

С 341.3
Фр. 716

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Д-1799



Г.Н. Флеров, С.М. Поликанов

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

Обзорный доклад, представленный
на Парижскую конференцию по ядерной физике.
Конференция посвящена 30-летию открытия
искусственной радиоактивности.
Часть II

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

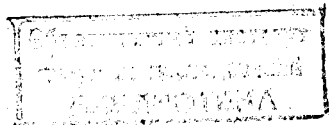
1964

Д-1799

Г.Н. Флеров, С.М. Поликанов

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

Обзорный доклад, представленный
на Парижскую конференцию по ядерной физике.
Конференция посвящена 30-летию открытия
искусственной радиоактивности.
Часть II



2655/2 38

После открытия Ганом и Штрассманом в 1939 году деления ядер физики обратили исключительное внимание на этот процесс. С одной стороны, изучались основные закономерности деления, а с другой, — измерялись различные константы, которые определяли возможность технического использования деления ядер.

Одновременно с накоплением экспериментальных данных успешно развивались теоретические представления о процессе деления.

Основой этих работ явилась капельная модель деления, предложенная Я.И.Френкелем и Н.Бором и Д.Уиллером, которая до сих пор не утратила своего значения.

К настоящему времени накоплен столь большой материал, связанный с изучением деления, что затруднительно даже простое перечисление отдельных направлений исследований.

Может возникнуть вопрос, не утрачен ли сейчас интерес к физике деления? Безусловно нет, и одна из причин этого состоит в том, что, изучая деление, мы получаем ценную информацию о коллективном движении нуклонов ядра и свойствах ядер при таких больших деформациях, которые доступны лишь при делении.

Один из вопросов, привлекающих к себе внимание физиков, интересующихся делением, — это влияние на процесс деления оболочечных эффектов и парных корреляций между нуклонами.

Как известно, при энергии возбуждения, равной барьеру деления, ядро в седловой точке оказывается холодным. По мере увеличения энергии возбуждения открываются новые каналы деления, соответствующие новым значениям спинов и четности для уровней над барьером деления.

Поразительным обстоятельством, впервые отмеченным О.Бором на 1-й Женевской конференции, является сохранение информации о состоянии ядра в седловой точке до процесса разделения, о чем свидетельствуют, в частности, угловые распределения осколков деления. В связи с этим представляет интерес анализ имеющихся экспериментальных данных с точки зрения концепции каналов деления О.Бора, проведенный в работе Н.С.Работнова и др.^{1/} Этот анализ дает подтверждения концепции каналов деления и показывает возможность почти количественного описания делительных ширин формулой Бора-Уиллера при разумных предположениях о расположении каналов деления и характеристик соответствующих потенциальных барьеров. В этой работе

приводятся новые данные о квадрупольной компоненте углового распределения осколков деления.

Одним из наиболее эффективных методов изучения каналов деления является использование процесса (d, pf) , при котором ядро может иметь энергию возбуждения меньше, чем при захвате теплового нейтрона.

Среди экспериментальных работ этого направления следует назвать работу, выполненную в Лос-Аламосской лаборатории Бриттом и др.^{/2/}. Авторы изучали зависимость углового распределения осколков деления от энергии возбуждения для ядер Ru^{240} и U^{234} . Полученные данные (рис. 1) показывают, что рост квадрата проекции спина на ось деления при увеличении энергии возбуждения ядра в седловой точке не является монотонным.

При энергиях возбуждения над порогом деления, равных 0,7; 1,6 и 2,7 Мэв, K^2 испытывает скачки.

Была высказана гипотеза, что скачки при энергиях 0,7 и 1,6 Мэв связаны с возбуждением коллективных гамма-вибрационных уровней, а скачок при 2,7 Мэв связан с разрывом пары нуклонов. Принимая это предположение, мы должны согласиться с тем, что энергетическая щель для уровней четно-четных ядер должна увеличиться, примерно, вдвое по мере увеличения деформации ядер.

В работах, представленных на эту конференцию Бондаренко и др.^{/3/} и Работновым и др.^{/1/}, поддерживается эта точка зрения на основе некоторых дополнительных экспериментальных данных.

В качестве дополнительных аргументов приводятся интересные экспериментальные данные о зависимости числа вторичных нейтронов от энергии нейтрона. При энергии 2,0 Мэв наблюдается характерное изменение энергетической зависимости величины ν . Эта область энергии нейтронов соответствует возбуждению ядра в седловой точке, равному, примерно, 2,5 Мэв. Высказывается гипотеза, что при меньших энергиях возбуждаются лишь коллективные уровни и энергия нейтронов идет на увеличение кинетической энергии осколков. Предполагается, что увеличение ν при 2,5 Мэв связано с разрывом пары. На это же обстоятельство указывает и немонотонное изменение угловых распределений осколков с энергией нейтронов, вызывающих деление.

На роль парных корреляций на барьере деления указывает в своей работе Струтинский^{/4/}. Анализируя результаты работы Бритта и др., Струтинский делает несколько иные выводы, чем ранее упомянутые авторы. Предполагая, что энергетическая щель в седловой точке такая же как и при обычных деформациях, Струтинский считает, что с энергии 1,6 Мэв рвется одна пара, а при энергии 2,7 Мэв в седловой точке возбуждается четырехквасичастичное состояние. Именно с этой энергии быстро начинает расти плотность одночастичных состояний.

Нам представляются весьма интересными дальнейшие исследования в этом направлении.

Говоря о влиянии однонуклонных состояний на процесс деления, нельзя не вспомнить спонтанное деление ядер. По-видимому, именно для этого процесса наиболее велика роль однонуклонных состояний.

В известной работе Юханссеном^{/5/} была предпринята попытка учесть влияние однонуклонных состояний на барьер деления и соответственно на вероятность спонтанного деления.

Правильно отражая основные тенденции изменения периода спонтанного деления для различных изотопов, модель Юханссена вряд ли может принести пользу для точного предсказания периодов спонтанного деления новых изотопов трансурановых элементов.

Одним из недостаточно обоснованных предположений модели Юханссена, подвергавшейся критике, является предположение о сохранении значения проекции спина на ось деления в процессе деления.

На настоящую конференцию представлена работа Урина и Зарецкого^{/6/}, в которой исследуется влияние парных корреляций нуклонов на вероятность спонтанного деления.

Авторы показали, что массовый коэффициент B , входящий в показатель экспоненты, определяющей период спонтанного деления, сильно зависит от значения энергетической щели.

Исходя из этого предположения, можно объяснить увеличение периода спонтанного деления нечетно-четных и нечетно-нечетных ядер по сравнению с четно-четными.

Было бы интересно объяснить на основе этого подхода и наблюдающиеся вариации периодов спонтанного деления для четно-четных ядер. Однако есть основания опасаться, что существующая точность знания Δ для различных изотопов не всегда достаточна.

В последние годы был открыт новый класс явлений, в которых, возможно, еще более резко проявилось влияние однонуклонных состояний на вероятность спонтанного деления.

Имеется в виду спонтанное деление ядер, находящихся в изомерном состоянии^{/7/}.

Этот процесс был впервые обнаружен в Дубне, когда при облучении U^{238} ионами Ne^{22} наблюдалось образование неизвестного изотопа, распадающегося путем деления с периодом полураспада 13 мсек.

Анализ первых экспериментальных данных позволил высказать гипотезу о том, что наблюдаемый эффект объясняется спонтанным делением ядра, находящегося в изомерном состоянии.

Последующие эксперименты ^{/8/}, в которых эффект наблюдался при облучении различных мишеней более легкими частицами, включая альфа-частицы и дейтоны, подтвердили эту гипотезу.

Совсем недавно изотоп, распадающийся путем деления за время 13 мсек был синтезирован при облучении Am_{95}^{243} нейтронами с энергией 14 Мэв ^{/9/}.

Результаты этих опытов, так же как и опытов с дейтонами и альфа-частицами говорят о том, что мы имеем дело со спонтанным делением Am_{96}^{242} , находящегося в пока неизвестном изомерном состоянии.

Для изотопов плутония с близкой массой период спонтанного деления равен 10^{11} лет, для Am^{241} - 10^{14} лет.

Для изотопа Am^{242} неизвестен период спонтанного деления в основном состоянии, однако, на основании имеющихся представлений о спонтанном делении, можно считать, что он не меньше, чем для Am^{241} . Это значит, что вероятность спонтанного деления в изомерном состоянии увеличена по сравнению с основным состоянием более чем в 10^{23} раз (рис. 2).

К настоящему времени еще не удалось найти объяснение этому удивительному явлению.

Предполагая, что увеличение вероятности деления может быть объяснено увеличением проницаемости через барьер за счет большей энергии возбуждения, мы наталкиваемся на необходимость считать энергию возбуждения равной 3-4 Мэв. Объяснить существование для нечетно-нечетного ядра изомерного уровня с такой энергией и временем жизни 13 мсек - сложная задача.

Последние опыты, проведенные в Дубне, указывают на существование новых спонтанно делящихся изотопов ^{/10/}.

При облучении Pu^{242} ионами B^{11} наблюдался спонтанно-делящийся изотоп, живущий примерно 1 мсек, а при облучении U^{238} ионами Ne^{20} , O^{16} и B^{11} наблюдался распад путем деления за время 3,5 сек. Пока что не известны ни заряд, ни масса изотопов.

Эти данные дают нам основание надеяться, что спонтанное деление ядер в изомерном состоянии будет широко распространенным явлением для изотопов трансуроновых элементов.

Попытка наблюдать спонтанное деление из известного изомерного состояния была предпринята в Аргоннской лаборатории Р.Ванденбошем и др. ^{/11/}.

Изотоп Sm^{244} , образующийся при бета-распаде Am^{244} , в некоторой доле случаев оказывается на изомерном уровне B^+ с энергией 1,04 Мэв, распад с которого идет за 34 мсек.

Если бы изменение периода спонтанного деления определялось только энергией возбуждения, то по оценке Р.Ванденбоша и др. период спонтанного деления уменьшился бы, примерно, в 10^8 раз.

Однако оказалось, что вместо ожидаемых 0,14 года период спонтанного деления изомера Sm^{244} больше $1,4 \times 10^2$ года.

Это указывает на то, что разрыв пары нуклонов, приводящий к образованию изомерного уровня, приводит к появлению фактора запрета, аналогично тому, что мы наблюдаем при переходе от четно-четных ядер к нечетно-нечетным.

Теоретические и экспериментальные исследования закономерностей спонтанного деления ядер, находящихся как в основном, так и в изомерном состояниях, выполненные в последние годы, делают, на наш взгляд, весьма актуальными эксперименты по синтезу и изучению свойств спонтанно делящихся изотопов новых наиболее тяжелых элементов (102, 104 и т.д.). Интерес к изучению спонтанного деления таких ядер обусловлен, в частности, наличием у них больших значений параметров $\frac{Z^2}{A}$, что может привести к целому ряду особенностей их деления, например, к значительному вкладу деления на 3 осколка сравнимой массы.

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в Дубне разработана программа экспериментальных работ по получению и изучению свойств радиоактивного распада ядер, образующихся в реакциях под действием многозарядных ионов.

Совсем недавно сотрудниками лаборатории были проведены опыты по получению изотопа 104-го элемента с массовым числом 260, используя методику, ранее применявшуюся для изучения спонтанно-делящихся изотопов.

Предварительно были предприняты эксперименты по изучению закономерностей образования некоторых изотопов трансуроновых элементов в области $Z = 100$, в частности, изотопа 102-го элемента с массовым числом 256. Было установлено, что этот изотоп образуется в ядерной реакции $\text{U}^{238}_{92}(\text{Ne}^{22}, 4n)102^{256}$ и распадается путем испускания α -частиц с $T_{1/2} = 8$ сек; частичный период спонтанного деления для него составляет ~ 1500 сек. Функция возбуждения для образования этого изотопа имеет характерный испарительный вид с максимумом при энергии Ne^{22} , равной 111 Мэв, и полушириной 8-10 Мэв ^{/12,13/}.

Подобная реакция была использована и для синтеза изотопа $^{260}_{104}$. Опыты проводились на 300 см циклотроне тяжелых ионов. В качестве мишени применялся $^{242}_{94}\text{Pu}$, облучение проводилось пучком ионов $^{22}_{10}\text{Ne}$. Было обнаружено, что при энергии бомбардирующих частиц, равной 113-115 Мэв наблюдается образование спонтанно-делящегося изотопа со временем жизни $\sim 0,3$ сек и с сечением $\sim 2 \cdot 10^{-34}$ см². Зависимость сечения образования нового изотопа от энергии ионов подобна той, которая имела место при получении 102-го элемента в реакции ($^{22}_{10}\text{Ne}$, $^{242}_{94}\text{Pu}$).

Для того, чтобы проверить, что наблюдаемый эффект связан с распадом $^{260}_{104}$, были поставлены опыты, в которых $^{238}_{92}\text{U}$ облучался $^{22}_{10}\text{Ne}$ и $^{242}_{94}\text{Pu}$ облучался $^{20}_{10}\text{Ne}$. В этих экспериментах могли образоваться практически все возможные изотопы и изомеры, которые возникали при облучении $^{242}_{94}\text{Pu}$ ионами $^{22}_{10}\text{Ne}$, за исключением $^{260}_{104}$. Оказалось, что в реакциях $^{238}_{92}\text{U} + ^{22}_{10}\text{Ne}$ и $^{242}_{94}\text{Pu} + ^{20}_{10}\text{Ne}$ изотоп со временем жизни 0,3 сек не образуется. Таким образом, результаты экспериментов дают достаточно оснований предполагать, что в реакции $^{242}_{94}\text{Pu} (^{22}_{10}\text{Ne}, ^{242}_{94}\text{Pu})$ образуется изотоп 104-го элемента с массовым числом 260. Период полураспада составляет $0,3 \pm 0,1$ сек.

При проведении опытов исследователи столкнулись с обычно встречающейся в подобных экспериментах трудностью, а именно: малым сечением образования нового элемента и коротким временем жизни. Несмотря на это разработанная в нашей лаборатории экспрессная химическая методика позволит получить дополнительные доказательства синтеза 104-го элемента, а также даст возможность изучить его химические свойства.

Возвращаясь к вынужденному делению, надо сказать, что по-прежнему делается большое число работ, направленных на исследование динамики процесса деления.

Отличительной чертой большинства этих работ является то, что производится, если так можно выразиться, "дифференцированное" изучение процесса деления. Например, сейчас изучается не усредненный спектр гамма-лучей при делении или среднее число вторичных нейтронов, а измерения производятся при точно измеренном отношении масс осколков.

Число работ в этом направлении, присланных на настоящую конференцию, составляет лишь малую долю общего числа работ, выполненных в различных лабораториях, и в докладе анализ этих работ не будет проводиться.

Наконец, хотелось бы остановиться на некоторых исследованиях тройного деления.

Говоря о тройном делении, мы обычно имеем в виду деление с испусканием альфа-частицы.

На настоящую конференцию представлено несколько работ, посвященных этому вопросу. В докладе Мишадона и др. /14/ обнаружено изменение относительного выхода α -частиц от резонанса к резонансу на $^{235}_{92}\text{U}$, которые качественно согласуются с результатами Мостовой /15/.

Полученная в этих работах энергетическая зависимость выхода α -частиц от энергии нейтронов возможно частично обусловлена реакцией (n, α). Эта реакция, идущая с заметным сечением при захвате медленных нейтронов $^{235}_{92}\text{U}$, была обнаружена М.Совинским и др. /16/. В докладе Дерюнттер и др. /17/, представленном на данную конференцию, подтверждаются результаты Совинского и Даковского.

В теоретической работе Б.Т.Гейликмана и Хлебникова /18/ дается простое объяснение углового и энергетического распределения скоростей α -частиц тройного деления на основе определенного предположения о начальном распределении скоростей α -частиц, испускаемых с шейки ядра.

В последнее время заметный успех достигнут в поисках деления на три, примерно, равные части. Согласно оценкам Святецкого, вероятность такого процесса сильно увеличивается с ростом параметра $\frac{Z^2}{A}$. Поэтому наличие пучков тяжелых ионов сильно расширило возможность поиска такого процесса. Используя в качестве детектора осколков слюду, Прайс и др. /19/ обнаружили деление на три равные части при облучении $^{238}_{88}\text{U}$ и $^{208}_{84}\text{Pb}$ ионами аргона.

В работе Юрич /20/, представленной на эту конференцию, есть указания на существование такого типа деления и при захвате тепловых нейтронов.

Л и т е р а т у р а

1. Н.С.Работнов, Г.Н.Смиренкин, А.С.Солдатов, Л.Н.Усачев. Доклад С. 337в
2. H.C.Britt, R.H.Stokes, W.R.Gibbs, J.J.Griffin. Phys. Rev. Letts. II, 343 (1963).
3. И.И.Бондаренко, В.Ф.Кузнецов, В.Г.Нестеров, В.А.Павлинчук, Л.И.Прохорова, Н.С.Работнов, Г.Н.Смиренкин, Л.Н.Усачев. Доклад С. 336в.
4. В.М.Струтинский. Доклад С.359в.
5. S.A.E.Johansson. Nucl. Phys. 12, 449 (1959).
6. М.Г.Урин, Д.Ф.Зарецкий. Доклад С. 382в.
7. С.М.Поликанов, В.А.Друин, В.А.Карнаухов, В.Л.Михеев, А.А.Плеве, Н.К.Скобелев, В.Г.Субботин, Г.М.Тер-Акопян, В.А.Фомичев. ЖЭТФ, 42, 161464 (1962).
8. Г.Н.Флеров, С.М.Поликанов, К.А.Гаврилов, В.Л.Михеев, В.П.Перелыгин, А.А.Плеве. ЖЭТФ, 45, 1396 (1963).
9. А.Ф.Линев, Б.Н.Марков, А.А.Плеве, С.М.Поликанов, Препринт ОИЯИ Д-1693, Дубна, 1964 г.

10. В.А.Друин, Н.К.Скобелев, Б.В.Фефилов, В.И.Кузнецов, Ю.В.Лобанов, Ю.П.Огане-
сян. Препринт ОИЯИ Р-1651, Дубна, 1964 г.
11. R.Vandenbosh, P.R.Fields, S.E.Vandenbosh, D.Metta. J.Inorg. Nucl. Chem. 26, 219 (1964).
12. Е.Д.Донец, В.А.Шеголев, В.А.Ермаков. Препринт ОИЯИ Р-1383, Дубна, 1963.
13. В.А.Друин, Н.К.Скобелев, Б.В.Фефилов, Г.Н.Флеров. Препринт ОИЯИ Р-1580,
Дубна, 1964 г.
14. A.Michaudon, A.Lottin, D.Paya, I.Trochon C. 220 b.
15. Т.А.Мостовая, В.И.Мостовой, Т.В.Яковлев, Атомная энергия. 16, 3 (1964).
16. M.Sowinski, M.Dokowski, H.Piekarz. Physics Letters, v. 6, 321 (1963).
17. A.L.Deruytter, M.Neve de Mevergnies, Доклад С.191
18. Б.Т.Гөйликман, Г.И.Хлебников. Доклад С.332в.
19. P.V.Price, R.L.Fleischer, R.M.Walker, E.L.Hubberd. Proceedings of the 3-a Conference on Reactions
Between Complex Nuclei p.p. 332-338 Univ. of California Press 1963.
20. Mira K. Iuric. Доклад С 103 в.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 августа 1964 г.

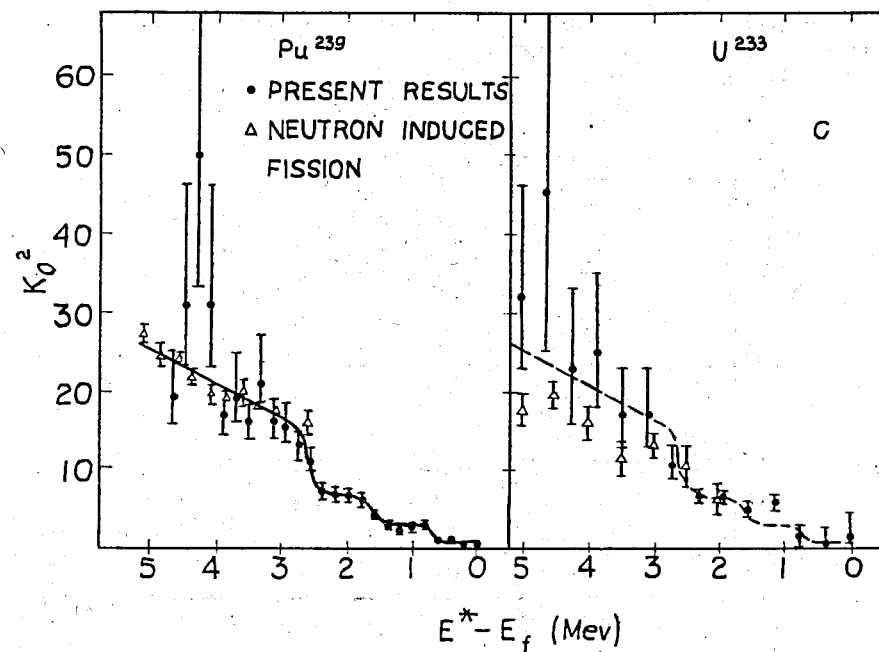


Рис. 1.

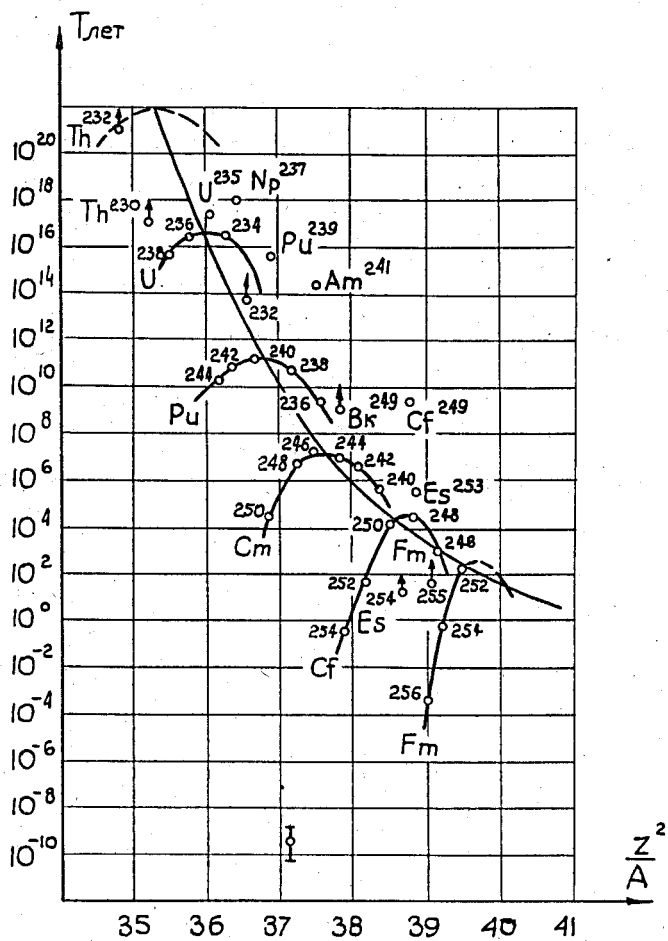


Рис. 2.