластинки составляло 8 сек, а время движения сборника - 3 сек. В результате этих опытов наблюдались  $\alpha$ -частицы с энергией в интервале 8,2-9,0 мэв. Всего было зарегистрировано 90 таких  $\alpha$ -частиц. Тщательный активационный анализ показал, что примеси свинца могут обусловить не более 40% от всего числа наблюдавшихся  $\alpha$ -частиц в этом интервале энергий. Вторая мишень была изготовлена после дополнительной очистки плутония и содержала значительно меньше свинца, чем первая. В результате 10 трехчасовых облучений в том же самом режиме работы регистрирующего устройства наблюдалось 20  $\alpha$ -частиц в интервале энергий 8,2-9,0. Активационный анализ показал, что только 4 из них можно отнести за счет загрязнений мишени свинцом.

Как уже отмечалось, метод определения энергии  $\alpha$ -частиц с помощью фотоэмульсий не обладает высокой точностью. На рис. 1а приведен спектр

$\alpha$ -частиц, полученных с помощью фотоэмульсий при облучении Рb ионами  $O^{18}$  /8/. На рис. 16 показан тот же спектр, измеренный с помощью полупроводниковых детекторов в Дубне (1967 г.). Обращает на себя внимание тот факт, что, во-первых, многие  $\alpha$ -группы, естественно, не были разрешены в фотоэмульсиях, и, во-вторых, энергия основных групп  $\alpha$ -частиц несколько завышена. В 1958 году считалось, что энергия  $\alpha$ -частиц одной из наиболее интенсивной группы составляет 7,5 мэв, в действительности же эта энергия равна 7,27 мэв, т.е. в фотоэмульсии энергия была завышена на 230 кэв. В области более высоких энергий отмечалась группа  $\alpha$ -частиц с энергией 12 мэв, тогда как на самом деле их энергия равна 11,65 мэв, т.е. завышение энергии составило 350 кэв.

Если обратиться к спектру  $\alpha$ -частиц, изображенному на рис. 2 и полученному при облучении  $Pu^{241}$  ионами  $O^{18}$  (рис. 5 из работы /8/), то видно, что с учетом только что указанных поправок в энергиях  $\alpha$ -частиц высокоэнергичная группа, отнесенная к распаду 102-го элемента, имеет энергию, примерно, на 300 кэв ниже, т.е.  $8,8 \pm 0,4$  мэв, а не  $8,9 \pm 0,4$  мэв. Оценки периода полураспада этого изотопа давали значение в интервале 2 сек  $\leq T_{1/2} \leq 40$  сек. Авторам не удалось детально изучить функцию возбуждения реакции, приводящей к образованию нового излучателя. Однако при тех значениях энергии ионов  $O^{18}$ , которые использовались в опытах по облучению  $Pu^{241}$ , могли иметь место только два сорта испарительных реакций с вылетом либо 4, либо 5 нейтронов, т.е. обнаруженный изотоп с  $E_{\alpha} = 8,8 \pm 0,4$  мэв и временем жизни в интервале от 2 до 40 сек мог иметь массовое число 252 или 253. Сечение ядерной реакции, приводящей к образованию исследованного изотопа, оказалось равным  $2 \cdot 10^{-32}$  см<sup>2</sup>.

В настоящее время мы знаем (об этом будет сказано ниже), что изотоп  $102^{252}$  обладает свойствами, близкими к тому, что наблюдалось в московской работе /8/: его период полураспада равен 4,5 сек, а энергия  $\alpha$ -частиц - 8,41 мэв. Очевидно, что именно этот изотоп наблюдался в опытах 1957-1958 г.г. в ядерной реакции  $Pu^{241} (O^{18}, 5n) 102^{252}$ .

Другой экспрессный физический метод, в котором идентификация исследуемого изотопа 102-го элемента проводилась по его дочернему продукту, был разработан А. Гиорсо и др. /9/ и в дальнейшем модифицирован и использован в работе Е.Д. Донца и др. /10/.

В опытах А. Гиорсо и др. /9/ ядра, выбитые из мишени, тормозились в атмосфере гелия и затем положительно заряженные атомы собирались электрическим полем на ленту, находившуюся под отрицательным потенциалом. Лента-конвейер перемещалась с определенной скоростью в зону, где происходило собиранье дочерних продуктов на вторичные сборники ядер отдачи.

Дочерние продукты с хорошо известными характеристиками распада, оказавшиеся на вторичном сборнике, идентифицировались затем химическими методами.

Неоспоримым достоинством этого метода, являющегося развитием классического способа времен отсчета и изучения радиоактивности, была возможность однозначной идентификации первичного продукта. Правда, при этом можно было измерять лишь период полураспада интересующего изотопа, а энергия альфа-излучения - важнейшая характеристика ядерных свойств изотопа - не определялась.

Используя этот метод, Гиорсо и др. /9/ провели опыты по синтезу изотопа  $102^{254}$  в реакции  $Cm^{246} (C^{12}, 4n) 102^{254}$ . Идентификация выполнялась по дочернему изотопу  $Fm^{250} (102^{254} \alpha, Fm^{250})$ , ядерные свойства которого были хорошо изучены ( $E_{\alpha} = 7,43$  мэв,  $T_{1/2} = 30$  мин). Действительно, в первых же экспериментах авторы обнаружили в дочерних продуктах  $Fm^{250}$ . Зависимость выхода  $Fm^{250}$  в дочерних продуктах от энергии бомбардирующих ионов  $C^{12}$  имела вид острой кривой с максимумом при энергии ионов  $70 \pm 5$  мэв, что доказывало, что первичный продукт  $102^{254}$  синтезируется именно в реакции с испарением четырех нейтронов. В результате одного опыта, проведенного в оптимальных условиях, регистрировалось 40 распадов  $Fm^{250}$ . Распределение  $Fm^{250}$  на вторичном сборнике соответствовало периоду полураспада для  $102^{254}$ , равному 3 сек. При изменении скорости движения ленты распределение ядер  $Fm^{250}$  на сборнике дочерних продуктов изменялось в соответствии с  $T_{1/2} = 3$  сек. Это доказывало, что в данном случае  $Fm^{250}$  появляется на сборнике в результате именно альфа-распада  $102^{254}$ , присутствующего на ленте, а не каким-либо другим образом. Это же доказывалось и тем, что на сборниках не были обнаружены ни  $Cf^{246}$ , ни  $Cf^{245}$ , имевшиеся в большом количестве на самой ленте. Более того, принадлежность альфа-активности с  $E_{\alpha} = 7,43$  мэв и  $T_{1/2} = 30$  мин изотопу  $Fm^{250}$  была проверена химическим способом. На рис. 3 показана хроматограмма,

полученная в этих опытах. Видно, что фракция фермия очень четко отделена от фракции Cf и более легких элементов.

В работе /11/, выполненной в 1959 году, А. Гиорсо и др. непосредственно наблюдали альфа-излучение изотопа  $102^{254}$ , используя для его синтеза ту же реакцию  $\text{Cm}^{248} (\text{C}^{12}, 4 \text{ п}) 102^{254}$ . В этих опытах лента, на которой собирались продукты ядерных реакций, протягивалась через ионизационную камеру с сеткой, где регистрировалось их альфа-излучение. Экспериментаторы наблюдали альфа-излучатель с  $T_{1/2} = 3$  сек и  $E_{\alpha} = 8,3$  мэв и отождествили его со  $102^{254}$ , основываясь на совпадении периода полураспада этого излучателя со значением, полученным в предыдущей работе. Кроме того в этих же опытах было зарегистрировано спонтанное деление изотопа, распадавшегося с  $T_{1/2} = 3$  сек. Было высказано предположение, что изотоп  $102^{254}$  испытывает спонтанное деление в 30% случаев.

В течение длительного времени эта работа рассматривалась как наиболее убедительное доказательство синтеза  $102^{254}$ , свойства этого изотопа ( $T_{1/2} = 3$  сек,  $E_{\alpha} = 8,3$  мэв) считались безусловно определенными правильно, поскольку  $\text{Fm}^{250}$  может появиться на вторичном сборнике только как продукт  $\alpha$ -распада  $102^{254}$ . При этом идентификация  $\text{Fm}^{250}$  в дочерних продуктах осуществлялась методом ионно-обменной хроматографии, что считается наиболее надежным способом определения порядкового номера элемента (см. хроматограмму на рис. 3).

Однако когда в 1962-1963 г.г. в ОИЯИ была создана аналогичная, лишь несколько видоизмененная методика для синтеза и изучения  $\alpha$ -распада /12/ изотопов 102-го элемента и было решено воспроизвести результаты А. Гиорсо и др. для  $102^{254}$ , то возникали первые сомнения в правильности данных берклиевской работы.

Схема аппаратуры, использовавшейся на внутреннем пучке циклотрона У-300, приведена на рис. 4. Принцип действия устройства состоит в том, что при бомбардировке тяжелыми ионами тонкой мишени образующиеся атомы 102 элемента выбиваются в наполненный газом замкнутый объем и за счет диффузии оседают на стенках этого объема. Три стенки объема представляют собой кольцевые углубления в медном вращающемся диске (1), который вносит адсорбированные ядра 102-го элемента из зоны облучения в зону сбора дочерних продуктов. После  $\alpha$ -распада 102 элемента 50% ядер фермия выбиваются в газовую

среду и электростатически собираются на вторичном сборнике (4). В опытах проводилось химическое выделение фермия со сборника дочерних ядер и для дополнительного подтверждения факта синтеза 102 элемента изучались функции возбуждения, которые в случае испарения нескольких нейтронов имеют характерный колоколообразный вид. Этим способом и был синтезирован изотоп  $102^{254}$  в ядерных реакциях  $\text{U}^{238} (\text{Ne}^{22}, 6 \text{ п}) 102^{254}$  и  $\text{Am}^{243} (\text{N}^{15}, 4 \text{ п}) 102^{254}$  /12/. Оказалось, что распределение  $\text{Fm}^{250}$  на вторичном сборнике резко отличается от ожидаемого для случая 3-секундного периода полураспада  $102^{254}$ . Из этих опытов следовало, что период полураспада  $102^{254}$  значительно длиннее и составляет 50 сек. Это был весьма неожиданный результат, поэтому опыты выполнялись особенно тщательно. В дальнейшем для дополнительного контроля была использована другая методика, где регистрировались непосредственно  $\alpha$ -частицы от распада  $102^{254}$  /13/ (об этом более подробно будет сказано ниже). Результаты первой дубненской работы по  $102^{254}$  полностью подтвердились. Для  $T_{1/2}$  получено значение 50-75 сек, а для  $E_{\alpha}$  - значение 8,11 мэв.

К сожалению, отсутствие в публикациях А. Гиорсо и др. /9,11/ конкретного материала, получаемого в опытах (спектры энергий  $\alpha$ -частиц продуктов, функции возбуждения, кривые распада), затрудняло сопоставление опытов, проведенных в Беркли и в Дубне, и по поводу этого резкого расхождения в данных ничего нельзя высказать, кроме недоумения. Эта неясность усугубляется еще и тем, что при испытании методики авторами американской работы были совершенно правильно определены свойства  $\text{Fm}^{248}$ , синтезированного в реакции  $\text{Pu}^{240} (\text{C}^{12}, 4 \text{ п}) \text{Fm}^{248} \xrightarrow{\alpha} \text{Cf}^{244}$ ; тем самым было показано, что методика работает достаточно надежно.

Очевидно, что сами авторы должны проанализировать возможные источники ошибок, поскольку нам, не имеющим в своем распоряжении фактического материала, трудно найти причину, которая привела к ошибочному заключению о свойствах изотопа  $102^{254}$ .

В 1961 году, проводя эксперименты по облучению калифорниевой мишени ускоренными ионами бора, группа исследователей из Беркли обнаружена в продуктах ядерных реакций  $\alpha$ -активный изотоп, испускавший  $\alpha$ -частицы с энергией 8,2 мэв и обладавший периодом полураспада 15 секунд /14/. Авторами было высказано предположение, что это изотоп 102-го элемента с массовым



числом 255, синтез которого осуществлялся в реакции  $Cf^{250,251,252}(B^{10,11}, p, n)102^{255}$ . Принадлежность полученного излучателя 102-му элементу доказывалась тем, что его выход резко возрастал (в 20 раз) при замене бомбардирующей частицы ( $C^{12}$  вместо  $B^{10,11}$ ), поскольку в этом случае к его образованию приводят реакции типа  $(B, \alpha, n)$ , сечения которых значительно больше сечения ядерных реакций  $(B, p, \alpha)$ .

Однако в дальнейшем изотоп  $102^{255}$  был синтезирован в Дубне<sup>/18/</sup>. Было найдено, что его свойства весьма существенно отличаются от указанных американскими исследователями. В действительности изотоп  $102^{255}$  имеет период полураспада 3 минуты, а энергия  $\alpha$ -частиц составляет 8,08 мэв. Таким образом, данные 1961 года, полученные в США о свойствах  $102^{255}$ , также оказались ошибочными.

Синтез и исследование свойств изотопов 102-го элемента в ОИЯИ

Исследования свойств изотопов 102-го элемента в ОИЯИ проводились в 3-х направлениях:

- 1) изучение  $\alpha$ -распада изотопов с массовыми числами 256-251;
- 2) изучение спонтанного деления четно-четных изотопов  $102^{256,254,252}$ ;
- 3) изучение химических свойств 102-го элемента с использованием экспрессных методов химии в газовой фазе.

1) В первых опытах, выполненных в 1963-1965 г.г., ядра 102-го элемента детектировались по дочерним ядрам фермия  $Fm^{252,250}$ <sup>/10,12/</sup>. Эта методика давала сведения лишь о периоде полураспада изотопов 102-го элемента. С ее помощью было установлено, что период полураспада изотопа  $102^{254}$  составляет 50 сек, а для  $102^{256}$  было получено значение  $8 \pm 3$  сек. В дальнейшем, начиная с 1965 года, разрабатывалась методика, позволявшая четко регистрировать  $\alpha$ -распад непосредственно ядер 102-го элемента<sup>/15/</sup>. В основе этой методики, впервые примененной для изучения  $\alpha$ -распада редкоземельных элементов<sup>/16/</sup>, лежит метод адсорбции атомов отдачи из газовой струи, выходящей из небольшого (диаметром 0,5 мм) отверстия в стенке камеры, где в газе тормозятся атомы отдачи. Регистрация  $\alpha$ -частиц проводилась полупроводниковыми детекторами с хорошим энергетическим разрешением. В результате длительных методи-

ческих исследований были созданы установки с циркуляцией рабочего газа, позволявшие получать высокий и стабильный коэффициент сбора атомов отдачи в течение многих суток непрерывной работы.

Было изготовлено 2 варианта аппаратуры:

- 1) для выведенного пучка ионов (рис. 5),
- 2) для внутреннего пучка ионов (рис. 6), который более однородно распределен на мишенях большой площади, что весьма существенно при использовании высоких (до десятков мка) интенсивностей пучков циклотрона У-300<sup>/17,18/</sup>.

В опытах с этой аппаратурой регистрировались энергии  $\alpha$ -частиц изотопов 102 элемента, их периоды полураспада, зависимости выхода от энергии тяжелых ионов. В ряде случаев для дополнительной идентификации факта синтеза изотопов 102-го элемента применялась регистрация дочерних ядер фермия. В качестве сборника дочерних ядер служила чувствительная поверхность самого полупроводникового детектора, куда дочерние ядра вбивались за счет отдачи при  $\alpha$ -распаде ядер 102-го элемента в случаях, когда  $\alpha$ -частица вылетала в противоположную от детектора сторону.

Один из спектров, измеренный при синтезе изотопа  $102^{254}$  в реакции  $Pu^{242}(O^{16}, 4n)102^{254}$  в опытах на выведенном пучке циклотрона У-300, приведен на рис. 7<sup>/19/</sup>. Типичные функции возбуждения, полученные в опытах на выведенном пучке циклотрона У-300 для реакций  $Pu^{242}(O^{16}, 4n)102^{254}$  и  $Pu^{242}(O^{16}, 5n)102^{253}$ , приведены на рис. 8.

В целом исследованные ядерные реакции и определенные свойства изотопов 102-го элемента представлены в таблице 1.

Вся совокупность данных по изотопам 102-го элемента, полученных в разное время в разных лабораториях, представлена в таблице 2. Порядок приведения данных соответствует хронологической последовательности их появления.

Из этой таблицы видно, что результаты дубненских экспериментов по изотопам 102-го элемента<sup>/13,18,19,20/</sup> существенно отличаются от полученных ранее данных. Наиболее полное и достоверное установление свойств целого ряда изотопов 102-го элемента явилось результатом завершенных в Дубне в 1966 г. опытов, выполненных на 310-см и 150-см циклотронах ЛЯР ОИЯИ. Результаты этих опытов были доложены на Международной конференции по физике тяжелых

ионов в Дубне в октябре 1966 года и вскоре получили полное подтверждение в опытах, выполненных в Беркли.<sup>/26/</sup> Целиком подтвердив многолетние дубненские результаты по всем изученным изотопам, берклиевская группа тем самым отказалась от своих ранних, представлявшихся в течение многих лет наиболее убедительными, результатов по синтезу и изучению свойств изотопа 102-го элемента с массовым числом 254, так же как и от несколько более поздних по 102<sup>255</sup>, включенных во все таблицы изотопов, изданные в последние годы.

Изучение спонтанного деления четно-четных изотопов 102<sup>252,254,256</sup>

После того как в 1959 году стали известны результаты экспериментов по изучению  $\alpha$ -распада и спонтанного деления изотопа 102<sup>254</sup> /9,11/, в Беркли была выполнена теоретическая работа по оценке стабильности по отношению к спонтанному делению некоторых изотопов 102-го и других более тяжелых элементов<sup>/21/</sup>. Поскольку за основу расчетов были приняты значения парциальных периодов  $\alpha$ -распада и спонтанного деления для 102<sup>254</sup> (3 и 8 сек, соответственно), то для изотопа 102<sup>256</sup>, в частности, была получена величина периода спонтанного деления, равная 0,02 сек.

Однако уже в первых опытах по изучению 102<sup>256</sup> было показано, что его время жизни составляет несколько секунд<sup>/10/</sup>. Это значение в сотни раз превышало теоретическую оценку. Тем более было интересно установить вид распада изотопа 102<sup>256</sup> и попытаться определить парциальный период спонтанного деления этого изотопа. Результаты экспериментов позволили бы внести соответствующие поправки в расчеты и более реально оценить времена жизни более тяжелых, чем 102, элементов.

К сожалению, на пути таких экспериментов возникли непредвиденные трудности. В 1961 году в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ было открыто новое явление - спонтанное деление ядер в изомерном состоянии<sup>/22,23/</sup>. Это очень интересное само по себе явление создавало фон, в десятки раз превышающий эффект при исследовании спонтанного деления из основного состояния короткоживущих изотопов 102-го элемента. В настоящее время известно около 10 ядер-изомеров, испытывающих деление с временами от 10<sup>-8</sup> сек до нескольких минут. Эти ядра-изомеры образуются в ядерных реакциях с тяжелыми ионами за счет сложных реакций передачи.

Тем не менее в ОИЯИ были поставлены опыты по исследованию спонтанного деления четных изотопов 102-го элемента, которые позволяли оценить нижние граничные значения периодов полураспада. В первых экспериментах использовалась высокочувствительная методика (рис. 9) с наклонной мишенью и полупроводниковыми детекторами для регистрации осколков<sup>/24/</sup>. Было показано, что на долю спонтанного деления изотопа 102<sup>256</sup> приходится небольшая часть ( $\leq \frac{1}{200}$ ) всех случаев распада ядер, т.е. что время жизни изотопа 102<sup>256</sup> /10/ определяется  $\alpha$ -распадом. Граничное значение для периода спонтанного деления 102<sup>256</sup> составляет  $\geq 1000$  сек.

В последнее время продолжались опыты по изучению спонтанного деления 102<sup>256</sup> и 102<sup>254</sup> с использованием модифицированной методики<sup>/25/</sup>. В новом варианте методики вместо поверхностно-барьерных кремниевых детекторов применялись стеклянные или слюдяные детекторы. Синтез изотопов осуществлялся в ядерных реакциях  $U^{238}(Ne^{22}, 4n)102^{256}$  и  $U^{238}(Ne^{22}, 4n)102^{254}$ . В результате установлено, что граничные значения периодов спонтанного деления для этих изотопов составляют 25 часов (102<sup>254</sup>) и 20 минут (102<sup>256</sup>), т.е. в действительности изотоп 102<sup>254</sup> делится не в 30% случаев, как это указывалось в работе Гиорсо и др.<sup>/11/</sup>, а всего лишь не более чем в 0,6%.

Недавно в США было исследовано спонтанное деление изотопа 102<sup>252</sup> и получено значение для  $T_{sp} = 6$  сек<sup>/26/</sup>. В нашей лаборатории были проведены аналогичные опыты с целью проверки и подтверждения американских данных. Изотоп 102<sup>252</sup> в нашем случае синтезировался в ядерной реакции  $Pu^{239}(O^{18}, 5n)102^{252}$ . Изучались одновременно  $\alpha$ -частицы и осколки спонтанного деления этого изотопа с помощью аппаратуры с полупроводниковыми детекторами на установке для синтеза изотопов трансурановых элементов на внутреннем пучке циклотрона У-300<sup>/18/</sup>. Было зарегистрировано спонтанное деление примерно в 40% случаев относительно числа событий  $\alpha$ -распада (102<sup>252</sup>  $T_{1/2} = 3$  сек,  $E_{\alpha} = 8,41$  мэв). Однако в контрольном опыте при облучении  $U^{233}$  ионами  $O^{18}$  нами был зарегистрирован спонтанно-делящийся изотоп с таким же выходом, как и в случае облучения  $Pu^{239}$  ионами  $O^{18}$ , причем период полураспада этого излучателя также оказался равным 3 сек, а порядковый номер его не превышает 100. В связи с этим нам представляется, что доля спонтанного деления 102<sup>252</sup> существенно меньше 40%, а эффект спонтанного деления, наблюдаемый в реакции  $Pu^{239}(O^{18}, 5n)102^{252}$ , в значительной

степени определяется неидентифицированным пока изомером с периодом полураспада около 3 сек, который может образоваться с заметным сечением в реакции передачи аналогично его возникновению при облучении  $U^{233}$  ионами  $O^{16}$ . Образование этого изомера наблюдалось и ранее в ряде других ядерных реакций /27,28/.

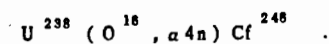
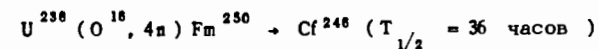
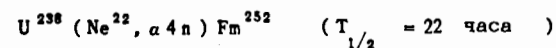
Таким образом, для всех трех изотопов 102-го элемента с массовыми числами 252, 254 и 256 удалось получить только нижние граничные значения периодов спонтанного деления, и эти результаты оказались в резком противоречии с данными А. Гиорсо как по  $102^{254}$ , так и по  $102^{252}$  /11,26/.

#### Опыты по химии элемента 102

Согласно активной гипотезе 102-й элемент принадлежит семейству актиноидов, занимающих место в III группе периодической системы элементов Д.И. Менделеева. По своим химическим свойствам актиноиды являются аналогами другого большого семейства редкоземельных элементов—лантаноидов, расположенных в той же III группе, к которой относятся также и более легкие элементы — скандий и иттрий. Химические соединения элементов третьей группы с некоторыми другими элементами, например, тригалогениды, обладают свойствами, резко отличающимися от свойств аналогичных соединений (тетрагалогениды) элементов соседней, IV группы, к которой относятся цирконий, гафний и 104-й элемент — курчатовий. Например, температура кипения хлористых соединений элементов III группы составляет 1500–1700°C, в то время как хлориды элементов IV группы обладают большей летучестью и возгоняются при 300°C.

Опыты по химии элемента  $102^{256}$  проводились на аппаратуре для экспрессного непрерывного разделения продуктов ядерных реакций, схематически изображенной на рис. 10 и ранее использованной в экспериментах по химии курчатовия ( $Z = 104$ ) /30,31/. Цель этих опытов заключалась в сравнении поведения хлоридов 102-го элемента с поведением хлоридов тербия, калифорния и фермия, являющихся типичными представителями семейств лантаноидов и актиноидов. В случае принадлежности 102-го элемента к трехвалентным актиноидам его хлориды должны вести себя аналогично хлоридам Tb, Cf и Fm. Если же свойства 102-го элемента близки к свойствам элементов, скажем, IV группы, то поведение его хлоридов было бы подобным поведению хлоридов циркония, гафния и курчатовия.

В качестве исследуемого изотопа 102-го элемента был выбран  $102^{256}$ , который получался в ядерной реакции  $U^{238} (Ne^{22}, 4n) 102^{256}$ . Одновременно в процессе опыта при облучении урановой мишени ионами  $Ne^{22}$  и  $O^{16}$  осуществлялся синтез некоторых изотопов фермия ( $Fm^{252}$ ,  $Fm^{250}$ ), а также калифорния ( $Cf^{246}$ ) в результате следующих реакций:



Для синтеза тербия в урановую мишень было добавлено небольшое количество самария. За счет сложной реакции передачи на самарии-144 возникал долгоживущий изотоп тербия  $Tb^{149}$ .

Таким образом, в процессе длительного облучения мишени из  $U^{238}$  ( $Sm^{144}$ ) ионами  $Ne^{22}$  и  $O^{16}$  в установке накапливались долгоживущие изотопы фермия ( $Fm^{252}$ ), калифорния ( $Cf^{246}$ ) и тербия ( $Tb^{149}$ ). Изотоп 102-го элемента  $102^{256}$ , распавшись с периодом полураспада 4 сек, превращался в изотоп фермия  $Fm^{252}$ . Из данных об эффективных сечениях реакций  $U^{238} (Ne^{22}, 4n) 102^{256} \rightarrow Fm^{252}$  и  $U^{238} (Ne^{22}, \alpha 4n) Fm^{252}$  /10/ следовало, что при энергии ионов  $Ne^{22}$ , равной 110 мэв, примерно 40% общего количества фермия-252, накопленного за время опыта в установке, образуется в результате  $\alpha$ -распада  $102^{256}$ .

Из дальнейшего станет ясно, что это очень важная характеристика, поскольку на основании распределения фермия-252 в различных частях установки относительно распределения  $Cf^{246}$  и  $Tb^{149}$  в тех же частях делался вывод о поведении хлоридов 102-го элемента.

Опыт проводился следующим образом (см. рис. 10).

Атомы отдачи  $102^{256}$ ,  $Fm^{252}$ ,  $Cf^{246}$  и  $Tb^{149}$  вылетали из мишени и тормозились в потоке азота, подаваемого в камеру мишени, а затем выносились азотом в область, заполненную парами  $NbCl_3$  и  $ZrCl_4$ . Здесь осуществлялось хлорирование всех продуктов ядерных реакций. Далее хлориды транспортировались газовым потоком по четырехметровой трубке (4) к инертному (5) и

химическому (6) фильтрам, а затем газ попадал в ловушку (7), где конденсировался хлорирующий агент. Весь газовый тракт (трубка и оба фильтра) находился при температуре около  $300^{\circ}\text{C}$ . При этом хлориды продуктов ядерных реакций в зависимости от своей летучести тем или иным способом распределялись между различными частями аппаратуры. По окончания облучения можно было определить количества  $\text{Fm}^{252}$ ,  $\text{Cf}^{248}$  и  $\text{Tb}^{149}$ , накопленные в разных местах установки. С этой целью аппаратура разбиралась и радиоактивные продукты смывались с каждой части отдельно. Затем смывы подвергались химической обработке с последующим хроматографическим разделением элементов. Идентификация изучаемых изотопов выполнялась по энергии  $\alpha$ -частиц и периодам полураспада.

Предварительными опытами, включая опыты по химии курчатовия, было показано, что сравнительно легко летучие хлориды элементов IV и более высоких групп проходят по всему газовому тракту без существенной задержки и накапливаются в основном на химически активном фильтре и в ловушке /32,33/. В то же время менее летучие хлориды лантанидов, калифорния и фермия сорбируются главным образом в трубке и в инертном фильтре /31/.

В экспериментах по химии 102 элемента было установлено, что распределение  $\text{Fm}^{252}$  в трубке, на инертном и химическом фильтре совершенно подобно распределению  $\text{Cf}^{248}$  и  $\text{Tb}^{149}$  по тем же частям установки. Если бы хлорид 102-го элемента был более летуч, чем хлориды калифорния и тербия, то распределение  $\text{Fm}^{252}$  должно было бы смещаться в сторону движения газа за счет накопления его при  $\alpha$ -распаде 102-го элемента.

Таким образом было доказано, что элемент 102 образует сильно сорбирующийся и, следовательно, мало летучий хлорид, по своим свойствам близкий к хлоридам тербия, калифорния и фермия и в то же время резко отличный по летучести от элементов IV группы - гафния и курчатовия.

Основные итоги 10-летних исследований элемента 102 сводятся к следующему:

1. В большинстве первых работ 1957-1961 г.г. по синтезу элемента 102 были допущены ошибки. Ни один из идентифицированных в то время изотопов с массовыми числами 251, 253, 254, 255 не обладает теми свойствами, которые им приписывались.

2. В московских опытах 1957-1958 г.г. по получению 102-го элемента факт синтеза нового элемента был установлен на основе тщательно разработанного активационного анализа мишеней на примеси Pb. Данные по энергии  $\alpha$ -распада ( $8,8 \pm 0,4$  мэв) согласуются с результатами, полученными в Дубне для  $102^{252}$ ; получено хорошее согласие по сечению образования этого изотопа ( $2 \cdot 10^{-32}$  см<sup>2</sup> в Москве и  $1,6 \cdot 10^{-32}$  см в Дубне); нет противоречий в данных по периоду полураспада ( $T_{1/2} = 2-40$  сек в Москве и  $T_{1/2} = 4,5$  сек в Дубне). Следовательно, в результате дубненских опытов уточнено массовое число синтезированного в Москве в 1957 году изотопа ( $102^{252}$ ).

3. В ОИЯИ получена впервые наибольшая информация о свойствах  $\alpha$ -распада шести изотопов 102-го элемента.

4. В Дубне впервые изучено химическое поведение атома 102-го элемента и показано, что по своим свойствам он подобен актиноидам и отличается от курчатовия и других элементов IV группы.

Т а б л и ц а 1

Изотоп	Реакция	$E_{\alpha}$ мэв	$T_{1/2}$ сек
$102^{256}$	$\text{U}^{238} (\text{Ne}^{22}, 4\text{n})$	$8,42 \pm 0,03$	$3,7 \pm 0,5$
$102^{255}$	$\text{Pu}^{242} (\text{O}^{18}, 4\text{n})$	$8,09 \pm 0,03$	$180 \pm 20$
	$\text{U}^{238} (\text{Ne}^{22}, 5\text{n})$		
$102^{254}$	$\text{Pu}^{242} (\text{O}^{18}, 5\text{n})$	$8,11 \pm 0,03$	$65 \pm 15$
	$\text{Am}^{243} (\text{N}^{15}, 4\text{n})$		
$102^{253}$	$\text{Pu}^{242} (\text{O}^{18}, 4\text{n})$	$8,01 \pm 0,03$	$95 \pm 10$
	$\text{U}^{238} (\text{Ne}^{22}, 6\text{n})$		
	$\text{Pu}^{242} (\text{O}^{18}, 5\text{n})$		
$102^{252}$	$\text{Pu}^{239} (\text{O}^{18}, 4\text{n})$	$8,41 \pm 0,03$	$4,5 \pm 1,5$
$102^{251}$	$\text{Pu}^{239} (\text{O}^{18}, 4\text{n})$	8,8	0,5 - 1,0

Л и т е р а т у р а

1. A.Ghiorso, B.G.Harvey, G.R.Choppin, S.G.Thompson, G.T.Seaborg, *Phys. Rev.*, 98, 1518 (1955).
2. L.Phillips, R.Gatti, A.Chesne, L.Muga, S.Thompson, *Phys.Rev.Lett.*, 1, 215 (1958).
3. Г. Кумф, Е.Д. Донец. ЖЭТФ 44, 799 (1963).
4. G.N.Akap'ev, A.G.Demin, V.A.Druin, G.N.Flerov, Yu.S.Korotkin, Yu.V.Lobanov. Preprint JINR, E7-3261, Dubna, 1967.
4. P.R.Fields, A.M.Friedman, J.Milsted, H.Atterling, W.Forsling, L.W.Holm and B.Aström. *Phys.Rev.*, 107, 1460 (1957); *Arkiv f.Fysik*, 15, 225 (1959).
6. A.Ghiorso, T.Sikkeland, J.R.Walton and G.T.Seaborg. *Phys.Rev.Letters*, 1, 17 (1958).
7. Г.Н.Флеров, С.М.Поликанов, А.С.Карамян, А.С.Пасюк, Д.М.Парфанович, Н.И.Тарантин, В.А.Карнаухов, В.А.Друин, В.В.Волков, А.М.Семчинова, Ю.Ц.Оганесян, В.И.Хализев, Г.И.Хлебников. ДАН СССР, 120, № 1, 73 (1958).
8. Г.Н.Флеров, С.М.Поликанов, А.С.Карамян, А.С.Пасюк, Д.М.Парфанович, Н.И.Тарантин, В.А.Карнаухов, В.А.Друин, В.В.Волков, А.М.Семчинова, Ю.Ц.Оганесян, В.И.Хализев, Г.И.Хлебников, Б.Ф.Мясоедов, К.А.Гаврилов. ЖЭТФ, 38, 82 (1960).
9. A.Choirso, T.Sikkeland, J.R.Walton and G.T.Seaborg. *Phys.Rev.Letters*, 1, 18 (1958).
10. Е.Д.Донец, В.А.Шеголев, В.А.Ермаков. Атомная энергия 16, 195 (1964).
11. A.Chiorso, UCRL-8714 (1959) ; см. также А.Гиорсо. Атомная энергия 7, 338 (1959). Доклад на VIII Менделеевском съезде (Москва).
12. Е.Д.Донец, В.А.Шеголев, В.А.Ермаков. Атомная энергия 20, 223 (1966).
13. Б.А.Загер, М.Б.Миллер, В.Л.Михеев, С.М.Поликанов, А.М.Сухов, Г.Н.Флеров, Л.П.Челноков. Атомная энергия 20, 230 (1966).
14. A.Chiorso, T.Sikkeland, A.E.Larsh and R.M.Latimer, *Phys.Rev.Letters.*, 6, 473 (1961).
15. В.Л.Михеев. ПТЭ № 4, 22 (1966).
16. R.D.Macfarlane, R.D.Griffioen, *Nucl.Instrum. and Methods*, 24, 461 (1963).
17. Г.Н.Акапьев, А.Г.Демян, В.А.Друин, Э.Г.Имаев, И.В.Колесов, Ю.В.Лобанов, Л.П.Пашенко. Атомная энергия 21, 243 (1966).
18. В.А.Друин, Г.Н.Акапьев, А.Г.Демян, Ю.В.Лобанов, Б.В.Фефилов, Г.Н.Флеров, Л.П.Челноков. Атомная энергия 22, 127 (1967).
19. В.Л.Михеев, В.И.Илющенко, М.Б.Миллер, С.М.Поликанов, Г.Н.Флеров, Ю.П.Харитонов. Атомная энергия 22, 90 (1967).

20. Г.Н.Флеров, С.М.Поликанов, В.Л.Михеев, В.Л.Илющенко, В.Ф.Кушнир, М.Б.Миллер, А.М.Сухов, В.А.Шеголев, *Ядерная физика*, 5, 1186 (1967).
21. S.Johansson, Report UCRL-10474, September 25, 1962.
22. С.М.Поликанов, В.А.Друин, В.А.Карнаухов, В.Л.Михеев, А.А.Плеве, Н.К.Скобелев, В.Г.Субботин, Г.М.Тер-Акопян, В.А.Фомичев. ЖЭТФ, 42, 1464 (1964).
23. Г.Н.Флеров, С.Бьёрнхольм, А.Ю.П.Гангрский, В.А.Карнаухов, В.И.Кузнецов, Б.Н.Марков, А.А.Плеве, С.М.Поликанов, Н.К.Скобелев, Х.Юнгклаузен. Доклад на конференции по физике тяжелых ионов, Дубна, октябрь 1966.
24. В.А.Друин, Н.К.Скобелев, Б.Ф.Фефилов, Г.Н.Флеров. Препринт ОИЯИ Р-1580, Дубна 1964.
25. G.N.Flerov, V.I.Kuznetsov, N.K.Skobelev, Preprint JINR, E7-3043, Dubna, 1966.
26. A.Ghiorso, T.Sikkeland, M.J.Nurmia, *Phys.Rev.Letters*, 18, 401 (1967).
27. В.А.Друин, Н.К.Скобелев, Б.В.Фефилов, В.И.Кузнецов, Б.В.Лобанов, Ю.Ц.Оганесян. Препринт ОИЯИ Р-1651, Дубна 1964.
28. G.N.Flerov and S.M.Polikanov, *Comptes rendus du congres international de physique nucleaire, Paris, 2-8 juillet, 1964*, v.1, 407.
29. Ю.Т.Чубурков, Р.Цалетка, М.Р.Шалаевский, И.Звара. Препринт ОИЯИ, Р6-3076, 3 Дубна 1966.
30. И.Звара, Ю.Т.Чубурков, Р.Цалетка, Т.С.Зварова, М.Р.Шалаевский, Б.В.Шилов. Атомная энергия, 21, 83 (1966).
31. И.Звара, Ю.Т.Чубурков, Р.Цалетка, Т.С.Зварова, М.Р.Шалаевский, Б.В.Шилов. Доклад на конференции по физике тяжелых ионов. Дубна, октябрь 1966 г.
32. И.Звара, Ю.Т.Чубурков, Т.С.Зварова, Р.Цалетка. Препринт ОИЯИ, Д6-3281, Дубна 1967.
33. И.Звара, Т.С.Зварова, Р.Цалетка, Ю.Т.Чубурков, М.Р.Шалаевский. *Радиохимия*, 9, 231 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 июля 1967 г.

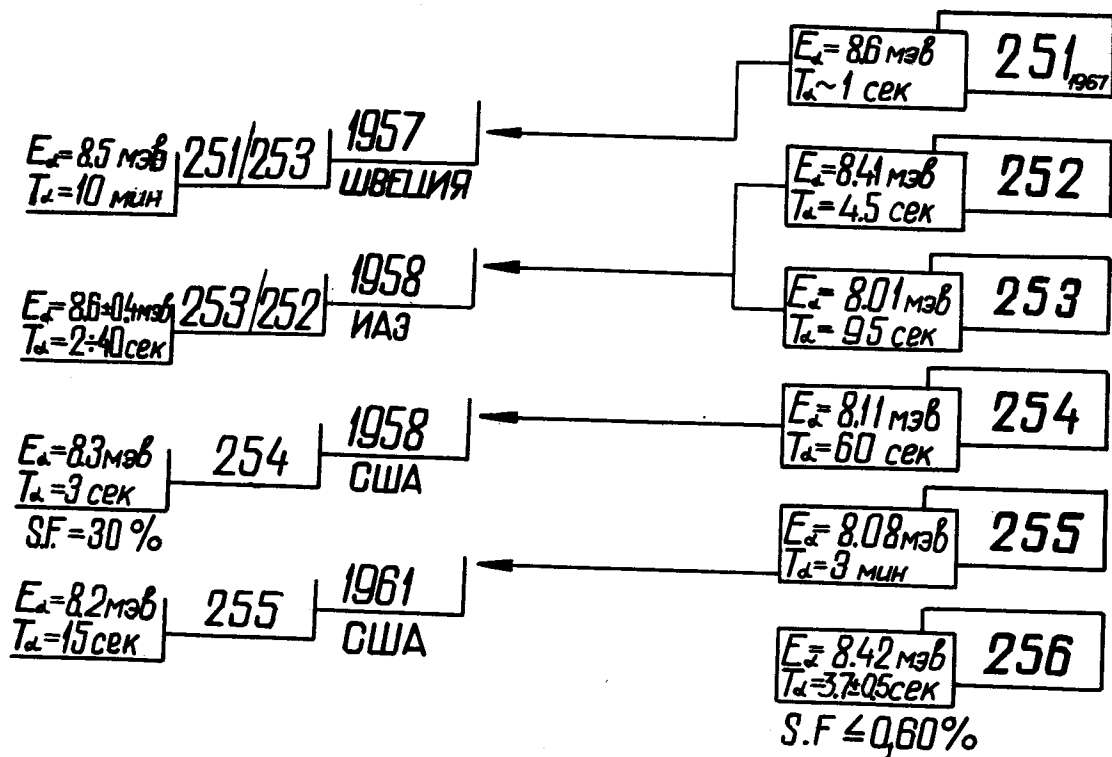


Таблица 2.

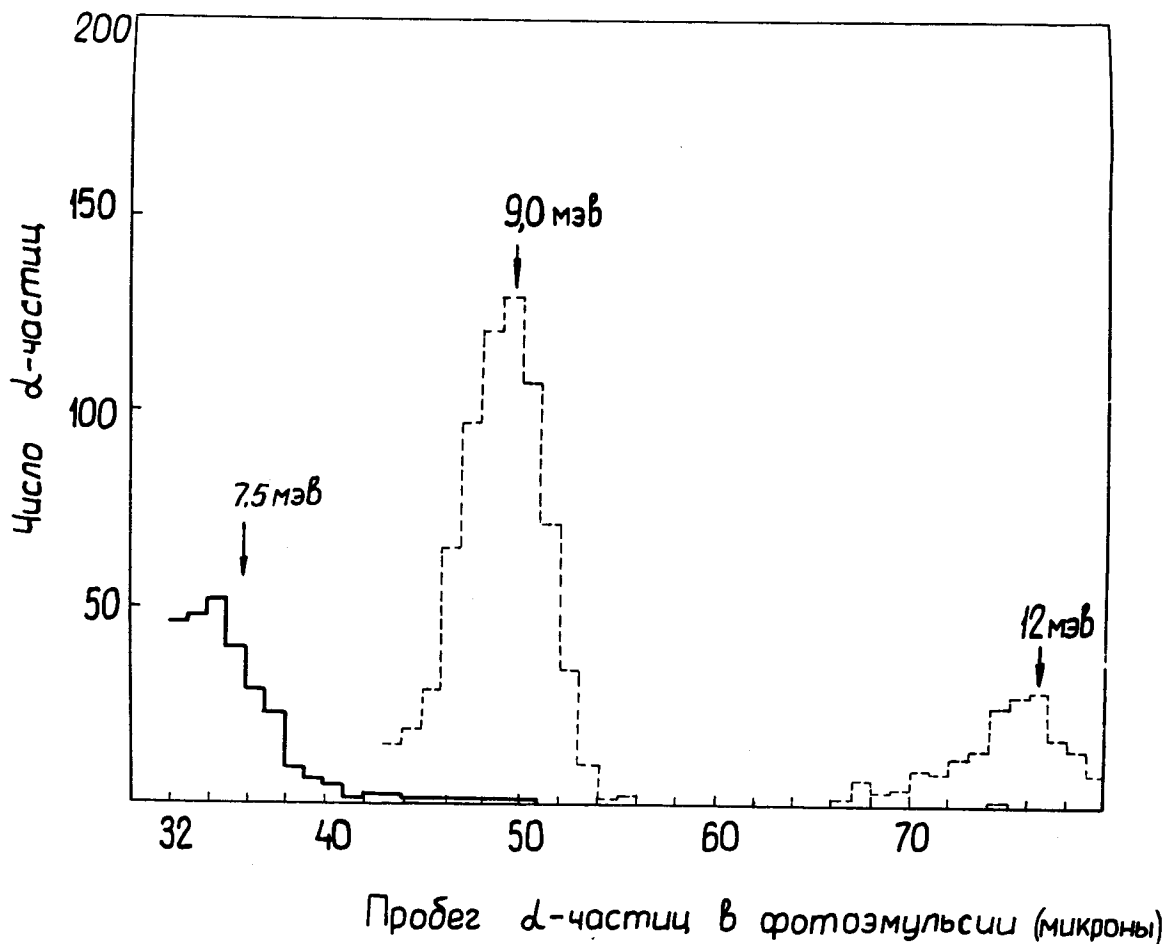


Рис. 1(а). Спектр альфа-частиц, полученный с помощью ядерных эмульсий при облучении свинца ионами  $O^{16}$ .

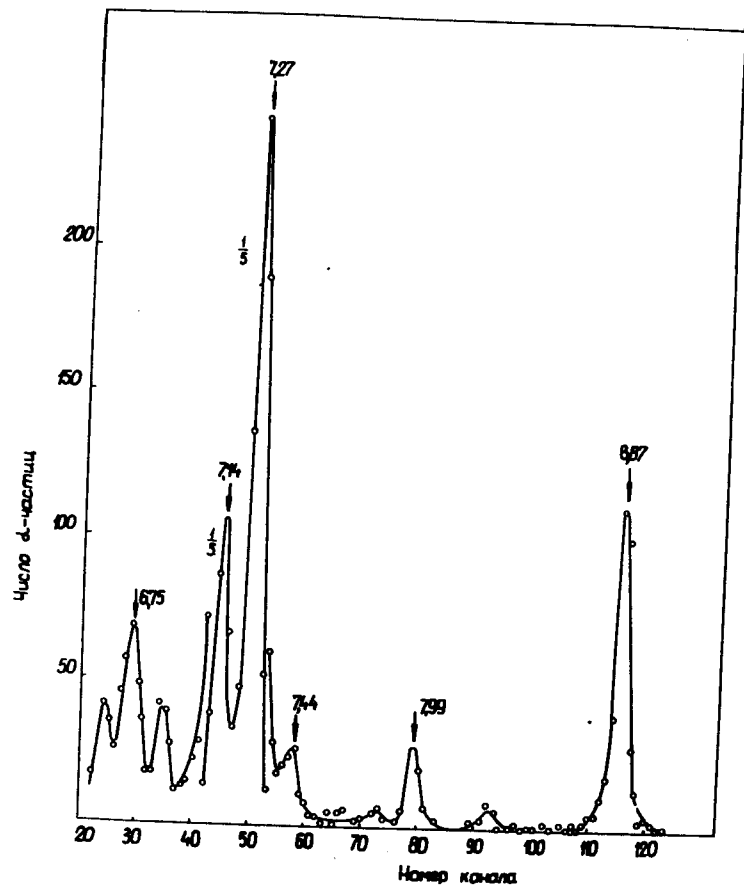


Рис. 1(б). Тот же альфа-спектр, измеренный с помощью поверхностно-барьерных детекторов.

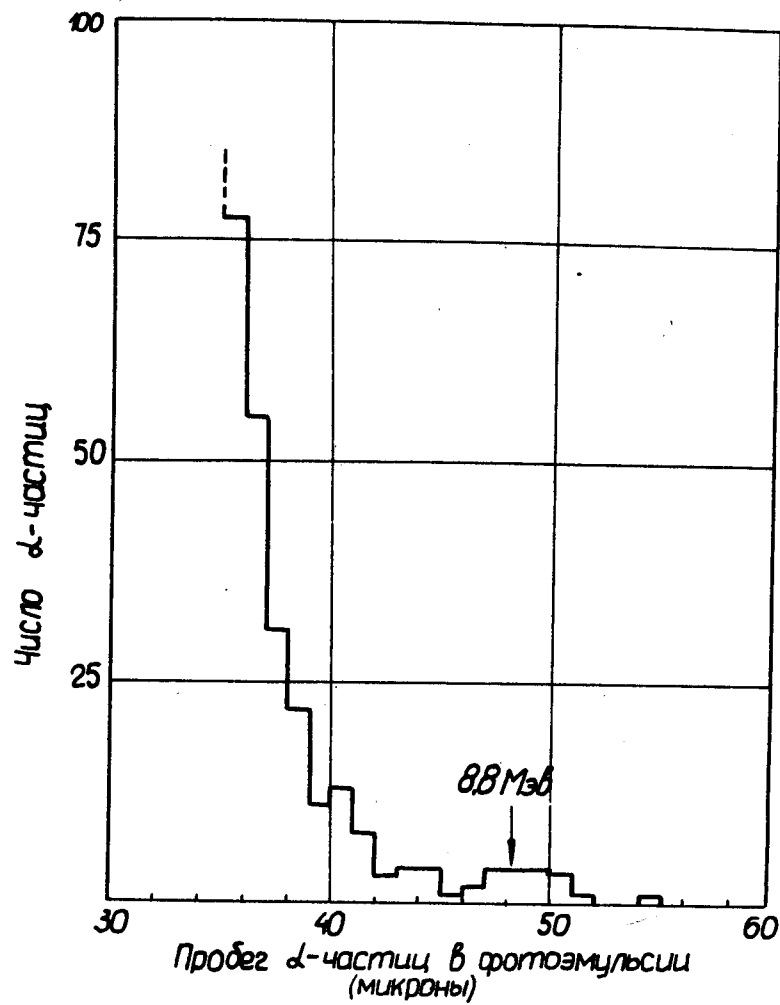


Рис. 2. Спектр альфа-частиц, полученный при облучении  $\text{Pu}^{241}$  ионами  $\text{O}^{16}$ .

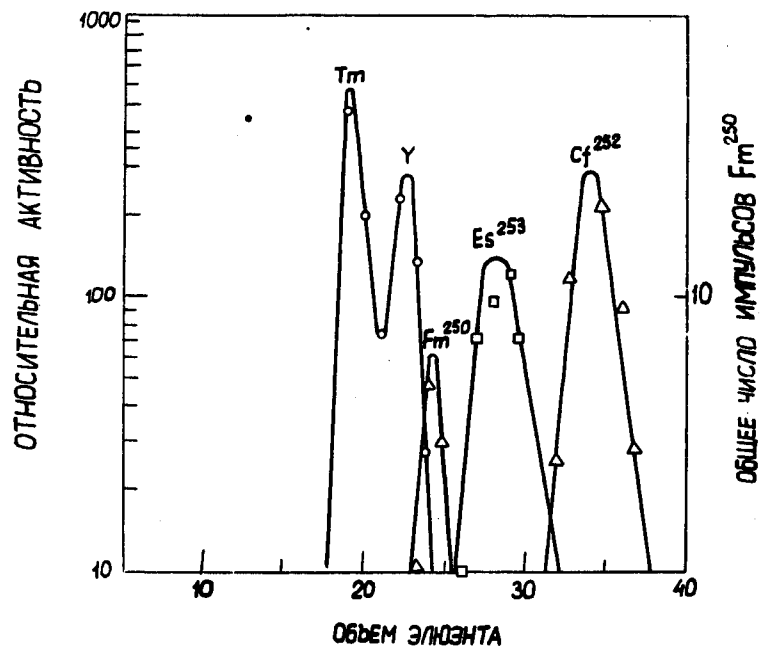


Рис. 3. Кривые вымывания трансураниевых элементов в опытах А. Гиорсо и др. /8/.

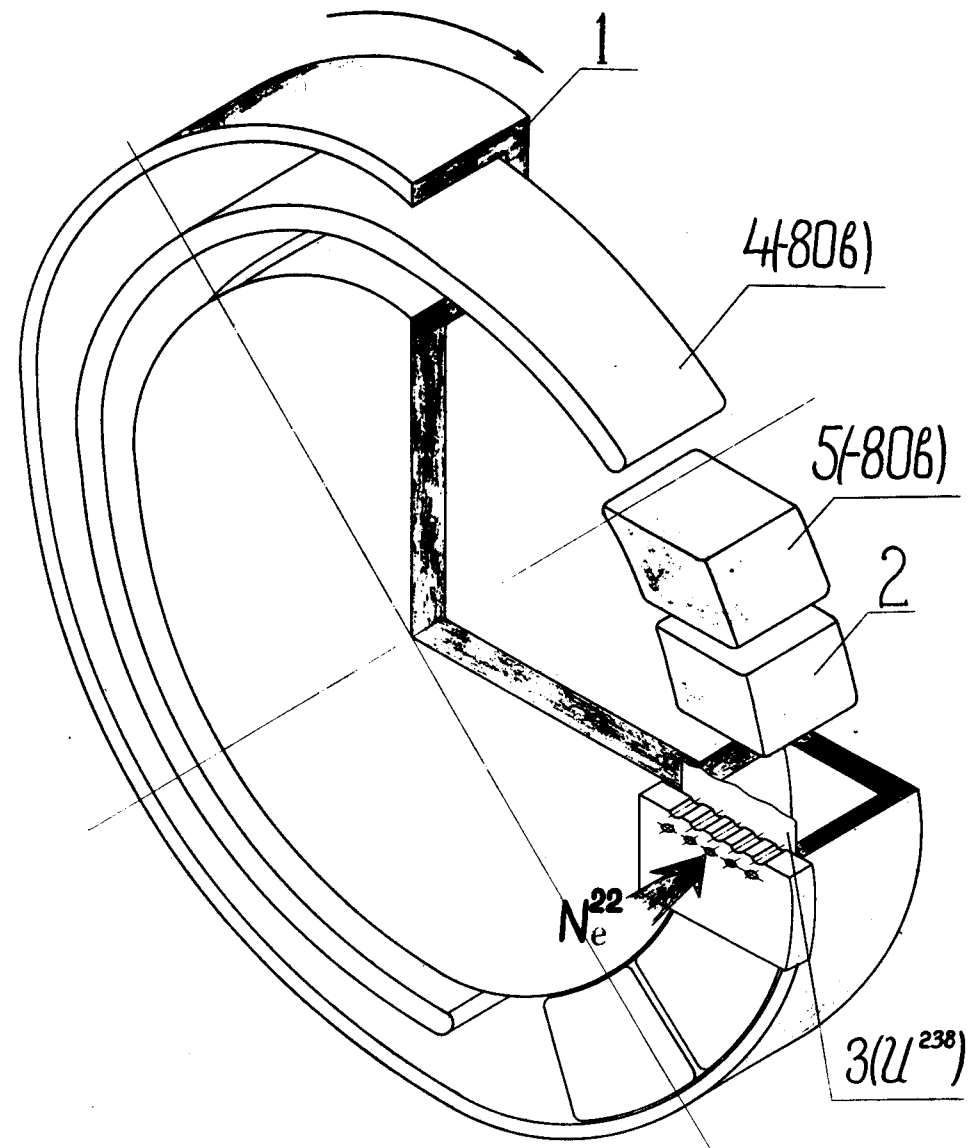


Рис. 4. Схема аппаратуры для детектирования 102 элемента по дочерним атомам фермия. 1 - медный вращающийся барабан, 2 - механическая пробка, 3 - мишень из  $U^{238}$ ; 4 - вторичный сборник, 5 - электрическая пробка.



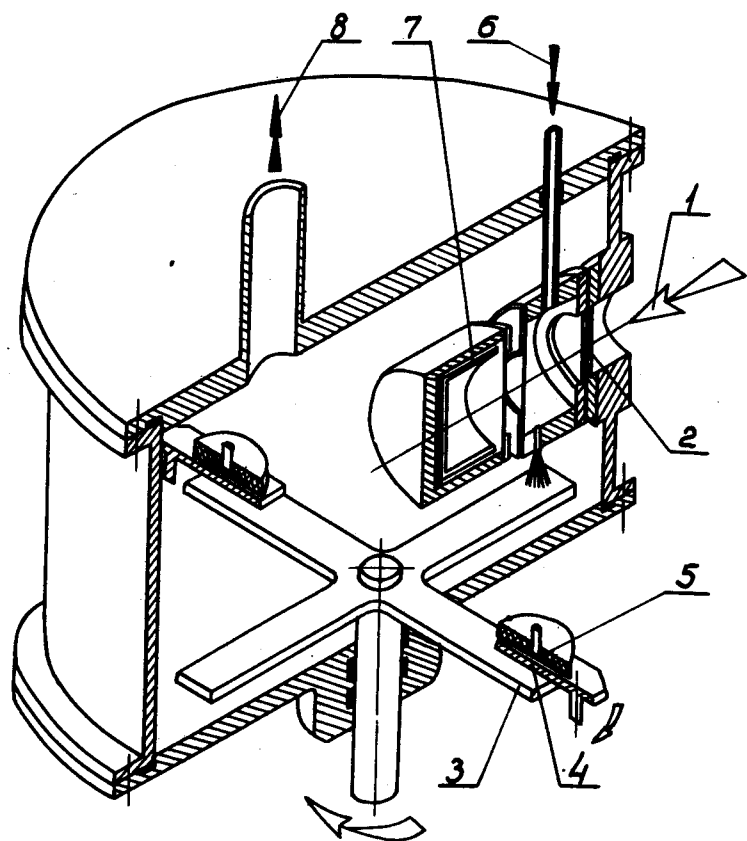


Рис. 5. Установка для синтеза трансураниевых элементов на внешнем пучке циклотрона. 1 - пучок, 2 - мишень, 3 - сборник, 4 - экран, 5 - детектор, 6 - газ гелий, 7 - цилиндр Фарадея, 8 - откачка камеры.

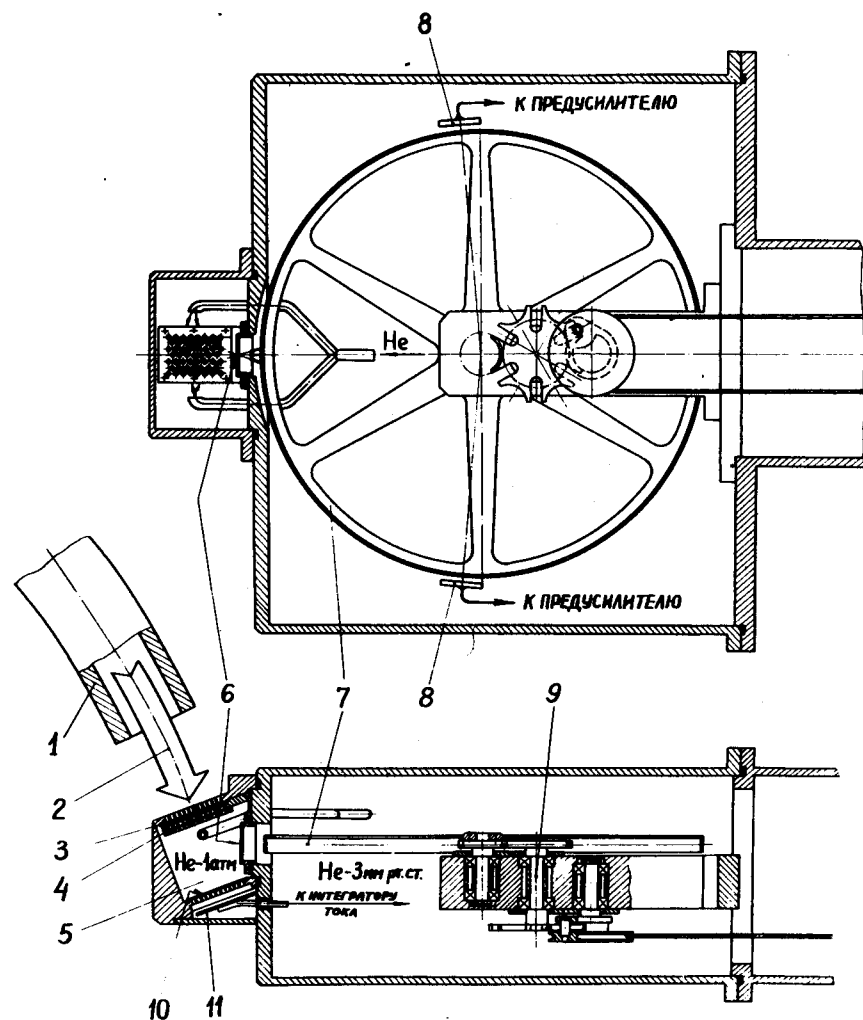


Рис. 6. Установка для синтеза трансураниевых элементов на внутреннем пучке циклотрона. 1 - дефлектор, 2 - пучок, 3 - входная фольга, 4 - мишень, 5 - внутренний объем камеры, 6 - выходное отверстие, 7 - сборник, 8 - детекторы, 9 - "мальтийский крест", 10 - выходная фольга, 11 - коллектор новов.

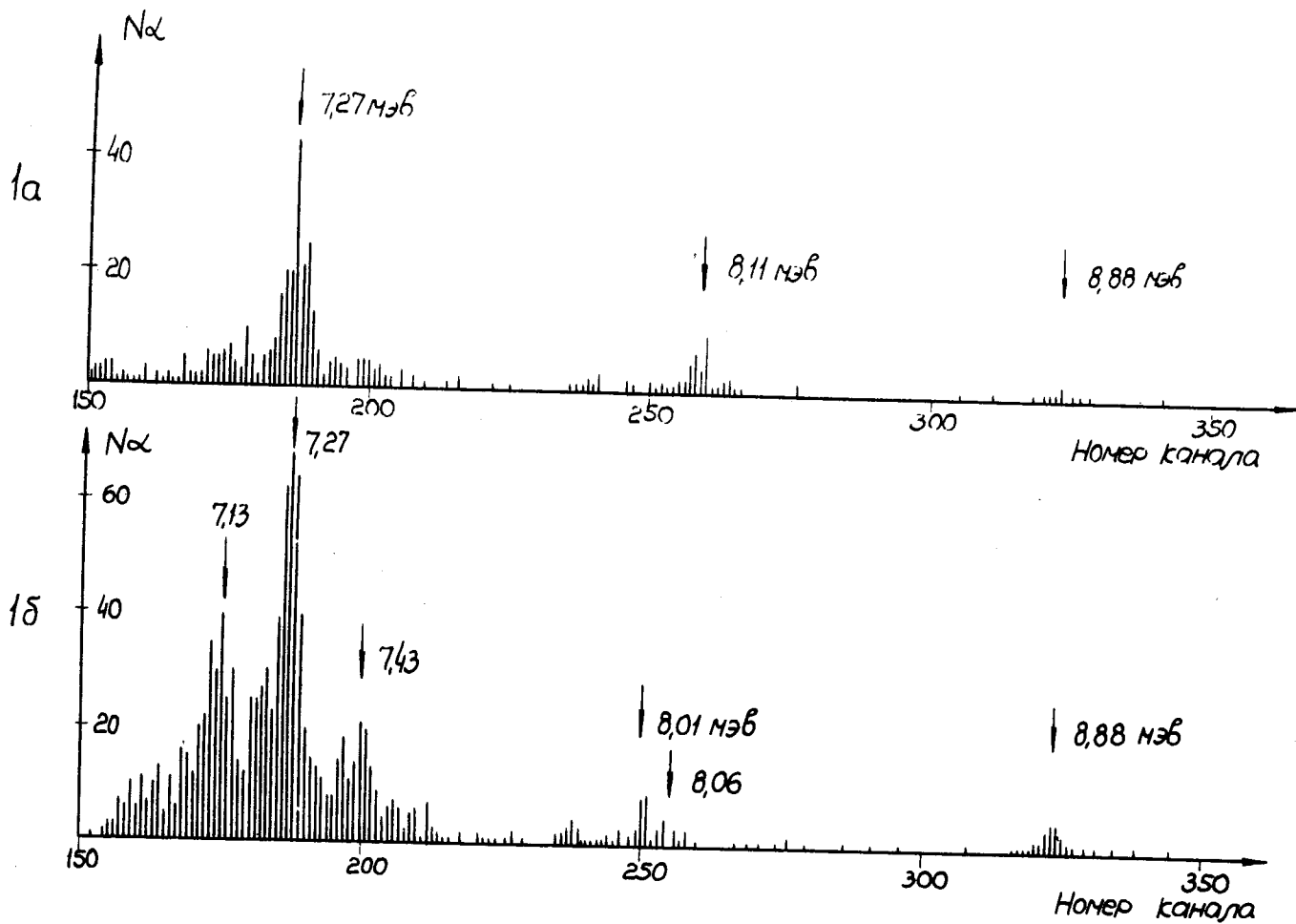


Рис. 7. Спектр альфа-частиц при облучении  $\text{Pu}^{242}$  ионами  $\text{O}^{16}$ .

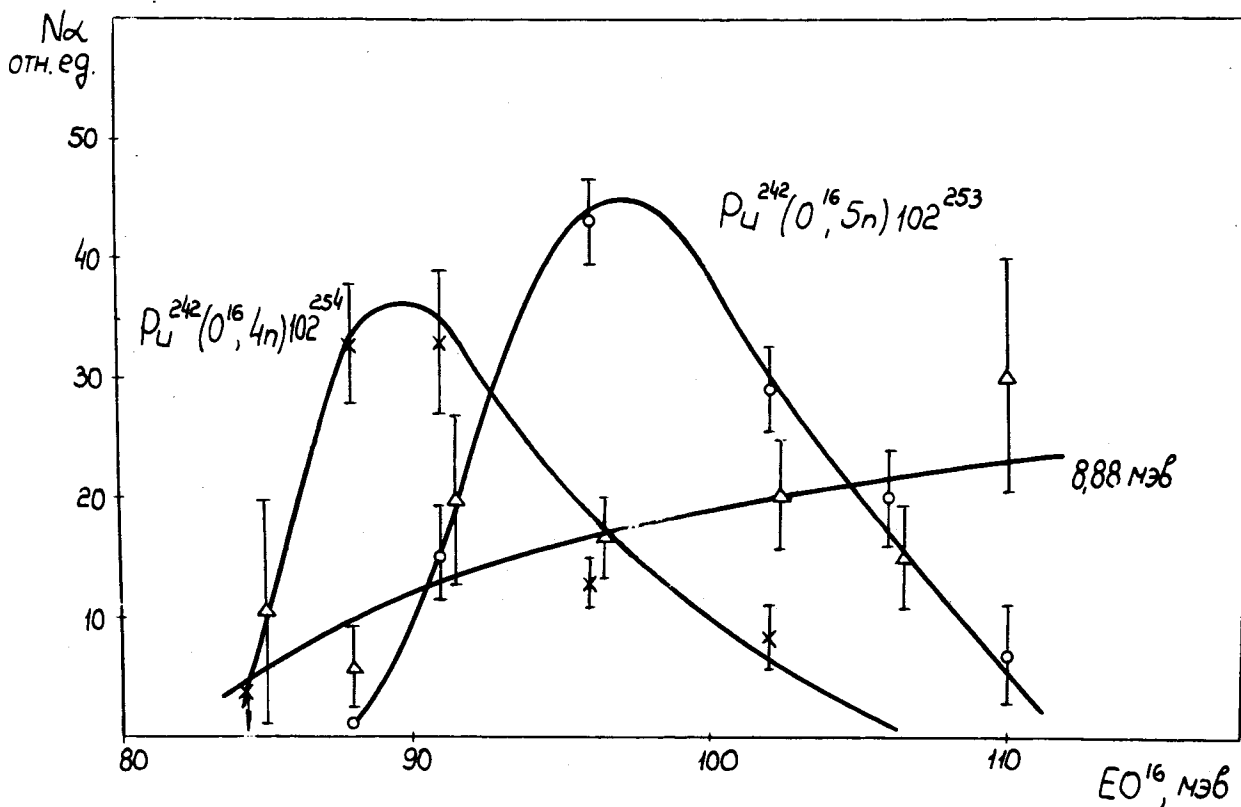


Рис. 8. Функции возбуждения для реакций  $\text{Pu}^{242}(\text{O}^{16}, 4n)\text{102}^{254}$  и  $\text{Pu}^{242}(\text{O}^{16}, 5n)\text{102}^{253}$ .

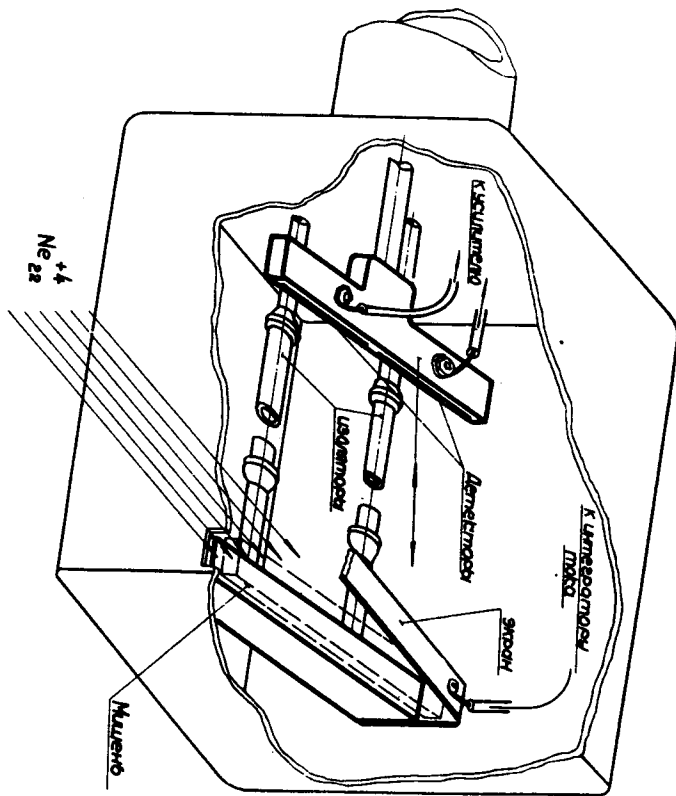


Рис. 9. Схематическое устройство пробника с наклонной мишенью.

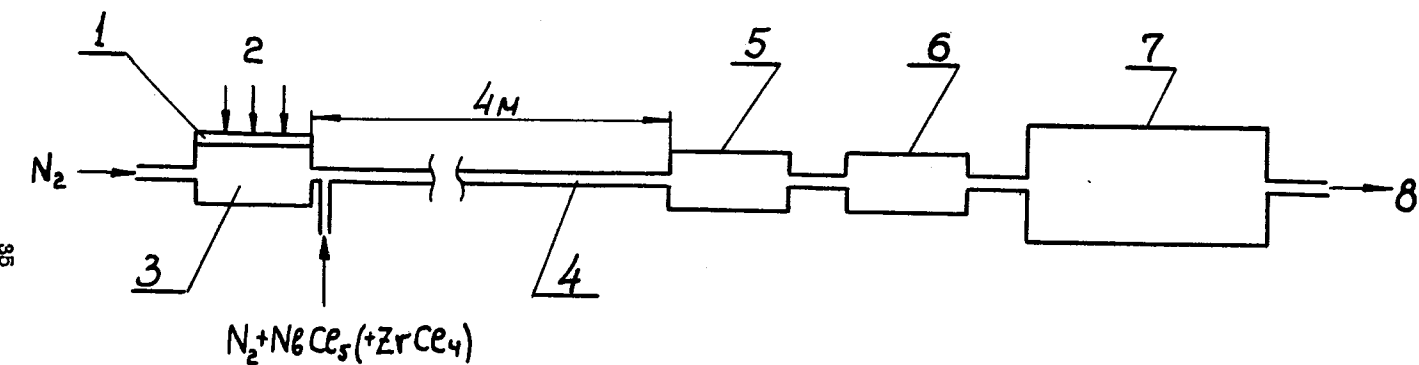


Рис. 10. Схема опыта по химическому исследованию 102-го элемента.  
 1 - мишень, 2 - пучок, 3 - камера мишени, 4 - трубка,  
 5 - инертный фильтр, 6 - химический фильтр, 7 - конденсирующая ловушка, 8 - откачка.