

ПРИРОДА

№ 1, 2003 г.

Щеголев В.А.

За краем таблицы Менделеева

© “Природа”

Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 00-07-90172)

vivovoco.rsl.ru
vivovoco.usu.ru
vivovoco.nns.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

За краем таблицы Менделеева

В.А.Щеголев

Статья, посвященная проблеме сверхтяжелых химических элементов, была опубликована в журнале «Природа» 25 лет назад [1]. Что изменилось за это время? Как далеко удалось продвинуться за край таблицы Менделеева? Какие новые идеи и подходы появились у теоретиков и экспериментаторов? Чтобы более полно ответить на эти вопросы, обратимся к краткой истории искусственного синтеза химических элементов и описанию последних достижений.

Эпоха синтеза новых химических элементов в заурановой области началась в 40-х годах прошлого века. Работы в этом направлении привели к созданию ядерной энергетики, без которой немыслимо будущее человечества. Исследования по ядерной физике и химии актуальны и в настоящее время, поскольку сама природа атомного ядра и процессов, происходящих в нем, ясны не до конца. Каждое новое открытие может существенно повлиять на наше представление об ядре и породить совершенно неожиданные применения полученных знаний.

© В.А.Щеголев



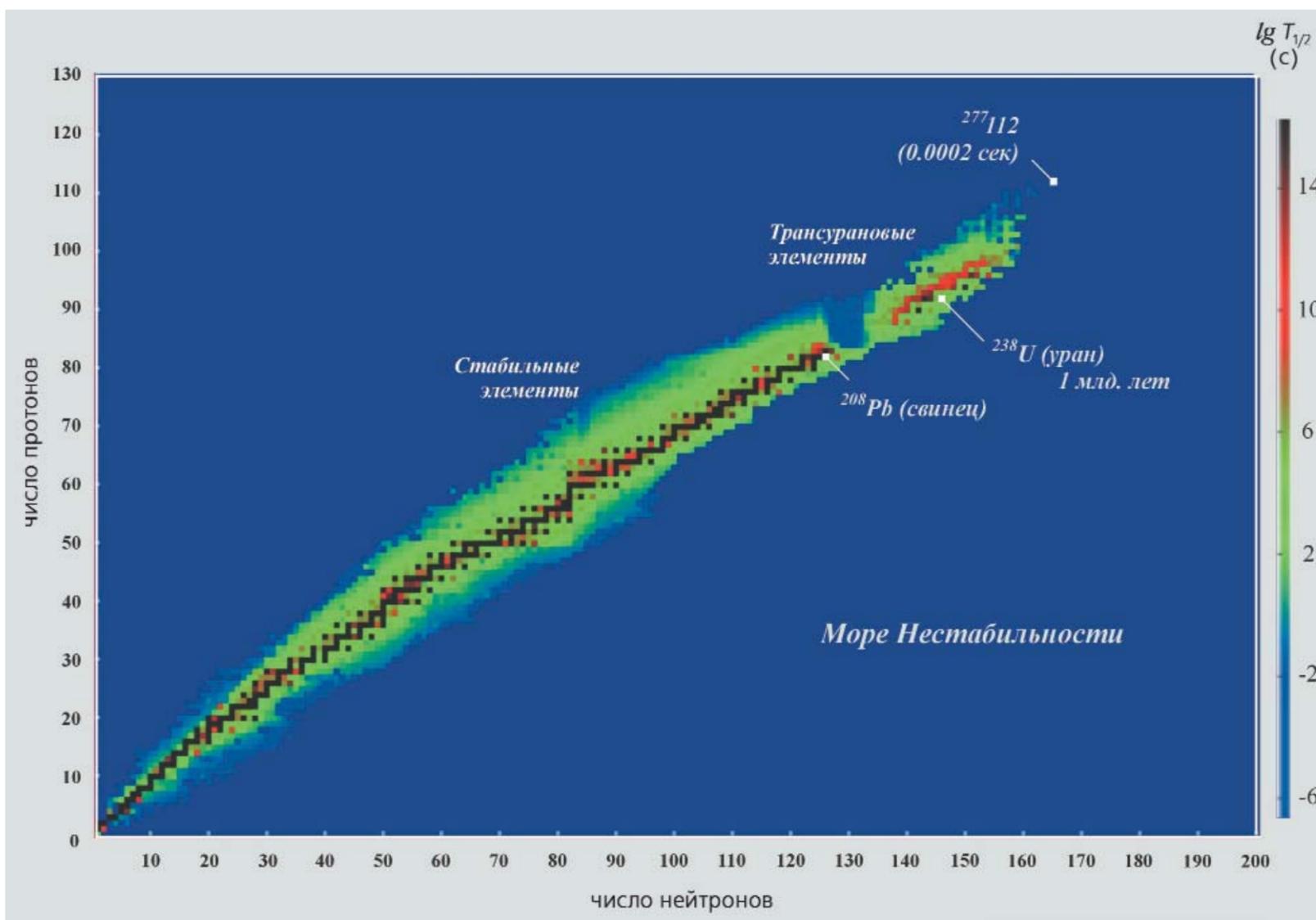
Владислав Александрович Щеголев, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова Объединенного института ядерных исследований (Дубна). Область научных интересов — физика тяжелых ионов.

Что предсказывала старая теория

Окружающий нас мир состоит из 92 элементов — от водорода (атомный номер $Z=1$) до урана ($Z=92$), которые представлены 287 стабильными изотопами. Они как бы образуют узкий материк в море нестабильных изотопов, испытывающих различные виды радиоактивного распада. По мере удаления от берегов материка время жизни радиоактивных изотопов уменьшается до того предела, где ядро — совокупность определенного числа протонов и нейтронов — уже не может существовать как нечто целое. В рамках этой границы должно оказаться около 5000 радиоактивных ядер. Среди них наибольший инте-

рес представляют легкие ядра с большим избытком нейтронов (так называемые нейтронные капли) и сверхтяжелые элементы, для которых теория предсказывает появление областей относительно стабильных ядер (островов стабильности). Вот к этим-то таинственным островам и стремились исследователи разных стран в течение последних 40 лет.

Изучение свойств различных ядер показало, что энергия E , сосредоточенная в ядре, возрастает по мере увеличения его массы (A — массовое число). Но на плавной с первого взгляда зависимости $E=f(A)$ были обнаружены нерегулярности при определенных числах протонов или нейтронов, составляющих ядро. Эти числа — 2,



Карта атомных ядер. На временной шкале справа цветом обозначены периоды полураспада указанных на карте ядер.

8, 14, 20, 28, 50, 82, 126 — были названы магическими. Наиболее наглядно магические числа проявляются после специального преобразования величин, которое выполнил А.Вапстра [2] на основе экспериментальных данных.

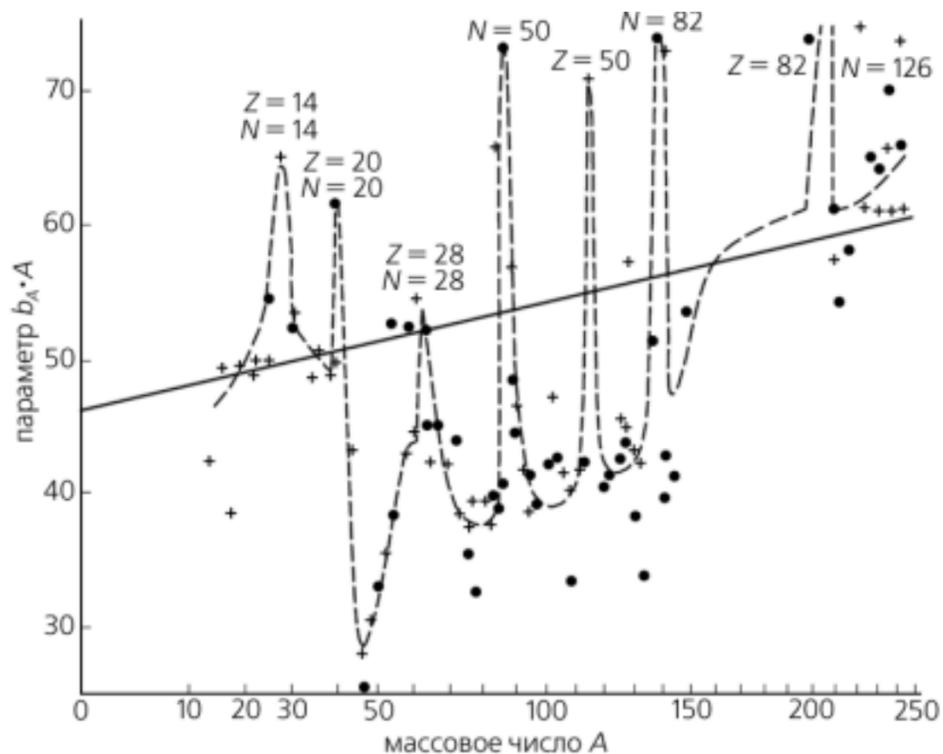
Не обратить внимание на столь очевидную особенность в зависимости $E=f(A)$ физики не могли, но понять ее причину было нелегко. В 1949 г. М.Гепперт-Майер и Г.Йенсен предложили оболочечную модель ядра, объяснившую магические числа и оказавшуюся весьма плодотворной.

В основе оболочечной модели [3] лежит представление, что нуклоны в ядре движутся подобно электронам в атоме, движущимся вокруг силового центра — положительно заряженного ядра. Правда, здесь скрыта внутренняя противоречивость: на самом деле в ядре подобного силового центра нет. Од-

нако коллективное движение нуклонов можно формализовать таким образом, будто он есть. Тогда нуклоны можно сгруппировать на определенных энергетических уровнях с учетом спин-орбитальной связи. В полученном, согласно модели, распределении нуклонов по энергетическим уровням обнаружилось сгущения уровней (оболочки), границы которых соответствовали числам нуклонов: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184. Совпадение с рядом магических чисел, известных из эксперимента, оказалось удивительно точным (выпадало только число 14). Это и обусловило успех предложенной оболочечной модели, и в дальнейшем теоретическая мысль развивалась именно в рамках таких представлений, несмотря на их внутреннюю противоречивость.

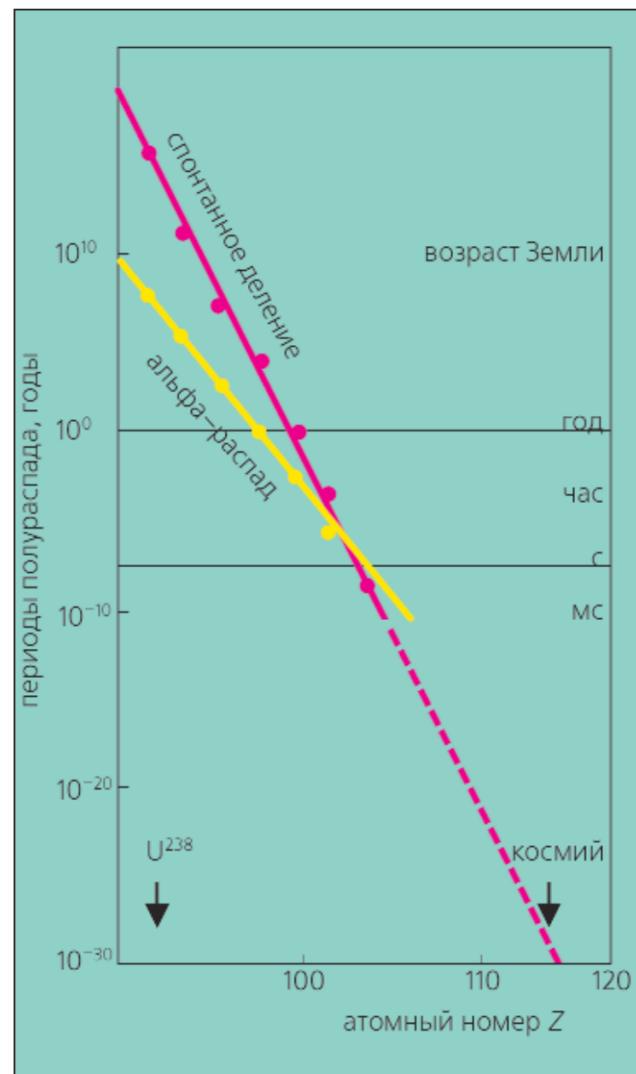
Интересно отметить, что формулу для ряда магических чисел

можно получить из самых общих соображений, не имеющих конкретного физического содержания. Эта формула — $N=1/3(n^3+5n)$, где n последовательно пробегает числа натурального ряда — дает $N = 2, 6, 14, 28, 50, 82, 126, 184...$; здесь отсутствуют только числа 8 и 20. Сама же формула выводится при решении комбинаторной задачи: *каково максимальное число элементов, составляющих систему, если каждый элемент представляет собой неповторимое сочетание заданного числа свойств, равного n* [4]. Видимо, за результатом, полученным чисто абстрактным путем, угадывается некий общий закон. Но как наполнить его конкретным физическим содержанием? Подобные формулы используются в кристаллографии, и здесь можно искать аналогии. Но можно ли представить независимое сосуществование в ядре протонного



Проявление магических чисел в массах ядер. Параметр b_A характеризует энергию связи в ядре таким образом, что отклонение от плавной зависимости $E=f(A)$ выражается наиболее явно.

Время жизни тяжелых ядер при альфа-распаде и спонтанном делении.



и нейтронного «кристаллов»? И самое главное — что это за «свойства», число которых n возрастает по мере увеличения числа нуклонов в ядре?

Следует отметить, что правильное предсказание магических чисел получается в оболочечной модели не автоматически. Оно в существенной мере зависит от того, правильно ли выбран потенциал ядерных сил, действующих между нуклонами, является ли ядро сферическим или деформированным, возбуждено ли оно или находится в «холодном» (основном) состоянии. В определении названных факторов и их роли теория всегда ориентируется на эксперимент и в какой-то мере остается подгонкой под уже известный результат, но в то же время она делает предсказания в еще не изученной области. Так что в вопросе о правильности теории решающее слово за экспериментом, подтверждающим или опровергающим ее предсказания.

Исследования в области сверхтяжелых химических элементов (и теоретические, и экспериментальные) особенно затруднены из-за того, что тяжелые ядра сами по себе довольно неустойчивы по отношению к делению — как вынужденному, так и спонтанному. После того как О.Ган и Ф.Штрассман в 1938 г. открыли вынужденное деление урана, а Г.Н.Флеров и К.А.Петржак в 1940 г. — спонтанное деление урана, в течение нескольких десятилетий в ядерной физике господствовала модель жидкой капли, разработанная Я.И.Френкелем, Н.Бором и Дж.Уилером. В ней ядро представлялось аморфным телом, которое было стабильно благодаря превосходству сил поверхностного натяжения над силами кулоновского отталкивания, действующими между входящими в ядро протонами. Чтобы произошло деление ядра, ему необходимо сообщить определенную энергию, называемую барьером деления. Стабильность ядра,

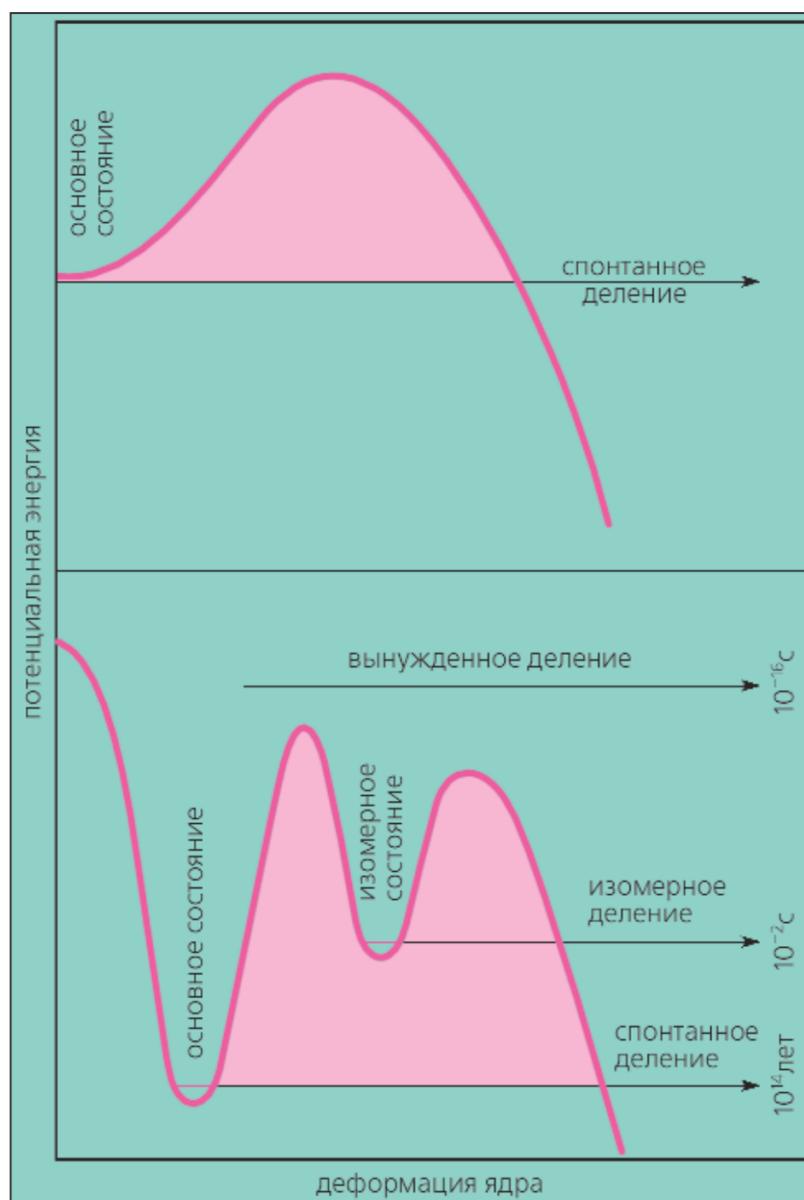
а точнее его время жизни (или период полураспада $T_{1/2}$), зависит от параметра Z^2/A (Z — число протонов, A — общее число нуклонов), и граница существования атомных ядер как таковых была определена при $Z^2/A = 46$, когда барьер деления исчезал. Гипотетический химический элемент с таким Z^2/A , названный заранее космием, должен был жить не более 10^{-21} – 10^{-20} с. Соответственно $T_{1/2}$, например, для 102-го элемента оценивалось в 10^{-6} с.

А что предсказывает новая?

Начиная с 60-х годов новые экспериментальные данные поставили под сомнение правомерность классической модели жидкой капли. В 1962 г. в Лаборатории ядерных реакций в Дубне было сделано сенсационное открытие спонтанно делящихся изомеров, впоследствии подтвержденное в других ла-

бораториях мира при синтезе 39 подобных ядер. Было обнаружено, что у тяжелых ядер могут быть два значения $T_{1/2}$ по отношению к спонтанному делению, а этот факт в модель жидкой капли никак не вписывался. Стало ясно, что в представление об ядре как аморфном теле нужно вводить структурный фактор, т.е. вносить элементы кристалличности. Все это дало пищу для нового развития теории.

Прогресс был достигнут прежде всего при описании процессов в деформированных ядрах. В работах В.М.Струтинского [5], В.В.Пашкевича была выдвинута и разработана концепция двугорбого барьера деления, что позволило говорить о наличии не только одного, но и нескольких устойчивых состояний ядра при различных его деформациях. Это объясняло существование спонтанно делящихся изомеров. Полная энергия ядра стала представляться в виде суммы $E_{\text{tot}} = E_{\text{id}} + \{E_{\text{sh}}$, состоящей из макроскопической (жидкокапельной) энергии E_{id} и микроскопической поправки $\{E_{\text{sh}}$, которая связана с наличием ядерных оболочек и эффектом парных корреляций нуклонов. В результате расчетов по новой макроскопической модели были обнаружены регулярные оболочечные явления в деформированных ядрах, благодаря чему существенно повысилась точность определения масс и форм последних. Вопреки широко распространенному представлению об ослаблении влияния оболочек по мере деформирования ядра оказалось, что в сильно деформированном ядре происходит существенное перераспределение нуклонных состояний. С ростом деформации оболочечные эффекты не исчезают, а изменяются, внося по-прежнему значительную коррекцию в потенциальную энергию ядра. Расчеты, выполненные в этой модели, объяснили целый ряд экспериментальных фактов: изомерию формы актинидных ядер, постоянство высот их барьеров деления, резкие изменения вероятности деления у ядер с числом нейтронов, близким к 152, и многие другие закономерности, которые не могли найти объяснения



Формы энергетических барьеров деления ядра в старом (вверху) и новом (внизу) представлении.

в рамках классической модели жидкой капли. Наиболее значительный вклад в новую теорию внесли теоретики В.М.Струтинский, В.Святецкий, В.Майерс, С.Нильсен, А.Собичевский, В.В.Пашкевич и др. [6].

Возникшие новые представления о природе тяжелых ядер породили и новые теоретические предсказания о существовании островов стабильности в области сверхтяжелых элементов и свойствах конкретных ядер. В 1966 г. была опубликована теоретическая работа А.Собичевского, Ф.А.Гареева и Б.Н.Калинкина [7], в которой при расчетах использовался ядерный потенциал Хартри—Фока—Боголюбова (как наиболее реалистичный при описании ядерных явлений) и было предсказано существование для протонов магического числа

$Z=114$. Соответственно в данной области ядер следовало ожидать и наличия острова стабильности. Это предсказание возбудило интерес многих экспериментаторов, потому что названная гипотетическая область стабильности была в принципе доступна при имеющихся технических возможностях, хотя сами эксперименты представлялись исключительно трудными. Но цена положительного результата была очень высока, поскольку на нем по существу проверялась вся современная концепция ядернофизических представлений о природе тяжелых ядер.

Чем были заняты экспериментаторы

Новые трансурановые элементы на первом этапе синтезировали в основном с помощью мощных нейтронных потоков в ядерных реакторах и в ядерных взрывах. Таким способом в ядре-мишени с числом протонов Z создавался избыток нейтронов. При использовании сильнопоточных реакторов синтез происходил в результате последовательных захватов нейтронов ядром-мишенью. Пересыщенное нейтронами ядро испытывает бета-распад, при котором излишний нейтрон превращается в протон и получается ядро нового элемента с $Z+1$. В свою очередь это новое ядро снова захватывает лишний нейтрон и т.д. При ядерных же взрывах в ядро-мишень практически моментально вгоняется сразу несколько нейтронов, и затем Z полученного тяжелого ядра увеличивается в результате последовательных бета-распадов. В ряде случаев для синтеза использовались ускорители легких частиц (протонов, дейтронов, ядер гелия), когда в ядро-мишень сразу вгонялись один или два протона. Таким образом американские исследователи под руководством Г.Сиборга открыли девять трансурановых элементов — от нептуния Np ($Z=93$) до менделевия Md ($Z=101$). В настоящее время целый ряд подобных элементов можно получать в весовых количествах. Например, Pu-239 ($T_{1/2}=24110$ лет) накоплен в количестве сотен тонн, а Cf-252 ($T_{1/2}=2.6$ года) «добывается» десятками граммов.

Но к середине 50-х годов прошлого века указанные методы синтеза новых элементов исчерпали себя. Причина — в резко уменьшающемся их времени жизни по мере возрастания Z . Использование сильнопоточных реакторов было ограничено конкуренцией между процессом последовательного захвата нейтронов и процессом радиоактивного распада образованного ядра: новое ядро успевало распаться, не дождавись следующего нейтрона. В ядерных взрывах удалось продвинуться лишь до

Fm-257 ($T_{1/2}=100$ дней). Препятствием оказался очень короткоживущий, испытывающий спонтанное деление Fm-258 ($T_{1/2}=360$ мкс). Не удавалось накопить необходимого количества исходного вещества, которое могло быть использовано в качестве мишени при синтезе следующего элемента с большим Z . Достаточно сказать, что при открытии менделевия в качестве мишени использовалось всего 10^9 атомов эйнштейния Es-253 и было получено лишь девять атомов Md-256, по которым и идентифицировали новый элемент. Это был предел, и нужно было изыскивать новые, более эффективные методы синтеза.

Выход был найден в использовании ядерных реакций на тяжелых ионах. Взяв в качестве бомбардирующих частиц атомы элементов с $Z>2$, т.е. тяжелее гелия, а именно углерод ($Z=6$), неон ($Z=10$), аргон ($Z=18$) и т.д., можно было увеличить число протонов в ядре-мишени скачком и таким способом получать новые элементы с $Z>101$. Правда, требовалось создать ускорители нового типа и соответственно мощные источники многозарядных ионов. В середине 50-х годов эта работа была начата и завершилась созданием линейного ускорителя NILAC в Беркли (США, 1957) и циклотрона У-300 в Дубне (1959). В 1978 г. к этим установкам присоединился UNILAC в Дармштадте (Германия). В перечисленных трех научных центрах — Национальной лаборатории им.Э.Лоуренса (Беркли), Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова (ЛЯР), Обществе тяжелых ионов — и были развернуты исследования по синтезу новых элементов в реакциях на тяжелых ионах, проходившие как в соперничестве, так и в сотрудничестве.

Новая методология синтеза вызвала к жизни новые экспериментальные подходы и техническое оснащение. Очень схематично процесс синтеза и идентификации неизвестного ранее элемента выглядит следующим образом. При бомбардировке мишени интенсивным пучком ускоренных тяжелых ионов в определенной доле случаев ядро-мишень и бомбардирующая части-

ца полностью сливаются и образуют ядро нового элемента. За счет большого импульса, внесенного частицей, эти ядра выбиваются из мишени; их отделяют различными способами от исходного пучка, а далее — идентифицируют по различным физическим характеристикам (чаще всего по характеристическим свойствам радиоактивного распада) или по химическим свойствам с использованием специальной аппаратуры. За прошедшие десятилетия в практике физического эксперимента были разработаны самые разнообразные методы идентификации новых элементов, рекордные по своей чувствительности и избирательности. Они включали экспрессный механический, газовый и электромагнитный транспорт продуктов ядерных реакций от мишени к детекторным системам, быстрый масс-спектрометрический анализ, методы газовой химии и др. Были сконструированы оригинальные полупроводниковые и твердотельные низкофоновые детекторные системы. Потребовалось создать многофункциональные экспериментальные установки, позволявшие идентифицировать эффект по многим ядерно-физическим параметрам. Огромный объем работы был проделан и по строительству и развитию ускорителей с целью увеличения интенсивностей пучков ионов, их энергии и расширения ассортимента ускоряемых ионов вплоть до урана.

Скачки с препятствиями

Сам процесс синтеза в реакциях с тяжелыми ионами связан с немалыми трудностями, для преодоления которых исследователям приходится проявлять высокое экспериментальное мастерство и изобретательность. Эти трудности сводятся к трем основным.

Первая. Вероятность образования атомов нового элемента очень мала и вдобавок резко убывает по мере увеличения атомного номера синтезируемого элемента. Например, если при имеющихся интенсивностях пучков бомбардирующих

частиц число синтезированных атомов 102-го элемента составляет несколько десятков за 10—12 ч работы ускорителя, то в случае 114-го элемента это количество — один—два атома за несколько месяцев непрерывной работы (о последнем эксперименте будет рассказано ниже).

Вторая. При соприкосновении ядер помимо реакции полного слияния, приводящей к образованию искомого составного ядра, в подавляющем числе случаев (в 10^8 — 10^{12} раз чаще) происходит его развал (деление на две части) или образование фрагментов с меньшим атомным номером. Создается огромный фон разнообразных радиоактивных излучений, из которых выделить излучение искомого продукта и по нему опознать ядро нового элемента чрезвычайно трудно. Для преодоления этой трудности разрабатываются очень чувствительные экспериментальные методики. Можно сказать, что обнаружение иголки в стоге сена — смехотворно простая задача по сравнению с поис-

ком атома нового элемента.

Третья. Известно, что по мере увеличения атомного номера трансуранических элементов их время жизни (период полураспада $T_{1/2}$) резко убывает. Поэтому требуются именно экспрессные методики. Но дело осложняется тем, что теоретические предсказания времен жизни для новых ядер могут колебаться в пределах от микросекунд до десятков минут, а это определяет, удачным ли будет выбор соответствующих методик.

В поисках оптимальных решений экспериментаторы ищут наиболее эффективные подходы, которые в сущности сводятся к решению двух проблем. Во-первых, к поиску таких комбинаций мишень—частица, при которых энергия возбуждения, вносимая в составное ядро и нагревающая его, была бы минимально возможной и соответственно выход искомого продукта был бы максимальным. Во-вторых, к выбору таких экспериментальных средств, которые позволили бы надежно выделить искомым эффект

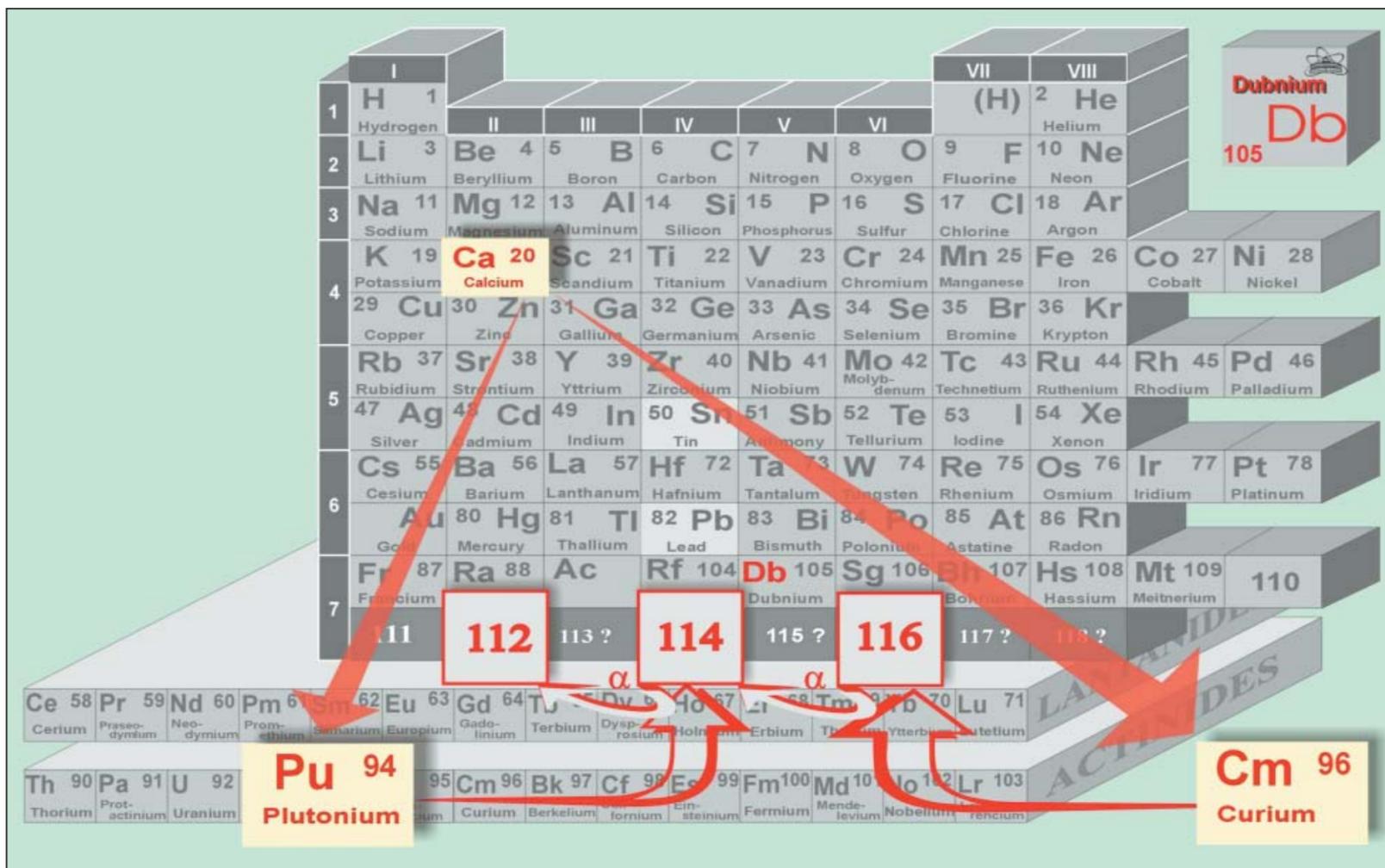
из огромного фона побочных продуктов ядерных реакций.

При синтезе элементов с $Z=101$ — 106 , проведенном в Дубне и в Беркли в 1960—1970 гг., предпочтение отдавалось наиболее асимметричным реакциям, в которых мишень имела максимально возможное значение Z , а частица соответствующее малое Z . В этих случаях синтезированное составное ядро оказывалось наименее нагретым, и вероятность его выживания была достаточно высока. Например, из двух реакций ${}_{92}\text{U}^{238}+{}_6\text{C}^{12}\rightarrow{}_{98}\text{Cf}^{250^*}$ и ${}_{94}\text{Pu}^{241}+{}_4\text{Be}^9\rightarrow$

$\rightarrow{}_{98}\text{Cf}^{250^*}$, приводящих к одному

и тому же составному ядру ${}_{98}\text{Cf}^{250^*}$, вторая была предпочтительней.

Конечно, исследователи той и другой лаборатории при синтезе конкретного элемента исходили из своих технических возможностей. Но основные усилия были затрачены на получение в высокопоточных реакторах весовых количеств именно тяжелых изотопов трансурано-



Синтез сверхтяжелых элементов в реакциях ${}_{94}\text{Pu}^{244}+{}_{20}\text{Ca}^{48}={}_{114}^{288}$ и ${}_{96}\text{Cm}^{248}+{}_{20}\text{Ca}^{48}={}_{116}^{292}$. Для синтезированных изотопов наблюдался последовательный альфа-распад от 116^{292} через 114^{288} к 112^{284} .

вых элементов от Pu до Fm, которые использовались в качестве материала мишени. Роль бомбардирующих частиц играли ионы от бора ($Z=5$) до магния ($Z=12$). Однако на этом пути удалось продвинуться только до элемента 106.

Лучше холодно, чем жарко

В начале 70-х годов возникла идея «холодного» синтеза, когда при выборе комбинации мишень—частица предпочитали мишени с меньшим Z , а частицы — с большим Z . Так, комбинация $82+20=102$ («холодный» синтез) оказалась лучше пары $92+10=102$ («горячий» синтез). Если же в качестве ядра-мишени и бомбардирующей частицы использовать магические ядра, то составное ядро, получающееся при их слиянии, оказывается почти холодным. Соответственно резко возрастает выживаемость составного ядра. Эксперимент, впервые проведенный в ЛЯР, выявил, что в реакции $^{208}\text{Pb}_{82}+^{48}\text{Ca}_{20}\rightarrow 102$ выход 102-го

элемента оказался на порядок выше, чем в реакциях «горячего»

синтеза [8].

Реакции «холодного» синтеза существенно изменили положение дел в проблеме получения новых элементов. Поскольку в качестве материала мишени стали использоваться стабильные изотопы $^{204-208}\text{Pb}$ или ^{209}Bi , экспериментальные работы в области синтеза тяжелых ядер стали доступны широкому кругу исследователей. Теперь уже достижения ускорительной техники в получении интенсивных пучков тяжелых ионов ($A>50$) определяли чувствительность экспериментов. Вместе с тем в реакциях слияния ядер ^{208}Pb с ядрами наиболее тяжелых стабильных изотопов, выступающих в качестве бомбардирующих частиц, рождающиеся составные ядра обладают сильным нейтронным дефицитом и поэтому очень малым временем жизни. Необходимость получать интенсивные пучки тяжелых ионов с $A>50$ и использовать экспрессные методы сепарации и детектирования новых ядер ($T_{1/2}\approx 1$ мкс) кардиналь-

но повлияла на постановку экспериментов по синтезу новых элементов.

В 80-х годах в Обществе тяжелых ионов создали ускоритель но-

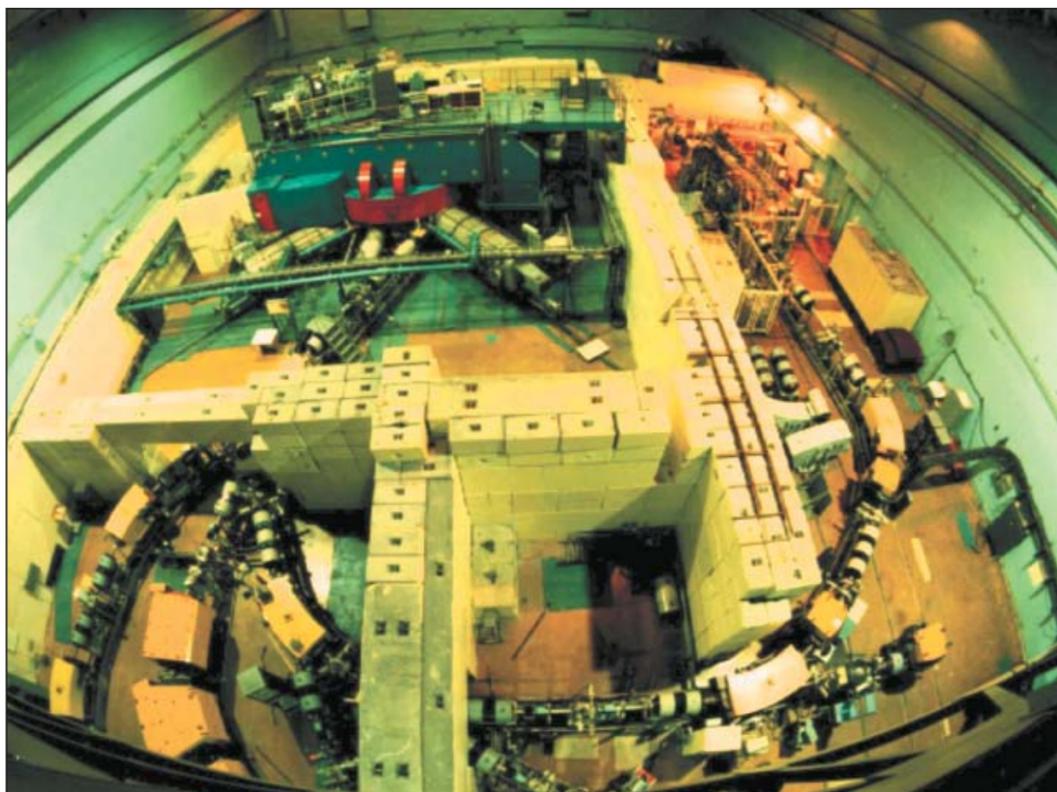
вого поколения UNILAC и установку SHIP, позволяющую отделять на лету за время ≈ 10 мкс атомы новых

элементов от громадного фона, порождаемого побочными продуктами реакций неполного слияния. В Лаборатории ядерных реакций были созданы аналогичные быстродействующие установки: газонаполненный масс-сепаратор ГНС и электростатический сепаратор ядер ВАСИЛИСА, а также сооружен новый ускоритель тяжелых ионов У-400, значительно расширивший возможности эксперимента как по интенсивности пучков, так и по ассортименту ускоряемых ионов.

В итоге почти 20-летней работы в обоих центрах в реакциях «холодного» синтеза при бомбардировке ядер ^{208}Pb или ^{209}Bi ионами от ^{54}Cr до ^{70}Zn были синтезированы шесть наиболее тяжелых элементов с $Z=107-112$. Важным результатом стало установление факта, что времена жизни изотопов этих элементов значительно превышают значения, ожидавшиеся из предсказаний прежней теории. Это придавало все больше уверенности, что в области указанных элементов мы будто находимся на отмени, ведущей к острову стабильности вблизи 114-го элемента. Также были обнаружены замкнутые оболочки в деформированных ядрах с $Z=108$ и $N=162$, что проявилось в увеличении их стабильности. Создавались предпосылки для начала штурма самого острова стабильности — синтеза 114-го элемента.

Прорыв к острову стабильности

Задача эта была исключительно сложной, на грани возможного и доступного. В предстоящем эксперименте необходимо было реализовать самые последние достижения техники ядерно-физического эксперимента, использовать очень редкие материалы, обеспечить стабильную и надежную работу ускорителя и регистрирующей аппаратуры в течение нескольких месяцев непрерывной работы. Естественно, усилиями только одного



Общий вид ускорителя У-400, на котором проводились эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов.

коллектива Лаборатории ядерных реакций эта работа не могла быть выполнена, особенно при скудном финансировании науки в целом в 90-е годы. Важную роль здесь сыграло международное сотрудничество. Кроме ЛЯР, осуществлявшей главную роль, в работе участвовали в той или иной степени американская Ливерморская национальная лаборатория (LLNL) и немецкое Общество тяжелых ионов, а также французская Национальная лаборатория GANIL (Кан), японский ядерный центр RIKEN (Токио). Существенную помощь оказал Минатом РФ. Возглавил эксперимент научный руководитель Лаборатории ядерных реакций член-корреспондент РАН Ю.Ц.Оганесян.

Сам синтез 114-го элемента было решено осуществить в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{292}114$: в ней после ис-

парения из составного ядра трех или четырех нейтронов должны были образоваться изотопы $^{289}114$ и $^{288}114$, которые предстояло идентифицировать по соответствующим цепочкам радиоактивного распада. Подготовка к этому эксперименту (пока решались сложные технические проблемы) заняла пять лет.

Для проведения эксперимента необходимо было использовать в качестве материала мишени ^{244}Pu , а в качестве ионного пучка ^{48}Ca . Самые тяжелые изотопы этих элементов понадобились потому, что они обладают наибольшим избытком нейтронов в своих ядрах. Только при этом условии можно было рассчитывать получить хотя бы несколько атомов изотопа 114-го элемента. Но ^{244}Pu — очень редкий и дорогой изотоп. Он накапливается в атомных реакторах десятилетиями, и во всем мире его не более нескольких сотен миллиграмм. Этот изотоп был предоставлен нам американскими участниками эксперимента из LLNL. Для ^{48}Ca ситуация была не проще. В естественной смеси изотопов кальция его содержание составляет всего 0.18%, а процесс обогащения — сложный и дорогостоящий. В России методы разделения и обогащения изотопов наиболее развиты.

При поддержке Минатома на предприятии в Екатеринбурге было разработано это уникальное вещество.

Для получения достаточно интенсивного пучка ионов ^{48}Ca потребовалась разработка нового циклотронного источника ионов с экономным расходом рабочего вещества. В конце 80-х годов французские ученые предложили конструкцию источника, работающего на принципе электронного циклотронного резонанса. Он стал широко применяться в западных научных центрах. Взяв за основу этот принцип, в ЛЯР в течение года разработали собственный вариант, который превосходил известные западные образцы по получению высокозарядных ионов кальция и удовлетворял требованиям предстоящего эксперимента как по интенсивности пучка ускоренных ионов, так и по рабочему расходу этого уникального вещества.

Поскольку ожидаемый выход 114-го элемента оценивался в один-два атома за несколько месяцев непрерывной работы, необходимо было создать регистрирующую аппаратуру с рекордной эффективностью и надежностью. Был сделан специальный электромагнитный сепаратор с газовым наполнением, который позволял отсеивать пучок ионов, разделять на лету многообразные продукты ядерных реакций, выбиваемые из плутониевой мишени, и направлять атомы именно 114-го элемента в детектор. Измерительная аппаратура была также разработана в ЛЯР. Вся система успешно рекомендовала себя при синтезе 110-го элемента.

Схема регистрации единичного акта радиоактивного распада ядра 114-го элемента выглядела следующим образом. Если принять, что гипотеза о существовании острова стабильности в области сверхтяжелых элементов справедлива, то ядро 114-го элемента с массой 288 должно испытывать альфа-распад, превращаясь в ядро 112-го элемента. Последнее через альфа-распад становится ядром 110-го, которое уже испытывает спонтанное деление. Таким обра-

зом, мы должны были наблюдать новое радиоактивное семейство с весьма необычными свойствами. Именно так открывались радиоактивные ряды еще в пионерских работах Марии Кюри-Склодовской начала XX в.

Практически в наших экспериментах эта схема была воплощена так. Регистрирующая система представляла собой «колодец» со стенками, собранными из восьми полупроводниковых детекторов, окружающих центральный детектор. Общая площадь детектирующей поверхности составляла 50 см^2 . Сигналы с установки дают возможность регистрировать сам факт попадания в нее синтезированного ядра и координаты места попадания, энергию альфа-частиц или осколков спонтанного деления, испущенных при распаде именно этого ядра, а также его «дочек», и интервалы времени между зафиксированными событиями распада. Таким образом, устанавливается генетическая связь между изначальным материнским ядром, полученным непосредственно в ядерной реакции, и продуктами его распада. Была разработана специальная компьютерная программа, выделявшая по 16 параметрам события, соответствующие именно принятой схеме, и исключавшая возможные случайные совпадения сигналов, имитирующие искомый распад. Достаточно сказать, что вероятность ошибочной идентификации составляла всего 10^{-13} . Такая степень достоверности полученного результата редко достигается в практике физического эксперимента. В итоге проделанной подготовительной работы стало возможным осуществить эксперимент, который имел чувствительность в 1000 раз больше, чем подобные эксперименты по синтезу новых элементов на протяжении последних 25 лет как в нашей стране, так и за рубежом.

Осенью 1999 г. в Дубне приступили непосредственно к синтезу 114-го элемента и был получен положительный результат [9]. В эксперименте, длившемся непрерывно три месяца, было зарегистрировано два атома изотопа $^{288}114$ и один — $^{289}114$. Были установлены

их цепочки распада и соответствующие характеристики распада самих этих изотопов и их «дочерних» продуктов. В 2000 г. в ЛЯР по той же методике был проведен эксперимент по синтезу 116-го элемента, в котором в качестве мишени использовался уже ^{248}Cm [10]. Результат тоже оказался положительным — было зафиксировано два атома 116-го элемента. При этом при распаде $^{292}116$ воспроизвелась вся цепочка распадов, наблюдаемая при регистрации $^{288}114$.

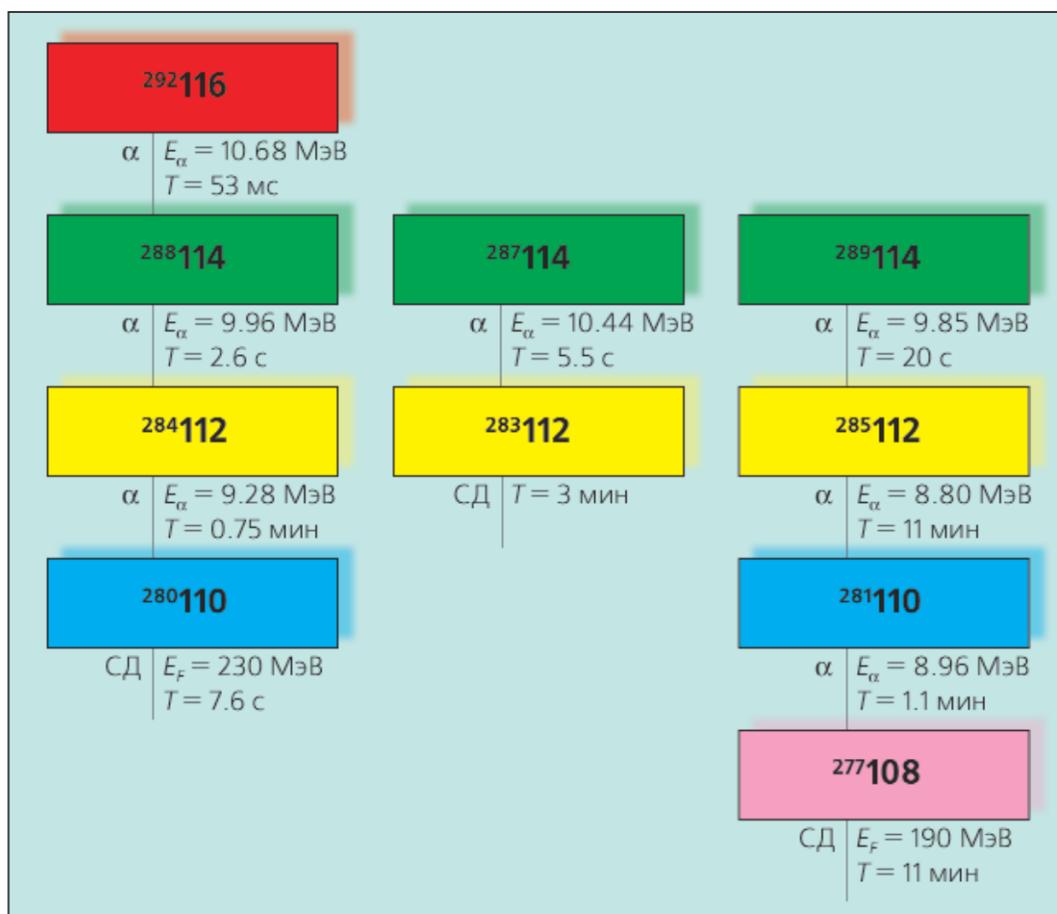
Для непосвященного человека этот результат может показаться весьма скромным, но для ядерной физики он имеет огромное значение. Предсказание теории было полностью подтверждено. Действительно, в море ядерной нестабильности, простирающимся в конце таблицы Менделеева, обнаружился остров стабильности, на который физики Лаборатории ядерных реакций вступили первыми.

Достигнутый успех породил и новые замыслы. Прежде всего хотелось бы получать ядра сверхтя-

желых элементов в больших количествах. Конечно, сам факт открытия нового элемента всего по двум атомам впечатляет, но для более полного изучения требуется значительно большее их количество. Оказалось, что для этого есть резервы — в дальнейшем совершенствовании экспериментальной аппаратуры, в частности в увеличении ее эффективности. В настоящее время в ЛЯР осуществляется проект MASHA с созданием высокоэффективного масс-сепаратора с высоким разрешением. После ввода его в действие можно рассчитывать на получение уже десятков таких атомов сверхтяжелых элементов и исследовать их свойства более широко. Еще один резерв — в получении на ускорителе пучков ионов с возможно большим избытком нейтронов в ядре. Среди естественных стабильных изотопов чемпион по этому параметру — кальций-48 (отношение числа нейтронов к числу протонов $R=1.4$), но для будущих экспериментов требуется еще бо́льшая величина

R . Поэтому нужно переходить к ускорению радиоактивных ядер, которые получаются при делении урана (осколки деления). Среди них наиболее перспективным представляется олово-132 ($R=1.64$). Ускорить такие ядра — технически очень сложная, но выполнимая задача. На ее решение направлен реализуемый в настоящее время проект DRIBs, где в единый комплекс объединяются сразу три ускорителя, разнесенные друг от друга на сотни метров. В январе 2002 г. была успешно осуществлена первая стадия этого проекта.

Возникли и новые идеи относительно свойств сверхтяжелых элементов, которые следует проверить экспериментально. Образно говоря, попав на остров стабильности, мы еще не добрались до его вершины, пока мы только на одном из отрогов. Но и это может многое сказать. Ясно, что современная теория должна быть пересмотрена с учетом полученных экспериментальных данных. Сейчас она предсказывает время жизни для ядер, находящихся на вершине, в десятки тысяч, а то и миллионов лет. Но не исключено, что с внесением поправок это время жизни возрастет до сотни миллионов лет. И тогда будет иметь смысл искать такие элементы в недрах Земли. То, что они до сих пор не обнаружены, можно объяснить, с одной стороны, их малым содержанием, которое оценивается как 10^{-16} г на грамм руды, а с другой — неопределенностью их химических свойств. Периодический закон Д.И.Менделеева предсказывает, например, что химическим аналогом 112-го элемента должна быть ртуть. Но так ли это на самом деле? Есть основания предполагать, что не совсем. При столь большом числе протонов в составе ядер могут заработать релятивистские эффекты, которые способны существенно повлиять на энергетические состояния электронов в этих атомах и соответственно на химические свойства. Такие предположения требуют экспериментальной проверки. Если же гипотезы о возможном существовании сверхтяжелых элементов в природных образцах подтвердятся



Схемы распада изотопов элементов 114 и 116. α — альфа-распад; СД — спонтанное деление; E_α — энергия альфа-частиц; E_f — полная энергия осколков деления. T — промежуток времени между последовательными актами распада.

ся, можно будет ставить вопрос об их добыче. Уже сейчас ясно, что они представляют собой очень компактный источник энергии.

* * *

В заключение уместно остановиться на том, каким образом в конце концов разрешилась проблема номинации новых химических элементов, вокруг которой было много неопределенностей и споров относительно приоритетов открытия. Следует сказать, что в исследованиях по синтезу новых элементов фокусируются научно-технические достижения стран, они служат индикатором их общего развития и потому становятся предметом национального престижа. Названия, присвоенные новым химическим элементам, увековечиваются в Периодической системе — в некотором роде концентрате человеческих знаний о Природе. Этим объясняется имевшая место активная полемика при определении приоритетов открытия между создателями новых элементов. Оставляя за рамками статьи историю каждого открытия, остановимся на конечных результатах. В 1997 г. конгресс Международного союза чистой и прикладной химии официально утвердил названия элементов со 102-го по 109-ый:

Открытые в последние годы элементы 110—116 еще ждут своих названий. В своем решении конгресс исходил из установившегося ранее правила присваивать названия новым элементам в честь выдающихся деятелей науки и географических мест, где находятся науч-

ные центры, внесшие значительный вклад в развитие естественных наук. Присвоение 105-му элементу названия «дубний» в честь города Дубны, в котором располагается Лаборатория ядерных реакций им.Г.Н.Флерова, стало признанием заслуг в развитии ядерной физики не только этого научного коллектива, но и Объединенного института ядерных исследований, и российской атомной науки в целом. ■

102 нобелий	106 сиборгий
103 лоуренсий	107 борий
104 резерфордий	108 ганий
105 дубний	109 мейтнерий

Литература

1. Оганесян Ю.Ц. На пути к сверхтяжелым // Природа. 1977. №6. С.8—19.
2. Wapstra A.H. // Physica. 1955. V.21. P.367, 385.
3. Престон М. Физика ядра. М., 1964.
4. Щеголев В.А. Сообщение ОИЯИ, Д-98-34. Дубна, 1998.
5. Strutinsky V.M. // Nucl. Phys. 1967. V.A95. P.420—425.
6. Myers W.D., Swiatecki W.J. // Nucl. Phys. 1966. V.81. P.1—9.
7. Sobiczewski A., Gareev F.A., Kalinkin B.N. // Phys. Rev. Lett. 1966. V.22. P.500—502.
8. Oganessian Yu.Ts. // Lecture Notes in Physics. 1974. V.33. P.221—226.
9. Oganessian Yu.Ts. et al. // Nature. 1999. V.400. P.242—243.
10. Oganessian Yu.Ts. et al. // Phys. Rev. 2000. V.C63. P.011301(R).