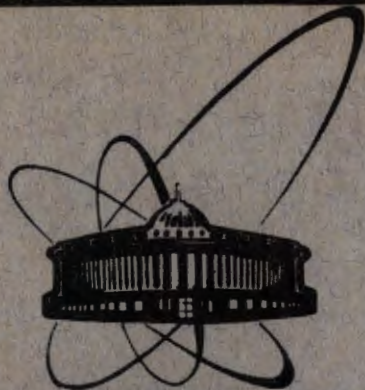


89-820



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

Ф 716

Д7-89-820

Г. Н. Флеров, И. Звара, Г. М. Тер-Акопьян,
В. А. Щеголев, В. Л. Михеев

ИСТОРИЯ ТРАНСФЕРМИЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1989

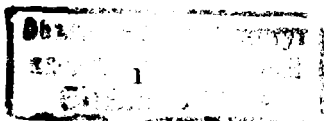
От авторов

С конца пятидесятих годов в Радиационной Лаборатории Лоуренса (Беркли, США), в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, СССР), а с семидесятых годов также в Обществе тяжелых ионов (Дармштадт, ФРГ) проводятся исследования по синтезу новых элементов в трансфермиевой области. Эти работы, в которых использовались ядерные реакции на пучках тяжелых ионов, привели к открытию элементов с атомными номерами 101-110. В течение трех десятилетий развивалась и совершенствовалась экспериментальная база, появлялись новые подходы и концепции, причем разные группы исследователей предпочитали неодинаковые подходы. В условиях разнообразия применявшихся методов и способов доказательства идентификации ядер появилось расхождение в вопросе о критериях открытия новых элементов.

В то же время каждая группа авторов настойчиво отстаивала свой приоритет в открытии и, соответственно, право присвоить название новому элементу согласно традиции. В результате в литературе и новых изданиях Периодической таблицы Менделеева новые элементы получили разные названия: 102 - нобелий и жолитий, 103 - лоуренсий и резерфордий, 104 - резерфордий и курчатовий, 105 - ганий и нильсборий. Разумеется, такое положение неприемлемо и нужно решать проблему на уровне международной научной общественности.

Названиями элементов традиционно занималась Комиссия по номенклатуре неорганической химии Международного союза чистой и прикладной химии (ИЮПАК). Из спорных вопросов ей ранее пришлось решить лишь несколько застарелых проблем с названиями элементов из довоенной истории химии, а в основном она занималась номенклатурой химических соединений. Появление заявок на открытие трансфермиевых элементов, синтезированных на ускорителях и идентифицированных и изученных современными методами ядерной физики и радиохимии, поставил эту комиссию в затруднительное положение. В ее состав не входили и не входят эксперты из названных областей науки, и поэтому комиссия не могла квалифицированно судить об обоснованности этих заявок, на первых порах она просто доверилась авторам.

Проблема синтеза новых элементов всегда вызывала повышенный интерес у широкой научной общественности и, естественно, она затрагивается во многих обзорах, опубликованных в научной и популярной литературе. Авторы ряда таких обзоров, не будучи непосредственно причастными к работам по синтезу новых элементов, тем не менее высказывались по поводу критериев открытия новых элементов и излагали свое отношение к тем или иным приоритетным работам, зачастую недостаточно объективное. Все это приводило к еще большей путанице и заблуждениям.



Считая создавшуюся ситуацию ненормальной, дубненская группа неоднократно настойчиво обращалась в ИЮПАК с предложениями о создании международной комиссии, которая могла бы решить спорные вопросы. Однако по ряду причин этого не было сделано.

В 1984-1985 г.г. с инициативой внести ясность в данную проблему выступил Международный союз чистой и прикладной физики (ИЮПАП). По предложению занимавшего тогда должность его президента А.Бромли решением исполкома ИЮПАП при согласовании с руководством ИЮПАК была создана Рабочая группа по трансфермиевым элементам под председательством Д.Вилкинсона (Великобритания). В состав группы вошли известные авторитетные ученые в области ядерной физики и химии из разных стран (кроме наиболее заинтересованных - США, СССР, ФРГ): И. Жанен (Франция) - от ИЮПАК (президент этого союза с 1989 г.), А.Валстра (Голландия) - секретарь, И.Улегла (Чехословакия) - секретарь, Р.Барбер (Канада), П.Гринвуд (Великобритания) - от ИЮПАК, М.Лефорт (Франция), М.Сакаи (Япония), А.Хринкевич (Польша).

В задачу Рабочей группы входит выработка критериев открытия новых элементов и их применение при определении приоритета открытия трансфермиевых элементов. Рабочая группа начала работать с февраля 1988 г. В частности, она знакомится с научными материалами на месте - в каждой из трех заинтересованных лабораторий (Дармштадт, Беркли, Дубна).

Мы и наши коллеги в Дубне с самого начала энергично поддерживали предложение о создании Рабочей группы от ИЮПАП и стремились способствовать ее успешной деятельности. Но, по нашему мнению, обсуждение не должно ограничиваться узким кругом. О нем должна информироваться широкая научная общественность. Поэтому нами подготовлен настоящий обзор по истории открытия новых элементов, в котором мы излагаем свое понимание проблемы и отношение к различным конкретным экспериментальным работам по синтезу новых элементов, в частности элементов 101, 102 и 103. Особое внимание уделено критериям открытия.

Обращая внимание читателя на эту проблему, мы надеемся, что он не только проявит к ней интерес, но и сделает критические замечания на основе своего профессионального и жизненного опыта. Мы могли бы их учесть перед тем, как в окончательном виде направить данный обзор в научный журнал. Особо мы заинтересованы в независимых мнениях о критериях открытия.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕМЕНТА 101 (МЕНДЕЛЕВИЙ, Md)	19
3. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТА 102	
3.1. Эксперименты по синтезу 102-го элемента, выполненные в 1957 году в Стокгольме	23
3.2. Эксперименты 1958-1961 годов, выполненные в Радиационной лаборатории в Беркли	28
3.3. Эксперименты 1957 - 1960 годов в Москве	31
3.4. Эксперименты 1962 - 1966 годов, проведенные в ОИЯИ, Дубна	
3.4.1. Синтез изотопа $^{256}_{102}$	32
3.4.2. Синтез изотопа $^{254}_{102}$	38
3.4.3. Синтез изотопов $^{255}_{102}$ и $^{256}_{102}$	42
3.4.4. Синтез изотопов $^{252}_{102}$, $^{253}_{102}$, $^{254}_{102}$	45
3.4.5. Изучение спонтанного деления четно-четных изотопов	48
3.4.6. Эксперименты по химии 102-го элемента	49
3.5. Сумма данных, полученных к октябрю 1966 года	50
3.6. Эксперименты группы Беркли, опубликованные в PHYSICAL REVIEW LETTERS в 1967 году	52
3.7. Обсуждение результатов работ Беркли и Дубны, претендующих на открытие 102-го элемента	53
3.8. Заключение	61
4. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТА 103	
4.1. Работы Радиационной лаборатории Лоуренса, Беркли, США, по "лоуренсию"	65
4.2. Анализ берклиевской работы по "лоуренсию"	68
4.3. Работы по синтезу элемента 103 в Дубне	73
5. НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ	79

1. ВВЕДЕНИЕ

Богатая, более чем тридцатилетняя история работ по искусственному синтезу трансфермиевых элементов ($Z > 100$) насыщена яркими событиями и неожиданными поворотами. Она могла бы представить собой большой увлекательный рассказ о перипетиях фундаментальных научных поисков, дающий материал для важных обобщений. Одно обстоятельство омрачает эту картину. Движение вперед сопровождалось возникновением довольно резких споров о приоритете открытия отдельных элементов между группами, работающими в этой области. Эти споры, которые задерживали прогресс исследований, получили широкую огласку, и в сознании научной и более широкой общественности, несомненно, в какой-то степени затмили исключительно значительные, согласованные, положительные итоги работы больших коллективов, затративших огромные интеллектуальные и материальные усилия. Кроме открытия десяти новых элементов, эти итоги состоят в данных о радиоактивных свойствах почти 50 нуклидов с атомными номерами 102-110, в изучении химических свойств ряда этих элементов, в открытии новых видов радиоактивности, закономерностей спонтанного деления ядер, механизмов ядерных реакций. Особенно ценная информация была получена об особенностях спонтанного деления и закономерностях изменения его характеристик.

Как будет показано ниже, получение трансфермиевых (или, точнее, трансменделевиевых) элементов в ядерных реакциях с "тяжелыми ионами" (ионы элементов тяжелее гелия) явилось совершенно новым и специфическим этапом в расширении границ таблицы Менделеева. Большие трудности этой работы в ряде случаев не позволили полностью избежать ошибок. Основой возникновения споров о приоритете, оказавшихся большей частью бесплодными, явилось отсутствие согласованных критериев, по которым можно было бы оценивать заявки на приоритет в открытии новых элементов. Сейчас ставится задача выработки таких критериев. Скажем сразу, что они должны быть весьма общими, поскольку методы и способы доказательств открытия уже известных трансфермиевых элементов потребовали новых, разнообразных подходов, и работа почти над каждым элементом приносила новые методические особенности и способы аргументации. Критерии должны учитывать весь прошлый опыт и в то же время подходить для конкретных ситуаций, которые можно предвидеть в будущем. Они не должны непосредственно зависеть от способа распада изучаемых ядер, от экспериментальных подходов и т.п. Это несомненно потребует участия широкой научной

общественности в обсуждении критериев на всех стадиях их выработки.

Доказательства открытия

Общий подход к критериям был намечен в выступлениях представителей Дубны (1971 - Приложение I [1]) и Дармштадта (1985 - Приложение II [23]). В его основе лежит очевидное требование надежного определения порядкового номера "подозреваемого" нуклида. Исторически, если рассматривать все известные элементы, наибольшую роль сыграло определение химической индивидуальности. В строгом смысле слова, химическая идентификация нового радиоактивного синтетического элемента состоит в отделении его от всех известных элементов за счет специфических свойств. Это требование принципиально выполнимо, если имеются достаточно долгоживущие изотопы элемента. В истории трансуранов вплоть до менделевия, чтобы убедиться в получении нового элемента, исследователи с успехом использовали комбинацию неполных (в отмеченном выше смысле) радиохимических данных с аргументами, основанными на ядерных свойствах и явлениях, а также следствия законов сохранения Z и A . Требование химической идентификации в строгом смысле было обычно выполнено лишь некоторое время спустя. Краткий обзор истории открытия элементов от $\text{Np}^{(93)}$ до $\text{Md}^{(101)}$, где специально прослеживается это сочетание химических и физических доказательств, приводится в приложении III [3].

Из физических методов однозначное доказательство атомного номера дает, в первую очередь, измерение характеристического рентгеновского излучения. Этот классический метод, как известно, сыграл определяющую роль в открытии ряда нерадиоактивных элементов. Однако необходимо отметить характерные особенности и условия его использования на современном этапе: синтетические трансфермиевые элементы доступны лишь в столь малом количестве атомов, что нельзя использовать внешний источник возбуждения. Поэтому реально детектировать лишь X -лучи, испускаемые атомами дочернего нуклида после какого-либо распада ($\alpha, \beta^+, \text{EC}$) материнских ядер, а в случае спонтанно делящихся нуклидов в принципе можно детектировать X -лучи каждого из двух осколков деления. Реально существует большое ограничение на использование этого метода, обусловленное трудностями получения "хорошей статистики", и до настоящего времени измерение характеристического рентгеновского излучения не сыграло существенной роли в открытии трансурановых элементов.

Весьма доказательным ядерно-физическим методом является установление генетической связи нового нуклида с каким-либо

известным изотопом через радиоактивный распад или целую цепочку распадов. Со времен Резерфорда, Содди и др. этот метод используется для идентификации α -активных нуклидов и на этапе исследований трансураниевых элементов сыграл значительную роль в их открытии.

Существует большой набор физических и других данных, которые можно рассматривать в качестве дополнительных (вспомогательных) аргументов в пользу правильности идентификации атомного номера. Рассмотрим кратко некоторые из них. Очень эффективным методом идентификации нуклидов, в принципе, являются перекрестные облучения. Значения этого метода в открытии элементов, синтезированных с помощью тяжелых ионов, в целом меньше, так как число осуществимых комбинаций мишень-бомбардирующая частица, приводящих к искомому нуклиду, редко больше двух. Эффективным методом, который, однако, пока не применялся, было бы прямое определение массового числа нуклида с помощью какого-либо масс-сепаратора. В сочетании с некоторыми добавочными данными масса была бы очень весомым аргументом в пользу определенного атомного номера.

Продукты реакций "полного слияния" тяжелого иона с ядрами мишени имеют весьма точно определенные кинематические характеристики вследствие закона сохранения импульса. От направления движения строго по пучку ядро отдачи лишь слегка отклоняется за счет рассеяния в материале мишени и за счет импульсов нейтронов, испаряющихся из составного ядра. Узкое угловое распределение дает возможность отделить продукты, получаемые в результате других каналов взаимодействия между пучком и мишенью.

К настоящему времени достаточно хорошо поняты закономерности функций возбуждения различных видов реакций с тяжелыми ионами, поэтому в ряде случаев экспериментальные данные о зависимости выхода нуклида от энергии бомбардирующих частиц служили вспомогательными аргументами в пользу открытия элемента. Имеются и другие величины, характеризующие ядерные реакции, значения которых эмпирически систематизированы и описаны теориями с "подгоночными" параметрами. Это эффективные сечения каналов взаимодействия различных типов, величина энергии и времени жизни различных типов радиоактивного распада в зависимости от атомного и массового номера.

Представляется, что могут быть определены и использованы ионизационные потенциалы атомов, а также некоторые химические свойства, которые не претерпевают больших скачков в районе изучаемых атомных номеров.

Мы пока не упоминали о важнейшем моменте в экспериментальных

исследованиях, который, к сожалению, может дискредитировать даже самые строгие аргументы. Дело в том, что в первых попытках синтеза новые элементы, как правило, получали на пределе возможностей экспериментальной аппаратуры, и их реальный выход исчислялся единичными атомами. Эта "бедная статистика" может серьезно ограничить доказательную силу любых аргументов.

После выработки критериев вполне возможна ситуация, когда работы двух коллективов в сумме будут соответствовать этим критериям, хотя ни одна из работ в отдельности не сможет быть признана открытием. Тогда следует обсудить понятие "совместного открытия".

На наш взгляд, следует внимательно отнестись к предложению, чтобы работа с обоснованной заявкой на открытие признавалась открытием только после того, как результаты будут подтверждены независимо, желательно в другой лаборатории.

Мы еще раз заостряем внимание на этих положениях потому, что наш анализ истории трансуранов показал несостоятельность попыток абсолютизировать какие-либо доказательства открытия, поставив другие "вне закона". Неоднократно случалось, что аргументы, казавшиеся в свое время абсолютно надежными и убедительными, оказались впоследствии недействительными, так как были вскрыты новые явления и закономерности, которыми так богата трансурановая область. Можно сослаться на несколько достаточно известных примеров (ссылки см. ниже). Так, при открытии nobelium ($Z=102$) методика химической идентификации базировалась на ожидании трехвалентного состояния элемента в водных растворах (вспомним актиноидную концепцию Сиборга). Однако оказалось, что элемент наиболее устойчив в двухвалентном состоянии, которое характеризуется другим химическим поведением. Далее, при открытии менделевия исключали возможность наблюдения нуклидов с атомными номерами меньше 100 на том основании, будто эти элементы не могут иметь столь короткие (речь шла о часах) времена жизни относительно спонтанного деления. В значении Z не ошиблись, но приведенный аргумент оказался полностью несостоятельным, так как позже в области элементов от U до Bk у десятков нуклидов были найдены спонтанно делящиеся изомеры даже с временами жизни 10^{-9} с. Наконец, систематика периодов полураспада четно-четных нуклидов относительно спонтанного деления в зависимости от числа нейтронов при фиксированном атомном номере в области до $Z=102$, которая характеризуется острыми максимумами при $Z=152$, в свое время использовалась как аргумент против факта открытия элемента

104-курчатовия в Дубне. Впоследствии оказалось, что эта систематика полностью изменяется при переходе от $Z=102$ к $Z=104$ (это сейчас в теории хорошо件нятно), и сомнения, основанные на экстраполяции от области $Z<102$, не оправдались.

Развитие подходов к синтезу

Как известно, первые трансурановые элементы были получены в результате реакций захвата нейтронов ядрами урана с последующим β -распадом образующихся нейтроноизбыточных нуклидов, а также в реакциях ($^4\text{He}, \text{xn}$) при облучении соответствующих тяжелых мишеней, полученных нейтронным методом, пучками ускоренных ионов ^4He . Эйнштейний ($Z=99$) и фермий (100) были впервые обнаружены в продуктах наземного термоядерного взрыва, где они образовались в результате мгновенного захвата быстрых нейтронов ядрами урана, которые затем претерпели длинную цепочку β -распадов. В шестидесятых годах в США были сделаны попытки получить на этом пути и трансфермиевые элементы. Для этого при подземных термоядерных взрывах в устройство закладывались мишени из реакторных трансурановых нуклидов массой в десятки граммов. Подход, однако, оказался безуспешным и составил лишь эпизод в истории трансфермиевых элементов. Столбовой же дорогой стало облучение мишеней из изотопов тяжелых элементов, доступных в необходимых весовых количествах ($>0,1$ мг), тяжелыми ионами. Все открытия новых элементов выше менделевия связаны с реакциями "полного слияния", сопровождающимися испарением из возбужденного составного ядра одних только нейтронов, т.е. реакции (HI, xn). Некоторые изотопы уже открытых элементов были затем получены с использованием и других типов взаимодействия тяжелых ионов, например, в реакциях ($\text{HI}, \alpha \text{xn}$), в реакциях передачи большого числа нуклонов и т.д.

Получение новых элементов в реакциях с тяжелыми ионами характеризуется несколькими основными экспериментальными трудностями. Низкие выходы и короткие времена жизни синтезируемых нуклидов осложняют снятие различного рода зависимостей с достаточной статистикой: малые времена жизни затрудняют удаление продуктов ядерных реакций от мишени на пучке ускорителя на достаточное расстояние, препятствуют полному использованию возможностей химических методов и т.п. Взаимодействие тяжелых ионов протекает по многим каналам. Снятие возбуждения составного ядра испарением нескольких нейтронов с сохранением суммарного заряда бомбардирующей частицы и ядра-мишени является одним из наименее вероятных каналов.

В огромном большинстве случаев возбужденное составное ядро претерпевает мгновенное деление. Наряду с этим, в 10^3 - 10^5 раз большие эффективные сечения, чем канал (HI, xn), имеют реакции передачи значительного числа нуклонов между сталкивающимися сложными ядрами. Они являются основным источником фоновых активностей, имитирующих излучение нового элемента и мешающих его обнаружению. При регистрации α -излучения фон дадут α -частицы больших энергий, испускаемые короткоживущими членами цепочек распада относительно долгоживущих родоначальников из области нейтронодефицитных изотопов Ra-Th. Последние образуются при срыве нескольких нуклонов из актиноидных мишеней. Присутствие свинца и околосвинцовых элементов в мишенях приводит к образованию изомерных, относительно долгоживущих состояний изотопов Po, которые имеют необычно высокие энергии α -распада (вплоть до 11,65 МэВ). При регистрации спонтанного деления источником фона является распад спонтанно делящихся изомеров ядер из области средних актиноидов, а также запаздывающее (после β^+ -распада) деление сильно нейтронодефицитных актиноидных нуклидов.

В последнее время интенсивность пучков тяжелых ионов на ускорителях удалось довести до уровня, который может вызывать разрушение мишеней, используемых в исследованиях по трансфермиевым элементам. Достаточно сказать, что в ряде случаев энерговыделение в мишенном слое за счет торможения пучка сейчас достигает значений 2000 кВт/кг, что можно сравнить с 20 кВт/кг топлива в современных энергетических ядерных реакторах. Если в прошлом основной технической проблемой было увеличение интенсивности пучка, то теперь ищут технические решения, которые позволили бы использовать существенно большие интенсивности пучка.

Этапы открытия элементов

Несколько условно историю открытия элементов за менделевием можно разделить на этапы, связанные с открытием конкретных элементов, имеющие характерные признаки. Мы говорим именно об этапах истории открытия, так как изучение ранее открытых элементов продолжается по сей день.

Элементы 102 и 103

Этот этап, так же как и следующий, связан с использованием в качестве мишеней урана и реакторных трансуранов Pu, Am, Cm, которые облучались соответствующими (дополнительными по Z) тяжелыми ионами. Реакции можно назвать "горячим синтезом", так как минимально возможная энергия возбуждения составного ядра довольно высока и для

его перехода в основное состояние необходимо испарение не меньше 3-4 нейтронов. Из-за конкурирующего процесса мгновенного деления вероятность образования новых элементов в таких реакциях сравнительно мала.

Первые открытые изотопы элементов 102 и 103 были альфа-активными. Ввиду принадлежности этих элементов к актиноидному ряду близких по свойствам элементов, химическую идентификацию удалось выполнить лишь после того, как чисто физическими методами были открыты и однозначно идентифицированы несколько достаточно долгоживущих изотопов.

В первых попытках этого этапа, проведенных в Стокгольме, Москве, Беркли и Дубне, были вскрыты особенности задачи и осознаны препятствия, возникающие на выбранном пути.

Элементы 104 и 105 (106)

У первых открытых изотопов вероятности альфа-распада и спонтанного деления близки по порядку величины. Открытие элементов являлось результатом комбинации химических и физических доказательств. Этап был очень плодотворным и в других отношениях. В химических экспериментах была экспериментально локализована верхняя граница актиноидного семейства в Периодической системе и окончательно подтверждено его существование. Обнаруженные в физических опытах "фоновые" источники спонтанного деления ядер из актиноидной области сами оказались явлением масштаба открытий. Мы имеем в виду спонтанно делящиеся изомеры формы и ядра, испытывающие запаздывающее деление. Открыта новая закономерность в "систематике" периодов спонтанного деления.

Опыты этого этапа проводились в Дубне и частично в Беркли.

Элементы (106)107 - 109

Наиболее характерной чертой этапа является использование для синтеза элементов "холодного полного слияния" ядер - метода, впервые реализованного в Дубне и впоследствии затем широко применявшегося в Дармштадте. Если взять мишень из района дважды магического ядра ^{208}Pb и соответствующие тяжелые ионы, которые близки к дважды магическому ^{48}Ca , в результате большой затраты энергии на слияние взаимодействующих ядер минимальная энергия возбуждения составного ядра может быть столь низкой (<20 МэВ), что оно испускает всего 1 или 2 нейтрона или даже происходит радиационный захват тяжелого иона. "Выживаемость" составных ядер поэтому больше, однако появляются препятствия для их образования. Получение пучков ядер

элементов с $Z > 20$ потребовало существенного усовершенствования ускорительной техники.

Синтезированные нуклиды имеют периоды полураспада в основном в районе миллисекунд и у них, как правило, преобладает альфа-распад.

Элементы 110

Реакции "холодного слияния" имеют некоторое преимущество по эффективным сечениям перед реакциями горячего синтеза в области элементов 106-109, однако это, по-видимому, переходящая ситуация. Элементы выше 109-го путем холодного слияния получить не удалось и продвижение вперед ищут в возвращении к горячему синтезу. В частности, в Дубне проведены опыты по синтезу элемента 110 при облучении урана и тория соответственно ионами аргона и кальция. Выходы чрезвычайно низки и эксперименты ведут с помощью всего арсенала методических и технических средств, который был накоплен на предыдущих этапах.

После этого краткого введения в историю трансфермиевых элементов мы перейдем к отдельным элементам и приведем соответствующие сведения о постановке опытов, их результатах и интерпретации. Историческую часть мы считали полезным дополнить сведениями о свойствах каждого элемента, имеющимися на сегодняшний день. Это, очевидно, представит интерес для более широкого круга читателей.

Литература

1. G.N.Flerov, I.Zvara. JINR Comunn. D7-6013, Dubna, 1971.
2. P.Armbruster. In: Ann.Rev.Nucl. Part. Sci. 35, 135(1985).
3. I.Zvara. Pure Appl. Chem. 53, 979(1981).

Приложение 1

Г. Н. Флеров, И. Звара
ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВТОРОЙ СОТНИ
Сообщение ОИЯИ Д7-6013, Дубна, 1971

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 радиактивные свойства изотопов и применяются ядерно-физические 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 радиактивных 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 ядерно-физической 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 измерены 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 ИЮПАК. Характер проблемы требует привлечения специалистов по различным отраслям 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 создавали бы основу для дальнейшей работы специализированных номенклатурных органов.

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

П. Армбрустер

О ПОЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕМ ХОЛОДНОГО СЛИЯНИЯ:
ЭЛЕМЕНТЫ 106 - 109

Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1985, v. 35, p. 135-194

Наименование элементов

Не скрывая определенной нашей собственной заинтересованности, мы хотим внести вклад в разрешение существующих разногласий относительно названий элементов. Мы предлагаем следующее правило: синтезом элемента становится получение определенного изотопа, и название должно приниматься только в том случае, если претендующий на открытие эксперимент может быть воспроизведен. Изотоп определяется массовым и атомным номерами, его признаки - виды распада и период полураспада. Обсуждаемые изотопы распадаются путем электронного захвата и спонтанного деления, что иногда бывает трудно отнести к какому-либо определенному изотопу, или же путем альфа-распада, что, благодаря точности измерений энергии распада в десятые доли процента, дает очень надежный способ отождествления. Временная корреляция последовательных распадов является дополнительным методом для окончательной идентификации изотопов. Предложенное правило должно применяться и в ретроспективе, для всех элементов, открытых путем идентификации изотопов, т.е. элементов 102-109. Настоятельно требуется объединенная комиссия из физиков и радиохимиков, чтобы разрешить долговременные споры.

И. Звара

ПРОБЛЕМА ХИМИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Pure Appl. Chem., 1981, v. 53, p. 979

ВВЕДЕНИЕ

Возможности открытия новых химических элементов определяются прогрессом ядерной физики и техники. Все известные элементы с атомными номерами выше 100 синтезированы в ядерных реакциях с альфа-частицами и тяжелыми ионами ($Z > 2$) при бомбардировке урана, реакторных трансурановых изотопов, а также свинца и висмута. С получением все более интенсивных пучков тяжелых ионов связаны в основном и перспективы открытия новых элементов, в том числе "сверхтяжелых" (СТЭ), в будущем, если долгоживущие изотопы последних не будут найдены в природе (см. работы [1-5] обзорного характера). Новейшие синтетические элементы доступны, фактически, лишь как единичные атомы и имеют малые времена жизни. Это крайне затрудняет выполнение химической идентификации как составной части открытия и дальнейшее изучение химических свойств этих элементов - две задачи, которые, разумеется, взаимно тесно связаны. Понятие элемента, бесспорно, наиболее богато своим химическим содержанием, поэтому все же находятся энтузиасты, готовые преодолеть возникающие в этих работах принципиальные и технические трудности.

В строгом смысле слова химическая идентификация должна состоять в отделении нового элемента от всех известных с использованием характерных только для него особенностей химического поведения. На самом деле, открыватели синтетических трансурановых элементов всегда с успехом использовали ядерно-физические данные и аргументы, что давало возможность сократить объем необходимых химических доказательств открытия (см. обзоры [6-8]). Прежде всего это были радиоактивные свойства, как то: энергия и период альфа-распада и их взаимосвязь и периоды полураспада для спонтанного деления. Эти величины являются весьма специфичными характеристиками, и лишь сравнительно немногие тяжелые элементы могут, в принципе, иметь изотопы, похожие по радиоактивным свойствам на искомый новый трансураниевый элемент. Далее, несмотря на то, что при синтезе взаимодействие между бомбардирующими тяжелыми ионами и ядрами мишени протекает по многочисленным каналам, все же возможность образования многих нуклидов исключается в силу законов сохранения, или же закономерности процессов приводят к ничтожным эффективным сечениям.

Сильным аргументом в пользу правильности идентификации атомного и массового номеров часто служили генетические связи нового ядра с ранее известными нуклидами, но их не всегда удается однозначно проследить. Классический метод перекрестных облучений имеет меньшее значение для новейших элементов, так как набор доступных мишеней и бомбардирующих частиц в необходимых комбинациях очень ограничен. Перечисленные ядерно-физические аспекты работ по синтезу трансураниевых элементов рассматриваются в других докладах на настоящей конференции.

В истории трансуранов удельный вес ядерно-физических и химических доказательств открытия от случая к случаю менялся. Приведем несколько примеров.

Решающим доказательством открытия нептуния-239 [9] послужило установление генетической связи с известным уже тогда изотопом ^{239}U , на которую указывало постоянное отношение выходов этих двух активностей в различных условиях облучения урана нейтронами. Затем был найден способ химического разделения нептуния и урана и с его помощью доказано, что нептуний накапливается со скоростью, соответствующей скорости распада ^{239}U . Химические данные сводились к установлению близости химических свойств урана и нептуния при возможности отделения нептуния от урана и тория.

Похожая ситуация имела место в случае плутония [10, 11]. Было замечено, что изотоп нептуния, полученный облучением ^{238}U дейтонами, массовое число которого тогда не было установлено, в результате β^- -распада дает альфа-активность, которая, следовательно, должна принадлежать элементу 94 (это был ^{238}Pu). Химические данные сводились к доказательству отделимости этой альфа-активности от урана, нептуния и тория.

Америций [12, 13] был впервые получен из плутония-239, облученного в реакторе, где образовался в результате захвата двух нейтронов и бета-распада ^{241}Pu . Способ синтеза давал очень определенные указания на атомный номер, и исследователи были полностью убеждены в получении нового элемента после того, как отделили его от плутония.

Курий [14], берклий [15], калифорний [16] и менделевий [17] были впервые синтезированы путем облучения ускоренными альфа-частицами соответствующих элементов-мишеней с порядковыми номерами на две единицы меньше в реакциях типа $^{253}\text{Es}(\alpha, n)^{256}\text{Md}$. Элементы вымывались из катионитной хроматографической колонки в соответствии с поведением редкоземельных элементов-аналогов. Одно это не было бы достаточно убедительным доказательством, если бы не была

практически исключена возможность протекания других ядерных реакций, кроме (α, n) . Вспомогательным аргументом явилось также достаточно надежное предсказание ядерных свойств, а в случае менделевия - установление генетической связи $^{256}\text{Md} \xrightarrow{\text{EC}} ^{256}\text{Fm}$ (по кривой накопления - распада).

Первой работой по Эйнштейнию и Фермию считается сообщение, опубликованное в 1955 году [18], в котором описывается выделение из продуктов термоядерного взрыва (1953 г.). При хроматографическом разделении трехвалентных трансураниевых элементов были в положении двух ожидаемых транскалифорниевых элементов обнаружены новые альфа-активности, однако, кажется, что полную уверенность авторы открытия получили только после независимого синтеза этих элементов с помощью тяжелых ионов [19], а затем и в ядерном реакторе [20], т. е. путем ядерных превращений более изученного типа.

Таким образом, с самого начала работ по получению трансураниевых элементов сложилась вполне определенная традиция. Так как ядерные данные позволяли указать сравнительно узкие пределы для возможного значения порядкового номера, то химические опыты сводились к отделению новой активности от элемента-мишени и от небольшого числа соседних или других "подозреваемых" элементов. Более полные химические исследования, в которых действительно показывалось одними только химическими методами, что элемент не идентичен ни одному из известных, проводились всегда позже.

Нетрудно проследить еще одну интересную закономерность. Несмотря на то, что химическая идентификация выполнялась не в строгом смысле этого термина, задача оказывалась настолько трудной, что для ее решения зачастую приходилось привлекать новые, не ставшие еще привычными для химиков или "классическими", химические методики. Так было, в сущности, при открытии нептуния и плутония и, прежде всего, в случае америция и курия [12-14], когда использовалось ионообменное хроматографическое разделение на катионитной смоле с комплексобразующим элементом, т. е. метод, который лишь незадолго до этого был впервые применен для лантаноидных элементов [21].

Литература к приложению III

1. Флеров Г.Н., УФН, 1968, т. 95, с. 25.
2. Seaborg G.T., Ann. Rev. Nucl. Sci., 1968, v. 18, p. 53.
3. Flerov G.N., in Proc. Int. Conf. on Nuclear Structure, Tokio, 1977, J. Phys. Soc. Jap. Suppl., 1978, v. 44, p. 723.
4. Flerov G.N., in Proc. Intern. Symp. on Studies of Nuclei far from Stability, Nashville, 1979, p. 339, North Holland, Amsterdam, 1980.
5. Herrmann G., Nature, 1979, v. 280, p. 543.
6. Флеров Г.Н., Звара И., в кн. "Столетие Периодического закона химических элементов", М.:Наука, 1969, с. 115
7. Флеров Г.Н., Звара И., препринт ОИЯИ Д7-6013, Дубна, 1971.
8. Seaborg G.T., Actinides Review, 1967, v. 1, p. 3.
9. McMillan E., Abelson P.H., Phys. Rev., 1940, v. 57, p. 1185.
10. Seaborg G.T., McMillan E.M., Kennedy J.W., Wahl A.C., Phys. Rev., 1946, v. 69, p. 366.
11. Seaborg G.T., Wahl A.C., Kennedy J.W., Phys. Rev., 1946, v. 69, p. 367.
12. Seaborg G.T., The Transuranium Elements, Yale University Press, New Haven, 1958, p. 81.
13. Ghiorso A., James R.A., Morgan L.O., Seaborg G.T., Phys. Rev., 1950, v. 78, p. 472.
14. Seaborg G.T., James R.A., Ghiorso A., The Transuranic Elements, Nat. Nucl. En. Ser. Div. IV, 14B, Paper 22.2, New York, McGraw Hill, 1949.
15. Thompson S.G., Ghiorso A., Seaborg G.T., Phys. Rev., 1950, v. 77, p. 838.
16. Thompson S.G., Street K., Ghiorso A., Seaborg G.T., Phys. Rev., 1950, v. 78, p. 298.
17. Ghiorso A., Harvey B.G., Choppin G.R., Thompson S.G., Seaborg G.T., Phys. Rev., 1955, v. 98, p. 1518.
18. Ghiorso A. et al., Phys. Rev., 1955, v. 99, p. 1048.
19. Ghiorso A. et al., Phys. Rev., 1954, v. 93, p. 257.
20. Thompson S.G. et al., Phys. Rev., 1954, v. 93, p. 908.
21. Tompkins E.R., Khym J.X., Cohn W.E., J. Am. Chem. Soc., 1947, v. 69, p. 2769.

2. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕМЕНТА 101 (МЕНДЕЛЕВИЙ, Md)

Эксперименты, в которых был открыт элемент 101, имели некоторые новые важные методические особенности по сравнению с работами по элементам до фермия ($Z=100$). Прежде всего, было зарегистрировано очень малое число ядер и, соответственно, химическая идентификация была выполнена буквально с отдельными атомами. Другое отличие - впервые новый элемент был открыт с помощью детектирования актов спонтанного деления. Эти особенности характерны и для синтеза и открытия последующих элементов. Поэтому мы считаем полезным рассмотреть и открытие элемента 101 с единой точки зрения, несмотря на то, что по поводу приоритета открытия в данном случае споры не возникали.

В 1955 году была опубликована работа Гиорсо и др. [1], которые предприняли попытку синтезировать элемент 101 бомбардировкой мишени из ^{253}Es (приблизительно 10^9 атомов) ускоренными ионами ^4He . Собирались атомы отдачи, вылетающие из мишенного слоя, и из них химически выделяли фракции отдельных актиноидных элементов ионообменной хроматографией. В каплях элюата, куда должны были попасть трансфермиевые актиноиды, а также во фракции фермия были зарегистрированы акты спонтанного деления. Периоды полураспада спонтанно-делящихся активностей, найденные в трансфермиевой фракции (по 6 зарегистрированным событиям деления) и в фермиевой фракции (по 40 событиям), "были приблизительно одинаковы, где-то 3-4 часа" и близки к периоду ^{256}Fm , который был открыт в параллельно проводимых исследованиях [2]. Авторы [1], по их собственным словам, "испытали искушение сделать вывод", что в реакции $^{253}\text{Es}(\alpha, n)$ образуется $^{256}_{101}$, который распадается электронным захватом с периодом полураспада "порядка получаса" в спонтанно-делящийся ^{256}Fm . Обоснование оценке времени жизни $^{256}_{101}$ в статье [1] не дается. Можно лишь догадываться на основании рис.2 из [1], что оценка исходила из факта наблюдения с-д. активности (предположительно) ^{256}Fm во фракции элемента 101, в то время как на кривой распада этой активности, которую начинали измерять через 50 мин после окончания облучения мишени, не был замечен участок накопления. "Кривая" построена, однако, только по 6 отсчетам, хотя в тексте говорится о получении 17 атомов элемента 101.

Авторы сознавали, что полученных ими данных, однако, недостаточно, чтобы доказать генетическую связь $^{256}_{101}\text{Es} \rightarrow ^{256}\text{Fm}$ и таким образом определить массовое число. Поэтому они специально отметили следующие аргументы, доказывающие, по их мнению, идентификацию порядкового номера элемента.

1. Лишь самые тяжелые элементы распадаются путем спонтанного деления со столь короткими периодами полураспада.

2. Вымывание из колонки непосредственно впереди элемента 100 показывает на $Z > 100$.

3. Метод синтеза не позволяет получать элементы с $Z > 101$.

В [1] предложено назвать элемент 101 менделевием.

В 1958 году была опубликована работа Филлипса и др. [3], посвященная изучению изотопа элемента 101 с массовым числом 256. Использовались те же бомбардирующая частица и мишень, но число атомов ^{253}Es было $2 \cdot 10^{12}$, т.е. в 2000 раз больше, чем в [1]. Вскользь упоминается, что период полураспада $^{256}_{101}$ из [1] ("порядка 0,5 часа") был исправлен на 1,5 ч, по-видимому, в результате измерения кривой накопления-распада ^{256}Fm в химически выделенной фракции 101-го с много лучшей статистикой (в явном виде об этом не говорят), и приводится эффективное сечение реакции синтеза, оценки которого в работе [1] отсутствуют. Данные [3] о радиоактивных свойствах $^{256}_{101}$ и реакции синтеза, а также о химических свойствах впоследствии неоднократно подтверждались другими исследованиями. В частности, в 1962 году в Дубне изучался $^{256}_{101}$, полученный совсем другим путем - в реакции $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, p3n)$ [4]. Период полураспада, указанный в [3], был воспроизведен, подтвердилось и химическое поведение в конкретных условиях.

Необходимо отдать должное искусству, которое проявили авторы [1], чтобы преодолеть многие экспериментальные, технические и, по-видимому, психологические трудности в этой пионерской работе. Достаточно упомянуть невесомую мишень (миллионные доли микрограмма) и большие токи на мишени - до $6 \cdot 10^{13}/\text{с}$. Впервые работа проводилась с единичными атомами. В то же время мы должны отметить, что приведенные в [1] аргументы в пользу идентификации Z , весьма убедительные в свете имевшихся в конце пятидесятих годов знаний, не представляются сильными с точки зрения сегодняшнего дня. Так, например, короткие времена жизни относительно спонтанного деления имеют на самом деле не только элементы с $Z > 100$: сейчас известно более 30 спонтанно делящихся изомеров у изотопов U - Вк, распадающихся за малые доли секунды и, кроме того, обнаружено несколько довольно короткоживущих изотопов олоурановых элементов, которые испытывают запаздывающее деление. Далее, химическая идентификация элемента 101 опиралась на актиноидную концепцию, проверенную вплоть до фермия. Сейчас известно, что элемент 101 может

1955
Ghiorso [1]
 $^{253}\text{Es}(\alpha, n)$
 $\sigma = ?$

(256)₁₀₁ CHEM
(EC) \approx 0.5 h
(²⁵⁶Fm) CHEM

1958
Phillips [3]
 $^{253}\text{Es}(\alpha, n)$
 $\sigma \approx 100 \mu\text{b}$

synthesis
properties
O. K. ?

$^{256}_{101}$ CHEM
(EC) \approx 1.5 h

chemical
radioactive
properties
O. K.

1962
Berganov [4]
 $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, p3n)$
 $\sigma \approx 0.002 \mu\text{b}$

$^{256}_{101}$ CHEM
(EC) \sim 1.5 h
 ^{256}Fm CHEM

быть восстановлен в водных растворах до двухвалентного, а элемент 102 вообще наиболее устойчив в состоянии $2+$. Возможность этого в 1955 году не обсуждали, поскольку двухвалентность 101-го элемента не была и не могла быть предсказана в рамках актиноидной концепции. В условиях химических опытов в работах [1,3] менделевий все же действительно существует в трехвалентном состоянии и химически аргумент в пользу $Z=101$ все же апостериори оправдан. Третий аргумент оригинальной статьи [1] конечно же абсолютен, так как основывается на законе сохранения заряда. Однако он дает для Z только верхнюю границу возможного значения, не более того.

Тем не менее, по нашему мнению, работа [1], безусловно, все же может рассматриваться как открытие элемента 101, благодаря тому, что полученные в ней качественные и полуквантитативные данные были в ряде последующих независимых исследований уточнены, но не подвергались принципиальной ревизии.

В строгом смысле достаточные доказательства открытия были, по-видимому, получены только в работе [3].

Литература

1. A.Ghiorso, B.G.Harvey, G.R.Choppin, S.G.Thompson, G.T.Seaborg. Phys. Rev. **98**, 1518 (1955).
2. G.R.Choppin, B.G.Harvey, S.G.Thompson, A.Ghiorso, Phys. Rev. **98**, 1519 (1955).
3. L.Phillips, R.Gatti, A.Chesne, L.Muga, S.Thompson, Phys. Rev. Lett. **1**, 215 (1985).
4. Г.Баранова, И.Брандштетт, В.Друин, В.Ермаков, Т.Зварова, М.Крживанек, Я.Малы, С.Поликанов, Су Хун-Гуй. Препринт ОИЯИ Р866, Дубна, 1962, Nukleonika **7**, 465 (1962).

3. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТА 102

3.1. Эксперименты по синтезу 102-го элемента, выполненные в 1957 году в Стокгольме [C1, C2]*

Это были первые эксперименты по синтезу нового химического элемента с помощью пучка тяжелых ионов. Они проводились группой авторов из Швеции, Великобритании и США на внутреннем пучке 225 см циклотрона Нобелевского института в Стокгольме. Пучок $^{13}\text{C}^{4+}$ был получен на конечных орбитах циклотрона в результате механизма ускорения (перезарядка $^{13}\text{C}^{2+} \rightarrow ^{13}\text{C}^{4+}$ на промежуточных орбитах), который давал очень широкий энергетический спектр пучка ионов.

Мишень из курья (94,1% ^{244}Cm , 1,4% ^{245}Cm , 4,4% ^{246}Cm , 0,1% ^{247}Cm), нанесенного в виде слоя химического соединения толщиной около $1\text{мг}/\text{см}^2$ на $2,7\text{мг}/\text{см}^2$ алюминиевую фольгу, помещалась в специально устроенный герметичный пробник, который устанавливался на одной из циклотронных орбит. Энергию бомбардирующих ионов на мишенном слое варьировали, изменяя радиус орбиты пучка. Из данных, приведенных в статьях [C1, C2], трудно составить представление об энергии ионов и об их интегральном потоке на мишени. Фактически это признавали и сами авторы работы (см. [C2]). Было проведено около 62 облучений мишени длительностью по 0,5 часа. Чаще всего энергия "большинства ионов, попадавших на мишень" была порядка 90 МэВ [C1]. "...Энергетическое распределение имело пик в диапазоне 80-100 МэВ, но содержало также заметные по вкладу компоненты ниже 80 МэВ. Условия работы циклотрона могли, однако, влиять на спектр энергии на данном радиусе, и возможно, что в части облучений в энергетическом спектре была представлена с относительно высокой интенсивностью группа ионов с энергией ниже 80 МэВ" [C2]. "В серии экспериментов энергия ионов варьировалась в диапазоне 65-100 МэВ" [C1]. Ток ионов, попадающих на мишень с энергией выше 70 МэВ, составлял 0,03-0,1 мкА.

Ядра отдачи, образующиеся при облучении мишени, выбивались из курьевого слоя, проходили защитный слой алюминия ($50-100\text{мкг}/\text{см}^2$) и останавливались в пластиковом сборнике толщиной $1\text{мг}/\text{см}^2$. После окончания облучений сборники сжигались на платиновой пластине, которая могла быть использована непосредственно как тонкий источник для α -спектрометрических измерений. В таком случае измерения

* Буквы В, М, Д и С перед ссылкой обозначают место, где была выполнена работа, т.е. Беркли, Москва, Дубна и Стокгольм соответственно.

начинались через 3 минуты после окончания облучения. Для химической идентификации полученных α -активностей они смывались с платиновой пластины и подвергались разделению на ионообменной колонке.

В 12 случаях из проведенных 62 облучений были зарегистрированы α -частицы с энергией $8,5 \pm 0,1$ МэВ. Комбинированная кривая распада этой активности дала период полураспада, равный приблизительно 10 мин.

Из шести примененных кюриевых мишеней только на трех был получен продукт реакции, испускавший $8,5$ МэВ α -частицы. И на этих трех мишенях по истечении примерно двух недель после начала облучений пучком углерода более не удавалось получить α -активность с энергией $8,5$ МэВ. Столь низкую воспроизводимость результата авторы [С1] объясняли большим количеством балластной примеси в некоторых мишенях (их действительные толщины могли быть больше ядер отдачи) и радиационными повреждениями мишеней в процессе облучений, а также из-за воздействия собственной α -активности.

По мнению авторов [С1], основанием для идентификации обнаруженной α -активности с энергией $8,5$ МэВ явились результаты химических опытов. В одном типе опытов (их число не указано в статье) проводилось поэлементное разделение группы актиноидов - вымыванием с катионообменной колонки раствором α -гидрооксизобутирата. Активность $E_{\alpha} = 8,5$ МэВ появилась в ожидавшейся для 102-го элемента позиции - перед фермием. Проводился также смыв с горячей катионообменной колонки 6N соляной кислотой, тогда $8,5$ МэВ α -активность вымылась вместе с калифорнием и фермием.

На основании данных этих химических экспериментов авторы [С1] заключили, что полученная ими $8,5$ МэВ α -активность принадлежит одному из изотопов 102-го элемента. Имевшиеся в то время представления о систематике свойств α -радиоактивных тяжелых ядер давали короткие времена жизни (около 10 с) для четно-четных изотопов этого элемента. Поэтому авторы [С1] предположили, что наиболее вероятными излучателями $8,5$ МэВ α -частиц являются нечетные изотопы $^{253}_{102}$ или $^{251}_{102}$, которые могли быть синтезированы в реакциях $^{244}_{82}\text{Cm}(^{13}_{6}\text{C}, 4n)^{253}_{102}$ и $^{244}_{82}\text{Cm}(^{13}_{6}\text{C}, 6n)^{251}_{102}$.

Однако в 1958 году на Женевской конференции Флеровым были представлены результаты московской группы (см. [МЗ, М4]), которые показали, что α -активность $E_{\alpha} = 8,5$ МэВ, $T_{1/2} = 10$ минут, не могла быть приписана изотопу $^{253}_{102}$. В Москве облучали моноизотопную мишень $^{241}_{84}\text{Pu}$ моноэнергетическим пучком ионов $^{16}_{8}\text{O}$ с целью получения $^{253}_{102}$ в реакции $^{241}_{84}\text{Pu}(^{16}_{8}\text{O}, 4n)^{253}_{102}$. Авторы работы [МЗ, М4] пришли к выводу, что время жизни этого изотопа не превышает 40 с.

В 1958 году в Беркли были выполнены эксперименты [Б5], с целью воспроизвести результаты стокгольмской работы [С1]. Группа из Беркли располагала моноэнергетическими пучками тяжелых ионов и кюриевыми мишенями практически того же изотопного состава, которые использовались в Стокгольме. Применялись мишени, нанесенные электролитическим методом на металлические подложки. Четыре мишени с толщиной слоя кюрия $0,4$ $\text{мг}/\text{см}^2$ и две с толщиной $0,1$ $\text{мг}/\text{см}^2$ собирались в одну стопку, которая бомбардировалась в вакууме пучком ионов углерода. Позади каждой мишени в стопке помещалась палладиевая фольга-сборник. После облучения эти шесть фольг растворяли в царской водке и затем быстро отделяли от палладия фракцию актиноидных элементов в результате смыва 2M соляной кислотой с колонки, заполненной анионообменной смолой Дауэкс-1. Трансплутониевая фракция могла исследоваться через 8 минут после конца облучения. Бомбардировка кюриевых мишеней ионами $^{12}_{6}\text{C}^{+}$ и $^{13}_{6}\text{C}^{+}$ различной энергии в интервале 60-100 МэВ не дала положительных результатов.

Для сравнения чувствительности своих экспериментов с чувствительностью, достигнутой в Стокгольме [С1], авторы работы [Б5] использовали измеренные ими выходы $^{246}_{98}\text{Cf}$ с данными статьи [С1], в которой приведена кривая вымывания $^{246}_{98}\text{Cf}$ из катионообменной колонки, полученная в одном из стокгольмских опытов. Из этого авторы [Б5] сделали вывод, что они должны были бы наблюдать в одном опыте по крайней мере до 100 событий α -распада с $E_{\alpha} = 8,5$ МэВ и $T_{1/2} = 10$ минут. На самом же деле они наблюдали лишь несколько фоновых событий, распределенных случайным образом на десятки экспериментов, при разных значениях энергии бомбардирующих ионов.

Авторы [Б5] провели специальные эксперименты, в которых исключалась возможность потери атомов 102-го элемента в случае их повышенной летучести. В этих опытах не проводилось химическое разделение продуктов реакций, но результат был опять отрицательным. Активность $E_{\alpha} = 8,5$ МэВ не была обнаружена и в экспериментах, в которых атомы отдачи, выбитые из кюриевой мишени, тормозились в газе и собирались под действием электрического поля на поверхности металлической фольги. Фольга непосредственно использовалась в качестве источника в α -спектрометрических измерениях. В этих экспериментах кюриевые мишени бомбардировали моноэнергетическими пучками ионов $^{12}_{6}\text{C}$, $^{13}_{6}\text{C}$, $^{16}_{8}\text{O}$, варьируя их энергию в диапазоне 60-145 МэВ.

В 1959 году стокгольмская группа опубликовала статью [С2], в которой было выражено сомнение в том, что в Беркли [Б5] действительно была достигнута чувствительность, достаточная для

опровержения результатов их работы [C1]. Наряду с этим авторы [C2] заявили, что более вероятным изотопом 102-го элемента, которому следует приписать активность $E_{\alpha}=8,5$ МэВ, $T_{1/2}=10$ минут, является $^{255}_{102}$, который мог быть синтезирован в их опытах [C1] в реакции $^{246}_{98}\text{Cm}(^{13}\text{C},4n)^{255}_{102}$; содержание изотопа $^{246}_{98}\text{Cm}$ в их мишенях было 4,4%.

Дискуссия между двумя группами, работавшими в Стокгольме и Беркли, так и не была доведена до конца. Действительно, из-за отсутствия в работах [C1,C2] данных об интегральных потоках бомбардирующих ионов в стокгольмских экспериментах, из-за большой неопределенности их энергии, а также ввиду очень плохой воспроизводимости результатов не представляется возможным оценить величину поперечного сечения реакции, ведущей к образованию 8,5 МэВ α -активности. К сожалению, и в работе [B5], несмотря на то, что в ней использовались монохроматические пучки и, по-видимому, наблюдалась воспроизводимость результатов, не приведены данные о пределах чувствительности, достигнутых в экспериментах.

К 1966 году в Дубне была завершена серия работ (см. раздел 3.5), в результате которых были однозначно определены свойства (энергии α -частиц и периоды полураспада) пяти изотопов 102-го элемента с массовыми числами 252-255. Ни один из изотопов, которые указывались в публикациях стокгольмской группы [C1,C2], не обнаружил характеристики α -распада, близкие к $E_{\alpha}=8,5 \pm 0,1$ МэВ, $T_{1/2}=10$ минут. Наиболее долгоживущий изотоп $^{255}_{102}$ имел период полураспада $T_{1/2}=3$ минуты и испускал α -частицы с энергией 8,1 МэВ. Если значительное различие в величинах периода полураспада, 10 минут [C1] против $T_{1/2}=3$ минуты для $^{255}_{102}$, можно как-то объяснить низкой статистикой событий в работе [C1], то отличие энергии α -частиц $E_{\alpha}=8,5 \pm 0,1$ МэВ [C1] от энергии α -частиц $^{255}_{102}$, составляющее четыре стандартные ошибки, невозможно объяснить случайными отклонениями результата измерений.

Спустя 11 лет после публикации работы [C1], в 1968 году, в Беркли было выполнено исследование химических свойств элемента 102 [B6]. Было установлено, что устойчивым состоянием окисления 102-го элемента в водных растворах является 2+, а не 3+, как предполагалось ранее. Заключение авторов работы [C1] об открытии 102-го элемента основывалось на том, что наблюдавшаяся ими 8,5 МэВ α -активность с $T_{1/2} = 10$ минут вымывалась α -гидрооксизобутиратом впереди фермия. Это положение ожидалось для трехвалентного состояния 102-го элемента. Однако, как следует из результатов работы [B6], в условиях опыта, описанного в [C1], 102 должен быть двухвалентным и вымываться

не до фермия, а после него. Следовательно, данные о химическом поведении активности $E_{\alpha}=8,5$ МэВ, $T_{1/2}=10$ минут, представленные в работе [C1], находятся в противоречии с выводами авторов, приписавших эту активность элементу 102.

Рассматривая начальный этап истории работ по синтезу 102-го элемента, мы видим, что участники этих работ впервые столкнулись с рядом трудных условий, характерных для экспериментов на пучках тяжелых ионов: очень низкие выходы искоемых нуклидов, большое число источников фона, короткие времена жизни синтезируемых изотопов нового элемента. Вывод о правильности или ошибочности первой работы [C1] был отложен надолго, ввиду того, что в этой работе, так же как и в работе группы Беркли [B5], проведенной специально для ее проверки, не было уделено достаточное внимание механизму реакции синтеза: не изучалась зависимость поперечного сечения от энергии бомбардирующих ионов, не были даны оценки величины поперечного сечения реакции, не исследовались источники фона. По-видимому, выяснение этих вопросов было на самом деле затруднительно в экспериментах, в которых за основу принимали традиционный для того времени способ химической идентификации нового элемента. Не только короткое время жизни синтезируемых нуклидов, но и нарушение характера химического поведения при переходе от менделевия к элементу 102 препятствовали решению специфических проблем, возникших в связи с использованием нового инструмента синтеза - тяжелых ионов.

Лишь после длительного интервала времени, затраченного на изучение основных условий работы на пучках тяжелых ионов, удалось установить, что работа [C1] не содержит доказательств открытия 102-го элемента.

Литература

- C1 P.R.Fields et al. Phys.Rev., vol.107, p.1460 (1957).
- C2 P.R.Fields et al. Arkiv Fys. vol.15, p.225 (1959).
- M3 Г.Н.Флеров и др. ДАН СССР, т.120, с.73 (1958).
- M4 Г.Н.Флеров и др. ИЭФ, т.38, с.82 (1960).
- B5 A.Ghiorso et. al. Phys.Rev.Lett., vol.1,p.17 (1958).
- B6 J.Maly et al. Science, vol.160, p.1114 (1968).

3.2. Эксперименты 1958-1961 годов, выполненные в Радиационной лаборатории в Беркли

Группа, работавшая в Беркли, в 1958 году опубликовала статью с заявкой на открытие 102-го элемента [1]. Ее авторы использовали с целью идентификации ядер 102-го элемента метод, который применялся еще в начале этого столетия О. Ханом и другими (см. [2]). Речь идет о сборе на отрицательно заряженный электрод дочерних ядер, выбитых в газ в результате радиосактивного распада материнского ядра. Наблюдая распад дочернего ядра, характеристики которого хорошо известны, можно однозначно идентифицировать материнское ядро. В классических работах описаны модификации этого метода, позволяющие наряду с идентификацией материнского ядра измерить и его период полураспада.

В данном случае в Беркли, по утверждению авторов, был химически идентифицирован изотоп фермия (^{250}Fm) как дочерний продукт α -радиосактивного изотопа 102-го элемента ($^{254}\text{102}$). Для синтеза 102-го элемента использовалась реакция слияния бомбардирующих ионов ^{12}C с ядрами кюриевой мишени, в составе которой было 95% изотопа ^{244}Cm и 4,5% - ^{246}Cm . Продукты ядерных реакций (первичные продукты), выбитые из мишени, тормозились в гелии, которым была заполнена реакционная камера и весь остальной объем установки. Было установлено, что при достаточно высокой напряженности электрического поля все первичные продукты собирались на отрицательно заряженной металлической ленте, расположенной непосредственно под мишенью. Атомы первичных продуктов переносились лентой-конвейером под фольгу, которая была в свою очередь заряжена отрицательно по отношению к движущейся ленте. При α -распаде атомов, собранных на поверхности ленты, около половины дочерних атомов из-за отдачи покидали ленту, тормозились в газе, и под действием электрического поля высаживались на поверхности фольги-сборника. После окончания облучения фольга-сборник разрезалась поперек направления движения конвейерной ленты на пять равных частей, на каждой из которых с помощью ионизационной камеры с сеткой фриша и амплитудного анализатора измерялась α -активность.

Как отмечают авторы, установка позволяла легко проводить все желаемые измерения для идентификации атомов, захваченных на фольге-сборнике, и таким образом измерять период полураспада материнского ядра. Метод был успешно опробован при бомбардировке ^{240}Pu ионами ^{12}C , в результате чего был идентифицирован новый изотоп фермия, ^{248}Fm . Из анализа данных регистрации активности известного 20-минутного изотопа ^{244}Cf на пяти частях фольги-сборника было найдено, что ^{248}Fm имеет период полураспада, равный 0,6 мин.

Чтобы приступить к синтезу 102-го элемента, по утверждению авторов, потребовалось лишь устранить попадание части первичных продуктов ядерных реакций (^{246}Cf)* на край фольги-сборника со стороны мишени. Авторы сообщили, что за счет дополнительной экранировки фольги-сборника этот нежелательный эффект был сведен до "пренебрежимо низкого уровня".

Авторы статьи указывают, что для выбранной ими комбинации бомбардирующих ионов и мишени наиболее подходящим изотопом 102-го элемента, который мог быть наблюден на их установке, был изотоп $^{254}\text{102}$. Его предсказанное время жизни было в диапазоне нескольких секунд, а α -распад должен был приводить к образованию 30-минутного α -излучателя ^{250}Fm ($E_{\alpha} = 7,43$ МэВ). Очевидно, что образование изотопа $^{254}\text{102}$ ожидали в реакции $^{246}\text{Cm}(^{12}\text{C}, 4n)^{254}\text{102}$, протекающей на ^{246}Cm , содержание которого в мишени - 4,5%.

И действительно, в ряде экспериментов они обнаружили ^{250}Fm на фольге-сборнике. Приведен график распределения активности ^{250}Fm на пяти частях этой фольги, суммирующий данные многих экспериментов. Судя по графику, авторы зарегистрировали более 200 событий α -распада ^{250}Fm . Этот график - фактически кривая распада материнского ядра $^{254}\text{102}$. Период полураспада этого нуклида оказался равным 3 секундам.

Как сообщают авторы, при изменении скорости движения ленты распределение атомов ^{250}Fm на фольге-сборнике изменялось в соответствии с трехсекундным периодом полураспада материнских ядер. По их мнению, доказательством того, что ^{250}Fm появлялся на фольге-сборнике в результате именно α -распада $^{254}\text{102}$, а не каким-либо другим путем, служило то, что на фольге-сборнике не были обнаружены ^{246}Cf и ^{248}Cf , имевшиеся в большом количестве на конвейерной ленте.

Функция возбуждения, полученная по выходу ^{250}Fm на фольге-сборнике, по словам авторов, имела резкий максимум около энергии бомбардирующих ионов, равной 70^{+5} МэВ, где сечение реакции, по их оценке, достигало нескольких микробарн. Авторы сообщили, что в максимуме функции возбуждения они регистрировали в единичном опыте на фольге-сборнике около 40 отсчетов α -распада изотопа ^{250}Fm . К сожалению, кривая выхода ^{250}Fm на фольге-сборнике и кривые выхода различных первичных продуктов реакций в статье не приведены.

Была предпринята попытка измерить энергию α -частиц трех-

* Изотоп ^{246}Cf мог получаться, например, как первичный продукт реакции передачи $^{244}\text{Cm} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{246}\text{Cf} + \text{X}$.

секундного $^{254}_{102}$. Для этого над движущейся лентой-конвейером помещали ядерную эмульсию. Однако достигнуть желаемого результата не удалось, так как, по словам авторов статьи, "имелось в сотни раз большее число треков $^{250}_{\text{Fm}}$, $^{245}_{\text{Cf}}$, $^{240}_{\text{Cf}}$ и других α -излучателей".

По заявлению авторов окончательная идентификация активности, приписанной $^{250}_{\text{Fm}}$, была выполнена в отдельных экспериментах. Активность, собранная на фольге-сборнике, растворялась и фермий отделялся от других элементов актиноидной серии на ионообменной колонке. Было проведено всего два таких эксперимента, в одном из которых было зарегистрировано два атома $^{250}_{\text{Fm}}$, в другом - девять. Авторы заключили, что нет сомнений в том, что они идентифицировали элемент 102 в этих экспериментах.

Годом позже в Беркли провели новые эксперименты. Атомы 102-го элемента притягивались электростатическим полем к неподвижной металлической ленте, которая периодически переносила эти атомы к счетной позиции, находившейся внутри ионизационной камеры с сеткой. Один из авторов работы Гюрсо ([2,3]) сообщил, что в этом опыте была найдена α -активность с энергией 8,3 МэВ и периодом полураспада около трех секунд. С выходом, составляющим 50% от 8,3 МэВ α -активности, наблюдалось спонтанное деление, также характеризовавшееся периодом полураспада около трех секунд.

На основании этих данных, а также данных [1] были заявлены [2,3] следующие свойства изотопа $^{254}_{102}$: период полураспада - 3 с, энергия α -частиц - 8,3 МэВ, предположительно ветвь спонтанного деления - 30%.

В 1961 году в процессе работы, целью которой являлся синтез 103-го элемента, группа исследователей из Радиационной лаборатории в Беркли [4] получила данные, на основании которых был сделан вывод об открытии другого изотопа 102-го элемента - предположительно $^{255}_{102}$. В этом опыте атомы отдачи, выбитые из мишени, бомбардируемой пучком тяжелых ионов, снова тормозились в гелии и собирались на металлической конвейерной ленте. Лента переносила атомы последовательно к пяти поверхностно-барьерным кремниевым детекторам, которые регистрировали спектр энергии α -частиц и позволяли наблюдать кривую распада α -активности.

Были сообщены [4] следующие свойства изотопа $^{255}_{102}$: период полураспада - 15 секунд, энергия α -частиц - 8,2 МэВ. Такой вывод был сделан авторами [4] на основании необычайно ограниченных по объему и разрозненных данных, приведенных в статье. Активность α -излучения с периодом полураспада 15 с и энергией 8,2 МэВ наблюдалась при бомбардировке ионами $^{10}_{\text{B}}$ и $^{11}_{\text{B}}$ (энергия не указана) мишени,

состоявшей из смеси изотопов калифорния (3,3% $^{249}_{\text{Cf}}$, 32,8% - $^{250}_{\text{Cf}}$, 12,3% $^{251}_{\text{Cf}}$, 50,8% $^{252}_{\text{Cf}}$). Выход этой активности возрос в 20 раз при бомбардировке той же мишени ионами $^{12}_{\text{C}}$ (энергия не указана). С другой стороны, α -частицы с энергией 8,2 МэВ не были обнаружены при распаде продуктов реакции $^{243}_{\text{Am}} + ^{12}_{\text{C}}$ (вновь не указана энергия бомбардирующих ионов). Авторы работы заключили, что изотоп $^{255}_{102}$ образуется в реакциях ($^{10,11}_{\text{B}}$, рхп) и ($^{12}_{\text{C}}$, α хп), протекающих на нескольких изотопах калифорния, входивших в состав мишени.

3.3. Эксперименты 1957 - 1960 гг. в Москве

Первые эксперименты по синтезу трансурановых элементов на пучке тяжелых ионов были начаты в Институте атомной энергии в Москве в 1956 году. Мощные энергетичные и интенсивные, по тем временам, пучки ионов углерода, азота, кислорода были получены на 150 см циклотроне, на котором по предложению И.В. Курчатова был установлен плазменный ионный источник, разработанный для электромагнитной сепарации изотопов. Интенсивность пучка ионов $^{16}_{\text{O}^{+4}}$ с энергией 100 МэВ достигала 1 - 2 мкА. После того, как были синтезированы на пучке тяжелых ионов изотопы калифорния, эйнштейния и фермия и были изучены закономерности соответствующих ядерных реакций, были непосредственно начаты эксперименты по синтезу 102-го элемента.

В московских опытах [5,6] мишени из $^{241}_{\text{Pu}}$ и $^{239}_{\text{Pu}}$ облучались ионами кислорода $^{16}_{\text{O}}$. Ядра отдачи, выбитые из тонкой мишени, тормозились в алюминиевом сборнике, который за 1,5-2 секунды перемещался на расстояние 2 метра от мишени, где располагалась ядерная фотосмульсия, служившая детектором α -частиц. Ядра отдачи проникали вглубь сборника на 1-1,5 мкм, что приводило к потере точности при определении энергии α -частиц. На качестве спектров пробега α -частиц, определяемого с помощью фотосмульсии, отрицательно влияли нагрев и воздействие α , β и γ -радиации со стороны сборника.

Основная трудность, которая была впервые выявлена и осознана в процессе московской работы, была связана с возникновением α -радиационного фона на ничтожных примесях свинца, висмута, таллия в материалах мишени и сборника. Особенно опасен был свинец, так как при взаимодействии его ядер с ионами кислорода в реакциях передачи с поперечным сечением, близким к одному барну, образуется большое число изотопов Po, At, Rn и т.д., энергия α -распада которых близка к энергии α -линий синтезируемых изотопов 102-го элемента.

Вопросам устранения и учета фона в московских экспериментах было уделено очень большое внимание. С этой целью был разработан

высококочувствительный метод активационного анализа материалов мишени и сборника на Рb, были разработаны методы очистки этих материалов от посторонних примесей.

Синтез 102-го элемента проводился в 1958 году с использованием двух мишеней толщиной 180 и 100 мкг/см² ²⁴¹Pu. С первой мишенью была проделана серия 40 трехчасовых облучений, в процессе которой было зарегистрировано 90 α-частиц с энергией 8,2 - 9,0 МэВ. В статьях [5,6] приводятся результаты опытов, которые показали, что примеси Рb (а также менее существенные примеси Нg, Тl и Вi) могли обусловить не более 40% числа наблюдавшихся α-частиц с энергией 8,2-9,0 МэВ. Вторая мишень была изготовлена после дополнительной очистки плутония. В результате 10 трехчасовых облучений в том же режиме работы регистрирующего устройства было зарегистрировано 20 α-частиц в группе с энергией 8,2-9,0 МэВ. Активационный анализ показал, что из них только четыре можно отнести за счет примеси свинца.

Указанная группа α-частиц не была обнаружена при замене мишени на ²³⁹Pu: в длительных облучениях ионами ¹⁶O в диапазоне 8,2-9,0 МэВ была зарегистрирована только одна α-частица.

В работах [5,6] были приведены аргументы, показывающие, что α-излучатель с энергией α-частиц 8,2-9,0 МэВ не мог принадлежать какому-либо изотопу менделевия, фермия или другим трансурановым элементам. Был сделан вывод, что в проведенных экспериментах обнаружен α-радиоактивный изотоп 102-го элемента-²⁵³102 (допускалась также возможность ²⁵⁴102) с энергией α-частиц 8,9[±]0,4 МэВ. Были даны границы периода полураспада этого изотопа: $2c < T_{1/2} < 40c$.

3.4. Эксперименты 1962 - 1966 гг., проведенные в ОИЯИ, Дубна

3.4.1. Синтез изотопа ²⁵⁶102

С пуском трехметрового циклотрона тяжелых ионов в Дубне У-300 появились новые возможности для синтеза 102-го элемента. Высокая интенсивность ($10^{13} c^{-1}$ и более) пучков ионов, таких как неон, позволяла значительно увеличить выход нового элемента. Используя в качестве мишеней различные изотопы урана, а в качестве бомбардирующих ионов ²⁰Ne и ²²Ne, можно было, в принципе, получить изотопы 102-го элемента с массовыми числами 249-256.

Исследовательская группа в Дубне начала работу с синтеза изотопа ²⁵⁶102 по нескольким причинам. Имевшиеся в то время данные позволяли предположить, что выход более тяжелых изотопов в реакциях (НI, хп) больше по сравнению с легкими изотопами. Авторы работы [7] обращали внимание на интерес исследования спонтанного деления этого

изотопа. И, наконец, для дубненской группы существенным было то, что измерение поперечного сечения реакции синтеза этого изотопа и получение данных о свойствах его распада служили опорными точками в экспериментах по синтезу изотопа 104-го элемента ²⁶⁰104, которые в это время как раз проводились в Дубне.

Синтез изотопа ²⁵⁶102 проводили в реакции ²³⁸U(²²Ne, 4n)²⁵⁶102. Регистрацию и идентификацию этого изотопа осуществляли по его дочернему продукту отдачи - изотопу ²⁵²Fm. Это позволило снять проблему фона α-излучения от примесей свинца в мишени. Свойства дочернего ядра-²⁵²Fm, были хорошо известны ($T_{1/2} = 25,4$ ч, $E_{\alpha} = 7,04$ МэВ). Нуклид мог быть надежно выделен с помощью селективной химии и зарегистрирован ионизационной камерой с сеткой. Камера имела разрешение по энергии 30 кэВ (ширина α-линий на полувысоте). Для образцов, полученных после химического выделения фракции фермия на ионообменной колонке, разрешение составляло 60 кэВ, что определялось толщиной слоя. Система регистрации обеспечивала надежную работу в течение нескольких дней непрерывных измерений, при этом уширение линий не превышало 25 кэВ. Фон составлял около 0,3 имп/МэВ/ч в области $E_{\alpha} = 6-8$ МэВ.

Авторы [7] пришли к выводу, что применение электрического поля для сбора первичных продуктов ядерных реакций на движущийся сборник, является нецелесообразным, поскольку плотность ионизации газа под действием пучка тяжелых ионов очень велика и это могло существенно исказить собирающее электрическое поле. В работе [8] упоминалось о непонятных явлениях при такого рода собирании, когда знак прикладываемого электрического напряжения почти не сказывался на эффективности собирания.

Поэтому в установке, созданной в Дубне, для эффективного собирания первичных продуктов ядерных реакций, остановившихся в газе, использовалась диффузия.

Устройство для облучения урановой мишени ионами ²²Ne и накопления ²⁵²Fm было смонтировано в наполненном газом (аргон 500 тор) объеме, который помещался внутри камеры циклотрона У-300 на радиусе, отвечавшем выбранной энергии пучка ионов. Основой этого устройства (см. рис.1) являлся вращающийся массивный медный диск диаметром 100 мм, охлаждаемый водой. На периферии диска имелось кольцевое углубление прямоугольного сечения размером 20x10 мм. Две неподвижные механические пробки из тефлона отсекали часть объема этого углубления с двух сторон. С третьей стороны размещалась урановая мишень (1,0-1,5 мг/см² окиси урана на алюминиевой фольге), которая, таким образом, замыкала эту часть углубления. Продукты

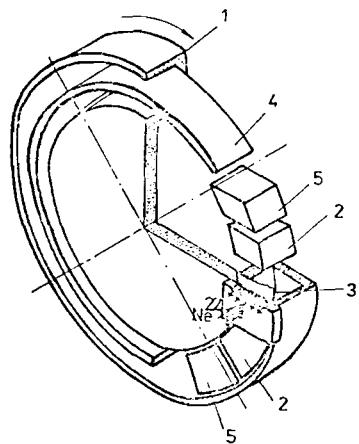


Рис.1. Схема устройства для синтеза изотопа $^{256}_{102}$ и накопления его дочернего продукта $^{252}_{\text{Fm}}$:

- 1 - медный диск с кольцевым углублением на периферии,
- 2 - механические пробки, ограничивающие объем для сбора продуктов ядерных реакций,
- 3 - урановая мишень,
- 4 - сборник продуктов α -распада,
- 5 - электрические пробки.

Рисунок взят из работы [7].

реакций выбивались из мишени в этот замкнутый объем, тормозились в газе, диффундировали к стенкам, ограничивавшим объем, и адсорбировались на них. Атомы, сорбированные на поверхности кольцевого углубления, при вращении диска переносились из замкнутого объема - зоны облучения - в зону отбора атомов отдачи, появившихся при α -распаде первичных продуктов ядерных реакций. Сборник атомов отдачи ($^{252}_{\text{Fm}}$) представлял металлическую основу в виде дуги (70% от длины окружности вращающегося диска), на поверхности которой крепилась серебряная фольга-сборник толщиной 3-5 мкм. Этот сборник был заряжен отрицательно (потенциал 80 В) по отношению к диску. После окончания облучения, которое обычно длилось 6-10 часов, извлекалась серебряная фольга, проводилось химическое выделение фракции фермия и регистрировался α -спектр полученного образца.

Авторы приняли тщательные меры, чтобы обнаружить и устранить возможные источники фона и причины ошибок, чему уделено существенное место в статье.

Поскольку по дочерним продуктам, зарегистрированным на серебряном сборнике, делался вывод о синтезе того или иного материнского изотопа в ядерной реакции, решающее значение имела гарантия того, что на сборник попадали лишь атомы, являвшиеся продуктами α -распада первичных атомов, возникших в зоне облучения. Наибольшую опасность, как отметили авторы работы, представляла возможность непосредственного проникновения на сборник первичных продуктов ядерных реакций. Это было связано с тем, что реакции типа $(\text{HI}, \alpha \text{n})$ в области фермия, 102-го элемента имеют поперечные сечения в несколько раз больше, чем реакции типа (HI, xn) . В частности, авторы

установили, что максимальное сечение реакции $^{238}_{\text{U}}(^{22}_{\text{Ne}}, \alpha \text{n})$ равно $2,5 \cdot 10^{-31} \text{ см}^2$.

Поэтому обращалось внимание на герметизацию объема зоны облучения, в котором происходил сбор первичных продуктов реакций на стенки. Зазоры между стенками кольцевого углубления в диске и механическими тефлоновыми пробками, а также зазоры между пробками и плоскостью мишени составляли всего около 100 мкм, а длина этих зазоров-щелей была не менее 20 мм. За механическими пробками располагались "электрические пробки", которые находились под потенциалом - 80 В по отношению к диску. Это исключало попадание заряженных первичных продуктов реакций на серебряный сборник.

Для определения полной эффективности регистрации синтезируемых нуклидов и проверки всей методики авторы измерили (см. рис.2) энергетическую зависимость сечения реакции $^{238}_{\text{U}}(^{20}_{\text{Ne}}, \alpha \text{n})$ $^{250}_{\text{Fm}}$ двумя методами: по выходу $^{250}_{\text{Fm}}$ непосредственно в первичных продуктах и по выходу $^{246}_{\text{Cf}}$ -дочернего продукта α -распада $^{250}_{\text{Fm}}$, измеренному при использовании описанной методики. Кривая выхода $^{246}_{\text{Cf}}$ на серебряном сборнике в пределах ошибок повторила кривую выхода $^{250}_{\text{Fm}}$ и значительно отличалась от кривой выхода $^{246}_{\text{Cf}}$ в первичных продуктах реакций. Это было хорошим доказательством надежности методики.

Определенная в этом опыте эффективность регистрации в целом для всей методики (без учета химического выхода, который определялся в каждом отдельном случае и составлял в среднем около 65%) оказалось равной 15%, что находилось в согласии с расчетом.

Используя высокую интенсивность пучка $^{22}_{\text{Ne}}$, можно было накопить $^{252}_{\text{Fm}}$ в количестве, достаточном для надежной регистрации и идентификации, даже если бы поперечное сечение реакции $^{238}_{\text{U}}(^{22}_{\text{Ne}}, 4\text{n})$ $^{256}_{102}$ оказалось равным 10^{-33} см^2 .

Данные, представленные на рис.2, свидетельствовали о довольно низком уровне фона первичных продуктов реакций $(\text{HI}, \alpha \text{n})$, проникающих на серебряный сборник продуктов α -распада. Тем не менее авторы работы провели несколько дополнительных экспериментов по определению "коэффициента просачивания", (т.е. отношения числа атомов первичных продуктов реакций, попавших на серебряный сборник, к полному числу атомов, полученных в ядерных реакциях и выбитых из мишени в газ. При бомбардировке Ва ионами $^{22}_{\text{Ne}}$ и Cs ионами $^{16}_{\text{O}}$ было установлено, что "коэффициент просачивания" для таких продуктов, как $^{150}_{\text{Dy}}$ и $^{151}_{\text{Dy}}$, не превышал $5 \cdot 10^{-4}$. Ввиду того, что обычно сечение реакции $(\text{HI}, \alpha \text{n})$ превосходит сечение реакции $(\text{HI}, 4\text{n})$ не более, чем в 20 раз, авторы сочли полученный предел величины "коэффициента просачивания" удовлетворительным.

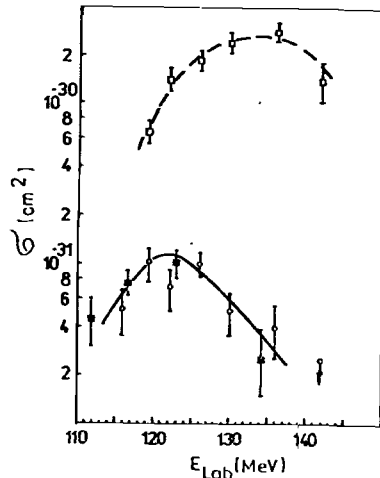


Рис.2. Результаты экспериментов по проверке надежности методики регистрации α -активных продуктов ядерных реакций по их дочерним продуктам.
 о - энергетическая зависимость сечения реакции $^{238}\text{U}(^{20}\text{Ne}, \alpha n)^{250}\text{Fm}$, полученная в результате регистрации ^{250}Fm ;
 ■ - та же зависимость, полученная по регистрации ^{246}Cf - дочернего продукта ^{250}Fm ;
 □ - энергетическая зависимость выхода ^{246}Cf при бомбардировке ^{238}U ионами ^{20}Ne (рисунок взят из работы [7]).

Ошибка, в принципе, могла бы быть связана еще и с тем, что под действием электрического поля на серебряный сборник могли собираться не только дочерние продукты α -распада, но и продукты β -распада, электронного захвата и изомерного перехода. Авторы работы экспериментально установили, что эффективность собирания дочерних продуктов β -распада равна 0,5%, электронного захвата - 1%, и оценили предел эффективности сбора дочерних продуктов изомерного перехода - 1%. Измеренная ими эффективность сбора дочерних продуктов α -распада составила около 100%.

В первых же экспериментах, проведенных весной 1962 года, на серебряном сборнике был обнаружен ^{252}Fm . Этот факт был установлен путем селективного химического выделения Fm, измерения α -спектров различных фракций, полученных в процессе химического разделения, и на основании измеренной кривой распада α -линии 7,04 МэВ, прослеженной в диапазоне до трех периодов полураспада ^{252}Fm .

Заключив, что регистрация ^{252}Fm в условиях данного эксперимента дала доказательство синтеза изотопа $^{256}_{102}$, авторы работы выполнили эксперименты по измерению функции возбуждения реакции $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{256}_{102}$, которая показана на рис.3. На нем также приведены кривые для сечений образования ^{252}Fm и ^{246}Cf в первичных продуктах реакций и для ^{246}Cf во вторичных продуктах.

Функция возбуждения реакции $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{256}_{102}$ (сплошная кривая на рис.3) имела вид, типичный для испарительных реакций с максимумом около $4,5 \cdot 10^{-32}$ см² при энергии ^{22}Ne около 112 МэВ.

Авторы отметили, что сравнение кривых выхода ^{252}Fm в первичных

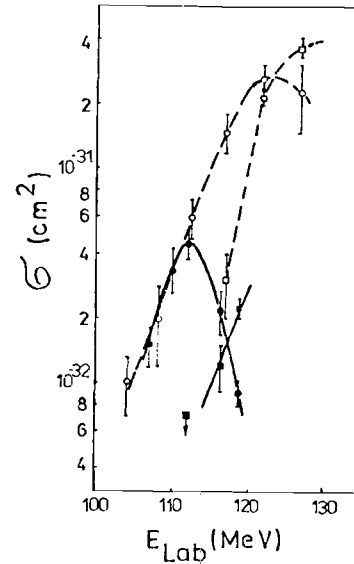


Рис.3. Энергетическая зависимость сечений реакций, идущих с образованием различных нуклидов:
 ● - $^{256}_{102}$ (по ^{252}Fm),
 ○ - ^{252}Fm (по ^{252}Fm),
 ■ - ^{250}Fm (по ^{246}Cf),
 □ - ^{246}Cf (по ^{246}Cf);
 (рисунок взят из работы [7]).

и дочерних продуктах представляет дополнительные доказательства образования ^{252}Fm на серебряной фольге за счет α -распада изотопа $^{256}_{102}$:

1. Левая ветвь функции возбуждения реакции $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{256}_{102}$ совпала с кривой выхода ^{252}Fm в первичных продуктах реакций.

2. Правая ветвь этой кривой шла круто вниз, в то время как выход ^{252}Fm в первичных продуктах продолжал

расти. Это еще раз свидетельствовало о том, что фон, обусловленный проникновением первичных продуктов на серебряный сборник, не представлял заметной величины.

3. Выход ^{252}Fm , зарегистрированный на серебряном сборнике, не мог быть обусловлен электронным захватом ^{252}Md по следующим причинам:

а) Синтез ^{252}Md возможен лишь в реакции $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, p7n)^{252}\text{Md}$, которая энергетически запрещена в области энергии <120 МэВ.

б) Сечения подобных реакций очень малы.

в) Если бы эта реакция все же имела место, то, учитывая эффективность собирания дочерних продуктов электронного захвата, выход ^{252}Fm в первичных продуктах должен был оказаться в несколько десятков раз больше наблюдавшегося (см. рис.3).

Все другие виды распада исключались по тем же причинам.

Заканчивая изложение работы [7], приведем краткие выводы, сделанные авторами в их статье.

1. Показано, что при регистрации и идентификации изотопа $^{256}_{102}$ по дочернему продукту ^{252}Fm фон от проникновения ядер ^{252}Fm , получившихся непосредственно в реакции $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$, на сборнике дочерних ядер отдачи не превышал 1/2000.

2. При исследовании реакции $^{238}\text{U}(^{20}\text{Ne}, \alpha n)^{250}\text{Fm}$ определена эффективность использовавшейся в опыте методики.

3. Получены кривые выхода ^{252}Fm на сборнике дочерних ядер отдачи, так же как и непосредственно в реакции $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$. Обнаружено резкое различие в характере этих кривых, причем вид первой из них с полушириной 8 МэВ и максимумом в районе 112 МэВ подтверждал тот факт, что здесь мы имели дело с реакцией $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{256}_{102}$.

4. Исследована возможность собирания дочерних ядер отдачи после β -распада и электронного захвата. Показано, что эти виды распада не могли обусловить попадания ^{252}Fm на сборник дочерних ядер отдачи.

5. Распределение ядер ^{252}Fm на сборнике дочерних ядер отдачи соответствовало α -распаду изотопа $^{256}_{102}$ с периодом полураспада, близким к 8 с.

Результаты проведенных опытов подтвердили вывод, что в реакции $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ был синтезирован α -активный изотоп $^{256}_{102}$.

3.4.2. Синтез изотопа $^{254}_{102}$

После успешного завершения работы по синтезу $^{256}_{102}$ естественным было желание попробовать получить изотоп $^{254}_{102}$, об открытии которого сообщалось в 1958 году в работе группы из Беркли [1]. Еще в 1959 году в Институте атомной энергии в Москве [9] пытались зарегистрировать спонтанное деление этого изотопа, получая его в реакции $^{242}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 4n)^{254}_{102}$. Однако события спонтанного деления не были обнаружены, что противоречило данным Гиорсо [2,3], будто в 30% случаев этот изотоп испытывает спонтанное деление. Авторы работы [9] сделали вывод, что, если для этого изотопа есть 30% ветвь спонтанного деления, то сечение его образования в указанной реакции значительно меньше, чем можно было ожидать на основе всех имевшихся данных.

Вызывал удивление также тот факт, что изотоп $^{256}_{102}$ ($T_{1/2}=8$ с) имеет период полураспада больший, чем сообщалось [1-3] для $^{254}_{102}$ ($T_{1/2}=3$ с). Было известно, что из-за влияния нейтронной подоболочки $N = 152$ периоды полураспада изотопов с $N = 152$ больше, чем у изотопов с $N = 154$: тогда уже знали, что период полураспада ^{250}Cf примерно в 5 раз больше, чем у ^{252}Cf , а в случае изотопов фермия - ^{252}Fm и ^{254}Fm - это различие достигало фактора 8. Поэтому естественным было предположение о том, что период полураспада изотопа $^{254}_{102}$ должен быть существенно больше 8 с.

Прежде чем начать опыты по синтезу изотопа $^{254}_{102}$, в Дубне были проведены дальнейшие усовершенствования экспериментальных методик: на циклотроне У-300 были получены выведенные пучки тяжелых

ионов, были изготовлены Si-Au поверхностно-барьерные детекторы, качество которых удовлетворяло требованиям экспериментов по синтезу трансфермиевых элементов, были созданы две новые установки для таких экспериментов [10,11], в которых была применена техника газовой струи, введенная в ядерно-физический эксперимент Макфарланом и Гриффином [12].

Первые эксперименты по синтезу $^{254}_{102}$ были проведены в Дубне в 1965 году на той же установке, на которой синтезировали $^{256}_{102}$ (см. рис.1). Сначала исследовали реакцию $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 6n)^{254}_{102}$ [13] и показали, что изотоп $^{254}_{102}$ испытывает α -распад. Однако полученные данные указывали, что период полураспада этого изотопа больше 3 с, и это противоречило данным Гиорсо и др. [1-3].

Затем была изучена реакция $^{243}\text{Am}(^{15}\text{N}, 4n)^{254}_{102}$. В статье, описывающей эту работу [14], приведены однозначные доказательства того, что авторы действительно синтезировали изотоп $^{254}_{102}$ и идентифицировали его по α -распаду его дочернего продукта ^{250}Fm : подробно описаны результаты селективного химического выделения фракции ^{250}Fm , приведены α -спектры этой фракции, измеренная кривая распада ^{250}Fm и функция возбуждения реакции $^{243}\text{Am}(^{15}\text{N}, 4n)^{254}_{102}$. Поперечное сечение в максимуме функции возбуждения ($E_{\text{лаб}} = 82-83$ МэВ) оказалось равным $6 \cdot 10^{-32}$ см². Подробно приводятся в статье данные измерения периода полураспада $^{254}_{102}$, который оказался равным 50 ± 10 с.

Авторы этой работы повторно и столь же тщательно изучили также реакцию $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 6n)^{254}_{102}$ и описали полученные результаты. Вновь был получен период полураспада $^{254}_{102}$: $T_{1/2} = (50 \pm 10)$ с.

Авторами был выполнен целый ряд контрольных опытов.

В частности, было установлено, что попадание ^{250}Fm из первичных продуктов ядерных реакций на сборник дочерних продуктов α -распада не превышало 1% от числа атомов ^{250}Fm , зарегистрированных на сборнике дочерних продуктов α -распада.

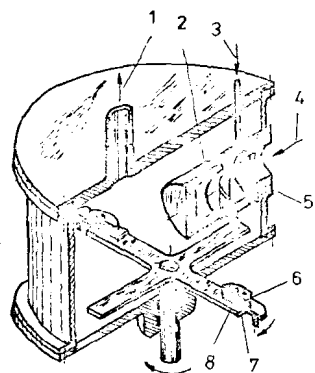
На основании всей суммы приведенных данных авторы статьи [14] заключили, что в реакциях $^{243}\text{Am}(^{15}\text{N}, 4n)$ и $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 6n)$ синтезирован $^{254}_{102}$ и что этот изотоп испытывает α -распад с периодом полураспада $T_{1/2} = (50 \pm 10)$ с.

Отличие этого значения $T_{1/2}$ от данных Гиорсо и др. [1-3] было очень велико. В связи с этим в серии работ, выполненных в Дубне в 1965-1966 гг. были проведены дополнительные исследования свойств $^{254}_{102}$.

Первая работа из этой серии [15] была посвящена измерению энергии α -частиц и периода полураспада $^{254}_{102}$. В экспериментах

использовалась установка [10], схема которой показана на рис. 4.

Рис. 4. Схема экспериментальной установки для синтеза и изучения ядер 102-го элемента с применением методики газовой струи:



- 1 - откачка гелия (давление гелия в объеме Si-Au детекторов 1-3 торр),
- 2 - цилиндр Фарадея,
- 3 - подача гелия (0,5-1 атм),
- 4 - пучок ионов,
- 5 - мишень,
- 6 - Si-Au-детектор,
- 7 - экран, вводимый между детектором и сборником,
- 8 - крестообразный сборник продуктов реакций (рисунок взят из работы [15]).

Изотоп $^{254}_{102}$ синтезировался в реакции $^{243}_{Am}(^{15}_N, 4n)^{254}_{102}$. Ядра отдачи выбивались из мишени $^{243}_{Am}$ толщиной $0,4 \text{ мг/см}^2$ и тормозились в гелии, заполнявшем объем небольшой мишени камеры. Затем направленной струей газа, выходящего из маленького отверстия в стенке камеры, эти ядра переносились на металлический сборник, который периодически перемещался к Si-Au поверхностно-барьерному детектору, регистрировавшему α -частицы.

Основная часть опытов по синтезу $^{254}_{102}$ проводилась при энергии бомбардирующих ионов $^{15}_N$ 82-84 МэВ, соответствовавшей расчетному максимуму ожидаемой реакции. Для подтверждения расчетов была измерена функция возбуждения в реакции $^{237}_{Np}(^{15}_N, 4n)^{248}_{Fm}$.

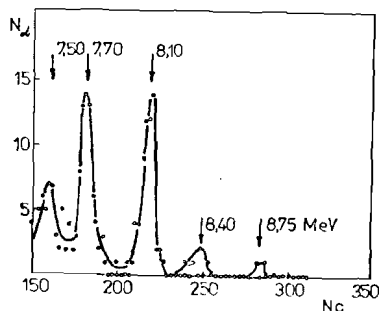


Рис. 5. Участок α -спектра, полученный при облучении $^{243}_{Am}$ ионами $^{15}_N$ с энергией 83 МэВ. Цикл накопления активности (13 с) равен циклу измерения (рисунок взят из работы [15]).

На рис. 5 приведен один из спектров α -частиц, полученных во время облучения $^{243}_{Am}$ ионами $^{15}_N$ с энергией 83 МэВ.

По мнению авторов [15] единственной группой α -частиц, которую можно было отнести к распаду $^{254}_{102}$, являлась группа с энергией $E_{\alpha} = 8,10 \pm 0,05$ МэВ. Поперечное сечение реакции образования этого α -излучателя, распадавшегося с периодом полураспада $T_{1/2} = (30-40)$ с составляло около $1 \cdot 10^{-31} \text{ см}^2$.

Для подтверждения того, что они действительно имели дело с изотопом $^{254}_{102}$, авторы провели специальные опыты, в которых выделили и надежно зарегистрировали сигналы α -распада дочерних ядер, образующихся после α -распада первичных продуктов реакций. Схема этого опыта видна на рис. 4. Часть дочерних продуктов α -распада первичных ядер, находившихся на сборниках, за счет отдачи попадала на поверхность Si-Au детектора, который, таким образом, фактически являлся сборником дочерних ядер. После одночасового облучения мишени $^{243}_{Am}$ ионами $^{15}_N$ в течение полутора часов между сборниками и детекторами помещали экраны, исключавшие попадание в детекторы α -частиц от распада первичных ядер на сборниках. В остальных условиях работы всей установки оставались неизменными. Измеренные в этом режиме α -спектры давали информацию о дочерних продуктах α -распада первичных ядер.

В α -спектре дочерних продуктов присутствовала группа α -частиц с энергией $E_{\alpha} = 7,45 \pm 0,05$ МэВ и периодом полураспада 30 минут. Это хорошо согласовывалось с известными свойствами $^{250}_{Fm}$ - дочернего продукта α -распада изотопа $^{254}_{102}$. Из распределения $^{250}_{Fm}$ на двух детекторах, разделенных при накоплении дочерних продуктов временным интервалом от 26 до 200 с, авторы еще раз смогли оценить период полураспада материнского изотопа $^{254}_{102}$. Он оказался значительно больше 3 с.

Выход $^{250}_{Fm}$ в дочерних продуктах α -распада соответствовал выходу первичной линии α -активности с энергией $8,10 \pm 0,05$ МэВ. В контрольных опытах, когда $^{243}_{Am}$ бомбардировали ионами $^{14}_N$ в интервале энергии 80-90 МэВ, выход излучателя $8,10 \pm 0,05$ МэВ резко уменьшился, при этом α -активность 7,45 МэВ в спектре α -распада дочерних ядер отсутствовала.

Суммируя свои данные, авторы работы [15] заключили, что они синтезировали в реакции $^{243}_{Am}(^{15}_N, 4n)^{254}_{102}$ α -радиоактивный изотоп $^{254}_{102}$ и определили его период полураспада $T_{1/2} = 20-50$ с и энергию α -частиц $E_{\alpha} = 8,10 \pm 0,05$ МэВ.

3.4.3. Синтез изотопов $^{255}_{102}$ и $^{256}_{102}$

Изотоп $^{255}_{102}$ был синтезирован в Дубне в 1966 году двумя группами, работавшими на аналогичных установках с газовой струей [10,11].

Первая из этих групп применяла ядерную реакцию $^{238}_{92}\text{U}(^{22}_{10}\text{Ne},5n)^{255}_{102}$. Полученные результаты были опубликованы в препринте [16], который затем был напечатан в виде журнальной статьи [17].

Измерения α -спектров в диапазоне энергии бомбардирующих ионов $^{22}_{10}\text{Ne}$ от 117 до 137 МэВ позволили авторам четко выделить следующие α -линии с энергией более 7,9 МэВ: 8,08 МэВ ($T_{1/2}=180$ с), 8,23 МэВ ($T_{1/2}>5$ мин), 8,35 МэВ (сложная группа с $T_{1/2}=30$ с и >5 мин),

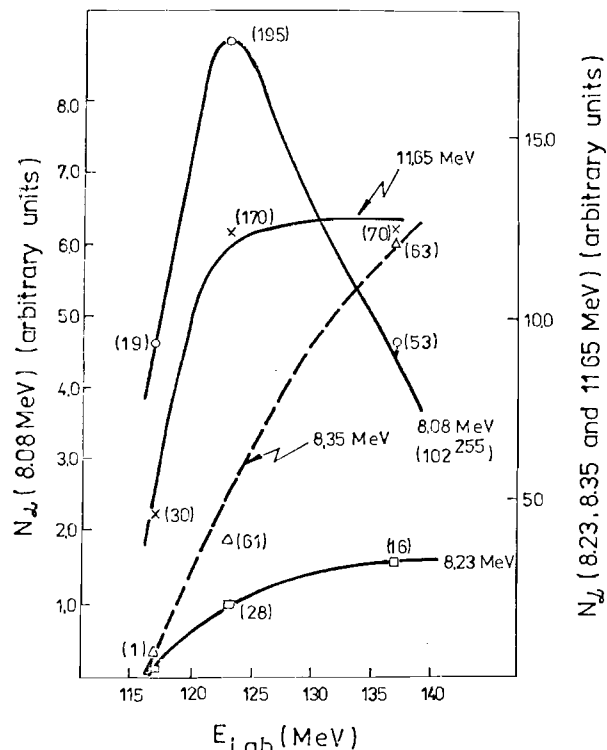


Рис. 6. Энергетическая зависимость выходов α -излучателей с энергией 8,08; 8,23; 8,35 и 11,65 МэВ в реакции $^{238}_{92}\text{U} + ^{22}_{10}\text{Ne}$. В скобках указано полное число зарегистрированных α -частиц (рисунок взят из работы [16,17]).

8,41 \pm 0,03 МэВ ($T_{1/2}=6\pm 2$ с), 8,87 МэВ ($T_{1/2}=25$ с), 11,65 МэВ ($T_{1/2}=45$ с). Для идентификации α -излучателей изучалась зависимость их выхода от энергии бомбардирующих ионов (см. рис.6).

Линии 8,87 МэВ и 11,65 МэВ были отождествлены с уже известными в это время изомерами $^{211m}_{86}\text{Po}$ и $^{212m}_{86}\text{Po}$ (см.[19]).

Линия $E_{\alpha}=8,41\pm 0,03$ МэВ наблюдалась только при энергии $^{22}_{10}\text{Ne}$ 116 МэВ, соответствующей максимуму реакции $^{238}_{92}\text{U}(^{22}_{10}\text{Ne},4n)^{256}_{102}$; значение периода полураспада, $T_{1/2}=6\pm 2$ с, было в согласии с результатом работы [7]. Максимальное сечение реакции, приводившей к образованию $^{256}_{102}$, оказалось равным $2 \cdot 10^{-32}$ см 2 , что было близко к величине $4 \cdot 10^{-32}$ см 2 для максимума функции возбуждения реакции $^{238}_{92}\text{U}(^{22}_{10}\text{Ne},4n)^{256}_{102}$, указанного в работе [7].

На основании этих результатов авторы заключили, что α -линия 8,41 \pm 0,03 МэВ принадлежит изотопу $^{256}_{102}$.

Рассмотрев функции возбуждения, измеренные в опытах (см.рис.6), авторы работы пришли к заключению, что только α -излучатель с энергией 8,08 \pm 0,03 МэВ и с периодом полураспада около 3 минут получался в реакции, функция возбуждения которой по форме и положению максимума совпадала с тем, что ожидали для реакции $^{238}_{92}\text{U}(^{22}_{10}\text{Ne},5n)^{255}_{102}$. Максимальный выход группы 8,08 МэВ примерно в 5 раз превышал максимальный выход группы 8,41 МэВ. Этот результат находился в согласии с известными данными [13] о функции возбуждения реакции $^{238}_{92}\text{U}(^{22}_{10}\text{Ne},5n)^{255}_{102}$.

Основываясь на этом, авторы [16,17] заключили, что излучатель α -частиц с энергией $E_{\alpha}=8,08\pm 0,03$ МэВ и периодом полураспада $T_{1/2}=180$ с является изотопом 102-го элемента $^{255}_{102}$.

Другая группа, работавшая в Дубне, для синтеза и изучения изотопов $^{255}_{102}$ и $^{256}_{102}$ применяла ядерную реакцию $^{242}_{94}\text{Pu} + ^{18}_8\text{O}$ [19]. Опыты проводились в диапазоне энергии бомбардирующих ионов $^{18}_8\text{O}$ от 82 до 104 МэВ. Обнаружив несколько линий в измеренном α -спектре, авторы сосредоточили внимание на двух линиях: 8,42 \pm 0,03 МэВ и 8,09 \pm 0,03 МэВ. Энергетическая зависимость выходов этих линий (а также линии 8,35 \pm 0,03 МэВ) показана на рис. 7. Форма и положение кривых, измеренных для α -линий 8,42 и 8,09 МэВ, находились в согласии с расчетными кривыми для поперечных сечений реакций $^{242}_{94}\text{Pu}(^{18}_8\text{O},4n)^{256}_{102}$ и $^{242}_{94}\text{Pu}(^{18}_8\text{O},5n)^{255}_{102}$.

* В работе [13] были получены экспериментальные функции возбуждения ряда реакций, в том числе функции возбуждения реакций $^{238}_{92}\text{U}(^{22}_{10}\text{Ne},x\text{n})$ ($x=4, 5, 6$). Измерения были выполнены в результате наблюдения дочерних продуктов α -распада первичных ядер $^{256}_{102}$, $^{255}_{102}$, $^{254}_{102}$, а именно: изотопов $^{252}_{100}\text{Fm}$, $^{251}_{100}\text{Fm}$, $^{250}_{100}\text{Fm}$.

Кривая распада ядер, испускавших α -частицы с энергией 8,42 МэВ, была измерена при энергии бомбардировки ионов ^{18}O , равной 92 МэВ. Измеренный период полураспада $T_{1/2} = 9 \pm 3$ с.

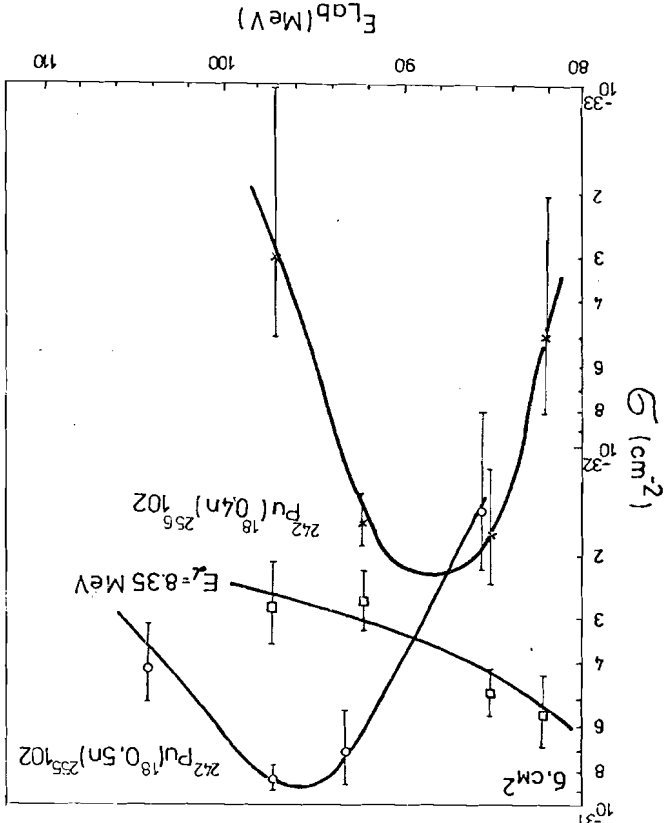


Рис. 7. Энергетическая зависимость выходов α -излучателей с энергией 8,09; 8,35 и 8,42 МэВ в реакции $^{242}\text{Pu} + ^{18}\text{O}$ (рисунок взят из работы [19, 20]).

Кривая распада α -активности 8,09 МэВ была измерена при энергии ионов ^{18}O 97 МэВ. Была получена величина периода полураспада $T_{1/2} = 180 \pm 40$ с. Измерения, выполненные при энергии ионов ^{18}O , равной 105 МэВ, дали другое значение периода полураспада этой линии: $T_{1/2} = 70$ с.

На основании измеренных результатов авторов работы [19] * пришли * Эта статья была сначала напечатана в виде препринта [20].

К выводу, что в реакции $^{242}\text{Pu}(^{18}\text{O}, 4n)^{256}\text{Pu}$ был синтезирован изотоп ^{256}Pu ($E_\alpha = 8,42 \pm 0,03$ МэВ, $T_{1/2} = 9 \pm 3$ с), в реакции $^{242}\text{Pu}(^{18}\text{O}, 5n)^{255}\text{Pu}$ был синтезирован изотоп ^{255}Pu ($E_\alpha = 8,09 \pm 0,03$ МэВ, $T_{1/2} = 180 \pm 40$ с).

3.4.4. Синтез изотопов ^{252}Pu , ^{253}Pu , ^{254}Pu и ^{255}Pu . Соотношение о синтезе изотопов ^{252}Pu и ^{253}Pu появилось в 1966 году в препринте ОЯЭИ [21], который затем был напечатан в журнале [22]. В этой работе был дополнительно исследован изотоп ^{254}Pu . Применялась установка, показанная на рис. 4.

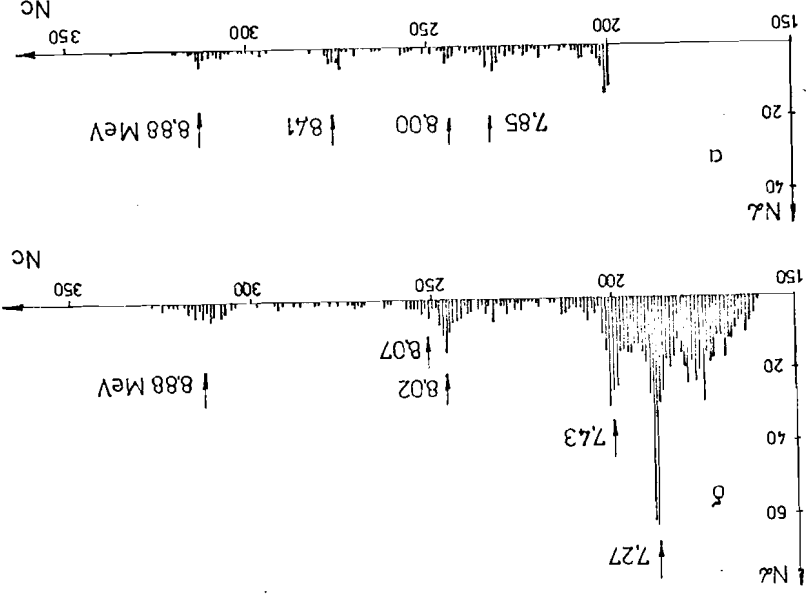


Рис. 8. Спектры α -частиц, измеренные при бомбардировке ^{239}Pu ионами ^{18}O : а) $E_{\text{lab}} = 96$ МэВ, б) $E_{\text{lab}} = 90$ и 96 МэВ (суммарный спектр) (рисунок взят из работы [21, 22]).

Изотоп ^{252}Pu синтезировали в реакции $^{239}\text{Pu}(^{18}\text{O}, 5n)^{252}\text{Pu}$. Спектр α -частиц, полученный при энергии ионов 96 МэВ, приведен на рис. 8а. Измеренная кривая распада активности $E_\alpha = 8,41 \pm 0,03$ МэВ дала период полураспада $T_{1/2} = 4,5 \pm 1,5$ с. Кривая выхода этой активности приведена на рис. 9. Ее форма и положение на энергетической шкале находитесь в хорошем соответствии с расчетом для функции возбуждения реакции $^{239}\text{Pu}(^{18}\text{O}, 5n)^{252}\text{Pu}$.

Для подтверждения того, что был синтезирован изотоп $^{252}_{102}$, авторы работы провели эксперимент, в котором наблюдали α -распад

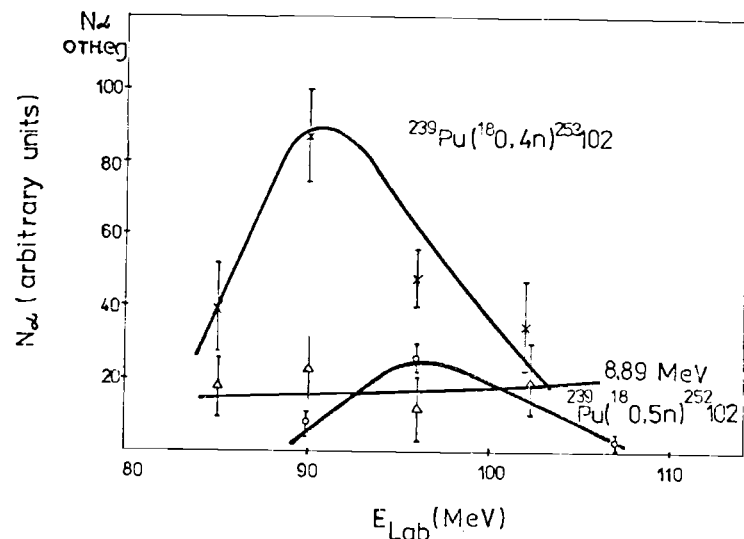


Рис.9. Кривые выхода α -активностей 8,41, 8,01 и 8,688 МэВ в реакции $^{239}\text{Pu} + ^{18}\text{O}$ (рисунок взят из работы [21,22]).

известного нуклида ^{248}Fm - дочернего продукта α -распада $^{252}_{102}$, ядра которого в результате отдачи при α -распаде $^{252}_{102}$ покидали сборник первичных продуктов реакций и вбивались в Si-Au поверхностно-барьерный детектор. Зарегистрировав 30 α -частиц с энергией $8,40 \pm 0,03$ МэВ, авторы в этом опыте наблюдали 3 импульса α -частиц с энергией $7,85 \pm 0,03$ МэВ, отвечавшей α -распаду ^{248}Fm . Авторы ожидали, что число импульсов от α -распада ^{248}Fm будет 7-8. Отклонение вполне объяснялось статистическими ошибками.

В целом полученные экспериментальные данные позволили авторам работы заключить, что ими в реакции $^{239}\text{Pu}(^{18}\text{O},5n)^{252}_{102}$ был синтезирован изотоп $^{252}_{102}$, имеющий $T_{1/2} = 4,5 \pm 1,5$ с и $E_{\alpha} = 8,41 \pm 0,03$ МэВ.

При бомбардировке ^{239}Pu ионами ^{18}O в реакции $^{239}\text{Pu}(^{18}\text{O},4n)$ был получен еще один изотоп 102-го элемента $^{253}_{102}$. Этот изотоп был синтезирован авторами этой работы также и в реакции $^{242}\text{Pu}(^{16}\text{O},5n)^{253}_{102}$. На основании данных, полученных в двух реакциях, авторы указали для этого изотопа такие характеристики: $T_{1/2} = 95 \pm 10$ с, $E_{\alpha} = 8,01 \pm 0,03$ МэВ.

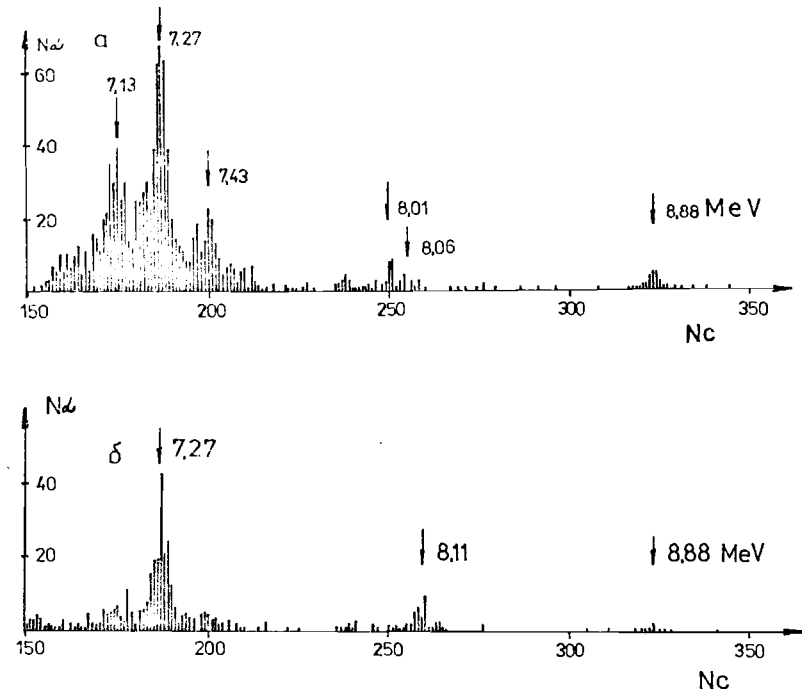


Рис.10. Спектры α -частиц, измеренные при бомбардировке ^{242}Pu ионами ^{16}O . а) $E_{\text{лаб}} = 102$ МэВ, б) $E_{\text{лаб}} = 88$ МэВ (рисунок взят из работы [21,22]).

Суммарный спектр α -частиц, полученный при облучении ^{239}Pu ионами ^{18}O с энергией 90 и 96 МэВ, показан на рис. 86. Период сбора продуктов реакций и измерения α -спектра на Si-Au детекторах был почти в 20 раз больше, чем в случае спектра, данного на рис.8а. Поэтому α -линия 8,41 МэВ от изотопа $^{252}_{102}$ лишь слабо проявила себя, но четко видна линия $8,02 \pm 0,03$ МэВ от α -распада 95-секундного $^{253}_{102}$. Функция возбуждения активности 8,02 МэВ представлена на рис.9. Она полностью соответствует реакции $^{239}\text{Pu}(^{18}\text{O},4n)^{253}_{102}$.

В статье [21,22] приведен также спектр α -излучения, зарегистрированный в случае реакции $^{242}\text{Pu}(^{16}\text{O},5n)^{253}_{102}$, когда энергия ионов ^{16}O равнялась 102 МэВ (см. рис.10а). Для α -линии $8,02 \pm 0,03$ МэВ, принадлежащей $^{253}_{102}$, получена кривая распада и измерена функция возбуждения. Для подтверждения того, что в этих опытах действительно зарегистрирован α -распад изотопа $^{253}_{102}$, авторы поставили специальный опыт, в котором регистрировали α -распад

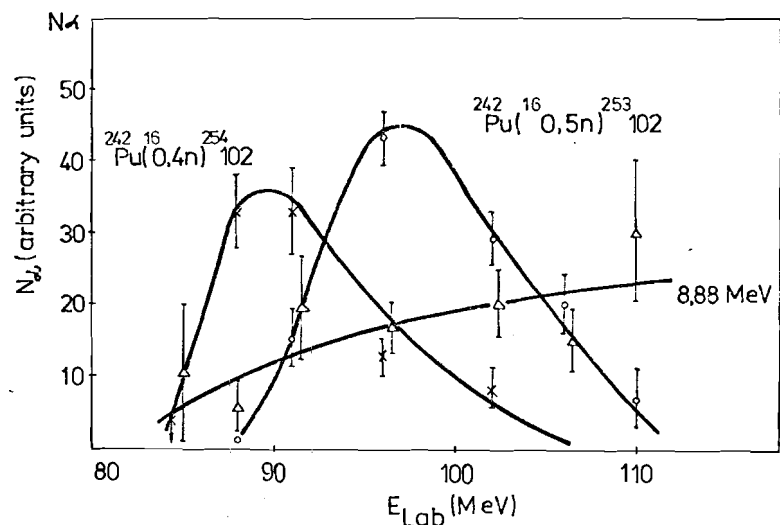


Рис. 11. Кривые выхода α -активностей 8,11, 8,01 и 8,88 МэВ. Кривые соответствуют реакциям: $^{242}\text{Pu}(^{16}\text{O},4n)^{254}_{102}$ (8,11 МэВ), $^{242}\text{Pu}(^{16}\text{O},5n)^{253}_{102}$ (8,01 МэВ) и реакции $\text{Pu} + ^{16}\text{O}$ (8,88 МэВ), протекающей на примеси свинца (рисунок взят из работы [21,22]).

дочерних ядер ^{249}Fm . Зарегистрировав 113 α -частиц с энергией 8,01 МэВ от распада $^{253}_{102}$, они зарегистрировали 3 α -частицы ^{249}Fm ($E_\alpha = 7,52 \pm 0,03$ МэВ) и 5 α -частиц ^{245}Cf ($E_\alpha = 7,10 \pm 0,03$ МэВ). С учетом статистических ошибок этот результат совпал с ожидаемым для цепочки распадов $^{253}_{102} \xrightarrow{\alpha, 8,01 \text{ МэВ}} ^{249}\text{Fm} \xrightarrow{\alpha, 7,52 \text{ МэВ}} ^{245}\text{Cf} \xrightarrow{\alpha, 7,10 \text{ МэВ}} ^{241}\text{Cm}$.

При бомбардировке мишеней ^{242}Pu ионами ^{16}O с меньшей энергией, например, с энергией 88 МэВ, авторы получили в спектре α -излучения линию $E_\alpha = 8,11 \pm 0,03$ МэВ (см. рис. 106). Энергия этой линии совпала с величиной $8,10 \pm 0,05$ МэВ, ранее полученной для изотопа $^{254}_{102}$, синтезированного в реакции $^{243}\text{Am}(^{15}\text{N},4n)^{254}_{102}$ [15]. Период полураспада этого изотопа, измеренный в этом случае, составил $T_{1/2} = 75 \pm 15$ с. Кривая выхода линии 8,11 МэВ (см. рис. 11) совпала с расчетной функцией возбуждения для реакции $^{242}\text{Pu}(^{16}\text{O},4n)^{254}_{102}$.

3.4.5. Изучение спонтанного деления четно-четных изотопов.

Изучение спонтанного деления изотопа $^{254}_{102}$ было начато сразу же после того, как он был синтезирован в Дубне и было выявлено

резкое различие данных Дубны [14,15,21,22] и Беркли [1-3] о периоде полураспада и энергии α -частиц этого нуклида. Проведенные эксперименты описаны в статье [23,24]. Применив для получения ядер $^{254}_{102}$ реакцию $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne},6n)^{254}_{102}$, авторы [23,24] показали, что спонтанное деление очень маловероятно для этого изотопа, частичный период полураспада по отношению к спонтанному делению составляет не меньше 25 часов, то есть отношение величин вероятности спонтанного деления и α -распада $SF/\alpha < 1/1800$.

Таким образом, работа [23,24] показала, что данные группы Беркли о частичном периоде полураспада $^{254}_{102}$ ($T_{SF} = 6$ с) и отношении величин вероятности $SF/\alpha = 1/2$ [2,3] являются ошибочными.

Исследовалась также ветвь спонтанного деления другого четно-четного изотопа $^{256}_{102}$. При бомбардировке мишени из ^{238}U ионами ^{22}Ne авторы работы [36] наблюдали активность спонтанного деления с периодом полураспада около 10 с, которая на основании полученных данных о зависимости выхода от энергии ионов ^{22}Ne могла быть объяснена как проявление слабой ветви спонтанного деления изотопа $^{256}_{102}$, образующегося в реакции $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne},4n)^{256}_{102}$. Однако одновременно было обнаружено [36,37], что в других ядерных реакциях - $^{238}\text{U} + ^{20}\text{Ne}$ и $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ - образуется какой-то спонтанно делящийся нуклид с атомным номером $Z < 100$, имеющий период полураспада $3,5 \pm 0,7$ с. Ввиду того, что при очень малом выходе активности спонтанного деления было трудно отделить события деления $^{256}_{102}$ от деления этого неизвестного нуклида, был сделан вывод, что отношение ветвей спонтанного деления и α -распада изотопа $^{256}_{102}$: $SF/\alpha < 1/200$ [35].

3.4.6. Эксперименты по химии 102-го элемента

В 1967 году в Дубне были проведены опыты по определению химического характера элемента 102 [25] методом фронтальной хроматографии газообразных хлоридов, который до этого использовался для химической идентификации элемента 104.

В работе, в сущности, измерялась скорость движения молекул хлористых соединений изучаемых элементов в некоторой изотермической колонке в потоке хлорирующего газа. Для этого синтезировали атомы $^{256}_{102}$ ($T_{1/2} = 4$ с) и за его поведением следили по распределению дочернего долгоживущего ^{252}Fm ($T_{1/2} = 25$ ч) вдоль колонки.

Было найдено, что при определенных условиях элемент 102, подобно лантаноидам и известным до этого актиноидным элементам (Am и др.), перемещался по колонке очень медленно, в то время как элемент 104 подобно гафнию проходил через колонку без задержки за доли

секунды, благодаря образованию летучего четыреххлористого соединения. Отсюда следовало, что элемент 102 образует нелетучий хлорид, следовательно, его валентность не выше трех, и он является актиноидом. Полностью аналогичные результаты были получены и для элемента 103. Таким образом, результаты этих работ, в совокупности, впервые экспериментально решили вопрос об актиноидном химическом характере элементов 102 и 103 и о верхней границе актиноидного семейства - последним его членом оказался элемент 103.

Эти выводы были позже подтверждены результатами первых опытов по химии растворов элементов 102 - 104, выполненных в Беркли.

3.5. Сумма данных, полученных к октябрю 1966 года

В октябре 1966 года в Дубне состоялась Международная конференция по физике тяжелых ионов, на которой были сообщены изложенные здесь данные о свойствах различных изотопов 102-го элемента, синтезированных дубненской группой. Эти данные суммированы в таблице, в которой приведены также данные, сообщавшиеся в работах группы Беркли, опубликованных в 1958 - 1961 гг., и данные, рекомендованные в современных таблицах изотопов [26,27].

Таблица

Данные о α -распаде изотопов 102-го элемента, полученные в Беркли (1958-1961) и Дубне (1963-1966)

A	T _{1/2} (с)	E _α (МэВ)	Ядерная реакция	Литература	Данные таблиц	
					T _{1/2} (с)	E _α (МэВ)
1	2	3	4	5	6	7
252	4,5 [±] 1,5	8,41 [±] 0,03	²³⁹ Pu(¹⁸ O,5n)	Михеев и др. 1966 [21,22]	2,30	8,41(75%)
	2-40	8,9 [±] 0,4	²⁴¹ Pu(¹⁶ O,5n)	Флеров и др. 1958,1960 [5,6]		
253	90 [±] 10	8,01 [±] 0,03	²⁴² Pu(¹⁶ O,5n)	Михеев и др. 1966 [21,22]	105 ¹⁾	8,01 (100%)
	90 [±] 20	8,02 [±] 0,03	²³⁹ Pu(¹⁸ O,4n)	.	102 ²⁾	8,010 (100%) ²⁾

1	2	3	4	5	6	7
			²⁴⁶ Cm(¹² C,4n)	Гиорсо и др. 1958 [1]		8,10 или 8,11 ¹⁾
254	3		²⁴⁶ Cm(¹² C,4n)	Гиорсо,1959, 1960 [2,3]		
	3	8,3				
	50 [±] 10		²⁴³ Am(¹⁵ N,4n)	Донец и др. 1966 [14]	55	8,100 (85%)
	50 [±] 10	²³⁸ U(²² Ne,6n)		Донец и др. 1966 [14]		8,057 (15%) ²⁾
	20-50	8,10 [±] 0,05	²⁴³ Am(¹⁵ N,4n)	Загер и др. 1966 [15]		
	75 [±] 15	8,11 [±] 0,03	²⁴² Pu(¹⁶ O,4n)	Михеев и др. 1966 [21,22]		
255	15	8,2	Cf(¹¹ B,pxn)	Гиорсо и др. 1961 [4]	198 ¹⁾	
	180	8,08 [±] 0,03	²³⁸ U(²² Ne,5n)	Друин и др., 1966 [16,17]	186 ²⁾	8,121 (45,5%)
	180 [±] 40	8,09 [±] 0,03	²⁴² Pu(¹⁸ O,5n)	Флеров и др. 1966 [19,20]		
256	8 [±] 3		²³⁸ U(²² Ne,4n)	Донец и др. 1964 [7]	3,2 ¹⁾	8,43 или 8,41 ¹⁾
	6 [±] 2	8,41 [±] 0,03	²³⁸ U(²² Ne,4n)	Друин и др. 1966 [16,17]	3,3 ²⁾	8,430(80%)
	9 [±] 3	8,42 [±] 0,03	²⁴² Pu(¹⁸ O,4n)	Флеров и др. 1966 /19,20/		8,220(20%) ²⁾

Примечания к таблице:

Если у данных таблиц (7-я колонка) отсутствует сноска 1) или 2)- это означает, что данные двух цитированных таблиц совпадают.

- 1) Ледерер и Ширли, 1978 [26].
- 2) Вестмайер и Мерклин, 1985 [27].
- 3) Известны 10 α -линий изотопа ²⁵⁵102. Линия 8,121 МэВ - наиболее интенсивная среди этих 10 линий.

3.6. Эксперименты группы Беркли, опубликованные
в PHYSICAL REVIEW LETTERS в 1967 году

В 1967 году, после того как в Беркли стали известны все данные, полученные в Дубне, Гиорсо, Сиккеланд и Нурмиа [28] опубликовали результаты новых экспериментов, выполненных в декабре 1966 года. Бомбардируя мишени из моноизотопных препаратов ^{244}Cm , ^{246}Cm и ^{248}Cm пучками ионов ^{12}C и ^{13}C , они синтезировали семь изотопов 102-го элемента от $^{251}_{102}$ до $^{257}_{102}$. Их данные о характеристиках α -распада пяти изотопов от $^{252}_{102}$ до $^{256}_{102}$ полностью совпали с данными, полученными ранее в Дубне. Наряду с α -распадом изотопа $^{252}_{102}$ ($T_{1/2} = 2,3 \pm 0,3$ с, $E_{\alpha} = 8,41$ МэВ) они обнаружили активность спонтанного деления, с близким периодом полураспада, составлявшую по скорости счета 1/2 от скорости счета α -частиц с энергией 8,41 МэВ, и предположили, что эта активность спонтанного деления также относится к изотопу $^{252}_{102}$. Для другого изотопа, $^{256}_{102}$, они наблюдали слабую ветвь спонтанного деления и смогли указать отношение величины вероятности $SF/\alpha = 1/400$, вместо предела $SF/\alpha < 1/200$, ранее установленного в Дубне [35,36].

Авторы [30] отметили "в качестве предмета исторического интереса", что, по их мнению, изотоп $^{252}_{102}$ впервые был обнаружен в Беркли [2,3]. В качестве аргумента для такой реинтерпретации данных восьмилетней давности приведен только один факт: в 1959 году, когда наблюдали трехсекундную 8,3 МэВ α -активность [2,3], было зарегистрировано также спонтанное деление, выход которого составил 1/2 от выхода α -распада, что оказалось характерно для распада изотопа $^{252}_{102}$.

Возвращаясь к еще более раннему эксперименту [1], Гиорсо, Сиккеланд и Нурмиа [30] заявили следующее: "Мы теперь верим, что ввиду проблем, связанных с разрешением и дрейфом, было возможно спутать 20-мин 7,22 МэВ ^{244}Cf с 30-мин 7,43 МэВ ^{250}Fm . В эксперименте с выдаиванием (так американские авторы называют способ регистрации материнского α -радиоактивного ядра по α -распаду известного дочернего продукта отдачи) ^{244}Cf мог быть получен как внучка двухсекундного $^{252}_{102}$ (реакция $^{244}\text{Cm}(^{12}\text{C}, 4n)$); выход этого изотопа, как мы находим сейчас, согласуется с этой гипотезой. В химических проверочных экспериментах, подтвердивших, что ^{250}Fm был дочкой $^{254}_{102}$, испытавшей отдачу от α -распада, проблема разрешения не играла роли, так как ^{244}Cf в этом случае отделялся катионообменными колонками".

В статье [28] были подвергнуты реинтерпретации и данные другой работы [4]. Было заявлено следующее: "Как часть экспериментов, в которых был открыт элемент 103, лоуренсий, α -частицы с энергией 8,2 МэВ и 15-секундным периодом полураспада были правильно приписаны элементу 102, но сейчас ясно, что они принадлежат изотопу с массой 257, а не 255, как предполагалось в то время".

В 1967 году в популярном журнале "Physics Today" Гиорсо и Сиккеланд [29] опубликовали статью, в которой уделили внимание обоснованию приоритета группы Беркли в открытии 102-го элемента. Авторы утверждали, что в Беркли в 1958-1961 годы было открыто три изотопа 102-го элемента, прежде чем в Дубне впервые был синтезирован изотоп $^{256}_{102}$. Для обоснования этого утверждения приведены следующие доводы.

(1). Изотоп ^{250}Fm был "выдоем из $^{254}_{102}$ в 1958 году". Это, по мнению авторов статьи [31], явилось доказательством присутствия 102-го элемента.

(2). Заявляя, что в работе [1] изотоп ^{244}Cf был ошибочно принят за ^{250}Fm , авторы [29] утверждали, что в 1958 году в Беркли был открыт еще один изотоп 102-го элемента - $^{252}_{102}$.

(3). Было повторено утверждение [28], что α -активность с энергией $E_{\alpha} = 8,2$ МэВ и периодом полураспада $T_{1/2} = 15$ с, обнаруженная в 1961 году [4] и приписанная тогда изотопу $^{255}_{102}$, принадлежит изотопу $^{257}_{102}$, для которого были получены в работе [30] близкие по величине значения энергии α -частиц (8,23 МэВ - 50% и 8,27 МэВ - 50%) и периода полураспада (23 ± 2 с).

3.7. Обсуждение результатов работ Беркли и Дубны,
претендующих на открытие 102-го элемента

Точка зрения дубненской группы на вопрос о приоритете открытия 102-го элемента была изложена в обзорных статьях [30-32].

Вскоре после публикации статей [28,29] в ИЮПАК были формально признаны претензии группы Беркли на открытие 102-го элемента. По-видимому, основанием для признания послужили аргументы, выдвинутые в этих статьях.

Мы убеждены в необоснованности такого признания. Поэтому вернемся к работам, выполненным в Москве, Беркли и Дубне, и проанализируем их, стремясь выявить, в какой мере они удовлетворяют очевидному, на наш взгляд, критерию открытия: наличию доказательств того, что элемент 102 (атомы 102-го элемента, изотоп) был получен в описанном опыте. Доказательства должны быть основаны на ясном изложении условий проведенных опытов, анализе источников фона, его

количественной оценке. Это необходимо, например, для воспроизведения экспериментов, давших доказательство открытия элемента.

Во всех рассматриваемых работах речь шла о доказательствах, основанных на определении свойств ядер (изотопов) нового элемента: периода полураспада, энергии испускаемых α -частиц. Очевидно, что сообщенные величины должны быть достаточно точными. Например, их ошибки не должны превышать уровень, который реально мог быть достигнут с помощью существовавшей в данное время техники измерений. Желательно, чтобы точность данных была достаточной для использования в теории и для полумпирических систематик.

Ранние результаты, полученные в Москве, отличались невысокой точностью измерения энергии α -частиц и периода полураспада. Поэтому авторы работы [5,6] не претендовали на приоритет открытия 102-го элемента. Однако стоит отметить, что в этой работе были приведены исчерпывающие и надежные доказательства того, что наблюдавшаяся при бомбардировке ^{241}Pu ионами ^{16}O группа α -частиц с энергией $8,9^{+0,4}$ МэВ и периодом полураспада (2-40) с не могла быть объяснена фоном свинца. Очевидно, что авторы действительно наблюдали α -распад ядер 102-го элемента, то есть атомы 102-го элемента были получены в их опытах. По-видимому в измерениях с фотомульсией была несколько завышена энергия наблюдавшейся группы α -частиц [30]. Приняв во внимание это завышение, можно предположить, что в московских экспериментах в ядерной реакции $^{241}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 5n)^{252}\text{102}$ был получен изотоп $^{252}\text{102}$ ($T_{1/2}=3$ с, $E_{\alpha}=8,41$ МэВ).

Из суммы данных об элементе 102, полученных к осени 1966 года (см. таблицу в разделе 3.4.4), видно, что в 1963-1966 гг. в Дубне были впервые синтезированы пять изотопов этого элемента с массовыми числами от 252 до 256 и получены правильные данные о времени жизни этих изотопов и энергии α -частиц, испускаемых при α -распаде. Были даны исчерпывающие и скрупулезные доказательства синтеза ядер 102-го элемента, приведены результаты, надежно доказывающие правильность определения массовых чисел изотопов. В ходе этих исследований в Дубне был получен большой объем новой информации о ядерных реакциях, протекающих на пучках тяжелых ионов. Это данные о функциях возбуждения и абсолютных величинах поперечных сечений более чем двух десятков испарительных реакций с участием тяжелых ионов ^{15}N , ^{16}O , ^{18}O , ^{22}Ne и др. и мишеней ^{238}U , ^{239}Pu , ^{242}Pu , ^{243}Am и др., которые использовались непосредственно для синтеза новых нуклидов или исследовались с целью более глубокого понимания процесса образования и распада делящихся компаунд-ядер в новой неизвестной области массовых чисел и атомных номеров. Актуальность этих данных для

познания процессов взаимодействия сложных ядер неоспорима и в настоящее время.

Работы дубненской группы выявили ошибочность результатов и выводов, опубликованных ранее группой Беркли [1-4]. Ясно, что это и явилось причиной проведения повторных экспериментов [28] в Беркли. Не вызывает сомнений и то, что знание правильных свойств пяти изотопов 102-го элемента неизмеримо облегчило задачу, которую решали и быстро решили авторы экспериментов [28]. После этого "задним числом" были предложены новые объяснения результатов старых работ, хотя и сами авторы этих объяснений [29] признали, говоря об одной из этих работ [1], что "невозможно с уверенностью определить причины, по которым произошли ошибки".

Рассмотрим работы по синтезу 102-го элемента, выполненные в Беркли в 1958-1961 гг., с учетом новой интерпретации результатов этих работ, предложенных в 1967 году [28,29].

В статье Гиорсо и Сиккеланда [29] подчеркнута, что изотоп ^{250}Fm был "выдоем из $^{254}\text{102}$ в 1958 году", что явилось первым доказательством присутствия 102-го элемента в работе [1]. Было ли доказательство?

Знакомство с опубликованной статьей [1] показывает, что такого доказательства не было. В самом деле, в статье [1] указано, что в двух экспериментах было проведено химическое выделение фермия из фольги, служившей сборником дочерних продуктов, испытавших отдачу при α -распаде материнских ядер. В результате этих двух экспериментов было зарегистрировано всего 11 атомов фермия, причем их распределение вдоль сборника не исследовалось.

Однако в статье нет данных, доказывающих, что на этот сборник не могли попасть первичные продукты ядерных реакций, а следовательно, и атомы фермия, образовавшиеся непосредственно в реакциях $^{246}\text{Cm}(^{12}\text{C}, \alpha n)^{250}\text{Fm}$ и $^{244}\text{Cm}(^{12}\text{C}, \alpha 2n)^{250}\text{Fm}$. Сами авторы статьи сообщают, что число первичных атомов ^{250}Fm (а также ^{245}Cf и ^{246}Cf) на движущейся ленте было в сотни раз больше числа атомов ^{250}Fm на сборнике дочерних ядер отдачи. Простые оценки показывают, что достаточно было попадания на этот сборник менее 1% первичных атомов ^{250}Fm , чтобы объяснить результат опытов с химическим выделением фермия, не привлекая α -распад гипотетического материнского $^{254}\text{102}$. Авторы статьи не привели данных, которые могли бы исключить это возможное альтернативное объяснение результата их химических опытов. Вместе с тем они упомянули, что на начальной стадии работы им пришлось заниматься фоном первичных атомов ^{246}Cf , которые попадали на сборник дочерних ядер отдачи из-за несовершенства электростати-

ческой экранировки. Заявив, что им удалось снизить фон ^{246}Cf до "пренебрежимо низкого уровня", авторы не привели никаких данных, позволяющих количественно хотя бы грубо оценить этот уровень*. Между тем необходимость количественной оценки фона очевидна, если принять, что в работе [1] (в нехимических опытах) за ^{250}Fm ошибочно принят ^{244}Cf [28,29].

Как показали работы [8,10], механизм сбора электрическим полем первичных продуктов ядерных реакций тяжелых ионов осложнен экранирующим действием плотной плазмы, которая возникает в газе. Наряду с положительно и отрицательно заряженными ионами в газе имеются и нейтральные атомы - первичные продукты реакций. Очевидно, что нейтральные атомы фермия должны были за счет диффузии попадать на различные детали установки, в том числе и на сборник дочерних ядер отдачи.

Нельзя исключить и другую возможную причину попадания ^{250}Fm на этот сборник - существование изомера ^{250m}Fm , который с периодом полураспада около 2 с переходит в основное состояние ^{250}Fm [33]. Отдача при изомерном переходе приводит к отрыву атомов ^{250}Fm от

* В связи с этим вызывает удивление следующее обстоятельство. В статье [1] авторы дважды утверждали, что ^{246}Cf не был обнаружен на сборнике дочерних продуктов α -распада. В пределах одного и того же абзаца сначала говорят о том, что дополнительное экранирование исключило попадание первичного ^{246}Cf на этот сборник ("устранило эту проблему"), а чуть ниже утверждают: "То, что атомы, собранные на этом сборнике, были выбиты с ленты за счет отдачи при α -распаде, подтверждается тем фактом, что ни ^{246}Cf , ни ^{245}Cf , которые были собраны на ленте в намного больших количествах, не были найдены рельефно на сборниках". Следующее сообщение заканчивает этот абзац: "Над движущейся лентой была помещена ядерная эмульсия, чтобы зарегистрировать α -частицы от распада атомов 102-го элемента. Однако этого сделать не удалось, так как число треков от распада ^{250}Fm , ^{246}Cf , ^{245}Cf и др. в сотни раз превышало ожидаемое число треков α -частиц $^{254}\text{102}$ ". Если последнее утверждение верно, тогда как объяснить то, что ^{246}Cf не был обнаружен на сборнике дочерних продуктов α -распада? Простые оценки показывают, что α -распад дочерних атомов ^{246}Cf , выбитых с ленты из-за отдачи при α -распаде первичного ^{250}Fm и собранных на этом сборнике, должен был привести к появлению α -линии ^{246}Cf на уровне, не меньшем, чем 40 α -частиц ^{250}Fm (или ^{244}Cf ?), наблюдавшихся, по утверждению авторов [1], в одном опыте.

поверхности [33], поэтому наличие изомера ^{250m}Fm могло привести к ложному эффекту, имитирующему α -распад $^{254}\text{102}$. Такой вопрос возникает немедленно после знакомства с работой [1]. Он был сформулирован Гольданским [34] еще в 1959 году, задолго до возникновения дискуссии о критериях, предъявляемых к работам, претендующим на открытие новых элементов. К сожалению, авторы работы [1] никогда не пытались ответить на этот вопрос.

Некоторую ясность могло бы внести сравнение измеренных в широком диапазоне энергии бомбардирующих ионов кривых выхода ядер ^{250}Fm , зарегистрированных на сборнике дочерних ядер отдачи, и кривых выхода первичных продуктов реакций (в том числе и первичных ядер ^{250}Fm). К сожалению, кривые выхода (функция возбуждения) в работах [1-3] не приведены. Лишь кратко сказано, что функция возбуждения реакции синтеза ^{250}Fm , собранного на сборнике дочерних ядер отдачи, имела резкий максимум около 70 ± 5 МэВ. Отметим, что в этом случае под ^{250}Fm , как предлагают авторы [28,29], нужно понимать ^{244}Cf . При химическом же выделении фермия никакой речи об измерении кривой выхода не было.

Таким образом, утверждение "изотоп ^{250}Fm был выдоен из $^{254}\text{102}$ в 1958 году" нельзя признать доказанным.

По этим же причинам нельзя признать доказанным и другое утверждение, содержащееся, по сути дела, в статьях [28,29], а именно то, что ^{244}Cf (ошибочно принятый за ^{250}Fm) был выдоен в 1958 году из $^{252}\text{102}$ (через ^{248}Fm).

Предположение о том, что ^{244}Cf был ошибочно принят за ^{250}Fm , представляется целиком умозрительным и произвольным. Оно не подтверждено никакими данными опытов и сведениями в публикациях. В статье [1] отсутствуют не только измеренные спектры α -частиц, но нет даже упоминания об амплитудном разрешении ионизационной камеры, которая применялась авторами для регистрации α -спектров. Нет также данных о стабильности электронного тракта регистрации.

Известно, что ионизационная камера с сеткой Фриша, которая применялась в этих опытах, обычно позволяет получать α -спектры с разрешением 30-60 кэВ. Точность измерения энергии α -линий не должна быть хуже ± 30 кэВ даже при многосуточных измерениях. Поэтому признание авторов работы 1958 года (Гиорсо, Сиккеланд) в том, что они приняли α -линию ^{244}Cf (7,22 МэВ) за линию ^{250}Fm (7,43 МэВ), нельзя принять всерьез за аргумент в пользу их претензии на открытие 102-го элемента, а именно изотопа $^{252}\text{102}$ * (см. сноску на с.58)

характеристиками распада изотопа $^{252}_{102}\text{Po}$ ($E_\alpha = 8,41 \text{ МэВ}$, $T_{1/2} = 2,3 \text{ с}$). Различие в энергии α -частиц (более 100 кэВ) явно выходит за пределы трех стандартных ошибок измерения этой величины, если исходить из известных условий работы ионизационной камеры, примененной в работе [2,3] (к сожалению в [2,3] ошибки измерения энергии α -частиц не приведены).

Авторы [28,29] привлекают в качестве аргумента в пользу своей версии и тот факт, что в работе [2,3] вместе с α -частицами с энергией 8,3 МэВ было обнаружено спонтанное деление с относительным выходом $SF/\alpha = 1/2$ и это совпало с резульатом работы [28], в которой вместе с α -распадом изотопа $^{252}_{102}\text{Po}$ наблюдались спонтанное деление в пропорции $SF/\alpha = 1/2$. Однако и этот повод не является корректным, так как нельзя считать, что в результате работы [28] действительно было установлено существование 30% ветви спонтанного деления у изотопа $^{252}_{102}\text{Po}$. Сами авторы работы в примечании к таблице, приведенной в статье [28], говорят о том, что они не уверены в правильности этого вывода. То, что вопрос о величине парциального периода полураспада этого изотопа по отношению к спонтанному делению не столь прост, показала работа [38], выполненная в Беркли и опубликованная год спустя в 1968 году. Приведенные в ней для реакции $^{244}\text{Cm} + ^{12}\text{C}$ кривые энергетической зависимости выходов α -линии ($E_\alpha = 8,40 \text{ МэВ}$, $T_{1/2} = 2,5 \text{ с}$) и осколков спонтанного деления с периодом полураспада около 2,5 с указывают на то, что в этой реакции образуются, по крайней мере, два разных излучателя спонтанного деления, которые имеют близкие по величине периоды полураспада. Авторы [38] смогли лишь высказать предположение, что наряду с изотопом $^{252}_{102}\text{Po}$ (реакция $^{244}\text{Cm}(^{12}\text{C}, \alpha n)$) образуется изотоп фермия ^{246}Fm (реакция $^{244}\text{Cm}(^{12}\text{C}, \alpha n)$), который имеет период

полураспада $T_{1/2} = 1,1 \text{ с}$ и 10% ветвь спонтанного деления.

Авторы работы [39], выполнившей в Дюбне, синтезировали изотоп $^{252}_{102}\text{Po}$ в реакции $^{18}\text{O}, ^{252}_{102}\text{Pu}$ и наблюдали наряду с его α -распадом ($E_\alpha = 8,41 \text{ МэВ}$, $T_{1/2} = 3 \text{ с}$) активность спонтанного деления с таким же периодом полураспада. Отношение числа осколков деления к числу α -частиц составило $SF/\alpha = 2/3$. Однако эти авторы не сочли возможным объяснить свой результат как показательство ветви спонтанного деления изотопа $^{252}_{102}\text{Po}$, так как активность спонтанного деления с периодом полураспада 3,1 с была ими обнаружена и при бомбардировке мишени ^{233}U ионами ^{18}O . Выход активности спонтанного деления в двух реакциях $^{239}\text{Pu} + ^{18}\text{O}$ и $^{233}\text{U} + ^{18}\text{O}$ был примерно одинаков.

Доказательства существования 30% ветви спонтанного деления у

Таких образом, в работе [1] не было дано показательств открытия $^{102}\text{-Po}$ элемента. В работе были получены методические ошибки. В опубликованной статье отсутствует существенная информация о методике экспериментов (параметры ионизационной камеры, фон) и о принципиально важных экспериментальных данных (кривые выходы активности, α -спектр). В статье были сообщены ошибочные свойства изотопа $^{102}\text{-Po}$ элемента $^{254}_{102}\text{Po}$.

Поэтому работа [1], взятая ли в отдаленности от более поздних работ, опубликованных группой из Беркли, или вместе с более поздними работами, не может претендовать на открытие $^{102}\text{-Po}$ элемента.

Согласно интерпретации, сделанной в 1967 году [28,29], изотоп $^{252}_{102}\text{Po}$ был обнаружен также и в работе Гирсо [2,3], в которой сообщалось о наблюдении при бомбардировке кривой мишени ионами ^{12}C α -активности с энергией 8,3 МэВ, имевшей период полураспада около 3 с, и спонтанного деления с примерно таким же периодом полураспада. Давая такую интерпретацию, авторы [28,29] пытались опровергать ее с помощью характеристик α -активности, упомянутых в работах [2,3], со свойствами изотопа $^{252}_{102}\text{Po}$, впервые установленными в дубненской

работе [21,22] и подтвержденными группой из Беркли [28].

Однако работа [2,3] не может претендовать на открытие $^{102}\text{-Po}$ элемента, так как в ней не приведено ни одного доказательства в пользу вывода о том, что наблюдавшаяся α -активность (энергия α -частиц около 8,3 МэВ, период полураспада - около 3 с) обусловлена распадом нуклида с атомным номером $Z = 102$. Нет оснований говорить и о показанном сходстве характеристик этой α -активности с

* Если допустить, что опытные экспериментаторы рассмотрели такую группу ошибок, немедленно возникает следующий вопрос. В работе [1]

сообщалось, что в максимумы функции возбуждения улавлялось в одном опыте регистрировать на борнике до 40 α -распадов ^{250}Fm . Поверим сообщению, что в максимумы функции возбуждения улавлялось в одном

автоматом работ [28,29], что это был в основном ^{244}Cf , а не ^{250}Fm . Однако в работе [29] сообщается, что в упомянутых экспериментах [1]

с мишенью, в состав которой входило 95% ^{244}Cm и 4,5% ^{246}Cm , выход продукта реакции $^{244}\text{Cm}(^{12}\text{C}, \alpha n)$ $^{252}_{102}\text{Po}$ должен был быть в 3 раза выше, чем выход продукта другой реакции $^{246}\text{Cm}(^{12}\text{C}, \alpha n)$ $^{254}_{102}\text{Cf}$. Следовательно,

40 зарегистрированных α -частиц должны были образоваться две α -линии: $7,22 \text{ МэВ}$ (^{244}Cf) - 30 отсчетов и $7,43 \text{ МэВ}$ (^{250}Fm) - 10 отсчетов. Невыяснено разделение ионизационной камеры в Беркли было столь близким или у нее был такой большой дрейф, что в одном измерении длительно-

строю 1-2 часа нельзя было увидеть эти две α -линии?

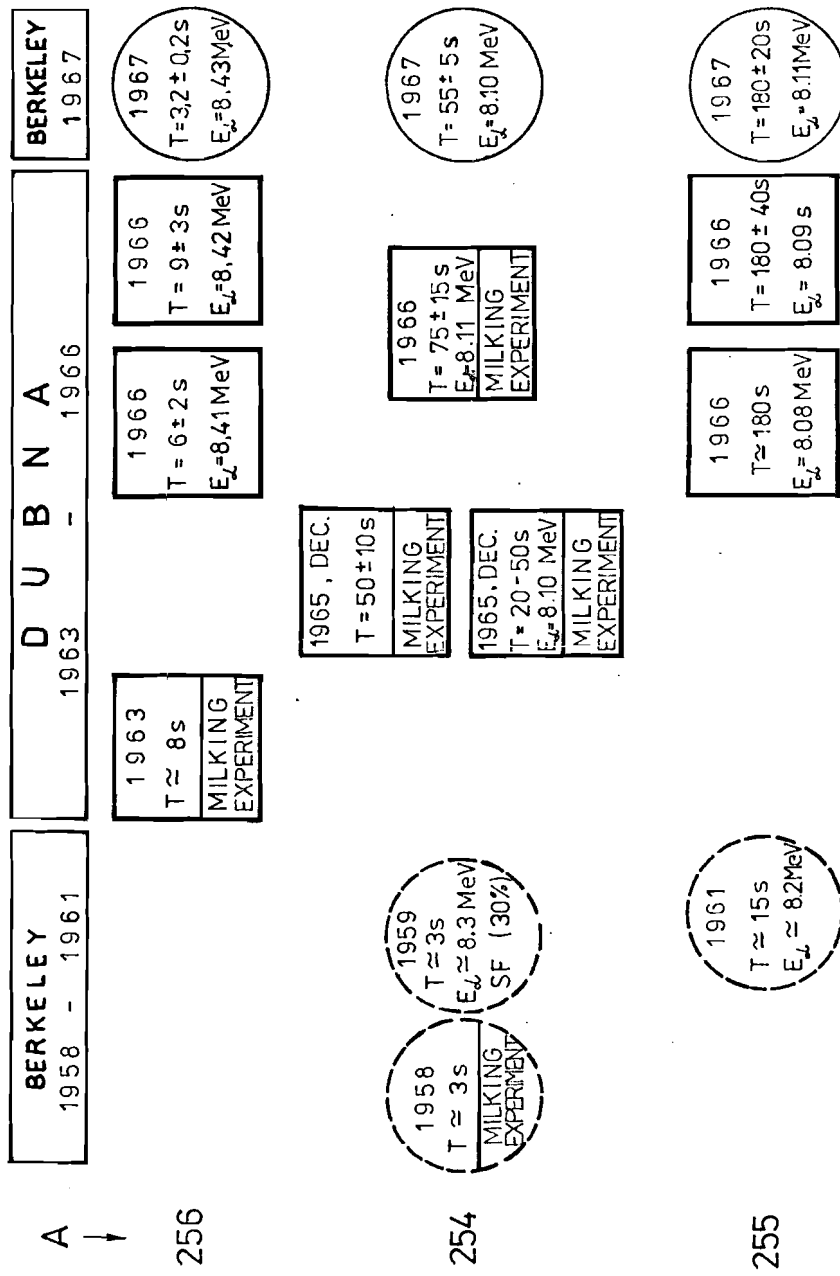


Рис.12. Хронология работ, претендующих на открытие элемента 102. Рассматриваются изотопы с массовыми числами 254, 255 и 256, т.к. только работы, посвященные этим изотопам, претендуют на открытие элемента 102.

изотопа ²⁵²102 были получены значительно позже в работах [40-42], в которых были реализованы некоторые способы идентификации (и исследования) активности спонтанного деления: выделение продуктов реакций (HI, xp) с использованием их узкого по сравнению с продуктами других реакций углового распределения [40], измерение множественности мгновенных нейтронов [41] и кинетической энергии осколков деления [42].

В 1961 году Гиорсо и др. [4] в работе, посвященной элементу 103, вскользь упомянули об обнаружении α-активности с энергией 8,2 МэВ и периодом полураспада 15 с. Авторы сообщили, что эта активность наблюдалась при бомбардировке калифорниевой мишени сложного изотопного состава ионами ¹⁰B, ¹¹B и ¹²C, и привели лишь грубую цифру, характеризующую отношение выхода на пучке ¹²C к выходу на пучке ¹⁰B или ¹¹B (в статье не сообщалось, было ли различие выходов на ¹⁰B и ¹¹B). Только на основании этих данных активность была приписана изотопу ²⁵⁵102. Авторы не привели количественных данных в пользу того, что 102-й элемент был получен в их опытах, то есть они не доказали правильность идентификации атомного номера и массового числа. В работе отсутствует описание условий опытов, отсутствует оценка возможных источников фона.

Поэтому и работа [4] не может претендовать на приоритет открытия 102-го элемента.

3.8. Заключение

На рис.12 показана хронология работ по элементу 102, выполненных в Москве, Беркли и Дубне до 1967 года.

Работа, выполненная в Москве в 1957-1958 гг. [5,6], не претендует на открытие 102-го элемента ввиду низкой точности полученных данных о периоде полураспада и энергии α-частиц синтезированных ядер. Это также привело к ошибочному заключению о массовом числе полученного изотопа.

Работа, выполненная в Беркли в 1958 году [1], не содержала доказательств того, что химически выделенные атомы фермия действительно были дочерними продуктами α-распада ядер 102-го элемента. Эта работа также не содержала доказательств того, что были зарегистрированы ядра ²⁴⁴Cf - внучатые продукты α-распада изотопа ²⁵²102. Следовательно, работа [1] не содержит доказательств наблюдения 102-го элемента. В этой работе были сообщены ошибочные сведения о α-распаде изотопа ²⁵⁴102. В статьях, опубликованных в 1967 году [28,29], хотя и дана новая интерпретация старой работы [1]

однако не приведены доказательства того, что в этой работе наблюдали атомы (ядра) 102-го элемента. Поэтому работа Гиорсо и др. [1] не может претендовать на открытие 102-го элемента.

В работах [2-4] также нет доказательств наблюдения α -распада ядер 102-го элемента. В них были сообщены ошибочные сведения о α -распаде изотопов $^{254}_{102}$ и $^{255}_{102}$. Обнаруженное позже сходство характеристик радиоактивного распада изотопов $^{252}_{102}$ и $^{257}_{102}$ с некоторыми данными, полученными в работах [2-4], не изменило сути дела.

Изотоп $^{252}_{102}$ был открыт Михеевым и др. [21,22]. Эти авторы привели однозначные доказательства наблюдения в их опытах данного нуклида и определили точные характеристики его α -распада. До того, как этот результат был получен и опубликован, автор работы [2,3] не мог объяснить своих данных, хотя уже было известно [14,15], что изотоп $^{254}_{102}$, о котором только и шла речь в его работе [2,3], имеет другие свойства, а не те, которые были приписаны им этому изотопу.

Аналогично изотоп $^{257}_{102}$ был открыт Гиорсо, Сиккеландом и Нурмиа [28]. Только после этого появилась возможность предположить [28,29], что α -линия, наблюдавшаяся в 1961 году Гиорсо и др. [4], принадлежала данному нуклиду. До этого не было никаких доказательств, допускавших возможность такого предположения, хотя было уже известно [16,17,19,20], что изотоп $^{255}_{102}$, которому авторы [4] приписали эту α -линию, имеет совсем другие свойства.

Подчеркнем, что в обоих случаях [2,3] и [4] была дана лишь правдоподобная интерпретация [28,29] результатов старых работ, содержащих ошибочные выводы. Никаких новых доказательств того, что в этих работах наблюдали элемент 102, не было дано.

Поэтому работы [2,3,4], так же как и [1], не могут претендовать на открытие 102 элемента.

Открытие 102-го элемента было сделано в Дубне в работах, выполненных в 1963-1966 гг. (см. таблицу в разд.3.5). В этих работах были приведены однозначные и исчерпывающие доказательства синтеза и наблюдения его ядер и были получены правильные данные о характеристиках α -распада пяти изотопов 102-го элемента.

Литература

1. A.Ghiorso et.al. Phys. Rev. Lett. v.1, p.18 (1958).
2. А.Гиорсо. АЭ т.7, с.338 (1959).
3. A.Ghiorso. In: Proc. of the Second Conf. on Reactions between Complex Nuclei, Gatlinburg 1960. Wiley and Sons, New-York 1960, p.195.
4. A.Ghiorso et.al. Phys. Rev. Lett. v.6, p.338 (1961).
5. Г.Н.Флеров и др. ДАН СССР, т.120, с.73 (1958).
6. Г.Н.Флеров и др. ЖЭТФ, т.38, с.82 (1960).
7. Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков. АЭ, т.16, с.195 (1964).
8. A.Ghiorso. Discovery, November 1961.
9. В.А.Друин, Г.Н.Флеров. В кн.: Физика деления атомных ядер. Москва. Госатомиздат 1962, с.143.
10. В.Л.Михеев. ПТЭ, т.4, с.22 (1966).
11. Г.Н.Акапьев и др. АЭ, т.21, с.243 (1966).
12. R.D.Macfarlane and R.D.Griffioen. Nucl. Instr. Meth. v.24, p.461, (1963).
13. Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков. ЯФ, т.2, с.1015 (1965).
14. Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков. АЭ, т.20, с.223 (1966).
15. Б.А.Загер и др. АЭ, т.20, с.230 (1966).
16. Г.Н.Акапьев и др. ОИЯИ Р-2938, Дубна 1966.
17. В.А.Друин и др. АЭ, т.22, с.127 (1967).
18. В.А.Карнаухов. ЖЭТФ, т.42, с.973 (1962).
19. Г.Н.Флеров и др. ЯФ, т.5, с.1186 (1967).
20. Г.Н.Флеров и др. ОИЯИ Р-3059, Дубна 1966.
21. В.Л.Михеев и др. ОИЯИ Р-2839, Дубна 1966.
22. В.Л.Михеев и др. АЭ, т.22, с.90 (1967).
23. G.N.Flerov, V.I.Kuznetsov, N.K.Skobeliev. JINR E7-3043, Dubna 1966.
24. Г.Н.Флеров, В.И.Кузнецов, Н.К.Скобелев. АЭ т.22, с.494 (1967).
25. Ю.Т.Чубурков и др. ОИЯИ Р6-3076, Дубна 1966; Радиохимия т.9, с. 637 (1967).
26. C.M.Lederer and V.S.Shirley. Table of Isotopes, Seventh Ed. John Wiley & Sons, New-York (1978).
27. W.Westmeier and A.Merklin. Physics Data, Fachinformationszentrum Karlsruhe N 29-1 (1985).
28. A.Ghiorso, T.Sikkeland and N.J.Nurmi. Phys. Rev. Lett. v.18, p.401 (1967).
29. A.Ghiorso and T.Sikkeland. Physics Today, v.20, p.25 (1967).

30. Г.Н.Флеров. АЭ, т.24, с.5 (1968).
G.N.Flerov. Ann. Phys. v.2, p.311 (1967).
31. Г.Н.Флеров, И.Звара. ОИЯИ Д7-6013 (1971).
32. G.N.Flerov, G.M.Ter-Akopian. Prog.Part. Nucl. Phys. v.19, p.197(1987).
33. A.Ghiorso et al. Phys. Rev. C, v.7, p.2032 (1973).
34. В.И.Гольданский. УФН, т.67, с.186 (1959).
35. Г.Н.Флеров и др. В кн: Труды международной конференции по физике тяжелых ионов. Дубна, 1966. Выпуск 2. "Синтез и исследование свойств изотопов трансурановых элементов". ОИЯИ Д7-3548, Дубна, 1967.
36. В.А.Друин и др. ОИЯИ Р-1580, Дубна, 1964.
37. В.А.Друин и др. ОИЯИ Р-1651, Дубна, 1964.
38. T.Sikkeland, A.Ghiorso, M.J.Nurmia. Phys.Rev., v.172, p.1232 (1968).
39. Г.Н.Флеров и др. ЯФ, т.7, с.977 (1968).
40. Ю.Ц.Оганесян и др. АЭ, т.28, с.393 (1970).
41. Ю.А.Лазарев и др. Phys.Lett. v.52B, p.321 (1974).
42. C.E.Bemis et al. Phys.Rev.C, v.15, p.705 (1977).

4. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТА 103

4.1. Работы Радиационной лаборатории им. Лоуренса, Беркли, США по "лоуренсию"

В течение 1958-1961 гг. в Беркли делались неоднократные попытки синтезировать элемент 103 при облучении мишеней из кюрия и калифорния соответственно ионами азота и бора. К этому времени вступил в действие линейный ускоритель MILAG, который давал пучки указанных ионов разумной интенсивности. В реакторах с повышенным потоком тепловых нейтронов были накоплены тяжелые изотопы Og и Cf для мишеней.

Синтез намеревались провести в реакциях (Nl, xp) . Их малое эффективное сечение предопределяло трудности идентификации новых элементов, регистрируемых по α -излучению. Особую опасность представляли фоны от α -излучения в области Po-Ra , получающиеся на примесях Pb и Bi , которые могли имитировать α -частицы нового элемента. На это указывалось в работах группы Флерова, работавшей над синтезом элемента 102 в Москве [1]. Поэтому очистка мишени и выбор метода идентификации нового элемента имел решающее значение.

Химическая идентификация не была возможной из-за слишком малого времени жизни изотопов, которые можно было надеяться синтезировать. Из физических методов в принципе наиболее достоверным можно считать установление генетической связи между неизвестным нуклидом и его дочерним продуктом с хорошо известными радиоактивными свойствами через α -распад [2]. Этот подход группа Гиорсо применила в предшествующей работе - попытке синтеза элемента 102 [3]. Другим аргументом, дополняющим первый, но при определенных условиях имеющим самостоятельную доказательную силу, является установление соответствия между зависимостью выхода наблюдаемого нуклида от энергии бомбардирующих ионов и ожидаемой функцией возбуждения постулируемой реакции. Такой метод определенно применим в определенных случаях - если мишень является моноизотопной и реакция "испарительной" - (Nl, xp) .

Таковы были, на наш взгляд, материальные и идейные предпосылки для проведения экспериментов по синтезу элемента 103 в Беркли в начале 60-х годов.

Хронология попыток синтезировать элемент 103 такова. Первые эксперименты относятся к 1958 году [3]. Мишень из ^{244}Og (95%) и ^{246}Og (4%) облучалась ионами ^{14}N . Продукты ядерных реакций, выбитые

из мишени и заторможенные в газе, собиравшись электростатическим

осаждением ионизованных атомов на сборник. Альфа-излучение собранных

продуктов детектировалось фотосмульсией. Наблюдалась слабая

«активность» с энергией 9 ± 1 МэВ и периодом полураспада около 0,25 с.

Она очень предположительно была приписана изотопу $^{256}_{103}$ Cf.

реакции $^{246}_{98}\text{Cm}(n,4n)^{256}_{103}\text{Cf}$. Для доказательства этого утверждения

требовались дополнительные эксперименты, однако авторы [3] никогда

не сообщали о продолжении этой работы. Возможно, это было связано с

проникшей радиационной аварией, разрушением криебой мишени в

одном из экспериментов [4].

В 1960 г. Горсо [5] сообщил об опытах по синтезу изотопа

$^{259}_{103}\text{Cf}$. Мишень из калифорния массой около 1 мг, содержащую $^{252}_{98}\text{Cf}$,

облучали нейтронным излучением $^{259}_{103}\text{Cf}$ путем

установления его генерической связи с известным $^{255}_{94}\text{Pu}$ в цепочке

$^{259}_{103}\text{Cf} \xrightarrow{\alpha} ^{255}_{94}\text{Pu} \xrightarrow{\beta^-} ^{255}_{95}\text{Am} \xrightarrow{\beta^-} ^{255}_{96}\text{Cm} \xrightarrow{\beta^-} ^{255}_{97}\text{Bk} \xrightarrow{\beta^-} ^{255}_{98}\text{Cf}$.

используя метод «двойной отдачи» [3] (см. раздел об элементе 102). На

сборнике дочерних продуктов был обнаружен $^{255}_{98}\text{Pu}$ и его распределение

вдоль сборника соответствовало $T_{1/2} = 0,2$ с для $^{259}_{103}\text{Cf}$. Но

контрольные опыты показали, что $^{255}_{98}\text{Pu}$ появлялся в результате

«проецивания» на сборник непосредственно из зоны облучения первич-

ных атомов $^{255}_{98}\text{Pu}$, которые получались в реакции $^{252}_{98}\text{Cf}(n,4n)^{255}_{98}\text{Pu}$.

Это следовало из того факта, что при существенном замедлении

скорости транспорта первичных атомов в зону сбора дочерних продуктов

счет $^{255}_{98}\text{Pu}$ не попадал. Об этом же свидетельствовало обнаружение на

сборнике $^{256}_{98}\text{Pu}$ из реакции $^{252}_{98}\text{Cf}(n,4n)^{256}_{98}\text{Pu}$, который наблюдался по

спонтанному делению дочернего $^{256}_{98}\text{Pu}$. Все это определение показывало

на несовершенство примененной экспериментальной методики.

В третьей попытке берклиевская группа вернулась к прямому

наблюдению «распада элемента 102 в продуктах реакции. На этот раз

использовались поверхность-барьерные спектрометрические детекторы

«частиц с распределением 50 квВ. Результаты группы Горсо опубликовала

в 1961 г. [6]. В работе сделана заявка на приоритет открытия

элемента 102 и предположено назвать элемент «люденцем».

¹¹ В синтезе осуществлялся в реакциях Cf(B, xn)102 на пучках нейтронов

^{10}B . Мишень с массой 3 мкг имела сложный изотопный состав ($^{240}\text{Cf} -$

3% , $^{250}\text{Cf} - 33\%$, $^{251}\text{Cf} - 12\%$, $^{252}\text{Cf} - 51\%$). Были приняты специальные

меры для очистки материала мишени от примесей Pu и Bt. Продукты

ядерных реакций выявлялись из мишени в атмосфере гелия, торсионным

в нем и затем переносились слябом газовым потоком через отверстие

диаметром около 1 мм к орициально заряженной ленте, сужившей

сборником. Лента периодически, пыжами, перемещалась, чтобы переносить продукты ядерных реакций последовательно к 5 спектрометрическим «детекторам».

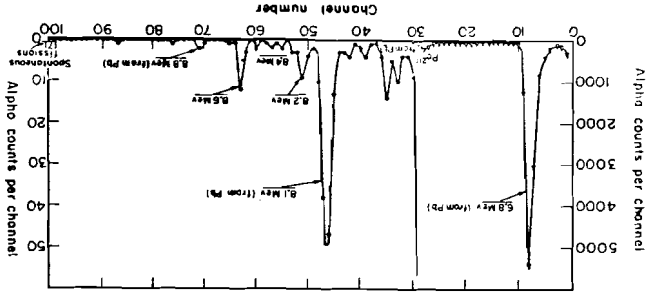


Рис. 1. Ca + ¹¹B. Альфа-спектр, полученный на 1-м детекторе. Суммарные данные опытов № 139-148. Полный поток нейтронов 5,0 А.ч. Длительность цикла 15 с.

В спектрах, как показано на рис. 1, была обнаружена «актив-ность» с $E_{\alpha} = 8,6$ МэВ. Утверждается, что ее измеренное значение $T_{1/2}$ составило $8 \cdot 10^{-2}$ с. Конкретный количественный материал, представленный в статье, сравнивается одним этим рисунком, другие результаты лишь констатируются словесно. Авторы приписали эту «активность» нуклиду $^{257}_{103}\text{Cf}$ по следующим соображениям.

При облучении мишеней из Pu, Bt, ^{240}Pu и ^{241}Am нейтронами ^{10}B и ^{11}B данную активность не наблюдали. Непринятость $8,6$ МэВ-активности к легким изотопам мendelevия исключалась тем, что ее не зарегистрировали при облучении ^{241}Am нейтронами ^{12}C .

Авторы также привели соображения относительно массового числа изотопа, испускающего $8,6$ МэВ «частицы». По их мнению это был $^{257}_{103}\text{Cf}$, так как наблюдавшаяся функция возбуждения была очень широкими как при облучении нейтронами ^{10}B , так и нейтронами ^{11}B . Это могло быть только в случае образования искомого нуклида сразу в нескольких реакциях ($x=3-6$) на разных изотопах Cf-мишени.

Возможность того, что активность с $E_{\alpha} = 8,6$ МэВ принадлежит какому-либо изотопу 102-го элемента из реаклий типа (B, xn), исключалась, по мнению авторов, на основании следующих соображений и данных. Наблюдаемая в спектре «активность» с $E_{\alpha} = 8,2$ МэВ (рис. 1), для которой они дают $T_{1/2} = 15$ с, была или предположительно отнесена к

²⁵⁵102. При облучении той же Cf-мишени ионами ¹²C (энергия не приводится) выход 8,2 МэВ-активности увеличился в 20 раз, а выход 8,6 МэВ-активности упал в 2 раза. Это явилось, по мнению авторов, окончательным доказательством того, что 8,6 МэВ-активность принадлежит изотопу элемента 103, так как якобы подобное соотношение можно было ожидать на основании опытов с ²⁴⁰Pu. "Эксперименты с ²⁴⁰Pu показали, что сечение (¹²C, αxn) должно быть больше, а сечение (¹²C, pxn) меньше по сравнению с облучением калифорния бором".

В 1965 году в Дубне был открыт ²⁵⁶103 [7] и в 1967 году было показано [8], что ²⁵⁷103 не имеет свойств, указанных в берклиевской работе 1961 года [6]. Заметим, в 1967 г. в Дубне было показано, что и ²⁵⁵102 не имеет свойств, приписанных ему в [6] (см. раздел об элементе 102). Вскоре Сиборг, не являвшийся автором [6], в 1967 году в обзоре [9] пишет: "...сейчас кажется более вероятным, что эта активность (т.е. "²⁵⁷103" от 1961 года - примечание наше) должна быть приписана ²⁵⁸103 или ²⁵⁹103". Наконец, в работе Эскола, Гиорсо и др. [10] 1971 года по изотопам 103 элемента с A=255-260 сказано следующее: "В настоящей работе показывается, что ²⁵⁷Lg имеет период полураспада 0,6 с и наиболее интенсивную α-группу 8,87 МэВ. Определение изотопа, имеющего 8,6 МэВ-активность, которое согласуется как с результатом 1961 года, так и с приведенными здесь, есть ²⁵⁸103. Различие в значениях периода полураспада обусловлено относительно бедной статистикой в первой работе".

Этими двумя цитатами пока ограничивается ответ берклиевской группы на тот факт, что выводы работы [6] не подтвердились. Со ссылками на такую реинтерпретацию авторы из Беркли в прошлом и сейчас настаивают на своем приоритете открытия элемента 103.

4.2. Анализ берклиевской работы [25] по "лоуренсию"

Сразу после реинтерпретации работы [6] Сиборгом [9] (см. цитату выше) Донец и др. в обзоре [11] подвергли тщательному разбору саму работу [6] и ее ревизию [9] и высказали серьезную критику. Наш собственный анализ показал, что на самом деле возникает еще больше вопросов.

Из одного факта наблюдения ранее неизвестной (а может быть просто неопознанной) активности нельзя, разумеется, делать каких-либо далеко идущих выводов. Проанализируем аргументы работы [6] в подтверждение правильности идентификации атомного номера Z в той последовательности (по всей вероятности, по хронологии проведения опытов), в которой они приведены в оригинальной статье. Сначала

отмечается, что наряду с активностью E_α=8,6 МэВ и T_{1/2}=8[±]2 с в спектрах наблюдались также α-частицы с энергиями 8,4 и 8,2 МэВ и близкими периодами полураспада около 15 с". Далее по ходу статьи говорится только об энергии 8,2 МэВ и постулируется (без основания), что это ²⁵⁵102. Как теперь известно, этот нуклид имеет E_α=8,1 МэВ и T_{1/2}=3 мин, т.е. совсем другие свойства. Авторы [6] специально подчеркивают, что наблюдение этих активностей воспроизводилось на протяжении нескольких недель проведения опытов при облучении как ионами ¹⁰B, так и ¹¹B. Это, конечно, необходимый признак реальности существования активностей, но не более того.

Далее приводится первый аргумент: "Облучение Pb, Bi, ²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am ионами ¹⁰B и ¹¹B не приводит к этим новым активностям" (по-видимому, имеются ввиду три активности). Условия облучения (энергия ионов, флюенс) не описываются и поэтому невозможно судить об уровне значимости отрицательного результата. Если предположить, что он достаточно высок и что энергия ионов менялась в необходимом диапазоне, то из опытов с облучением ²⁴⁰Pu + ^{10,11}B следует, что новые активности не могли быть обусловлены изотопами Es с массовыми числами <248 или продуктами их распада. Аналогично этому облучения ²⁴¹Am + ^{10,11}B дают предел A<249 для изотопов Fm и их продуктов распада. Здесь следует отметить, что к 1961 г. не был правильно идентифицирован ни один изотоп элемента 102, а для Md были известны только изотопы ²⁵⁵Md и ²⁵⁶Md. Таким образом, между указанными пределами для изотопов Es и Fm и синтезированным, по предположению ²⁵⁷103 (а тем более ²⁵⁸103 или ²⁵⁹103), оставалось большое поле неизвестных тогда изотопов Md и элемента 102, которые нельзя было исключить на основании облучения ²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am.

Авторы полагают, что в условиях их опытов могут происходить реакции слияния ядер Cf и B с испарением из составного ядра от 3 до 6 нейтронов, т.е. реакции типа Cf(B, xn)103. Для наглядности представим значения "x" этих реакций в таблице 1.

Таблица 1

Мишень	Реакции Cf(¹⁰ B, xn)103			Реакции Cf(¹¹ B, xn)103			Продукт
	²⁵² Cf	²⁵¹ Cf	²⁵⁰ Cf	²⁵² Cf	²⁵¹ Cf	²⁵⁰ Cf	
состав	51%	12%	33%	51%	12%	33%	
	3	-	-	4	3	-	²⁵⁹ 103
	4	3	-	5	4	3	²⁵⁸ 103
	5	4	3	6	5	4	²⁵⁷ 103
	6	5	4	7	6	5	²⁵⁶ 103

Заметим, что сечения реакций с $x=4$ и $x=5$ в максимуме кривых возбуждения почти равны, причем они на порядок выше максимальных сечений для $x=3$ и в несколько раз выше, чем сечения для $x=6$. Сечение на ^{250}Cf примерно в два раза ниже, чем на ^{252}Cf . Реакции с $x=1$ и $x=2$ практически не идут, поэтому не включены в табл.1. Далее, сечения для $x=3$ и $x=4$ достигают максимума при одной и той же энергии ионов В (59 МэВ), но для $x=5$ и $x=6$ максимумы сечений смещаются на несколько МэВ выше по энергии (64 и 80 МэВ для ^{11}B , 65 и 75 МэВ для ^{10}B). Ширина кривых возбуждения составляет 8-10 МэВ на половине высоты максимума. Именно по отношению к такому "стандарту", характеризующему узкую кривую возбуждения, следует понимать словесную характеристику ширины кривых возбуждения в [6]. Эти закономерности иллюстрируются рис. 2. Если теперь учесть все указанные свойства кривых возбуждения, а также изотопный состав мишени, то мы вправе ожидать следующий характер зависимости эффективного сечения от энергии ионов (здесь мало подходит термин "кривая возбуждения", использованный в [6]):

- кривая для $^{259}\text{103}$ должна быть узкой при облучении ионами как ^{10}B , так и ^{11}B ,
- кривая для $^{259}\text{103}$ должна быть узкой при облучении ^{10}B и чуть шире в случае ^{11}B ,
- кривая для $^{257}\text{103}$ должна быть широкой при облучении ^{10}B и очень широкой в случае ^{11}B ,
- кривые для $^{256}\text{103}$ должны быть широкими при облучении как ^{10}B , так и ^{11}B .

Нет сомнения, что на основании точно такого анализа авторы [6], наблюдая "очень широкую кривую", приписали новую активность $^{257}\text{103}$. Самой кривой в работе нет и даже нет указания, в каких пределах по энергии ионов она измерялась. Поэтому трудно судить, почему не рассматривались более легкие изотопы, чем $^{257}\text{103}$. Что же касается изотопов $^{259}\text{103}$ и $^{258}\text{103}$, то для них кривая возбуждения должна быть узкой, что противоречит экспериментальным наблюдениям в [6]. Поэтому попытки Сиборга [9] и Эскола и др. [10] реинтерпретировать результаты [6] представляются не только необоснованными, но и несостоятельными.

Авторы [6], отметив, что для $^{257}\text{103}$ кривая выхода "по необходимости" очень широкая, сделали затем по непонятным причинам логически неправильный шаг. Они как бы утверждают, что эта кривая является еще одним аргументом в пользу правильности идентификации $^{257}\text{103}$, отмечая, что для "окончательного доказательства" осталось еще исключить возможность реакций (B, xn) , в которых образуется элемент

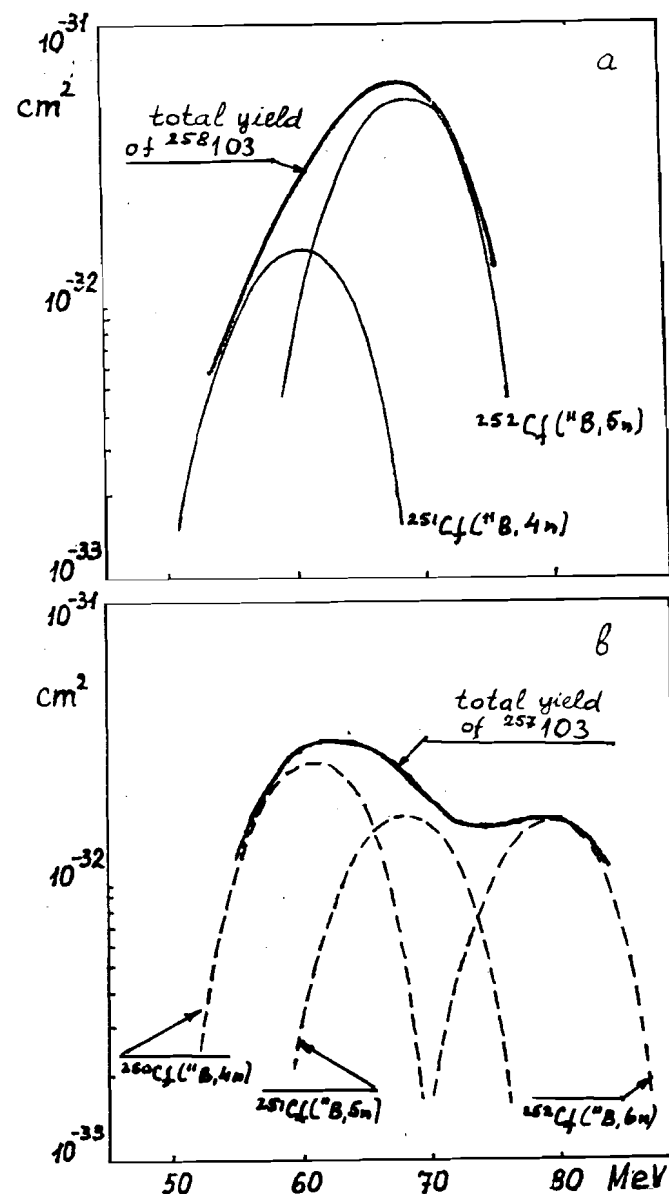


Рис. 2. Расчетные кривые выхода:
 а) $^{258}\text{103}$ из реакций $^{251}\text{Cf}(^{11}\text{B}, 4n)$ и $^{252}\text{Cf}(^{11}\text{B}, 5n)$,
 б) $^{257}\text{103}$ из реакций $^{250}\text{Cf}(^{11}\text{B}, 4n)$, $^{251}\text{Cf}(^{11}\text{B}, 5n)$, $^{252}\text{Cf}(^{11}\text{B}, 6n)$.

102 (см. ниже) и которые нельзя отбросить по форме кривой выхода. Здесь надо подчеркнуть, что "очень широкая кривая" не дает ни малейшей информации для идентификации Z и A, поскольку все типы ядерных реакций, которые могли иметь место в опытах [6], имеют кривые возбуждения с максимумом, и на немоноизотопной мишени кривые выхода должны быть по необходимости очень широкими (за исключением, возможно, кривых для $^{259}_{103}$ и $^{258}_{103}$).

"Окончательным доказательством", что Z=103 (по-видимому, авторы не претендовали на достаточность одного этого аргумента), явились результаты облучения той же Cf-мишени ионами ^{12}C . Выход предполагаемого $^{255}_{102}$ в ожидаемой реакции ($^{12}\text{C}, \alpha xn$) увеличился в 20 раз, а выход предполагаемого $^{257}_{103}$, ожидаемого по реакции ($^{12}\text{C}, pxn$), уменьшился в 2 раза. В то же время "эксперименты с ^{240}Pu показали, что сечение ($^{12}\text{C}, \alpha xn$) будет больше, а сечение ($^{12}\text{C}, pxn$) меньше по сравнению с облучением калифорния бором". И далее отмечается, что "легкие изотопы Md, которые могли бы получаться и которые вполне могли бы излучать α -частицы в области 8,2-8,6 МэВ, исключались по результатам облучения ^{243}Am ионами ^{12}C ".

В этом пункте как бы утверждается, хотя сказано это не совсем ясно, что приведенные количественные соотношения выходов, измеренные на Cf-мишени, похожи на результаты аналогичных опытов с Pu-мишенью. Однако никакие результаты по облучению ^{240}Pu не приводятся (все ограничивается приведенной цитатой), и они не были опубликованы и позже.

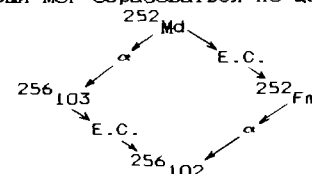
Первым естественным требованием для принятия подобной аргументации к рассмотрению является правильная идентификация нуклидов, о которых идет речь. Как отмечалось выше, свойства $^{257}_{103}$ и $^{255}_{102}$ совершенно другие, чем им приписывались авторами [6]. Далее, все реакции (HI, xn), (HI, pxn) и (HI, α xn) имеют кривые возбуждения с максимумами (на энергетической шкале), которые для данного иона и значения "x" могут отстоять друг от друга на 10-20 МэВ. В зависимости от энергии ионов отношение сечений этих реакций может меняться на один-два порядка. Поэтому данные об отношении сечений без указания энергии ионов, при которых оно было измерено, не могут ни подтвердить, ни опровергнуть какое-либо предположение.

Облучение $^{243}\text{Am} + ^{12}\text{C}$ в принципе позволяет получить изотопы Md с массовым номером 252 или ниже. Опять же не указывается диапазон энергии ионов ^{12}C и чувствительность опытов в терминах сечения, поэтому нижний предел "проверенных" массовых номеров не ясен. Заметим в этой связи, что ^{248}Md весьма похож на одну из трех активностей, которые обсуждаются в [6].

Как видно из приведенного анализа, в работе [6] практически отсутствуют количественные характеристики экспериментальных данных и условий их получения (энергия ионов, эффективность собирания атомов, эффективность α -счета, чувствительность по сечениям и др.). Поэтому она в таком виде даже в принципе не может быть подвергнута экспериментальной проверке. Позже авторы явно согласились с тем, что их идентификация наблюдаемых нуклидов была ошибочной. Но предложив реинтерпретацию результатов [6] в пользу открытия $^{258}_{103}$ [9,10], они не сделали даже попытки сопоставить детально новую интерпретацию с материалом статьи [6]. Очевидно, что один факт близости определенных позже в [10] радиосвойств свойств $^{258}_{103}$ ($E_\alpha=8,6$ МэВ, $T_{1/2}=4$ сек) и свойств той активности, которая наблюдалась в [6] и приписывалась $^{257}_{103}$, нельзя считать обоснованием заявки на открытие элемента 103. Донец и др. [11] и мы в настоящем обзоре отметили многочисленные моменты, которые противоречат этому. Статья [6] не содержит сколько-нибудь серьезных аргументов в пользу идентификации Z. Вспомогательные облучения не охватывали всю область нуклидов, которую следовало исключить. Результаты единственной попытки перекрестного облучения не имеют доказательной силы. Измеренная зависимость выхода 8,6 МэВ-активности без указания интервала энергий ионов, в котором проводились измерения, ничего не дает для идентификации Z=103 и исключает возможность приписать эту активность $^{258}_{103}$ или $^{259}_{103}$.

4.3 Работы по синтезу элемента 103 в Дубне

В Дубне работы по синтезу элемента 103 были начаты в 1965 году. В работе Е. Д. Донца и др. [7] был синтезирован изотоп $^{256}_{103}$ в реакции $^{243}_{18}\text{Am}(^{18}\text{O}, 5n)^{256}_{103}$. Идентификация $^{256}_{103}$ осуществлялась по внучатому $^{252}_{102}\text{Fm}$, который мог образоваться по цепочкам



Методика обеспечивала идентификацию независимо от того, испытывает ли $^{256}_{103}$ α -распад или электронный захват. Использовалась та же аппаратура (рис. 3), что и при синтезе $^{256}_{102}$ [12]. Продукты ядерных реакций выбивались из мишени в заполненное аргоном замкнутое

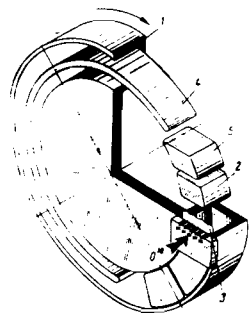


Рис. 3. Схема устройства для синтеза изотопа $^{256}_{103}\text{Fm}$ и накопления продукта его распада $^{252}_{\text{Fm}}$: 1 - медный диск с кольцевым углублением на периферии, 2 - механические пробки, ограничивающие околомишенное пространство, 3 - мишень из $^{218}_{\text{Am}}$ на Al-подложке, 4 - сборник дочерних продуктов (под электрическим потенциалом - 25 В), 5 - "электрические" пробки, препятствующие "просачиванию" первичных продуктов ядерных реакций из околомишенного пространства в зону сбора дочерних продуктов (под электрическим потенциалом - 25 В).

пространство, тормозились в газе и диффундировали на стенки кольцевого углубления в диске, переносившего их при вращении из околомишенного пространства в зону сбора дочерних продуктов. Нуклиды, образовавшиеся в результате α -распада, будучи заряженными, переносились в газе электрическим полем на поверхность некоторого сборника. Фермий, как продукт радиоактивного распада $^{256}_{103}\text{Fm}$, выделялся химически из материала сборника с помощью ионообменных методов. Альфа-активность фермиевой фракции измерялась на α -спектрометре с поверхностно-барьерными детекторами.

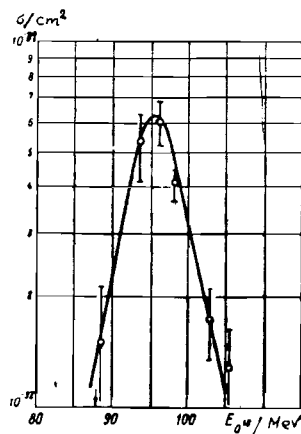


Рис. 4. Функция возбуждения реакции $^{243}_{\text{Am}}(^{18}\text{O}, 5n)^{256}_{103}\text{Fm}$, полученная по выходу $^{252}_{\text{Fm}}$ - дочернего продукта $^{256}_{103}\text{Fm}$.

Путем выделения $^{252}_{\text{Fm}}$ были измерены функция возбуждения реакции $^{243}_{\text{Am}}(^{18}\text{O}, 5n)^{256}_{103}\text{Fm}$ (рис. 4) и период полураспада $^{256}_{103}\text{Fm}$ (рис. 5), который оказался равным 45 ± 10 с. Предварительно в контрольном опыте [13] был синтезирован изотоп $^{252}_{102}\text{Md}$ и найдено, что он имеет $T_{1/2} = 8$ мин. Свойства $^{256}_{102}\text{Md}$ к этому времени также были известны. Это

означало, что $^{256}_{103}\text{Fm}$ испытывает в основном α -распад.

В 1967 г. в Дубне были продолжены эксперименты по синтезу

изотопов элемента 103. Работа велась двумя группами на разных экспериментальных устройствах, в которых использовался метод сбора продуктов ядерных реакций из газовой струи [14]. Детектировалось непосредственно α -излучение продуктов, их идентификация проводилась

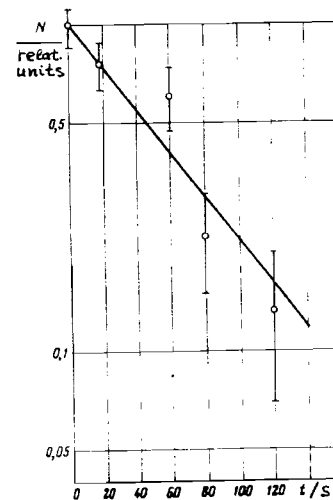


Рис. 5. Кривая распада $^{256}_{103}\text{Fm}$, полученная по выходу $^{256}_{103}\text{Fm}$ ($T_{1/2} = 45 \pm 10$ с).

по функциям возбуждения соответствующих ядерных реакций и с использованием перекрестных облучений. Большое внимание было уделено тщательной очистке мишеней от примесей свинца. Результаты исследований были опубликованы в [15,16].

На рис. 6 из работы [15] показаны спектры α -излучения продуктов облучения $^{243}_{\text{Am}}$ ионами ^{18}O с энергиями 91 и 96 МэВ. Группы α -частиц в диапазоне 8,35-8,60 МэВ связывались с распадом $^{256}_{103}\text{Fm}$. Появление группы с энергией 8,8 МэВ было обусловлено примесями Рз в

материале мишени. Как следует из α -спектра на рис. 6 в, полученного при облучении свинца, фон от примесей свинца в опытах по синтезу $^{256}_{103}\text{Fm}$ в диапазоне 8,3-8,6 МэВ, определенный путем калибровки по линии с $E_{\alpha} = 8,8$ МэВ, не превышал 10%. Измеренное значение периода полураспада группы с $E_{\alpha} = 8,3-8,6$ МэВ составило 35 с, что согласо-

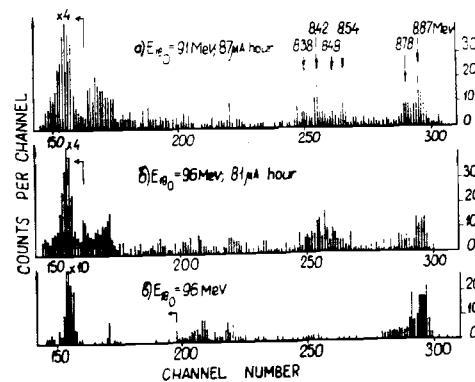


Рис. 6. Альфа-спектр, полученный при облучении $^{249}_{\text{Am}}$ ионами ^{18}O (а, б) и Рз+ ^{18}O (в). Цикл облучения и измерения равен 25 с.

вывалось с данными работы [7] для $^{256}_{103}\text{Fm}$. Зависимость выхода этой активности при изменении энергии бомбардирующих ионов соответствовала реакции $^{243}_{\text{Am}}(^{18}\text{O}, 5n)^{256}_{103}\text{Fm}$.

Много усилий авторы [15] затратили на поиски α -активности с $E_{\alpha}=8,6$ МэВ и $T_{1/2}=8$ с, отнесенной в берклиевской работе [6], к изотопу $^{257}_{103}\text{O}$. В области энергий ^{18}O 90–96 МэВ, где выход реакции $^{243}_{\text{Am}}(^{18}\text{O}, 4n)^{257}_{103}\text{O}$ должен иметь максимальное значение, α -активности, обнаруженной в Беркли, однако, не наблюдалось вплоть до уровня сечения $2 \cdot 10^{-33}$ см². Это много ниже значения, ожидаемого для искомого нуклида на основании систематики экспериментальных данных. Авторы работы [15] связывали с распадом $^{257}_{103}\text{O}$ группу α -частиц в диапазоне 8,5–8,6 МэВ. Впоследствии это предположение не подтвердилось.

В 1970 г. в Дубне был синтезирован изотоп $^{255}_{103}\text{O}$ в реакции $^{243}_{\text{Am}}(^{16}\text{O}, 4n)^{255}_{103}\text{O}$ и определены его свойства: $E_{\alpha}=8,38$ МэВ и $T_{1/2}=20$ сек [16].

Таким образом, в результате выполненных в 1965–1967 гг. в Дубне исследований [7, 15, 16] по синтезу $^{256}_{103}\text{O}$, этот нуклид был идентифицирован вначале по внучатому $^{252}_{\text{Fm}}$, а затем был измерен его период полураспада α -спектр. В дальнейшем свойства $^{256}_{103}\text{O}$ и $^{255}_{103}\text{O}$, определенные в Дубне, были полностью подтверждены в работе, выполненной в Беркли [10]. Учитывая, что данные [6] не подтвердились, авторы дубненских работ в 1967 году обратились в ИЮПАК с предложением назвать элемент 103 "резерфордием".

В 1971 году в Беркли были проведены эксперименты по получению свойств изотопов 103-го элемента с массовыми числами 255–260 [10]. Использовались практически моноизотопные мишени ^{249}Cf и ^{248}Cm , которые облучались соответственно ионами бора и азота. Сбор продуктов ядерных реакций осуществлялся методом газовой струи. Система из 28 поверхностно-барьерных детекторов позволяла с помощью сложной аппаратуры измерять α -спектры и периоды полураспада по 6 временным позициям как первичных продуктов ядерных реакций, так и их дочерних продуктов. Особое внимание было уделено проблемам фона от примесей свинца. Работа выполнена тщательно, и хотя пока не во всех случаях имеется независимое подтверждение, полученные результаты вызывают доверие. Наряду с результатами первых берклиевской [6] и дубненских работ они приведены в таблице 2. Видно, что приоритет дубненской группы в открытии элемента 103 не может вызывать сомнения (сравни также рис. 7).

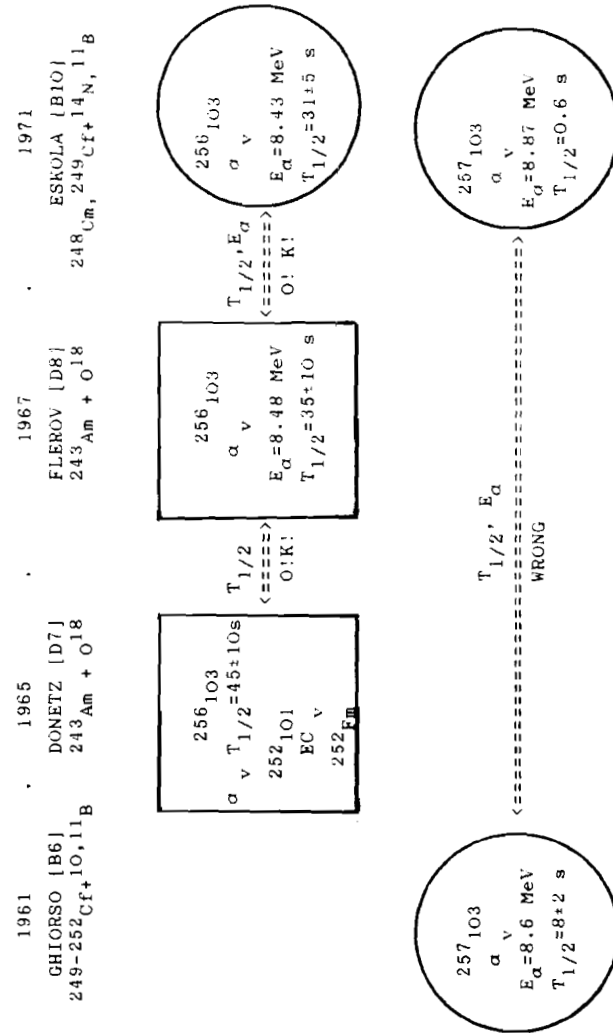


Рис. 7. Работы, относящиеся к открытию элемента 103.

Таблица 2

Изотоп	Беркли, 1961 г.		Дубна, 1965-70 гг.		Беркли, 1971 г.	
	$^{16}_{1/2}$ сек	E_{α} МэВ	$^{17,15,16}_{1/2}$ сек	E_{α} МэВ	$T_{1/2}$ сек	E_{α} МэВ
$^{255}_{103}$			20	8,38	22 ± 5	$8,37 \pm 0,02$ (50%)
$^{256}_{103}$			35 ± 10	8,4*	31 ± 5	$8,43 \pm 0,02$ (34%)
$^{257}_{103}$	8 ± 2	8,6	данные [6] не подтверждены		$0,6 \pm 0,1$	$8,87 \pm 0,02$ (81%)
$^{258}_{103}$					$4,2 \pm 0,6$	$8,62 \pm 0,02$ (81%)
$^{259}_{103}$					$5,4 \pm 0,8$	$8,45 \pm 0,02$ (100%)
$^{260}_{103}$					180 ± 30	$8,03 \pm 0,02$ (100%)

Литература

1. Г.Н.Флеров и др., Доклады АН СССР, 120, 73 (1958); ЖЭТФ, 38, 62 (1960).
2. O.Hahn, Verh. d. D. phys. Ges. 11, p.55, 1909.
3. A.Ghiorso, t.Sikkeland, J.R.Walton, G.T.Seaborg, Phys.Rev. Lett., 1, 18 (1958).
4. A.Ghiorso, Physics Today, 20, N 9 (1967), p.25.
5. A.Ghiorso, Proc. of the Second Conf. on Reactions between Complex Nuclei, Gatlinburg, May 2-4, 1960, p.195.
6. A.Ghiorso, T.Sikkeland, A.E.Larsh, R.M.Latimer, Phys. Rev. Lett. 6, 473 (1961).
7. Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков, АЭ, 19, 109 (1965).
8. G.N.Flerov et al., Nucl.Phys., A106, 476, (1967).
9. G.Seaborg, Actinides reviews, 1, 3 (1966).
10. K.Eskola, P.Eskola, M.Nurmi, A.Ghiorso, Phys.Rev. C, 4, N 2, 632 (1971).
11. Е.Д.Донец, В.А.Друин, В.Л.Михеев, АЭ, 25, N 2, 87 (1968); Ann.Phys. 3, 331 (1968).
12. Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков, АЭ, 16, 195, (1964).
13. Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков, Препринт ОИЯИ Р-2114, Дубна, 1965; ЯФ, т.2. вып.6, 1015 (1965).
14. В.Л.Михеев, ПТЭ, N 4, 22 (1966).
15. G.N.Flerov et al., Nucl.Phys., A106, 476, (1967).
16. В.А.Друин, ЯФ, т.12, в.2, 268 (1970); Sov. J. Nucl. Phys. 12, 146 (1971).

5. НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ

Попробуем подытожить анализ первых работ по синтезу и изучению свойств трансфермиевых актиноидных элементов ($Z=101,102,103$). Мы рассмотрели как сами эксперименты, так и их трактовку, чтобы этим конкретным материалом содействовать выработке критериев, которые должны применяться к работам, претендующим на открытие элементов.

Как можно видеть из обзора, отсутствие таких критериев, к сожалению, в некоторых случаях открыло простор для произвольной трактовки и реинтерпретации данных.

Первым трансфермиевым элементом является менделевий. Здесь можно с удовлетворением отметить, что исследовательская группа в Беркли, которая впервые синтезировала этот элемент и определила некоторые его свойства, выполнила работу настолько хорошо, что не возникло каких-либо оснований для дискуссий о приоритете открытия. После двух основных публикаций [1, 2] в исследованиях других авторов только уточнялись эти результаты и далее развивалось изучение элемента. Восхищает то, что хотя в первой работе [1] было получено всего 17 атомов, умелое и тщательное проведение экспериментов на пределе возможного позволило избежать ошибок. Опираясь на фундаментальные закономерности периодического закона Д.И.Менделеева, оформленные, в частности, в виде актиноидной концепции Сиборга, авторы [1] смогли получить убедительные данные о химическом характере менделевия и о радиоактивном распаде одного из его изотопов. Немалую роль в успехе этой работы сыграли и некоторые объективные факторы, то, что продукт распада $^{256}_{103}\text{Mf}$ оказался спонтанно делящимся нуклидом, а селективная индикация спонтанного деления - сравнительно простая задача. Кроме того, при использованной комбинации мишени (^{253}Es) и бомбардирующей частицы (^4He) природа избавила авторов от каких-либо фоновых продуктов - излучателей спонтанного деления.

Приступая к синтезу элементов 102 и 103, можно было предвидеть на основании теоретических и полуэмпирических экстраполяций, что придется иметь дело с изотопами, с намного меньшими, чем у Fm и Mc, временами жизни. Это ставило под сомнение возможность использования хорошо оправдавшего себя химического метода идентификации - жидкостной ионообменной хроматографии.

Тем не менее можно считать оправданной попытку применения хроматографии трехвалентных ионов в первой работе по синтезу 102-го элемента, которая была выполнена объединенной группой из Швеции, Великобритании и США в Стокгольме [С3]. Как стало впоследствии ясно из цикла дубненских работ, завершившихся синтезом пяти изотопов

102-го элемента [Д4], наиболее долгоживущий из них - $^{255}_{102}$, который, в принципе, мог быть получен в берклиевских экспериментах, имеет период полураспада 3 мин. Это, по-видимому, лишь в несколько раз меньше того предела, который был тогда доступен экспериментаторам. К сожалению, в публикациях (СЗ, С5) нет достаточно подробного описания химической части экспериментов. Поэтому затруднено их сопоставление с данными более поздних химических работ (см. [6]), где показано, что элемент 102 наиболее устойчив в двухвалентном состоянии, которое по свойствам отличается от трехвалентного.

Имея в виду короткое время жизни атомов, авторы работ по синтезу элементов 102 и 103, проведенных в Дубне в 1963-1967 гг., в качестве одного из основных методов однозначной идентификации новых нуклидов использовали выделение известных дочерних продуктов α -распада искоемых нуклидов. Отдача при α -распаде позволяет отделять дочерние атомы от материнских и заодно от многочисленных других первичных продуктов ядерных реакций. Долгоживущие дочерние нуклиды из распада изотопов элементов 102 и 103 идентифицировали, как правило, с помощью селективных химических методов. Известные энергия α -частиц и период полураспада дочерних атомов при правильной постановке экспериментов гарантировали безошибочность идентификации.

Отметим, что в основе указанного метода идентификации новых элементов лежит подход, успешно использованный еще в работах Хана и др. (см. [7]) в начале нашего столетия при расшифровке природных радиоактивных рядов.

Дополнительно для идентификации новых нуклидов с атомным номером $Z=102$ и 103 в Дубне измерялись энергетические зависимости их выхода, то есть (для малоизотопной мишени) функции возбуждения реакций синтеза. Она имеет для "испарительной" реакции $(N1, xn)$ вид сравнительно узкой колоколообразной кривой. Существенное значение имело также исследование перекрестных реакций (варьирование комбинаций мишень - бомбардирующий ион).

Сочетание основного метода (выделение дочерних атомов) и дополнительных (измерение функции возбуждения и осуществление перекрестных реакций) обеспечило получение безошибочных результатов в дубненских работах, в которых были открыты элементы 102 [ДВ-Д11] и 103 [Д12, Д13]. В некоторых случаях, например при синтезе $^{255}_{102}$ [Д14-Д17] и $^{253}_{102}$ [Д13], новые нуклиды удалось надежно идентифицировать с помощью прямого измерения их α -излучения на основе тщательного анализа функций возбуждения ядерных реакций и перекрестных реакций, не прибегая к выявлению их генетической связи (через α -распад) с известными нуклидами.

Опыт всей работы по синтезу элементов 102 и 103 показал, что выделение дочернего продукта α -распада нового элемента из сложной смеси многочисленных продуктов ядерных реакций и распознавание его по химическим свойствам, энергии α -распада и периоду полураспада на самом деле не является тривиальной задачей. Основная проблема - это убедительно доказать, что физической методикой собраны только атомы отдачи от α -распада и никакие другие. Оказалось, что изучение функций возбуждения и перекрестных реакций также требует тщательного и осторожного подхода.

Поначалу казалось, что это было учтено авторами из Беркли в их работах по синтезу 102-го [Б16-Б18] и 103-го [Б19] элементов. Их выводы представлялись столь убедительными, что соревнующаяся группа в Москве решила остановить свою работу по элементам 102 и 103 и начала подготовку к синтезу элементов 104 и 105.

Был создан мощный циклотрон в Дубне (У-300), предназначенный специально для получения интенсивных пучков тяжелых ионов. С новым источником многоядерных ионов получен материал для чистых моноизотопных мишеней ^{242}Pu , ^{243}Am . Возможности Дубны для синтеза новых элементов превысили то, чем располагали в то время в Беркли по ассортименту пучков тяжелых ионов и их интенсивности. Были созданы разнообразные методики и аппаратура.

Для проверки возможностей разработанных подходов в качестве "теста" решили синтезировать в различных комбинациях мишеней и бомбардирующих ионов изотоп 102 элемента с массой 256. Было получено несколько сотен атомов этого нуклида, измерен период полураспада, определена энергия α -частиц, изучены закономерности образования ядер $^{256}_{102}$ в двух различных комбинациях мишень и бомбардирующий ион [ДВ-Д11].

Отношение периодов полураспада $^{256}_{102}$, полученного в Дубне, и $^{254}_{102}$, ранее изученного в Беркли [Б16-Б18], вызвало удивление, так как противоречило известным данным о соотношении времен жизни изотопов Cf и Fm, имеющих числа нейтронов $N=152$ и 154 (^{250}Cf - ^{252}Cf , ^{252}Fm - ^{254}Fm). Поэтому было решено проверить свойства, указанные берклиевской группой [Б16-Б18] для $^{254}_{102}$.

В результате тщательно проведенных опытов [Д11, Д13] в Дубне убедились, что заявка группы из Беркли на открытие 102-го элемента и, как выяснилось позже [Д14, Д15], и их заявка [Б10] на открытие 103-го элемента, опирались или на ошибочные экспериментальные данные и (или) на заблуждения при трактовке данных. Дубненские результаты были сообщены в Беркли, однако сколько-нибудь основательного ответа на критику не было получено.

Вместе с тем номенклатурная комиссия ИЮПАК как бы признала открытие элементов 102 и 103 за группой Беркли, присвоив этим элементам названия "нобелий" (102) и "лоуренсий" (103), предложенные этой группой. Ошибки не могли бы быть таким образом "увековечены", если бы существовали критерии открытия, в которых одним из основных требований было бы подтверждение результатов в другой лаборатории или другой группой в той же лаборатории, где выполнена приоритетная работа. Это подтверждение должно при этом опираться на независимые эксперименты, проведенные, по возможности, с помощью видоизмененной методики и с применением различных комбинаций мишеней и бомбардирующих ионов. История с элементами 102 и 103 одновременно доказывает настоятельную необходимость того, чтобы полнота изложения данных в оригинальных статьях обеспечивала возможность их воспроизведения и, с другой стороны, исключала возможность их произвольной реинтерпретации.

Литература

- Б1. A.Ghiorso et al. Phys.Rev., vol.98, p. 1518 (1955).
Б2. L.Phillips et al. Phys.Rev.Lett., vol.1, p. 215 (1958).
С3. P.Fields et al. Phys.Rev., vol.107, p. 1460 (1957).
М4. Г.Н.Флеров АЭ, т.24, с.5 (1968).
G.N.Flerov. Ann.Phys., vol.2, p. 311 (1967).
С5. P.Fields et al. Arkiv Fys., vol.15, p. 225 (1959).
Б6. J.Maly et al. Science, vol.160, p. 1114 (1968).
7. E.Rutherford. Radioactive Substances and their Radiations.
Cambridge: at the University Press, 1913.
Д8. Е.Д.Донец и др. АЭ, т.16, с.195 (1964).
Д9. В.А.Друин и др. АЭ, т.22, с.127 (1967).
Д10. Г.Н.Флеров и др. ЯФ, т.5, с.1186 (1967).
Д11. Е.Д.Донец и др. АЭ, т.20, с.223 (1966).
Д12. Б.А.Загер и др. АЭ, т.20, с.230 (1966).
Д13. В.Л.Михеев и др. АЭ, т.22, с.90 (1967).
Д14. Е.Д.Донец и др. АЭ, т.129, с.109 (1965).
Д15. G.N.Flerov et al. Nucl.Phys. A, vol.106, p.476 (1967).
Б16. A.Ghiorso et al. Phys.Rev.Lett., vol.1, p.18 (1958).
Б17. А.Гиорсо, АЭ, т.7, с.338 (1959).
Б18. A.Ghiorso. In: Proc. of the Second Conf. on Reactions between Complex Nuclei, Gatlinburg 1960. Wiley & Sons, New-York 1960, p.195.
Б19. A.Ghiorso et al. Phys.Rev.Lett., vol.6, p.473 (1961).

Рукопись поступила в издательский отдел
11 декабря 1989 года.

Флеров Г.Н. и др.

D7-89-820

История трансфермиевых элементов

Представлен обзор, состоящий из нескольких статей об открытии новых трансфермиевых элементов. Авторы излагают свой взгляд на критерии открытия и дают подробный критический анализ конкретных публикаций. Анализируются работы по открытию элементов 101, 102, 103. Ставится цель дать подробную информацию для широкой научной общественности. Авторы надеются получить критические замечания, чтобы с их учетом направить материал в научный журнал. Обзор вместе с отзывами будет представлен в комиссию ИЮПАП, которая в настоящее время работает над выработкой критериев открытия и определением приоритета открытия новых элементов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Flerov G.N. et al.

D7-89-820

The History of the Transfermium Elements

The present review contains a few chapters dealing with the discovery of new transfermium elements. The authors express their views of the criteria for the discovery of a chemical element and make a thorough and critical analysis of concrete experimental studies. The works claiming the discovery of elements 101, 102 and 103 are considered. The purpose of the publication is to provide detailed information for the broad scientific community. The authors hope to receive critical comments which will be taken into account before the submission of the paper to a scientific journal. The review, together with the comments received, will be sent to the IUPAP Commission which is currently involved in working out criteria for element discovery in an attempt to determine priorities in the discoveries of new elements.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989