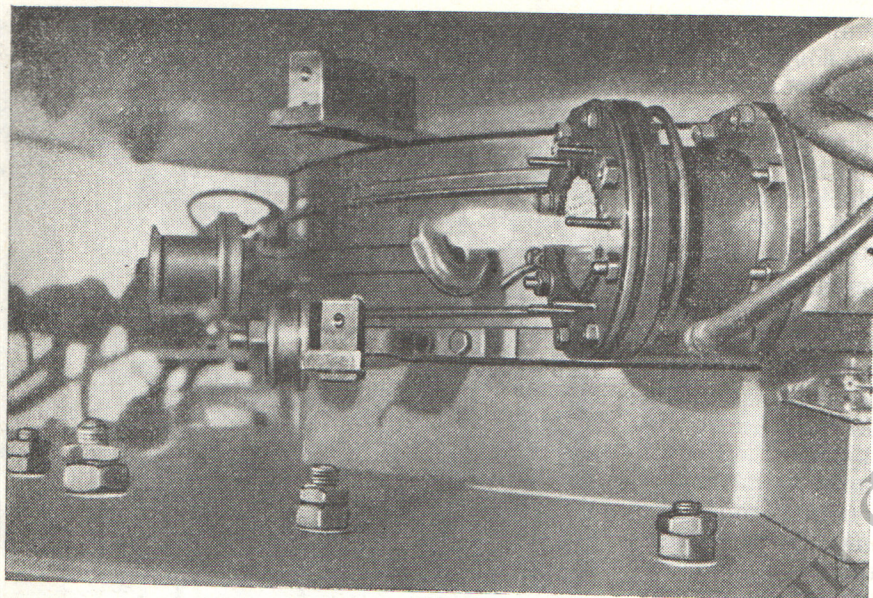




Пучок дейтронов, выпущенный из циклотрона

с парафиновыми блоками, послезавтра начинаем облучение уранилнитрата».

Так закончился знаменательный для нас продолжавшийся почти сутки рабочий день.

Для ведения опытов по отработке методики облучения Курчатов разбил всех сотрудников на бригады. Одну из бригад он возглавил сам. Опыты шли круглосуточно. Затем началось облучение уранилнитрата. Оно продолжалось до декабря 1945 г. Облученное вещество поступало для выделения плутония в лабораторию химика Бориса Васильевича Курчатова, брата Игоря Васильевича.

Для выделения плутония, полученного в результате облучения уранилнитрата на циклотроне, Б. В. Курчатов и его сотрудники разработали так называемый сульфатный метод (с осаждение из водного раствора).

Этот метод был отработан на первых микроколичествах плутония, впервые полученных в Со-

ветском Союзе Б. В. Курчатовым в октябре 1944 г. из 4,5 кг урана, облученного нейтронами $Ra + Be$ -источника. Этим же методом был выделен первый в Европе циклотронный плутоний. Так была решена задача, поставленная И. В. Курчатовым в марте 1943 г.

Война приближалась к победному концу. Но темп работы в Лаборатории № 2 не снижался. Число сотрудников значительно увеличилось. У Курчатова появились новые заботы.

Ни одному ученому Советского Союза не приходилось до этого руководить такими грандиозными коллективами и не один ученый не пользовался таким доверием партии и правительства, как Игорь Васильевич Курчатов. В этом человеке природа сочетала талант крупнейшего ученого с талантом выдающегося организатора.

УДК 633.173.7

Спонтанное деление тяжелых ядер

ПЕТРЖАК К. А., ФЛЁРОВ Г. Н.

Со времени открытия спонтанного деления урана,— работы, выполненной под научным руководством Игоря Васильевича Курчатова,— прошло почти сорок лет. За это время спон-

танное деление стало важным разделом физики атомного ядра. Сегодня интерес к спонтанному делению обусловлен, с одной стороны, тем, что оно представляет наиболее простой пример

крупномасштабного ядерного явления, связанного с движением большого количества ядерной материи. С другой стороны, оно является основным процессом, определяющим устойчивость тяжелых ядер, поэтому вопрос о спонтанном делении тесно связан с проблемой границ Периодической системы элементов Д. И. Менделеева и тем самым с некоторыми задачами химии, геофизики и астрофизики.

Отдавая дань памяти нашему учителю, мы подытожим здесь некоторые основные результаты и попытаемся наметить ближайшие перспективы в изучении спонтанного деления — нового вида радиоактивного распада тяжелых элементов.

Краткий исторический очерк

В 1934 г. Э. Ферми с сотрудниками, пытаясь получить трансурановые элементы бомбардировкой урана медленными нейтронами, обнаружили значительное число активностей, которые они приписывали различным изотопам радия и гипотетическим трансурановым элементам. Тем самым было положено начало своеобразной «золотой лихорадке» в ядерной физике, которая привела в 1939 г. к открытию деления ядер [1, 2].

В классических работах Я. И. Френкеля [3], Н. Бора и Д. Уилера [4] была развита первая теория деления, основанная на модели жидкой капли. Н. Бор и Д. Уилер указали также на возможность самопроизвольного деления, оценив, однако, время жизни ядер урана по отношению к этому процессу астрономическим значением 10^{22} лет. В том же 1939 г. В. Либби из Калифорнийского университета предпринял попытку обнаружить процесс самопроизвольного деления ядер урана и тория [5]. Первая серия его опытов заключалась в поиске радиоактивных осколков в естественной смеси изотопов, вторая — в попытке детектирования вторичных нейтронов, образующихся при делении. Обе серии опытов привели к отрицательным результатам, и нижняя граница времени жизни урана и тория относительно спонтанного деления была оценена 10^{14} годами.

К тому времени в нашей стране ядерно-физические исследования только начинали развиваться. Перед коллективами молодых ученых, возглавляемыми И. В. Курчатовым в Физикотехническом и Радиовом институтах в Ленинграде, была поставлена сложная задача — в кратчайший срок ликвидировать отставание

в исследованиях по физике ядра и выйти со своими работами на «мировую арену».

Глубочайшая научная интуиция позволила И. В. Курчатову сразу же после открытия оценить важность процесса деления и все силы руководимых им коллективов направить на его изучение. Здесь сказалось одно из основных свойств И. В. Курчатова — умение выбирать в исследованиях главное направление и ставить задачи, решение которых определяет судьбу проблемы в целом. Качественный прогресс на этом пути мог быть достигнут созданием экспериментальных методик, чувствительность которых значительно превосходила бы чувствительность имевшихся к тому времени за рубежом.

Перед нами, тогда еще совсем молодыми исследователями, И. В. Курчатов поставил задачу — определить с высокой точностью порог деления естественной смеси изотопов урана. Регистрировать осколки деления решено было ионизационной камерой с чувствительностью, существенно большей, чем у ранее использовавшихся. В результате многочисленных экспериментов мы создали многослойную камеру с рабочей площадью пластин около 1000 см^2 , куда удалось поместить урана в 30–50 раз больше обычного. В дальнейшем изготовили камеру, чувствительность которой превосходила обычную в 200 раз. В ходе работы пришлось преодолеть многочисленные технические трудности, связанные с разработкой специального усилителя, настроенного на импульсы от осколков, борьбой с шумами, микрофонным эффектом и т. п. Преодоление этих трудностей означало по существу работу на уровне, заметно превышающем уровень техники тех лет.

В первых же опытах наблюдались самопроизвольные импульсы в отсутствие нейтронного источника. Число импульсов было невелико — около 6 в час, и поэтому вполне понятно, что ранее, в камерах обычного типа, они не обнаруживались. Когда мы сообщили о поразительных итогах измерений Игорю Васильевичу, он сказал, что если это действительно самопроизвольное деление, то нужно бросить все и заниматься только этим! Последовали многочисленные обсуждения, в результате которых были намечены и проведены необходимые контрольные опыты. Каждый из них последовательно «отсекал» возможность происхождения «спонтанных» импульсов за счет радиотехнических помех, многократных наложений импульсов от α -частиц и т. п. Сравнение амплитудных распределений «спонтанных» импульсов и импуль-

сов от осколков вынужденного деления показали их идентичность и еще более убедило нас в том, что мы наблюдаем действительно осколки спонтанного деления.

Хотя предварительные оценки показывали, что вклад в наблюдаемый эффект за счет деления урана космическим излучением крайне мал, необходимо было проверить это экспериментально. Здесь сказалась еще одна черта, характерная для И. В. Курчатова, — умение быстро изменять ход работы, перенося ее в новые условия: по его предложению дальнейшие опыты стали проводить в шахте Московского метрополитена на глубине 50 м. С одной стороны, на такой глубине интенсивность космического излучения падает примерно в 40 раз, с другой, сами по себе новые условия в заметной степени исключали влияние непредвиденных факторов, действующих на поверхности земли, да еще в таком промышленном и техническом центре, как Ленинград. Как показала проведенная в Московском метро серия опытов, эффект спонтанного деления под землей — тот же, что и на поверхности. Этим же был дан ответ оппонентам (кстати, тогда довольно многочисленным), утверждавшим, что эффект полностью обязан делению под воздействием космического излучения. Надо сказать, немалая доля трудностей состояла еще и в том, что даже о вынужденном делении в то время знали очень мало. Конечно, это не могло не привести к значительному увеличению числа контрольных экспериментов, которые необходимо было проделать. В результате такой напряженной и длительной работы был сделан вывод о том, что «наблюдаемый нами эффект следует приписать осколкам, получающимся в результате спонтанного деления урана» [6].

Успех проведенных в Ленинграде опытов был обусловлен прежде всего качественным повышением чувствительности методики, позволившей детектировать весьма редкие события. Опыт регистрации редких событий, приобретенный в ходе этой работы, часто оказывал огромную помощь в наших дальнейших исследованиях.

Хотя Игорь Васильевич Курчатов был научным руководителем всего цикла исследований, он, проявив крайнюю щепетильность, не захотел стать соавтором публикаций по спонтанному делению. Отмечая его неоценимый вклад, мы писали в первой статье: «...Приносим искреннюю благодарность за руководство работой проф. И. В. Курчатову, наметившему все контрольные эксперименты и принимавшему самое

непосредственное участие в обсуждении результатов исследований» [6].

В 1943 г. Г. Поле [7], регистрируя нейтроны, которые сопровождают спонтанное деление урана, подтвердил результаты. В 1944 г. М. И. Певзнер и Г. Н. Флёров, значительно увеличив чувствительность метода, выделили радиоактивные изотопы из осколков радиохимически. Тем самым было доказано присутствие осколков спонтанного деления в естественной смеси изотопов, т. е. проделано то, что ранее не удалось В. Либби.

Наступившая война прервала наши исследования по спонтанному делению, выдвинув на первый план решение вопросов, имевших огромное государственное значение. Выдающаяся роль И. В. Курчатова в успешном выполнении поставленных задач хорошо известна.

Возобновление фундаментальных исследований по физике ядра в 50-х годах позволило продолжить изучение спонтанного деления по двум основным направлениям, развивавшимся в тесном взаимодействии друг с другом.

Первое направление было связано с подробным исследованием механизма спонтанного деления и включало как определение вероятности спонтанного деления для различных трансурановых элементов, так и изучение характеристик процесса, относящихся к данному спонтанно делящемуся ядру [8—10].

В 60-е годы наступил качественно новый этап в изучении механизма спонтанного деления: советская атомная промышленность, становление и развитие которой неразрывно связано с именем И. В. Курчатова, начала поставлять для исследователей реальные весовые количества искусственных трансурановых элементов. Появилась возможность детального измерения характеристик процесса — энергетических распределений осколков, выходов осколков различной массы и выяснения тем самым влияния квантовых оболочечных эффектов на процесс деления, нейтронов и γ -квантов, сопровождающих деление, и т. п. [11—13]. Постепенно становилось ясно, что для изучения столь сложного явления недостаточно измерять какой-либо один параметр, характеризующий процесс деления данного ядра. Дальнейший прогресс в изучении такой проблемы, как, например, динамика процесса деления, связывается с начатыми в конце 60-х годов многопараметровыми исследованиями, включающими одновременное измерение трех, четырех и даже пяти характеристик деления [14—16].

Особое место в исследовании механизма спонтанного деления занимает изучение деления,

сопровождающегося вылетом легких заряженных частиц — протонов, тритонов, α -частиц и т. п. [17—19]. Поскольку вылет легких частиц происходит в момент времени, близкий к разделению осколков, исследование этого процесса могло принести и принесло ценную информацию о свойствах делящейся системы. Деление с испусканием третьей легкой частицы — процесс маловероятный (например, на 500 случаев двойного деления испускается одна α -частица, а вероятность эмиссии других частиц еще меньше), поэтому его изучение потребовало создания сложных экспериментальных методик, предназначенных для регистрации весьма редких событий. При исследовании состава легких частиц неожиданно выяснилось, что в процессе тройного деления испускаются легкие ядра с большим избытком нейтронов (например, изотопы гелия от ^3He до ^8He), изучение структуры которых представляет самостоятельный интерес [20, 21].

Исследование некоторых характеристик спонтанного деления имеет также и важное прикладное значение. Прежде всего это относится к точному определению числа нейтронов на акт спонтанного деления ^{252}Cf — важнейшего опорного параметра для многочисленных относительных измерений, результаты которых напрямую используются для расчета и проектирования быстрых реакторов, к измерению спектров мгновенных нейтронов деления трансурановых элементов, сечений деления тяжелых ядер нейтронами спонтанного деления ^{252}Cf и т. п. [22—24].

Второе направление в изучении спонтанного деления было связано с выяснением его роли как одного из решающих факторов в проблеме стабильности тяжелых ядер, и, следовательно, в вопросе о границе Периодической системы элементов. К началу этих исследований насчитывалось уже восемь трансурановых элементов, включая фермий ($Z = 100$), полученных путем многократного захвата нейтронов в нейтронных потоках большой плотности.

Качественный прогресс на пути искусственного синтеза еще более далеких трансурановых элементов мог быть достигнут лишь при использовании ядерных реакций, вызываемых тяжелыми ионами.

Такие реакции позволили бы «скачком» увеличить атомный номер синтезируемых элементов сразу на несколько единиц. Задача заключалась в доказательстве принципиальной возможности ускорения ионов, масса которых в 10—20 раз превышает массу протона.

Под идейным руководством и при большой поддержке И. В. Курчатова в 1954 г. на 150-см циклотроне Института атомной энергии в Москве были поставлены первые опыты по ускорению ионов азота, а уже к концу 50-х годов в результате создания мощного источника многозарядных ионов, обеспечившего моноэнергетические пучки ядер углерода, азота и кислорода необходимой энергии, был завершен первый цикл исследований по выяснению главных особенностей взаимодействия многозарядных ионов с ядрами [25, 26]. Уже первые работы цикла показали исключительную перспективность использования тяжелых ионов для искусственного синтеза новых трансформированных элементов, и в 1956 г. начались эксперименты, нацеленные на получение неизвестного тогда элемента с атомным номером 102.

Успешно развивавшееся новое направление в физике ядра продолжало пользоваться неизменным вниманием и большой поддержкой академика И. В. Курчатова, по предложению которого было принято решение о существенном расширении исследований с тяжелыми ионами. В 1957 г. в ОИЯИ в Дубне на базе нового ускорителя, специально предназначенного для ускорения тяжелых ионов, была создана Лаборатория ядерных реакций.

Был разработан проект классического циклотрона с полюсами диаметром 310 см, который в 1960 г. вступил в строй действующих. По интенсивности и ассортименту ускоряемых частиц эта установка и по сей день остается одной из лучших в мире. В результате появилась возможность перейти к систематическим фундаментальным исследованиям, направленным на синтез новых трансформированных элементов, находящихся на границе области ядерной стабильности.

На базе многочисленных методических работ и исследований механизма ядерных реакций между сложными ядрами в 1964—1970 гг. синтезировали новые трансформированные элементы с порядковыми номерами 102, 103, 104 и 105 и изучили их физические и химические свойства [27, 28]. В знак признания выдающихся научных заслуг академика И. В. Курчатова открытому в 1964 г. элементу 104 советские ученые присвоили название «курчатовий».

Для идентификации элементов 102 и 103 преимущественно использовали детектирование α -распада ядер. Для элементов 104 и 105 развили и применили другой подход к идентификации, основанный на регистрации их спонтанного деления. Это было связано со следую-

щим. Во-первых, если для ядер с $Z < 100$ спонтанное деление является довольно редким видом распада, то в области $Z \geq 100$ оно превращается в основной. Во-вторых, идентификация новых нуклидов по их спонтанному делению имеет очевидные преимущества: осколки деления регистрируются с наивысшей чувствительностью благодаря их большой энергии и сравнительно малому набору известных спонтанно делящихся ядер. В-третьих, изучение спонтанного деления далеких трансурановых элементов имеет большую самостоятельную ценность, поскольку именно спонтанное деление, как уже неоднократно отмечалось, определяет устойчивость самых тяжелых ядер. Если к тому же учесть, что такой подход позволял исследовать спонтанное деление весьма экзотических по своему нуклонному составу ядер, то можно было ожидать появления и новых закономерностей в механизме деления, и новых эффектов.

Несколько забегаая вперед, отметим, что преимущественная ориентация на спонтанное деление оказалась правильной и плодотворной — были действительно обнаружены качественно новые явления и закономерности, связанные с делением тяжелых ядер.

Наиболее полно возможности спонтанного деления как метода идентификации новых трансфермиевых элементов проявились при синтезе элементов 106 и 107, осуществленном в 1974—1976 гг.

Продвижение по пути синтеза новых элементов с $Z > 105$ традиционным способом — облучением мишеней из тяжелых трансурановых элементов (Cm, Cf) сравнительно легкими ионами (O, Ne) — значительно затруднялось тем, что при использовании мишеней, которые сами имеют высокую осколочную активность, резко возрастает вероятность образования спонтанно делящихся изотопов фермия в результате реакций передачи нуклонов. Оба эти фактора приводят к образованию большого осколочного фона. К тому же компаунд-ядра, получаемые в таких комбинациях, обладают энергией возбуждения ~ 40 — 50 МэВ, и в основном состоянии путем последовательного испускания нейтронов может перейти лишь 10^{-9} — 10^{-10} их часть. В результате образование таким способом каждого последующего нового элемента является все более и более редким процессом.

Следуя по пути ускорения все более тяжелых частиц и использования нерадиоактивных мишеней, сотрудники Лаборатории ядерных реакций разработали метод синтеза трансфермиевых элементов, основанный на образовании слабозв-

бужденных составных ядер при бомбардировке мишеней из свинца ускоренными ионами аргона, титана, хрома и т. п. [29]. Данный метод свободен от многих трудностей, возникающих при традиционном подходе к синтезу новых элементов, и благодаря отсутствию фона отличается очень высокой чувствительностью при детектировании спонтанного деления. Использование такого метода и привело к открытию элементов с порядковыми номерами 106 и 107 [30, 31].

Дальнейшие перспективы связываются с использованием ускоренных ионов типа ^{48}Ca , представляющих исключительные возможности для искусственного синтеза элементов [32]. Структура этого ядра такова, что поверх заполненного дважды магического остова ^{40}Ca имеется восемь нейтронов. Его перестройка при слиянии с другим ядром требует значительных энергетических затрат, что приводит к малой энергии возбуждения получающейся компаунд-системы, а «лишние» нейтроны оказываются весьма существенными для того, чтобы максимально продвинуться в область больших Z и N . Несмотря на многочисленные трудности, к настоящему времени получены достаточно интенсивные (более 10^{12} частиц в секунду) пучки этих весьма экзотических ядер и начаты работы по синтезу элементов 108 и 109.

Здесь мы не останавливаемся на других направлениях развития физики тяжелых ионов, таких как искусственный синтез легких и средних ядер, существенно удаленных от области β -стабильности [33], изучение реакций глубоко-неупругих передач [34], запаздывающих протонов [35], синтез и исследование новых изотопов редкоземельных элементов [36], проблемы атомной физики и электродинамики при столкновении тяжелых ионов [37] и т. п. Современные достижения и перспективы развития этого многообещающего направления физики атомного ядра огромны [38]: уже к началу 70-х годов сложилось мнение, что ядерная физика ближайших одного-двух десятилетий — это прежде всего физика тяжелых ионов. Конечно, нельзя не отметить, что использование тяжелых ионов открывает уникальные возможности также и для решения многих актуальных прикладных задач [39].

Некоторые основные достижения в изучении спонтанного деления

За 38 лет, прошедших со времени открытия спонтанного деления, синтезировано более

100 изотопов в трансурановой области. Примерно 50 ядер из 100 испытывают спонтанное деление. Для большинства ядер периоды полураспада относительно спонтанного деления определены достаточно точно, для некоторых получены лишь нижние границы периодов. Для многих ядер из этой области экспериментально определены также величины барьеров деления.

Первые попытки систематизации периодов спонтанного деления, позволившие выяснить глобальную картину устойчивости тяжелых ядер по отношению к такому виду распада, относятся к началу 50-х годов [40, 41]. Тогда было установлено, что периоды спонтанного деления четно-четных ядер уменьшаются примерно экспоненциально с ростом параметра делимости Z^2/A . Это качественно согласовывалось с предсказаниями классической капельной модели, по которой вероятность спонтанного деления непосредственно определяется параметром Z^2/A — мерой отношения кулоновских сил расталкивания к силам поверхностного натяжения, стабилизирующим ядро. При критическом значении параметра $(Z^2/A)_{кр.} \sim 48$ барьер деления полностью исчезает, и тогда время жизни ядра относительно спонтанного деления составляет $\sim 10^{-22}$ с. Казалось бы, получается довольно простая картина: периоды спонтанного деления всех трансурановых элементов T_{sf} заключены в интервале от измеренного в 1940 г. периода спонтанного деления $^{238}\text{U} \sim 10^{16}$ лет до $\sim 10^{-22}$ с, соответствующего времени жизни абсолютно неустойчивой ядерной системы. При этом все другие точки ложатся на экспоненциальную кривую, проведенную между крайними значениями, так что измерение 1940 г. задает в некотором смысле крупномасштабную калибровку устойчивости ядер по отношению к спонтанному делению.

Однако появление новых данных о периодах спонтанного деления трансурановых, а затем и трансфермиевых элементов потребовало уточнения простой жидкокапельной картины. Из зависимости, приведенной на рис. 1, следует, что имеются существенные эффекты, необъяснимые в рамках классической модели. Во-первых, большой (10^3 – 10^6) коэффициент запрета для изотопов с нечетным числом нуклонов. Так, T_{sf} для ^{238}Pu составляет $4,9 \cdot 10^{10}$ лет, а ^{239}Pu $5,5 \cdot 10^{15}$ лет, для ^{256}Fm $2,7$ ч ($2 \cdot 10^{-4}$ года), а ^{257}Fm 10^2 лет, добавление одного нуклона к четно-четному остову приводит к резкому возрастанию стабильности системы. Во-вторых, в модели жидкой капли барьеры деления, а следовательно

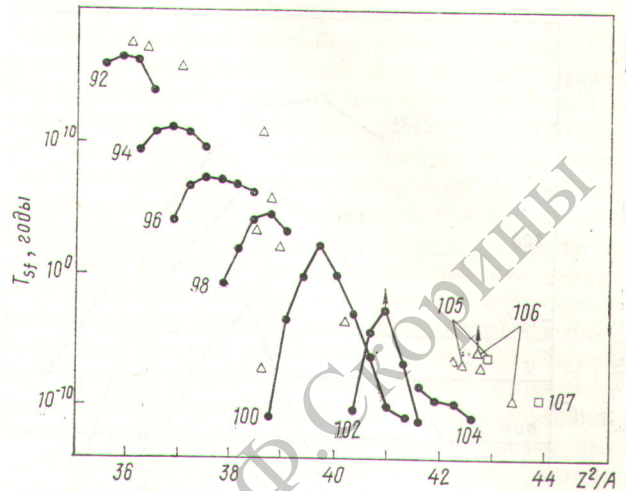


Рис. 1. Зависимость периодов полураспада тяжелых ядер относительно спонтанного деления T_{sf} от параметра делимости Z^2/A :

● — четно-четные ядра; Δ , $\square$ — нечетные ядра

но, и T_{sf} для изотопов одного элемента должны монотонно возрастать с ростом A , т. е. с уменьшением Z^2/A . Однако у кривых, соединяющих значения периодов спонтанного деления разных изотопов одного элемента, имеются, как правило, максимумы.

По мере увеличения числа протонов в ядре зависимость периодов полураспада от числа нейтронов N для изотопов данного элемента становится все более сильной, и, например, для изотопов фермия или 102-го элемента изменение числа нейтронов на две единицы приводит к уменьшению стабильности по отношению к спонтанному делению в 10^4 раз, как это следует из рис. 2.

В то же время характер изменения стабильности четно-четных изотопов курчатовия в зависимости от числа нейтронов кардинально отличается от аналогичных зависимостей для калифорния, фермия и 102-го элемента. Как показал Ю. Ц. Оганесян с сотр. [42], зависимость T_{sf} для изотопов курчатовия свидетельствует о монотонном возрастании времени жизни четно-четных ядер Ку с увеличением их массы без каких-либо существенных вариаций в области $N = 152$, там, где для других ядер вариации велики.

Из всех этих фактов может быть сделан тот физический вывод, что капельная модель соответствует лишь грубой усредненной картине и что весьма существенную роль в процессе деления играет внутренняя структура ядра.

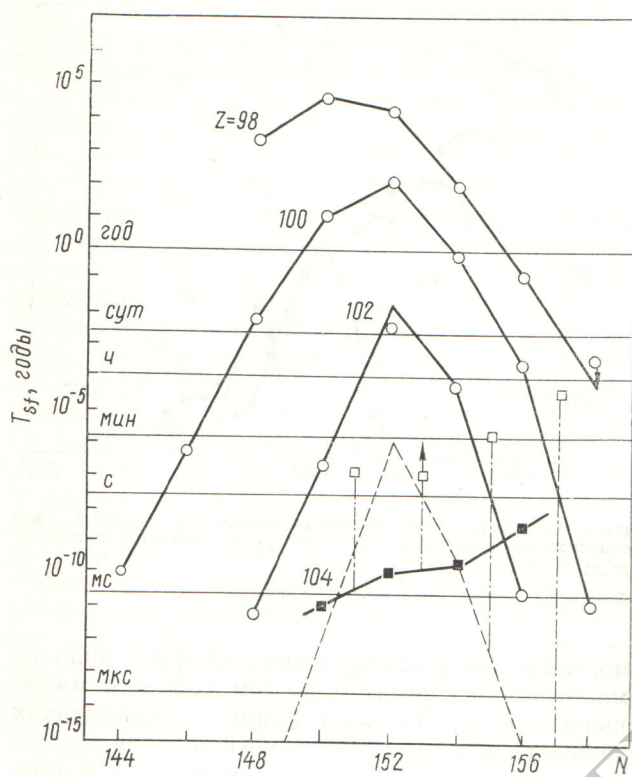


Рис. 2. Зависимость периодов полураспада относительно спонтанного деления T_{sf} от числа нейтронов N для наиболее тяжелых четно-четных ядер:

○, ■ — четно-четные ядра; □ — нечетные ядра

Многочисленные попытки теоретического учета влияния структуры ядра на вероятность спонтанного деления долгое время не приводили к успеху. Не рассматривая подробно все эти исследования, упомянем работу В. Майерса и В. Святецкого [43], где была сделана попытка объединения модели жидкой капли с моделью независимых частиц. Авторы считали, что оболочечная поправка к жидкокапельной массе ядра, связанная с пониженной или повышенной плотностью одночастичных уровней вблизи границы Ферми, максимальна для околomagических и сферических ядер и экспоненциально убывает с ростом деформации. На основании таких предположений вычислялись равновесные деформации ядер, а также высота и форма барьеров деления. В. Майерс и В. Святецкий экстраполировали расчеты в область сверхтяжелых ядер, и, как оказалось, вблизи предполагаемых магических чисел $Z = 126$ $N = 184$ учет оболочечной поправки приводит к возникновению барье-

ра высотой ~ 9 МэВ, т. е. к возможности существования в этой области сверхтяжелых ядер, имеющих заметную устойчивость по отношению к спонтанному делению.

Указанная модель была опровергнута систематикой порогов деления тяжелых ядер ($Z^2/A = 34-38$), которые в основном состоянии являются деформированными. Эксперименты показали, что в этой области ядер пороги деления остаются почти постоянными, в то время как по расчету они должны были уменьшаться в несколько раз. Постоянство порогов деления противоречило основному предположению В. Майерса и В. Святецкого о том, что оболочечная поправка оказывает стабилизирующее влияние лишь в области сферических околomagических ядер и исчезает в области ядер деформированных. Расхождение теории с экспериментом нельзя было объяснить даже качественно.

К неудаче привели также многочисленные попытки чисто микроскопических расчетов для описания сильнодеформированных ядер в процессе деления на основании схемы одночастичных уровней в деформированном потенциале Нильссона [44, 45]. Применение этого метода оказалось возможным лишь для небольших деформаций. Барьер деления в расчетах такого типа получался как малая разность двух больших по абсолютному значению энергий — поверхностной и кулоновской, а схемы уровней были известны не настолько хорошо, чтобы вычислить поверхностную энергию точно.

Ситуация существенно изменилась, когда в 1962 г. в Дубне в ходе экспериментов по синтезу нового элемента с порядковым номером 104 обнаружили, что ядро ^{242}Am испытывает спонтанное деление с периодом полураспада около 0,014 с [46]. Этот период нельзя было отнести ни к вынужденному делению (время жизни такой системы меньше 10^{-16} с), ни к самопроизвольному делению из основного состояния ($T_{sf} \sim 10^{14}$ лет).

Исследования, проведенные в Дубне и других ведущих лабораториях мира, показали, что наличие у ядра двух периодов полураспада по отношению к спонтанному делению является отнюдь не единичным явлением.

К настоящему времени идентифицировано более 30 таких ядер в области от урана до берклия с «аномальными» периодами полураспада $10^{-9}-10^{-2}$ с, полученных как в реакциях с тяжелыми ионами, так и при облучении тяжелых ядер нейтронами различной энергии,

вплоть до тепловых, γ -квантами и легкими заряженными частицами [47].

О. Бором и Г. Н. Флёрвым [48] было предложено интерпретировать это интереснейшее явление как деление из изомерного состояния, деформация которого существенно превышает равновесную, т. е. как изомерию формы.

Открытие деления из изомерного состояния стимулировало возникновение нового теоретического подхода [49, 50] как к проблеме устойчивости тяжелых ядер, так и к модели оболочек в целом, что в свою очередь позволило придать гипотезе об изомерии формы более конкретное содержание. Это было сделано В. М. Струтинским.

В первоначальном варианте его теории квантовая поправка к полной энергии ядра обусловлена неоднородностью одночастичного спектра в области границы Ферми. Однако, как было показано В. М. Струтинским, поправка не исчезает при отклонении формы ядра от сферической — квантовые неоднородности вблизи границы Ферми могут сохраняться вплоть до очень больших деформаций, стабилизируя систему. Поэтому явления «магичности» могут иметь место и в сильнодеформированных ядрах. В частности, в процессе деления происходит периодическое перераспределение неоднородностей уровней, приводящее к повышенной стабильности некоторых форм делящегося ядра. Потенциальная энергия ядра при определенных деформациях имеет минимумы, соответствующие заполненным «большим оболочкам» — областям повышенной плотности одночастичных уровней.

Для ядер, испытывающих изомерное деление, таких минимумов (и соответственно максимумов) два. Первый минимум соответствует основному состоянию ядра, второй — изомерному. Если ядро в процессе деления попадает во вторую яму и его энергия меньше, чем высота окружающих яму барьеров, оно захватывается. При этом возможно либо деление из второй ямы, вероятность которого определяется формой второго барьера, либо радиационный переход из изомерного состояния в основное путем туннельного перехода под первым барьером. Данная теория дает возможность корректно рассчитывать энергию ядра при больших деформациях, а следовательно, форму и высоту барьеров деления.

Многочисленные расчеты, проведенные по методу В. М. Струтинского, показали [51—53] существование довольно обширной области ядер в районе дважды магического ядра $^{298}114$,

где высота барьеров деления достигает 10 МэВ.

Следует, однако, оговорить, что ошибки, связанные с экстраполяцией параметров одночастичного потенциала в область сверхтяжелых ядер, могут быть весьма велики, и это отражается на точности расчета потенциальной энергии ядра как функции его деформации, в частности высоты и формы барьера деления.

В еще большей степени указанное относится к расчету периодов спонтанного деления тяжелых и сверхтяжелых ядер, что представляет собой задачу чрезвычайной сложности. Потенциальная энергия ядра, вычисленная как функция его формы, еще не определяет динамики движения делящейся системы к точке разрыва. Знание потенциальной энергии позволяет вычислить силы, действующие в ядре, однако дальнейшее решение полной динамической задачи требует определения таких свойств делящегося ядра, как его инерция или связанная с ней диссипация коллективной энергии по другим степеням свободы. Таким образом, например, появляется необходимость ввести эффективные коэффициенты инерции, которые подвержены влиянию оболочечной структуры ядра не в меньшей степени, чем сама потенциальная энергия.

Вместе с тем вычисление эффективных коэффициентов инерции представляет задачу принципиально менее определенную, чем вычисление потенциальной энергии, поскольку ее решение требует введения дополнительных предположений, справедливость которых не всегда оправдана.

К настоящему времени проведены теоретические расчеты [54—56] периодов полураспада относительно спонтанного деления самых тяжелых ядер, которые в своей сумме сравнительно неплохо воспроизводят экспериментальные данные — зависимости с «максимумами» для фермиевского элемента, существенное изменение в систематике при переходе от $Z = 102$ к курчатовию, четно-нечетные эффекты и т. п. Хотя эти попытки и имеют важное значение для дальнейшего развития теории деления, чувствительность к деталям расчета такова, что каждая из неопределенностей — 1 МэВ в высоте, 5% в ширине барьера или 10% в массовом параметре — приводит к изменению T_{st} примерно в 100 раз [57].

Поэтому пока нельзя ожидать точности расчета периодов спонтанного деления тяжелых и в особенности сверхтяжелых ядер лучше чем $10^{\pm 8}$ лет.

Сверхтяжелые ядра

Для физики атомного ядра одним из самых значительных следствий экспериментального и теоретического исследований процесса спонтанного деления является предсказание возможной области сверхтяжелых элементов. Сумма наших знаний об атомном ядре и его квантовой стабильности, полученная на протяжении последних четырех десятилетий, делает это предсказание достаточно надежным и не зависящим, в общем, от выбора того или иного конкретного варианта оболочечной модели. Ответ на вопрос о существовании сверхтяжелых элементов, полученный экспериментально, означал бы, пожалуй, наиболее критическую проверку самой концепции об оболочечной структуре ядра, основной ядерной модели, весьма успешно выдержавшей испытание временем, но остающейся все же моделью.

Более конкретно, устойчивость тяжелых ядер определяется главным образом их спонтанным делением, и поэтому необходимым условием существования таких ядер является наличие у них барьера относительно деления. Для ядер от урана до фермия оболочечная составляющая в барьере деления, приводя к некоторым интереснейшим физическим явлениям, все же не оказывает критического влияния на их стабильность, проявляясь в суперпозиции с жидкокапельной составляющей барьера. В области сверхтяжелых элементов капельная составляющая барьера полностью исчезает и стабильность сверхтяжелых ядер определяется проницаемостью чисто оболочечного барьера. Таким образом, существование или отсутствие сверхтяжелых элементов прямым образом связано с тем, справедливы или нет основные представления о структуре ядра, базирующиеся на оболочечной модели. С другой стороны, если для принципиального существования сверхтяжелых ядер достаточно наличия барьера, то для экспериментальной проверки такого предсказания требуется знание времени жизни сверхтяжелых ядер относительно спонтанного деления, ибо при любой конкретной постановке эксперимента по поиску невозможно охватить весь диапазон времени жизни — от 10^{10} лет до 10^{-10} с. Выбор принципа эксперимента существенно определяется тем, в каком интервале времен жизни проводится исследование.

Как уже говорилось, неопределенность теоретического расчета слишком велика — 8–10 порядков. Эта неопределенность а priori не исключает ни одной из возможностей полу-

чения или обнаружения сверхтяжелых элементов, и в качестве направлений экспериментального решения проблемы можно выбрать как поиск сверхтяжелых ядер в природе (на Земле, в объектах космического происхождения, в составе космического излучения и т. п.), так и искусственное получение элементов на ускорителях (в ядерных реакциях между сложными ядрами).

Хотелось бы сделать несколько замечаний относительно поиска в природе. Очевидно, что поиск сверхтяжелых элементов в земных объектах может привести к успеху только в том случае, если время жизни этих элементов сравнимо со временем жизни Земли — $4,5 \cdot 10^9$ лет. Такие работы широко проводятся на протяжении последнего десятилетия, и сейчас можно сказать, что уже определился ряд весьма перспективных в этом отношении объектов.

Не менее перспективным является поиск сверхтяжелых элементов в объектахвнеземного происхождения — метеоритах, космическом излучении и др. Поиски в данном направлении, которые проводятся в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и других лабораториях мира, могут привести к успеху даже в том случае, если время жизни сверхтяжелых элементов существенно меньше 10^{10} лет, — по своему возрасту такие объекты могут оказаться значительно «моложе» земных образцов.

Если коротко говорить о возможных механизмах образования сверхтяжелых элементов в процессах нуклеосинтеза во Вселенной, то можно отметить, что уже долгое время в качестве основного источника рассматриваются взрывы Сверхновых звезд, во время которых имеет место так называемый r -процесс — процесс быстрого многократного захвата нейтронов ядрами. Хотя оценки вероятности и распространенности сверхтяжелых элементов, получающихся в результате r -процесса, весьма противоречивы [58–60], принципиальная возможность подобного их образования остается. Обсуждаются также другие источники и механизмы образования сверхтяжелых элементов в звездных объектах — пульсары [61], реакции между тяжелыми ядрами, ускоренными во Вселенной [62] и др.

Таким образом, в вопросе поиска сверхтяжелых элементов в природе ядерная физика находит еще одну точку соприкосновения с астрофизическими задачами. Намечается любопытная обратная связь: проблема устойчивости тяжелых ядер, поставленная открытием спонтанного деления, развивавшаяся далее в «недрах» ядер-

ной физики и повлекшая предсказание существования сверхтяжелых элементов, может найти свое решение на астрофизическом уровне. В случае успешного разрешения она, обогатив наши представления о нуклеосинтезе во Вселенной, вернется вновь в ядерную физику и даст ответ на вопрос об основных свойствах структуры ядра.

Сделав небольшое введение в проблему поиска сверхтяжелых элементов в природе, мы не будем останавливаться на подробном изложении результатов конкретных работ — об этом уже сообщалось неоднократно (см., например, [63—65]). Вместо этого на примере исследований, проводившихся на протяжении последних 10 лет в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, покажем один из возможных и, на наш взгляд, удачных подходов к поиску сверхтяжелых элементов в природе [66—68].

Речь идет о поиске сверхтяжелых элементов в метеоритах типа углистых и неравновесных хондритов, в которых по ряду косвенных указаний присутствие таких элементов наиболее вероятно. В экспериментах для обнаружения редких актов спонтанного деления применяли детекторы множественного испускания нейтронов на основе пропорциональных счетчиков с ^3He , которые позволяют без разрушения образца достигнуть рекордной чувствительности 10^{-15} г/г. (Напомним, что подобную по своему принципу методику использовали ранее В. Либби [5] и Г. Позе [7] для обнаружения спонтанного деления урана. Чувствительность метода повысилась с тех пор в 10^7 раз.) Измерения проводили в соляной шахте на глубине 1100 м водного эквивалента. Для подавления космического фона детектор был окружен защитой из счетчиков Гейгера, включенных на антисовпадения. Средняя эффективность регистрации нейтронов составляла 12—30% для разных детекторов. Особое внимание уделялось проблеме фона от спонтанного деления как ^{238}U , так и техногенных трансурановых изотопов.

В итоге длительных многомесячных измерений образцов метеоритов Саратов, Ефремовка и Алленде был обнаружен эффект множественного испускания нейтронов, для объяснения которого необходимо допустить присутствие в них нового долгоживущего спонтанно делящегося нуклида [66—68], принадлежащего, наиболее вероятно, к области сверхтяжелых элементов.

Трудно думать, однако, что сверхтяжелые элементы могут присутствовать исключительно в метеоритах, скорее всего, это лишь

вопрос их концентрации. Поэтому совершенно не исключалось, что весьма перспективными для поиска сверхтяжелых элементов могли оказаться и другие объекты, в частности, имеющие земное происхождение, такие как геотермальные воды полуострова Челекен (район Южного Каспия), базальты Армении и т. п.

Одним из первых объектов земного происхождения, где усиленно проводились поиски сверхтяжелых элементов, явились геотермальные воды Челекена, работа с которыми в ЛЯР ОИЯИ была начата несколько лет назад. Вода геотермального источника пропусклась через большую колонну с анионно-обменной смолой. Смытую затем минеральную фракцию помещали в чувствительный объем нейтронного детектора. Было зарегистрировано 160 событий, из них только шесть могут быть отнесены к спонтанному делению примеси урана в образцах. Если считать, как и в случае метеоритов, что наблюдаемый эффект обусловлен спонтанным делением долгоживущего нуклида из области сверхтяжелых элементов, то его концентрация в минеральной фракции смолы оценивается $2 \cdot 10^{-13}$ г/г, при этом период полураспада предполагается равным 10^9 лет.

Один из способов идентификации нового излучателя методами ядерной физики предложен Ю. Ц. Оганесяном и заключается в том, что при бомбардировке пучком α -частиц мишени, полученной путем химического обогащения [66] и содержащей исследуемый элемент, можно наблюдать его вынужденное деление. Оно будет происходить с частотой в 10^6 раз большей, чем спонтанное деление. Как показали расчеты, изменяя энергию α -частиц, по порогу реакции деления можно определить порядковый номер делящегося ядра с точностью до двух единиц, если монохроматичность пучка не хуже 150 кэВ.

Подобные эксперименты проводятся в настоящее время в Дубне на циклотроне У-200, на котором получен пучок α -частиц ($\Delta E = 60$ кэВ) с плавно варьруемой энергией 24—40 МэВ. Как показано в предварительных экспериментах, данный метод позволяет обнаружить ядра сверхтяжелых элементов, если их количество в мишени будет составлять $\geq 5 \cdot 10^8$. Воспользовавшись этим методом, можно будет провести одну из самых жестких и критичных проверок того, действительно ли новый спонтанно делящийся природный излучатель является сверхтяжелым элементом.

Многолетние поиски сверхтяжелых элементов, проводившиеся в образцах земного и космического происхождения различными методами

в разных лабораториях мира, до последнего времени не приводили к успеху. Несмотря на неоднократные заявления об открытии сверхтяжелых элементов, все они оказывались при более тщательном рассмотрении преждевременными. Однако на основании самых последних результатов [66—68] нам представляется, что вопрос о существовании сверхтяжелых элементов в природе далеко не исчерпан и поиск более перспективных природных объектов нового типа в сочетании с непрерывным увеличением чувствительности экспериментальных методов позволяет надеяться на успех в окончательном решении этой важнейшей проблемы.

Вторым направлением, разумеется, является искусственный синтез сверхтяжелых элементов в реакциях между сложными ядрами. Такие работы проводятся с конца 60-х годов и в Дубне, и в других лабораториях мира с использованием разнообразных экспериментальных методов и различных пучков ускоренных ионов. Различными были и принципы подхода к проблеме получения сверхтяжелых ядер на ускорителях тяжелых ионов, однако многочисленные усилия пока не привели к желаемому результату. Не останавливаясь подробно на рассмотрении тех или иных конкретных попыток (это сделано, например, в [69, 70]), все же отметим, что исследования по искусственному синтезу сверхтяжелых элементов существенным образом углубили представления о механизме взаимодействия двух сложных ядер, привели, например, к открытию нового класса ядерных реакций — реакций глубоконеупругих передач — и явились исключительно мощным стимулом для возникновения многих новых идей в физике тяжелых ионов.

До последнего времени во всех экспериментальных попытках синтезировать сверхтяжелые элементы в ядерных реакциях были получены лишь верхние границы сечения их образования. Из этих данных при определенных предположениях могут быть сделаны оценки граничных значений времени жизни сверхтяжелых ядер, относящиеся, как правило, к спонтанному делению. Однако, как уже отмечалось, период полураспада относительно спонтанного деления определяется не только структурой барьера, но и динамическими аспектами процесса, в частности массовым коэффициентом. Поэтому на основе граничных значений времени жизни относительно спонтанного деления трудно сделать какие-либо определенные выводы о барьерах деления сверхтяжелых ядер. Сказанное относится к спонтанному делению.

Однако Ю. Ц. Оганесян и его сотрудники [71, 72] в последнее время предложили иной подход к проблеме искусственного получения сверхтяжелых элементов. Было предположено, что барьер деления существует и в возбужденных ядрах в той степени, в какой оболочечные эффекты сохраняются с ростом температуры и углового момента ядра. Поэтому можно думать, что при энергии возбуждения ~ 20 — 30 МэВ оболочечные эффекты в ядрах все еще хорошо выражены, и это должно сказываться на характеристиках их распада. Таким образом, вопрос о характере деления слабо возбужденных сверхтяжелых ядер может быть принципиально связан с наличием у них барьера деления. Сверхтяжелые ядра относительно малой энергии возбуждения $E^* \sim 20$ — 40 МэВ могут быть получены в реакциях с ионами тяжелее аргона (см. [29, 32]).

Располагая такой возможностью, Ю. Ц. Оганесян и сотр. изучили массовые и энергетические распределения продуктов, образующихся в ядерных реакциях при бомбардировке ^{208}Pb ионами ^{48}Ca энергией 220 и 250 МэВ, а также при бомбардировке ^{243}Am ионами ^{40}Ar в энергетическом интервале 214—300 МэВ [71, 72]. В случае реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ массовое распределение осколков деления составного ядра оказалось асимметричным при $E^* = 25$ МэВ, что свидетельствует о сохранении оболочечных эффектов в ядре $^{256}102$ при этой энергии возбуждения. С увеличением энергии возбуждения до 50 МэВ массовое распределение осколков становится практически симметричным (рис. 3).

Если массовое распределение в первом случае определяли радиохимическим методом, то энергетическое и массовое распределение продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ измеряли на пучке ионов при помощи пары полупроводниковых детекторов, угол между которыми однозначно определялся из кинематических условий и выделял случаи полной передачи импульса двум фрагментам (двухчастичный процесс). Оказалось, при энергии ионов аргона 300 МэВ наблюдается широкое распределение продуктов реакции, охватывающее область от 60 до 220 а. е. м. и имеющее форму симметричной кривой с максимумом вблизи $(A_{\text{ион}} + A_{\text{мишень}})/2 \sim 140$ (рис. 4), как это и можно было ожидать для деления возбужденного составного ядра. Однако с понижением энергии бомбардирующих ионов до 214 МэВ и соответствующим уменьшением энергии возбуждения до 40 МэВ наиболее вероятным оказывается сильно асимметричное деление с отношением масс осколков

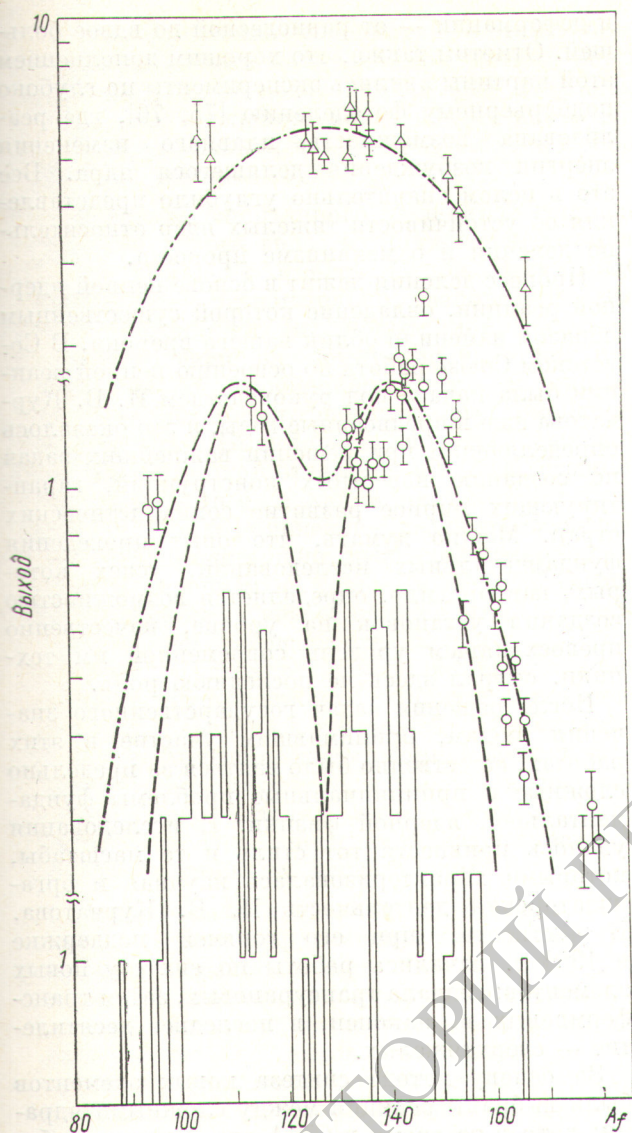


Рис. 3. Массовое распределение осколков деления компаунд-ядра $^{256}_{102}$ при энергии возбуждения 25 (○) и 53 МэВ (▽).

Гистограмма и пунктирная линия — массовые распределения осколков спонтанного деления соответственно для изотопов $^{252}_{102}$ и $^{256}_{102}$ Fm.

$A_{\text{тяжелый}}/A_{\text{легкий}} \sim 2,5$ при массе тяжелого осколка 200—210 а. е. м. По-видимому, асимметричный характер деления при энергии возбуждения 40 МэВ является следствием проявления оболочечных эффектов, которые в данном случае связаны с магическими числами $Z = 82$ и $N = 126$ (^{208}Pb).

В итоге этих исследований оказывается, что механизм деления слабо возбужденного сверх-

тяжелого ядра с $Z = 113$ и $A = 283$ подвержен заметному влиянию оболочечных эффектов. Поэтому в будущем представляет большой интерес изучение других комбинаций ион — мишень, приводящих к образованию тяжелых и сверхтяжелых составных ядер в широкой области Z и N . Подобные исследования могут иметь весьма существенное значение для решения проблемы искусственного синтеза сверхтяжелых элементов.

Заключение

За время, прошедшее с тех пор, когда О. Ган и Ф. Штрассман впервые наблюдали деление урана под действием нейтронов, проделана громадная работа по изучению этого явления. Получена не только новая экспериментальная информация, но и сделан ряд открытий, каждое из которых позволило взглянуть на проблему с новой, подчас неожиданной стороны и существенно повлияло на наши представления о структуре ядра и механизме деления в частности.

Может быть, не случайно классические опыты О. Гана и Ф. Штрассмана по радиохимическому

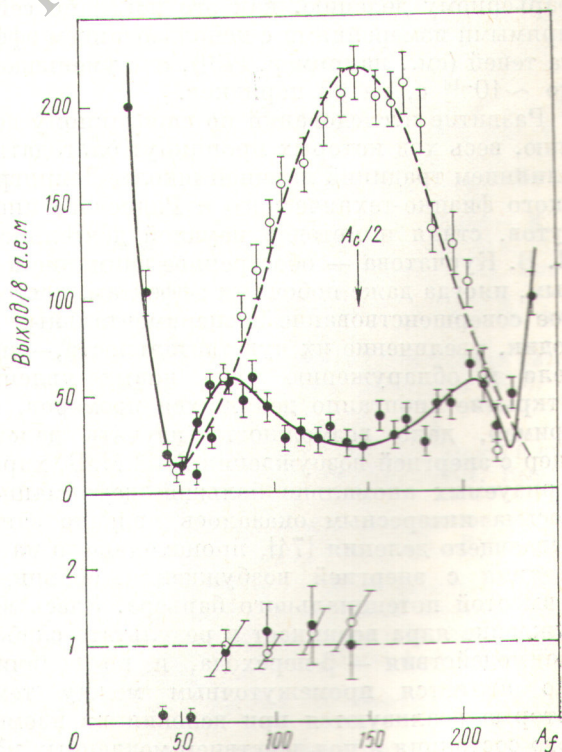


Рис. 4. Массовое распределение и угловая анизотропия продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{46}\text{Ar}$ при энергии 214 (●) и 300 МэВ (○)

выделению продуктов взаимодействия нейтронов с ядрами урана были проведены именно в Германии, а Лиза Мейтнер смогла дать им правильное толкование, так сильно отличавшееся от общепринятых взглядов на ядерные реакции. Тщательность и придирчивость в постановке экспериментов и одновременно смелость в объяснении результатов — удачное сочетание конкретного и абстрактного, характеризующее немецкую физическую школу, — все это занимает немаловажное место среди обстоятельств, которые привели в те далекие годы к открытию деления.

Если ядро урана, поглощая нейтрон, приобретает энергию возбуждения $\sim 6\text{ МэВ}$ и процесс деления возбужденной компаунд-системы становится весьма вероятным, то спонтанное деление происходит из состояния с нулевой энергией возбуждения и потому является событием несравненно более редким. Вместе с тем наблюдение спонтанного деления и сравнение его с вынужденным позволили выяснить, как влияет энергия возбуждения ядра на вероятность и другие характеристики деления: если время жизни урана по отношению к спонтанному делению составляет $\sim 10^{23}$ с, то при переходе к надбарьерному делению, как это показано сейчас прямыми измерениями с использованием эффекта теней (см., например, [73]), оно уменьшается до $\sim 10^{-16}$ с, на 39 порядков.

Развитие исследований по спонтанному делению, весь ход которых проникнут благотворным влиянием традиций научной школы Ленинградского физико-технического и Радиевого институтов, стиля и методов научной деятельности И. В. Курчатова — обостренное внимание к новым, иногда даже побочным эффектам, постоянное совершенствование экспериментальных методик, увеличение их чувствительности, — привело к обнаружению ряда новых явлений. Открытие спонтанно делящихся изомеров, например, дало возможность изучать деление ядер с энергией возбуждения 2—3 МэВ, характеризующихся аномально большой деформацией. Весьма интересным оказалось явление запаздывающего деления [74], происходящего из состояния с энергией возбуждения, сравнимой с высотой потенциального барьера. Здесь возбуждение ядра возникает в результате слабого взаимодействия — β -перехода, и по величине оно является промежуточным между теми, которые реализуются при делении из изомерного состояния и под действием медленных нейтронов. Эти новые эффекты «заполнили» интервал энергии возбуждения от нуля до $\sim 6\text{ МэВ}$

и деформации — от равновесной до вдвое большей. Отметим также, что хорошим дополнением этой картины явились эксперименты по глубоко подбарьерному фотоделению [75, 76], где реализована возможность плавного изменения энергии возбуждения делящегося ядра. Все это в целом значительно углубило представления об устойчивости тяжелых ядер относительно деления и о механизме процесса.

Процесс деления лежит в основе цепной ядерной реакции, овладение которой существенным образом изменило облик нашего времени. В Советском Союзе работа по освоению цепной реакции была начата под руководством И. В. Курчатова еще в предвоенные годы, и это оказалось определяющим при решении важнейших задач по созданию известных конструкций, гарантирующих мирное развитие социалистических стран. Можно думать, что опыт проведения фундаментальных исследований, успех которых, как правило, определяется возможностью создания установок на уровне, качественно превосходящем уровень современной им техники, сыграл здесь не последнюю роль.

После решения задач государственного значения людям, принимавшим участие в этих работах, естественно было взяться за предельно сложные и принципиальные проблемы фундаментальной ядерной физики. В исследованиях удалось привести тот стиль и те масштабы, которыми характеризовалась научная и организаторская деятельность И. В. Курчатова. В частности, при его горячей поддержке в 1954 г. начались работы по синтезу новых элементов: сначала трансурановых, затем трансфермиевых и, наконец, в последнее десятилетие — сверхтяжелых.

За основу метода синтеза новых элементов были выбраны реакции между сложными ядрами: хотя в то время в США еще активно работали над получением новых трансурановых элементов в потоках нейтронов высокой плотности, стало ясно, что принципиального продвижения на этом пути ожидать не следует.

В качестве установки для получения многозарядных ионов был выбран циклотрон. Его «сердце» — источник многозарядных ионов — был разработан в своей основе ранее академиком Л. А. Арцимовичем при решении задач эффективного разделения изотопов.

Выбор сделан удачно: на протяжении 17 лет циклотрон У-300 является лидером среди ускорителей тяжелых ионов этого поколения по основным параметрам пучков ускоренных частиц.

Уже достаточно говорилось о том, какие результаты были получены при синтезе новых элементов и исследовании самого механизма спонтанного деления, оказавшегося значительно более сложным, чем представлялось в далекие предвоенные годы.

Проблема спонтанного деления — радиоактивности нового вида, возникновение которого тесно связано с именем Игоря Васильевича Курчатова, — стремительно развивается. Вместе с читателем мы попытались расставить основные вехи на почти сорокалетнем пути исследований, пройденном нами и многими другими физиками, наметить его ближайшие перспективы. Быть может, уже через несколько лет мы с улыбкой отнесемся к нашей сегодняшней оценке того, в каком направлении и как именно пойдет дальнейшее развитие исследований. Несомненно одно: место, занимаемое спонтанным делением не только в ядерной физике, но и в смежных с нею областях знаний, является залогом неослабевающего интереса к этому явлению. Судьба острова стабильности сверхтяжелых ядер, возможное существование новой области элементов в таблице Д. И. Менделеева и многие другие аспекты ядерной физики почти целиком зависят от того, насколько подвержены спонтанному делению ядра, которые сперва были мечтой, а сейчас становятся предметом экспериментальных исследований.

Сложившаяся к настоящему времени ситуация с поиском сверхтяжелых элементов удивительным образом напоминает события, предварявшие окончательное открытие спонтанного деления. Еще год назад мы могли наблюдать лишь несколько актов спонтанного деления нового природного нуклида в месяц. Благодаря постоянному совершенствованию методов поиска, обогащения и идентификации сейчас регистрируются несколько спонтанных делений в сутки. Как и 40 лет назад, для выяснения истины требуются многочисленные, самые разнообразные и, быть может, еще более трудоемкие контрольные опыты. Наконец, во время первых опытов по спонтанному делению крайне мало было известно о делении вынужденном. Вряд ли сейчас мы представляем себе возможные свойства сверхтяжелых элементов лучше. Поэтому, несмотря на громадные усилия, которые уже затрачены на пути поиска и синтеза сверхтяжелых элементов, еще больше предстоит сделать.

Однако мы надеемся, что этот очередной виток спирали, по которой развивается ядерная физи-

ка, в любом случае приведет к более глубокому пониманию фундаментальных свойств материи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hahn O., Strassmann F. «Naturwiss.», 1939, Bd 27, H. 11, S. 89.
2. Meitner L., Frisch O. «Nature», 1939, v. 143, p. 239.
3. Френкель Я. И. «ЖЭТФ», 1939, т. 9, вып. 6, с. 641.
4. Bohr N., Wheeler J. «Phys. Rev.», 1939, v. 56, p. 426.
5. Libby W. Ibid., v. 55, p. 1269.
6. Петряк К. А., Флеров Г. Н. «ДАН СССР», 1940, т. 28, с. 500; см. также «ЖЭТФ», 1940, т. 10, с. 1013; «J. Phys.», 1940, v. 3, p. 275.
7. Pose H. «Z. Phys.», 1943, v. 121, p. 293.
8. Петряк К. А., Флеров Г. Н. «УФН», 1961, т. 73, вып. 4, с. 655.
9. Малкин Л. З., Алхазов И. Д., Кривохатский А. С., Петряк К. А. «Атомная энергия», 1963, т. 15, вып. 2, с. 158.
10. Александров Б. М., Кривохатский А. С., Малкин Л. З., Петряк К. А. Там же, 1966, т. 20, вып. 4, с. 315.
11. Малкин Л. З. и др. Там же, 1963, т. 15, вып. 2, с. 249.
12. Алхазов И. Д. и др. «Ядерная физика», 1970, т. 11, вып. 3, с. 501.
13. Алхазов И. Д. и др. Там же, 1972, т. 15, вып. 1, с. 22.
14. Alkhazov I. e.a. In: Proc. Second IAEA Symp. on Phys. and Chem. of Fission. Vienna, IAEA-SM-122/150, 1969, p. 961.
15. Адамов В. М. и др. «Ядерная физика», 1971, т. 13, вып. 5, с. 939.
16. Адамов В. М. и др. Там же, 1967, т. 5, вып. 4, с. 923.
17. Малкин Л. З. и др. «Атомная энергия», 1964, т. 16, вып. 2, с. 148.
18. Адамов В. М. и др. «Ядерная физика», 1967, т. 5, вып. 1, с. 42.
19. Адамов В. М., Коваленко С. С., Петряк К. А., Тютюгин И. И. Там же, 1969, т. 9, вып. 4, с. 732.
20. Адамов В. М. и др. Там же, 1970, т. 11, вып. 5, с. 1001.
21. Адамов В. М. и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1973, т. 37, вып. 1, с. 118.
22. Александров Б. М. и др. В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 3-й Всесоюз. конф., Киев, 1975). Ч. 5. М., Атомиздат, 1976, с. 166.
23. Батенко О. И. и др. Там же, с. 114.
24. Адамов В. М. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерные константы». Вып. 24. М., Атомиздат, 1977, с. 8.
25. Flerov G. In: Proc. Conf. on Reactions between Complex Nuclei. Gatlinburg. Oak Ridge, 1958, ORNL-2606, p. 384.
26. Флеров Г. Н. Труды 2-й Международной конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева 1958. Т. 1. М., Госатомиздат, 1959, с. 272.
27. Флеров Г. Н., Друин В. А., Плева А. А. «УФН», 1970, т. 100, вып. 1, с. 45.
28. Флеров Г. Н., Звара И. Сообщение ОИЯИ Д7-6013. Дубна, 1971.
29. Oganessian Yu., Demin A., Iljinov A., Tretyakova S. «Nucl. Phys.», 1975, v. A239, p. 353.
30. Оганесян Ю. Ц. и др. «Письма в ЖЭТФ», 1974, т. 20, вып. 8, с. 580.

31. Oganessian Yu. e.a. «Nucl. Phys.», 1976, v. A273, p. 505.
32. Flerov G. e.a. Ibid., v. A267, p. 359.
33. Волков В. В. «ЭЧАЯ», 1971, т. 2, вып. 2, с. 287.
34. Волков В. В. Там же, 1975, т. 6, вып. 4, с. 1040.
35. Карнаухов В. А. Там же, 1973, т. 4, вып. 4, с. 1018.
36. Bogdanov D. e.a. «Nucl. Phys.», 1977, v. A275, p. 229.
37. Каун К. Г. В кн.: Труды Междунар. школы-семинара по взаимодействию тяжелых ионов с ядрами и синтезу новых элементов. ОИЯИ Д7-9734. Дубна, 1976, с. 245.
38. Флеров Г. Н. В кн.: Труды V Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1977.
39. Флеров Г. Н. Препринт ОИЯИ P7-7551. Дубна, 1973.
40. Whitehouse W., Galbraith W. «Nature», 1952, v. 169, p. 494.
41. Seaborg G. «Phys. Rev.», 1952, v. 85, p. 157.
42. Oganessian Yu. e.a. «Nucl. Phys.», 1975, v. A239, p. 157.
43. Myers W., Swiatecki W. Ibid., 1966, v. 81, p. 1.
44. Johansson S. Ibid., 1959, v. 12, p. 449.
45. Johansson S. Ibid., 1961, v. 22, p. 529.
46. Поликанов С. М. и др. «ЖЭТФ», 1962, т. 42, с. 1464.
47. Поликанов С. М. Изомерия формы атомных ядер. М., Атомиздат, 1977.
48. Флеров Г. Н., Друин В. А. В сб.: Структура сложных ядер. М., Атомиздат, 1966, с. 249.
49. Strutinsky V. «Nucl. Phys.», 1967, v. A95, p. 420; 1968, v. A122, p. 1.
50. Brack M. e.a. «Rev. Mod. Phys.», 1972, v. 44, p. 320.
51. Музыка Ю. А., Пашкевич В. В., Струтинский В. М. Препринт ОИЯИ P7-3733. Дубна, 1968.
52. Nilsson S. e.a. «Nucl. Phys.», 1968, v. A115, p. 542.
53. Nilsson S., Thompson S., Tsang S. Preprint UCRL-18531, Berkeley, California, 1968.
54. Ledergerber T., Pauli H. «Nucl. Phys.», 1973, v. A207, p. 1.
55. Randrup J. e.a. Ibid., v. A217, p. 221.
56. Randrup J. e.a. «Phys. Rev.», 1976, v. C13, p. 229.
57. Sobiczewski A. «Physica Scripta», 1974, v. 10A, p. 47.
58. Seeger P., Fowler W., Clayton D. «Astrophys. J. Suppl.», 1965, v. 11, p. 121.
59. Берлович Э. Е., Новиков Ю. Н. «Письма в ЖЭТФ», 1969, т. 9, с. 445.
60. Schramm D., Fowler W. «Nature», 1971, v. 231, p. 103.
61. Silvestro G. «Lett. Nuovo Cimento», 1969, v. 2, p. 771.
62. Kowalski M., Kuchowich B. «Phys. Lett.», 1969, v. 30B, p. 79.
63. Flerov G. In: Proc. 4th Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, 1972. V. 7. Vienna, IAEA, 1972, p. 471.
64. Flerov G. In: Proc. of the Intern. Conf. on Reactions between Complex Nuclei V.2, Nashville, USA, 1974, p. 459.
65. Herrmann G. Int. Rev. of Science. Ser. 2 — Inorganic Chemistry, v. 8 — Radiochemistry, p. 221, 1975. University Park Press, Baltimore.
66. Флеров Г. Н. и др. «Ядерная физика», 1977, т. 26, вып. 3, с. 449.
67. Звара И. и др. Там же, с. 455.
68. Флеров Г. Н. Сверхтяжелые элементы. Докл. на Междунар. конф. по ядерной структуре. Токио, сентябрь 1977.
69. Флеров Г. Н. Препринт ОИЯИ P7-9956. Дубна, 1976.
70. Oganessian Yu. «Nukleonika», 1977, v. 22, N 1, p. 89.
71. Kalpakchieva R. e.a. JINR Preprint E7-10587, Dubna, 1977.
72. Kalpakchieva R., Oganessian Yu., Penionzhkevich Yu., Soban H. «Zeitschrift für Physik», 1977, v. A283, N 3, p. 253.
73. Карамян С. А., Меликов Ю. В., Тулинов А. Ф. «ЭЧАЯ», 1973, т. 4, вып. 2, с. 456.
74. Кузнецов В. И., Скобелев Н. К., Флеров Г. Н. «Ядерная физика», 1966, вып. 4, с. 271.
75. Bowman C., Schröder I., Dick C., Jackson H. «Phys. Rev.», 1975, v. 12C, p. 863.
76. Жучко В. Е. и др. «Письма в ЖЭТФ», 1975, т. 22, с. 255.

УДК 539.163.546.794

Изомеры в миллисекундной области

Ключарев А. П., Ремаев В. В., Ракивненко Ю. Н

Ядерная изомерия привлекала внимание исследователей на всех этапах изучения структуры атомного ядра. Интерес к исследованию изомерных ядер с принципиальной стороны связан с выяснением внутренних причин образования долгоживущих возбужденных состояний и определением степени запрета по соответствующему каналу распада; с методической стороны изомеры являются удобным объектом экспериментального изучения процессов, которые обычно протекают в ядре за очень короткое время. Кроме того, ядро в изомерном состоянии может существовать столь долго, что не исключается возможность практического использова-

ния изомеров с особыми, заданными свойствами.

Изучение изомерных состояний и их распада сыграло важную роль в формировании современных теоретических моделей атомных ядер. Роль эта широко известна: неравномерное распределение долгоживущих изомеров по N или Z (острова изомерии) согласуется с оболочечной структурой нуклонных одночастичных уровней в ядре, обобщенная модель ядра получила обоснование в существовании сильного запрета по асимптотическим квантовым числам, открытие делящихся изомеров предоставило уникальные возможности для исследования больших