

539.17

ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА НОВЫХ ИЗОТОПОВ И ЭЛЕМЕНТОВ*)**Г. Н. Флеров**

В наши дни трудно представить себе, чтобы где-то на Земле люди не знали, что такое радий или что значит слово «радиоактивность». Мария Склодовская-Кюри вместе с Пьером Кюри подарила человечеству и этот элемент, и это понятие.

Со времени величайшего открытия началось широкое и систематическое исследование естественной, а затем и искусственной радиоактивности. И это явилось неоценимым вкладом в наши представления о строении вещества, в науку об атомном ядре.

Ядерная физика исследует структуру ядер как стабильных, так и радиоактивных. Чем больше различных изотопов исследовано, тем полнее раскрывается перед нами картина строения ядерной материи. Естественно поэтому проанализировать, насколько далеко продвинулись мы в этом направлении, сколько уже синтезировано и изучено изотопов и сколько еще предстоит получить и изучить экспериментаторам в будущем. Ответ на этот вопрос можно найти, взглянув на рис. 1. На этом рисунке изображены уже синтезированные и возможные изотопы, которые, по-видимому, могут быть изучены в будущем, с различными Z (Z — число протонов в ядре) и $N - A - Z$ (N — число нейтронов в ядре, A — массовое число). Стабильные изотопы изображены темными квадратиками. После открытия супругами Жолио-Кюри в 1934 г. искусственной радиоактивности различными способами в ядерных реакциях было получено еще около 1500 изотопов, причем примерно 100 из них в трансурановой области.

Масштаб рисунка настолько мелкий, что деление ядер, которое определило технический прогресс XX века, на этой карте изотопов оставило лишь маленькие выступы. Внешний контур, представленный сплошной линией, обозначает границы области стабильности, полученные на основании теоретических расчетов. Легко видеть, что область синтезированных изотопов очень мала по сравнению с областью, которую предстоит заполнить. Оценка числа возможных изотопов в этой области дает величину 4—5 тыс. Это значительно больше полученного до сих пор.

Возникают два вопроса: 1) Что можно ожидать от исследования этих изотопов и, следовательно, нужно ли их получать? 2) Можно ли их получить?

По мнению коллектива физиков и химиков, работающих в Дубне, безусловно, нужно пытаться получать эти изотопы и изучать их. Синтезируя такие, скажем, изотопы, как кальций-70 или кальций-31, мы получим в свое распоряжение ядра с очень необычными соотношениями чисел протонов и нейтронов (20р и 11n или 20р и 50n). В этом случае мы сможем

*) Доклад, прочитанный в Варшаве на юбилейных торжествах, посвященных 100-летию со дня рождения М. Склодовской-Кюри (октябрь 1967 г.).

изучать ядерное вещество в крайне необычных состояниях. Такой методологический подход весьма характерен для физики вообще. Так, например, исследователи изучают поведение вещества в сильных магнитных полях, при очень больших давлениях, в условиях высоких электрических полей и т. д. С этой точки зрения изучение ядерной материи, когда соотношение между кулоновскими и ядерными силами необычно, позволило бы получить очень полезную информацию о свойствах ядерного вещества. В связи с этим становится понятным особый интерес к изучению далеких трансурановых элементов, где и кулоновские, и ядерные силы очень велики.

Каким образом можно получать новые изотопы? Эту задачу пытались решать многими способами. В частности, для получения очень тяжелых

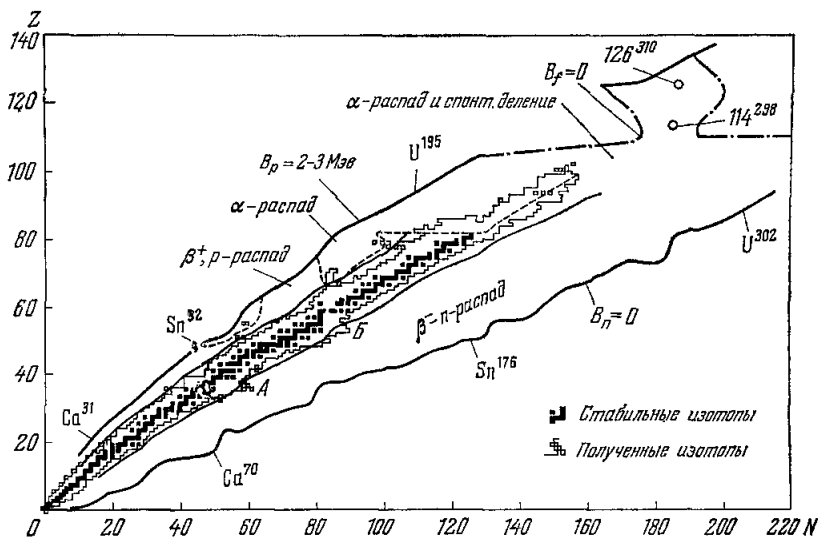


Рис. 1.

изотопов трансурановых элементов в США использовались подземные ядерные взрывы. Суть этого метода состоит в том, что в нейтронных потоках предельно большой плотности ядра последовательно захватывают несколько нейтронов, не успев испытать β -распад. Это дает возможность получить из исходного урана-238 очень тяжелые изотопы урана, которые после нескольких β -распадов превращаются в более далекие элементы.

Первые опыты не были предназначены специально для получения тяжелых изотопов.

В 1952 г. в результате взрыва (не подземного, а наземного) с не очень большим потоком нейтронов был открыт 100-й элемент с массой 255. Исходя из самых общих соображений, можно было предположить, что если получить потоки значительно большие и если проделать специальный экспрессный химический анализ, то это должно привести к успеху в попытке продвинуться к большим атомным номерам. Оптимистические оценки показывали, что так можно получить элементы с большим значением Z . Ожидалось, что при этом может быть синтезирован 110-й элемент, 112-й и т. д.

Найдется немного примеров, когда для достижения цели — получения больших потоков нейтронов и химического извлечения трансурановой фракции — было затрачено столько усилий, но ученые были воодушев-

лены высокой задачей проникновения в область долгоживущих изотопов далеких элементов, и сделано было, как мы считаем, максимум того, что вообще можно сделать. Однако этим методом к 1966 г. удалось получить лишь изотоп 100-го элемента с массой 257, т. е. за 14 лет этим способом продвинулись даже не по Z , а по A всего на две единицы. Нам не кажется, что это показывает полную безнадежность метода; по-видимому, существуют какие-то дополнительные возможности. Однако видно, что есть физическая причина, которая пока не возволяет продвинуться таким способом в область новых элементов.

Другой метод синтеза новых ядер, разработка которого была начата параллельно в 1954 г. в США и в СССР, по-видимому, на одинаковой идейной основе, — это попытка использовать тяжелые ускоренные частицы: углерод, кислород, неон, аргон. В этом случае принципиально возможны два пути. Во-первых, от сложного ядра могут отрываться куски ядерной материи, скажем сразу пять — семь нейтронов, и, таким образом, вместо последовательного захвата ядро-мишень может захватить сразу целый комплекс нейтронов.

Действительно, реакции такого типа изучались. В Дубне наблюдалась передача 5—8 нейтронов. Сечение такого процесса мало, хотя мы при этом не уходим далеко от области стабильности. Чтобы проникнуть в область нестабильности (см. рис. 1), необходимо стабильные ядра обогатить 40—50 нейтронами. Сечение такого процесса настолько мало, что этот метод, даже при использовании более тяжелых частиц, мало что обещает.

Второй путь заключается в том, что вместо процесса передачи комплексов нуклонов используются реакции слияния. Для примера рассмотрим, что должно получиться при облучении, скажем, свинца-208 неон-20. В этом случае компаунд-ядро (уран-228) будет иметь возбуждение около 60 $Mэв$. В результате из него испускается 6 нейтронов и при этом синтезируется легкий изотоп уран-222. Этот способ дает нейтронообедненные изотопы.

Этим методом, в частности, были синтезированы нейтронодефицитные изотопы — излучатели протонов. В Дубне В. А. Карнаухову с сотрудниками и в Канаде Беллу, а позднее и американским исследователям Р. Макфарлану, А. Посканзеру и др. удалось лишь немного выйти за область стабильности и тем не менее наблюдать около двух десятков протонных излучателей ¹⁻³. При дальнейшем продвижении в область нейтронодефицитных изотопов должна наблюдаться предсказанная В. И. Гольданским двупротонная радиоактивность. Для этого требуется вылет 15—20 нейтронов. Однако здесь начинает действовать строжайший закон, знакомый всем, кто занимается синтезом ядер, далеких от области стабильности. Мы хотим уйти от этой области как можно дальше. Вместе с тем для этой цели мы используем ядерные процессы, которые хотя и протекают за 10^{-14} сек, но являются, по существу, адиабатическими. Поэтому после вылета 6—8 нейтронов уменьшается вероятность испускания нейтронов ядром, а вероятность деления ядра или вылета из него протонов значительно возрастает. В случае нейтронодефицитных изотопов средних масс ядро пытается вернуться и действительно возвращается в область стабильности, испуская протоны.

В процессе синтеза трансурановых элементов велика вероятность деления, в результате которого вместо ядра, например, 100-го элемента получаются два ядра с $Z = 50$. Это и приводит к тому, что при решении проблемы синтеза трансурановых элементов приходится иметь дело с катастрофически малыми сечениями. Последние опыты, проведенные в Дубне, показали, что если сечение 102-го элемента, для которого синтезировано шесть изотопов, составляет 10^{-9} барн, то сечение образования

104-го элемента только около 10^{-10} барн, а для 105-го эта величина еще меньше. Все, что можно сделать для увеличения выхода, — это повышать интенсивность пучка ускоренных частиц либо проводить эксперимент вместо месячных экспозиций в течение многих лет. Оба эти способа линейны, а падение сечения экспоненциально. Поэтому, по нашему мнению, 105-й элемент, свойства которого сейчас уточняются в Дубне, по-видимому, будет последним доступным элементом для этого метода.

Естественный вопрос: есть ли выход из создавшегося положения? Занимаясь анализом возможностей, мы пришли к выводу: деление ядер — основной фактор, затрудняющий синтез новых изотопов и элементов.

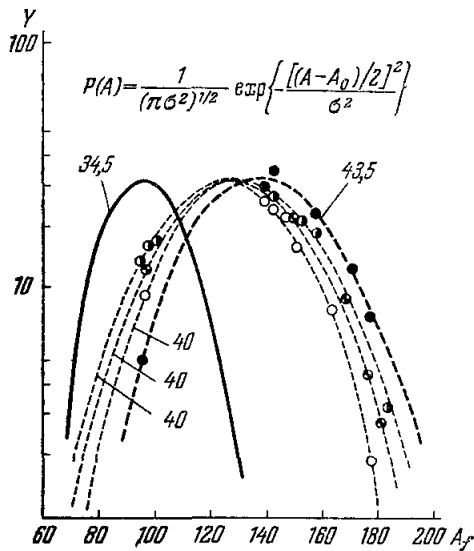


Рис. 2.

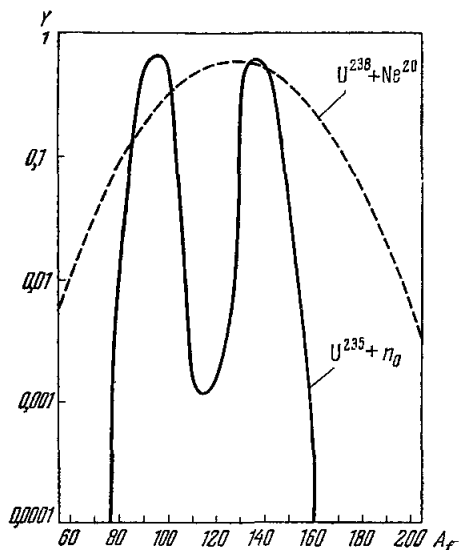


Рис. 3.

Попробуем воспользоваться приемом, иногда применяемым экспериментаторами: мешающий фактор заставить работать в нашу пользу. Будем пытаться осуществлять синтез новых элементов путем деления ядер, постепенно увеличивая заряд бомбардирующего ядра. Тогда осколки деления также постепенно будут увеличивать свой заряд, и в конце концов в предельном случае, скажем при облучении урана ураном, можно получить изотопы далеких трансурановых элементов, и не только трансуранов, а попутно и все изотопы, представленные на рис. 1.

Кроме того, этот метод особенно перспективен для получения ядер, находящихся в изомерных состояниях различных типов.

Идея, как будто бы, не бессмысленна, однако необходимо провести опыты, которые показали бы, что же в действительности получается, сколько образуется изотопов различных элементов в процессе деления. С этой целью в течение последнего года в Дубне Ю. Ц. Оганесяном совместно с группой химиков были проведены систематические исследования продуктов деления тяжелых ядер под действием многозарядных ионов. Мы обратились вначале к работам 1956—58 гг., когда для облучения урана были использованы сравнительно легкие частицы (углерод и азот). В этих исследованиях получалась кривая распределения с максимумом при $Z = 50$.

Возникал вопрос: что произойдет с кривой распределения, если постепенно увеличивать заряд падающей частицы? Безусловно, максимум

первые публикации, в которых сообщалось, что в результате облучения сверхмощными лазерами металлических пластинок получаются 8–10- и даже 15-зарядные ионы таких элементов, как кальций, железо.

По-видимому, при столь больших мощностях происходит то, что физики называют коллективным воздействием с одновременным поглощением большого числа световых квантов, либо какие-то другие процессы, приводящие к возникновению электрических полей, достаточных для глубокой ионизации атомов. Поэтому наряду с дальнейшим усовершенствованием плазменных источников необходима разработка лазерных источников.

Если думать о коллективных усилиях в создании методов ускорения наиболее тяжелых ионов, то, очевидно, необходимо будет в первую очередь продумать возможные направления работ по усовершенствованию ионных источников. Примером таких коллективных усилий в решении наиболее сложных задач может служить трансурановая проблема. Не вдаваясь в тонкости дискуссии по химии 102-го элемента, отмечу, что результаты американских ученых, по-видимому, существенно дополняют наши результаты, основанные на газовой химии. Конечно, это все будет далеко от того, что мы хотели бы знать о 102-м элементе. Слово «химия» включает в себя и физико-химические, и электрохимические, и ряд других свойств и оно, по существу, неисчерпаемо. Надеяться на то, что мы будем иметь тома, описывающие химические свойства 102-го элемента, подобно тому, что есть в справочнике Гмелина о других элементах, я думаю, нет оснований. Но мы можем, скажем, определить валентность, которая тоже условна. (Известно, что валентность зависит от внешних условий.) С этой точки зрения мне кажется, что газовая химия — один из основных методов исследования, используемый в нашей лаборатории (методом газовой химии изучались свойства и 102-го, и 104-го элементов), — представляет собой уже большой шаг вперед^{6,7}.

Возникает вопрос о правомерности определения физико-химических свойств отдельных атомов. Надо сказать, что, когда мы начинали опыты по химии 104-го элемента, мы исходили из того, что у хлористых соединений 104-го элемента и хлоридов гафния будут аналогичные свойства. В учебниках мы нашли для соединений гафния данные о давлении паров в зависимости от температуры.

Но как применить это понятие к одному атому? Получилась очень трудная ситуация. Однако оказалось, что для одного атома имеется соответствующая физическая аналогия. Если один атом многократно сталкивается с поверхностью либо в ионообменной колонке садится на смолу и снова уходит, то число актов адсорбции и десорбции очень велико, и тогда вместо давления паров вводится понятие среднего времени, в течение которого этот атом сидит на поверхности. Это понятие закономерно, и у нас нет никаких сомнений, что поведение одного атома будет совпадать с тем, как вел бы себя большой комплекс атомов, если нет взаимодействия между ними. Но взаимодействие необходимо учитывать лишь для весовых количеств; поэтому, если мы считаем химию законной для сотен тысяч атомов, то она столь же законна для одного атома.

Мне кажется, что в той дискуссии, которая, я надеюсь, еще не долго будет продолжаться, это противопоставление химии и физики очень искусственно. Дело в том, что если мы подойдем к элементам, которые живут, скажем, миллионные доли секунды, то ни газовая, ни жидкая химия ничего не дадут. Вместе с тем за эти времена ядра будут захватывать K -электроны, и изучение рентгеновских лучей, по существу, даст столь же надежные данные о Z , как, скажем, это получается в результате хроматографического изучения элемента.

Специального рассмотрения требует также вопрос об определении массового числа новых изотопов. В последнее время при синтезе короткоживущих ядер использовались методы так называемой физической идентификации. В этих методах идентификация продуктов реакций по массовому числу производилась, например, по функции возбуждения данной реакции, т. е. по выходу исследуемого продукта в зависимости от энергии бомбардирующих частиц. Однако эти методы косвенной идентификации не всегда дают однозначный результат. Прямой ответ на вопрос о массовом числе изотопа можно получить, если использовать масс-спектрометр или масс-сепаратор. Но это должен быть не обычный вариант прибора, а быстродействующий, позволяющий работать с очень короткоживущими ядрами. В настоящее время, как вам известно, такие инструменты создаются в ряде лабораторий. Их главная особенность состоит в том, что продукты ядерных реакций должны быстро отделяться от мишени и быстро транспортироваться в ионный источник непрерывно работающего масс-сепаратора. Регистрация распада сепарированных изотопов осуществляется тут же в сепараторе. Такой быстродействующий сепаратор в линии с циклотроном тяжелых ионов создается в Дубне.

Надо сказать, что пока успех опыта по синтезу изотопов во многих случаях определяется интенсивностью пучка, изотопной чистотой мишени и отсутствием в ней примесей, таких, как свинец. К сожалению, первые опыты по синтезу элементов 102 и 103 не удовлетворяли этим условиям ни в США, ни в Швеции, ни в Советском Союзе. Тогда не было одноизотопных мишеней, поэтому полученные данные можно было приписать тому или иному изотопу. В частности, изотоп, который синтезировался в шведской работе, за 10 лет «принимал» пять значений массового числа от 251 до 255, и потребовалась многолетняя работа в Дубне⁸ по синтезу и исследованию шести изотопов 102-го элемента, чтобы не оставить места для новых и новых гипотез упорствующих авторов.

Второе обстоятельство оказалось также существенным. В начальной стадии экспериментов на тяжелых ионах не было ясно, что очень опасной примесью будет свинец. Выход аналогичных α -излучателей на свинце в миллион раз больше выхода далеких трансурановых элементов, получающихся при облучении плутония, кюрия или калифорния. Поэтому очистка мишеней от свинца абсолютно необходима. Эта задача оказалась очень тяжелой, поскольку в химических и физических научных лабораториях много свинца. Лаборатории насыщены свинцом: пайка производится свинцовым припоем, у кабелей — свинцовые оболочки, защита делается из свинца и т. д.

По-видимому, нам удалось доказать, что в шведской работе был не 102-й элемент, а продукт облучения свинца, т. е. изотоп 88-го элемента, либо продукт реакции срыва или деления с $Z = 90$.

Работы по синтезу 105-го элемента также во многом зависят от чистоты мишеней — допустимо лишь крайне малое содержание свинца.

Второй подход — это создание таких условий, когда даже один случай распада настолько надежен, что не допускает противоречивых толкований, и при этом никакие фоны не сказываются. В нашей работе по элементу 105 мы идем обоими путями: с одной стороны, мы тщательно очищаем мишени от свинца, а с другой — стараемся на один акт α -распада получить максимальную информацию, которая абсолютно исключает возможность проявления каких-нибудь мешающих факторов (метод амплитудно-временных корреляций).

Молодые участники работы по 105-му элементу одно время считали, что она завершена. Однако те сложности, которые были со 102-м элементом, а также трудности, выявившиеся в работах по 103-му элементу

(наши результаты находятся в противоречии с тем, что было опубликовано в 1961 г. американскими исследователями), приводят нас к заключению, что следует продолжить исследование, хотя информация по 105-му элементу, которой мы располагаем, надежнее данных, полученных первоначально по 102-му и 103-му элементам.

Не знаю, удалось ли мне показать состояние проблемы в настоящем и будущем. По-видимому, в прошлом было очень много скоропалительных выводов. Это потребовало дополнительного десятилетнего труда, и мне кажется, что теперь нам нужно больше думать о настоящем и будущем. Поэтому я не давал подробного анализа работ периода 50-х и начала 60-х годов.

Если же вспомнить о прошлом, то только о далеком, а именно о героических усилиях, сделанных Марией Склодовской-Кюри и Пьером Кюри, когда они открывали новые элементы. Надо сказать, что тогда новые элементы открывались в условиях полного отсутствия данных об их химических свойствах, без применения каких-либо сложных (с нашей точки зрения) методик, но при очень требовательном отношении к собственным результатам и глубоком анализе получаемых данных. Поэтому ни в одной из работ супругов Кюри, по существу, нет случаев, сколь угодно похожих на ситуацию, создавшуюся с открытием 102-го и 103-го элементов, которая, как мы надеемся, не будет иметь повторений в будущем.

Позвольте мне в заключение выразить надежду, что задача синтеза ядер и исследования многих новых элементов и изотопов будет успешно решена на основе объединенных усилий ученых разных стран.

Объединенный институт
ядерных исследований, Дубна

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Карнаухов, Г. М. Тер-Акопьян, В. Г. Субботин, Препринт ОИЯИ Р-1072, Дубна, 1962.
2. A. M. Paskanser, R. M. Pheron, K. A. Esterlund, R. L. Reeder, Report 10362 ((1962).
3. R. Barton, R. McPherson, R. E. Bell, W. R. Frisken, W. T. Link and R. B. Moore, *Canad. J. Phys.* 41, 2007 (1963).
4. Ю. А. Музыка, Ю. Ц. Оганесян, Б. И. Пустыльник, Г. Н. Флеров, *Ядерная физика* 6, 306 (1967).
5. В. М. Струтинский, *Ядерная физика* 1, 821 (1965).
6. И. Звара, Т. С. Зварова, Р. Цалетка, Ю. Т. Чубурков, М. Р. Шалаевский, Препринт ОИЯИ Р-2548, Дубна, 1966.
7. И. Звара, Т. С. Зварова, Р. Цалетка, Ю. Т. Чубурков, М. Р. Шалаевский, *Радиохимия* 9, 2 (1967).
8. Г. Н. Флеров, Препринт ОИЯИ Д7-3444, Дубна, 1967.