

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
Московский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени  
Государственный Университет имени М. В. Ломоносова

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

C349

Д-76

В.А. Друин

955

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР**

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
член-корреспондент АН СССР

Г.Н. Флеров

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований

Дубна 1982 год

В.А. Друин

955

С 349

Д-76

ИССЛЕДОВАНИЕ  
НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

986 в.р.  
Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
член-корреспондент АН СССР

Г.Н. Флеров

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1962 год

## В в е д е н и е

Спонтанное деление является одним из видов радиоактивного распада ядер наиболее тяжелых элементов. О существовании самопроизвольного деления ядер на два осколка стало известно более двадцати лет назад. Этот факт был установлен при исследовании в многослойной ионизационной камере препаратов урана<sup>/1/</sup>.

В последующие годы изучением этого явления занимались физики из многих лабораторий. Исследования проводились, в основном, по двум направлениям: выяснение механизма деления и поиски новых спонтанно-делящихся элементов. С помощью ядерных реакторов и ускорителей заряженных частиц было синтезировано большое количество трансурановых элементов, многие из которых оказались нестабильными по отношению к спонтанному делению. Появилась возможность систематизации свойств спонтанно-делящихся ядер. Было установлено, в частности, что вероятность спонтанного деления сильно зависит от параметра  $Z^2/A$ . Это находилось в хорошем согласии с ядерной моделью жидкой капли. Однако выявился и целый ряд расхождений экспериментальных результатов с предсказаниями теории. Вместо экспоненциального изменения периодов спонтанного деления ядер различных четно-четных изотопов одного элемента обнаружился "резонансный" характер поведения  $T_d$  в зависимости от  $A$  при фиксированном  $Z$ . Кроме того, продолжительность жизни ядер, содержащих нечетное число протонов или нейтронов, оказалась по крайней мере в  $10^3$  раз больше, чем четно-четных с данным  $Z^2/A$ . Для объяснения этих фактов некоторые авторы привлекали представление об одночастичной структуре ядра. Наибольшие успехи в этом направлении достигнуты в работе Юханссона<sup>/2/</sup>. Вводя одночастичные поправки в гидродинамический барьер для деления, Юханссон показал, что поведение отдельных нуклонов в процессе деформации ядра, как целого, оказывает существенное влияние на вероятность спонтанного деления.

Несмотря на большие успехи в объяснении явления, теория спонтанного деления еще далека от завершения<sup>/3/</sup>. В частности, теоретически невозможно пока предсказать с достаточной степенью точности константы распада новых, еще не открытых элементов. Единственная возможность, которая здесь остается, — это экстраполяция эмпирических зависимостей в область неизвестных ядер.

Настоящая работа включает два раздела, касающиеся двух сторон проблемы синтеза и изучения свойств новых трансурановых элементов. С одной стороны, это уточнение и дополнение существующей систематики свойств спонтанно-делящихся четно-четных ядер, особенно в области наиболее тяжелых элементов, с целью

предсказания периодов полураспада новых ядер в области  $Z > 100$ , а также определение коэффициентов запрета для спонтанного деления нечетных изотопов. С другой стороны, это поиски ядерных процессов, которые могли бы оказаться перспективными для получения новых элементов с помощью тяжелых ионов.

В соответствии с этим изучалось спонтанное деление десяти изотопов различных трансурановых элементов и производились эксперименты по исследованию ядерных реакций с многозарядными ионами, сопровождающихся эмиссией заряженных частиц. Для этой цели использовалась высокочувствительная методика регистрации осколков спонтанного деления ядер - продуктов реакции, константы распада которых хорошо известны.

Эксперименты по получению калифорния и фермия, а также по изучению некоторых ядерных реакций проводились на внутреннем пучке 300-см циклотрона Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Измерение периодов спонтанного деления нечетно-четных ядер

$Am^{241}$ и $Np^{237}$	и четно-четных	$Pu^{238}$ , $Pu^{240}$ , $Pu^{242}$ , $Cf^{248}$ , $Cf^{249}$
	$Fm^{252}$ , $Fm^{256}$ , и $102^{254}$	

Применявшиеся обычно методы измерения констант спонтанного деления (ионизационная камера и пропорциональный счетчик) оказались неподходящими для некоторых исследованных нами ядер. Это объясняется большой удельной  $\alpha$ -активностью ряда препаратов ( $Am^{241}$ ,  $Np^{237}$ ) и связанной с нею опасностью имитации осколочных импульсов за счет наложенных импульсов от отдельных  $\alpha$ -частиц. В связи с этим в нашей работе для регистрации осколков были применены газовый сцинтилляционный счетчик и толстослойные ядерные фотоэмульсии<sup>4,5,6/</sup>. Наблюдение спонтанного деления некоторых элементов, количества которых ограничены ( $Cf$ ,  $Fm$ ), производилось с помощью высокостабильных бесфоновых  $Si$ - $Au$  детекторов<sup>7/</sup>.

Основное преимущество газового сцинтилляционного счетчика заключается в его быстрой реакции. При использовании соответствующей электроники разрешающее время установки может быть доведено до  $10^{-9}$  сек. При таких временных параметрах регистрирующего устройства наложение  $\alpha$ -частиц не мешает измерению осколков, если  $\alpha$ -активность образца составляет  $10^6 - 10^7$   $\alpha$ -частиц/сек.

Счетчик представлял собой герметическую камеру, изготовленную из высоковакуумных материалов (медь, тефлон) и наполненную ксеноном. В камере имелось специальное окно, закрытое стеклом, в контакте с которым монтировался фотоумножитель. С внутренней стороны наносился слой кватерфинила ( $\sim 50$  мкг/см<sup>2</sup>), преобразующего ультрафиолетовое излучение в видимый свет. Для лучшего собирания света стенки камеры покрывались отражателем из окиси магния. Камера откачивалась до  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. и наполнялась ксеноном до давления 2 атм.

В работе был использован ФЭУ-33с временным разрешением  $\sim 3 \cdot 10^{-9}$  сек и быстродействующий дискриминатор, собранный по схеме Муди.

Для калибровки аппаратуры в камеру помещался эталон из  $U^{235}$  (200 мкг/см<sup>2</sup>). С помощью (Po+Be) - нейтронного источника исследовалась счетная характеристика установки, которая имела хорошее плато. Большое внимание было уделено выявлению и устранению источников фона. Основными источниками фона в наших опытах могли быть вынужденное деление ядер образцов, помещенных в камеру сцинтиллятора, электромагнитные наводки в радиотехнической схеме установки и нестабильность источников питания. Существовала, например, возможность деления  $U^{235}$  фоновыми тепловыми нейтронами. Для исключения этого источника фона в камеру был введен экран с магнитным затвором, позволяющий закрывать  $U^{235}$  после проведения контрольных измерений. Для учета помех и нестабильности источников питания был использован "грозоотметчик" (чувствительный усилитель с антенной на входе). Импульсы с усилителя и грозоотметчика одновременно записывались на ленте самописца.

С помощью описанного ксенонового сцинтилляционного счетчика выполнены измерения констант спонтанного деления для  $Pu^{240}$  и  $Am^{241}$ . Слой плутония и америция наносился на никелевую или платиновую подложки электролитическим способом. Количество вещества определялось по измерению  $\alpha$ -активности слоя. Для  $Pu^{240}$  было получено с достаточно хорошей статистикой значение периода спонтанного деления  $1,20 \cdot 10^{11}$  лет, что находится в согласии с известными данными. При работе с  $Am^{241}$ , содержащим 60 мкг исследуемого вещества, наблюдалось 10 актов спонтанного деления за 200 часов измерений. Это соответствует периоду полураспада  $(2,3 \pm 0,8) \cdot 10^{14}$  лет. Имитация наблюдавшегося эффекта за счет спонтанного деления примесей  $Cm^{242}$  не могла иметь места, так как  $Cm^{242}$ , по оценкам, мог присутствовать в количестве не более  $10^{-10}\%$ .

Для изучения спонтанного деления  $Pu^{238}$ ,  $Pu^{242}$  и  $Np^{237}$  было изготовлено семь образцов: три из  $Np^{237}$  с количеством вещества  $\sim 20$  мг каждый (плотность  $\sim 1$  мг/см<sup>2</sup>), два из чистого  $Pu^{238}$  (0,27 и 0,35 мкг) и два из смеси изотопов  $Pu^{238}$  (14%) и  $Pu^{242}$  (86%) с количеством  $Pu^{238}$  соответственно 0,37 и 0,30 мкг. Изотопный состав смеси определялся на большом магнитном  $\alpha$ -спектрометре ИАЭ АН СССР. Однородность образцов контролировалась путем счета  $\alpha$ -частиц по отдельным участкам слоя. Кроме того, была выполнена радиография препаратов с помощью фотопластинок.

Измерения периода спонтанного деления изотопов плутония проводились двумя методами. В первой серии опытов для счета осколков использовался цилиндрический пропорциональный счетчик (диаметр 100 мм, длина 250 мм, давление метана 80 мм рт.ст.). Анализировался интегральный спектр импульсов. Средняя скорость счета осколков равнялась для чистого  $Pu^{238}$  0,92 частицы в час и для

смеси  $Pu^{242} + Pu^{238}$  - 7,0 частиц в час. Статистическая точность была не ниже 5%, а суммарная ошибка не превышала 10%. В результате были получены следующие значения периодов полураспада:  $5,2 \cdot 10^{10}$  лет для  $Pu^{238}$  и  $6,7 \cdot 10^{10}$  лет для  $Pu^{242}$ .

В дальнейших опытах была применена методика окисления скрытого изображения в ядерных эмульсиях с целью дискриминации осколков деления на фоне большого числа  $\alpha$ -частиц. Работа проводилась с эмульсией П-8 (НИКФИ) толщиной 100  $\mu$ . В качестве окислителя использовался  $K_3Fe(CN)_6$ .

Облучение фотопластинок проводилось в течение 10-100 часов. После экспозиции эмульсии обрабатывались окислителем определенной концентрации (15°C, 30 мин), затем окислитель вымывался дистиллированной водой (15°C, 30 мин), и пластинки проявлялись в разбавленном проявителе Д-19 (1:3) при 19°C в течение 30 мин.

Как показали опыты, имитировать эффект могут следы  $\alpha$ -частиц, появившиеся за счет распада радиоактивных ядер во время вымывания окислителя и проявления. Поэтому принимались специальные меры, чтобы исключить возможность загрязнения эмульсии во время экспозиции. На просмотренных пластинках плотность следов осколков спонтанного деления достигала 800 для  $Pu^{242}$  и 200 для  $Pu^{238}$  на 1 см<sup>2</sup>. Было установлено, что эффективность регистрации составляет (86 ± 5) %.

Измеренные периоды спонтанного деления  $Pu^{238}$  и  $Pu^{242}$  оказались равными соответственно  $(5,0 \pm 0,8) \cdot 10^{10}$  лет и  $(6,5 \pm 0,7) \cdot 10^{10}$  лет. Для получения заметного эффекта на  $Np^{237}$  необходимы длительные экспозиции (несколько суток). При этом возникает опасность регрессии скрытого изображения. Однако, контрольные опыты с осколками деления  $U^{235}$  под действием тепловых нейтронов показали, что регрессия не могла привести к значительному уменьшению эффективности регистрации осколков.

Всего было просмотрено 45 см<sup>2</sup> эмульсии, причем 2/3 площади последовательно просматривались двумя наблюдателями для исключения субъективного фактора. Вместо ожидавшихся 100 случаев было обнаружено только три следа. Это соответствует периоду спонтанного деления  $Np^{237} = 10^{18}$  лет.

Основная трудность изучения спонтанного деления изотопов калифорния и фермия состоит в получении их в достаточном количестве. Уже в 1955 году некоторые изотопы калифорния получались в ядерных реакциях, вызываемых многозарядными ионами при взаимодействии с ураном<sup>/8/</sup>. В настоящей работе  $Cf^{246}$  и  $Cf^{248}$  были получены при облучении  $U^{238}$  ядрами азота. Ядерные реакции, сопровождающиеся испарением 4-6 нейтронов, приводили к синтезу изотопов  $Es^{246,248}$ , которые, испытывая электронный захват, превращались в  $Cf^{248}$  и  $Cf^{246}$ . В одном опыте было получено  $\sim 2 \cdot 10^6$  ядер  $Cf^{246}$  и столько же  $Cf^{248}$ . Для получения изотопов фермия  $Fm^{252}$  и  $Fm^{256}$  использовалось облучение урана 238 ядрами  $Ne^{22}$ . К

образованию  $Fm^{252}$  приводила реакция  $U^{238} (Ne^{22}, \alpha n) Fm^{252}$ , а  $Fm^{256}$  получался как продукт распада  $Md^{256}$ , который возникал в результате реакции  $U^{238} (Ne^{22}, p3n) Md^{256}$ . С целью увеличения выхода изотопов фермия и использования максимальных токов неона нами была применена специальная наклонная мишень с водяным охлаждением, позволившая за 9 часов облучения синтезировать  $\sim 5 \cdot 10^5$  атомов  $Fm^{252}$  и  $\sim 10^3$  атомов  $Fm^{256}$ .

Измерения периодов спонтанного деления выполнялись с помощью (Si - Au) детекторов, изготовленных из кремния в Лаборатории ядерных реакций. Детекторы имели чувствительную поверхность - 4 см<sup>2</sup>. Импульсы с детектора величиной - 500 мкВ поступали на вход усилителя на транзисторах с коэффициентом усиления 2000. Далее следовал дискриминатор на транзисторах и механический регистратор. Схема усилителя и дискриминатора разработана в Лаборатории ядерных реакций Б.Фефиловым. Питание аппаратуры обеспечивалось малогабаритными сухими элементами. Смещение на детектор - 10 вольт подавалось от отдельной батарейки. С помощью эталона  $U^{235}$  и (Po+Be) нейтронного источника исследовалась счетная характеристика установки. Отсутствие фона в течение многих суток непрерывной работы и исключительно стабильная работа аппаратуры позволяли надежно регистрировать малые эффекты на уровне одного акта деления в сутки.

Как уже отмечалось, в нашем распоряжении имелось  $\sim 2 \cdot 10^8$  ядер  $Cf^{246}$ ,  $2 \cdot 10^6$  -  $Cf^{248}$  и в четырех опытах соответственно  $10^4$ ,  $1,5 \cdot 10^4$ ,  $5 \cdot 10^4$  и  $2 \cdot 10^5$  ядер  $Fm^{252}$  к моменту начала измерений периода спонтанного деления. При работе с калифорнием измерения дали 4 акта распада в первые пять суток работы в хорошем согласии с константой распада  $Cf^{246}$ , а последующее длительное наблюдение (25 суток) с помощью полупроводниковых детекторов и ядерных фотоэмульсий не дало результата. Поскольку  $\lambda_{Cf^{246}} = 2 \cdot 10^{-3}$  1/сутки, то в течение 25 суток за счет испускания  $\alpha$ -частиц распалось  $2 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25 = 10^5$  ядер  $Cf^{246}$ . Отсюда следует, что  $\frac{T_a}{T_{sf}} \leq \frac{1}{10^4}$  или что для  $Cf^{246}$   $T_{sf} \geq 9 \cdot 10^4$  лет.

В наиболее удачном эксперименте с фермием за первые 24 часа было зарегистрировано 220 импульсов, которые распределены во времени в соответствии с периодом полураспада 2,7 часа, отвечающим распаду  $Fm^{256}$ . На протяжении последующих 7 суток отмечено 5 актов распада, затем в течение 8 суток ни одного импульса не наблюдалось. По сумме всех четырех опытов для периода спонтанного деления  $Fm^{252}$  мы получили величину  $T_{sf} = 140 \pm 60$  лет. Ранее спонтанное деление этого изотопа не наблюдалось.

В 1959 году на 150-см циклотроне ИАЭ АН СССР были проведены опыты, в которых мы надеялись получить изотоп  $102^{254}$ , используя в качестве бомбардирующих частиц ионы кислорода  $O^{16}$ , а в качестве мишеней  $Pu^{242/10/}$ . К этому времени было известно из работы<sup>/11/</sup>, что изотоп  $102^{254}$  является  $\alpha$ -излучателем и в 30% случаев испытывает спонтанное деление ( $T_{sf} = 6$  сек). Условия экспери-

мента выбирались оптимальными для наблюдения реакции  $Pu^{242} (O^{16}, 4n) 102^{254}$ . Методика эксперимента настраивалась на регистрацию осколков спонтанного деления и, по существу, ничем не отличалась от применявшейся ранее в наших опытах по получению 102-го элемента <sup>12/</sup>. Для детектирования осколков использовались ядерные фотоэмульсии или сцинтиллятор  $ZnS(Ag)$  и ФЭУ-11Б.

Ожидалось, что выход  $102^{254}$  будет в 5-10 раз больше по сравнению с выходом  $102^{253}$  за счет большей величины  $(\Gamma_n / \Gamma_f)$ .

Полное облучение составило 30 мка-часов. Однако, ни с помощью фотопластинок, ни в опытах со сцинтиллятором не было зарегистрировано ни одного осколка спонтанного деления продуктов реакций. Отсюда следует, что сечение реакции  $Pu^{242} (O^{16}, 4n) 102^{254}$  не превышает  $8 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2$ . Эта величина составляет долю менее 0,01 от сечения образования того же изотопа в реакции  $Cm^{246} (C^{12}, 4n) 102^{254}$ , которую использовали американские физики для синтеза 102-го элемента.

Такое различие сечений двух реакций образования одного и того же ядра представляется удивительным. Следует отметить, что сечение образования других ядер (например, калифорния и фермия) в реакциях под действием ионов углерода и кислорода уменьшается только в 5-10 раз при переходе к более тяжелой частице.

В докладе на II Гатлинбургской конференции Гиорсо высказал предположение, что наблюдавшийся эффект в их опытах мог быть связан с образованием более тяжелого изотопа  $102^{256}$  за счет реакции  $Cm^{248} (C^{12}, 4n) 102^{256}$ . В нашем случае вероятность реакции  $(O^{16}, 2n)$  настолько мала, что практически невозможно рассчитывать на получение  $102^{256}$ .

Возможно это является объяснением большой разницы в сечениях образования  $102^{254}$  в наших и американских опытах. Если остановиться на этой точке зрения, то наблюдавшийся период спонтанного деления (~ 6 сек) следует приписать  $102^{256}$ , а наши результаты трактовать как указание нижней границы периода изотопа  $102^{254}$ , которая равняется примерно 1 минуте.

Для окончательной проверки этой гипотезы требуются дополнительные эксперименты, тем более, что значение  $T_{sf} = 6 \text{ сек}$  для  $102^{256}$  также сильно занижено (на ~ 3 порядка) по отношению к различным предположениям.

Обнаруженное недавно спонтанно делящееся ядро с аномально коротким периодом <sup>13/</sup> может оказаться не единичным случаем. Не исключено, что ядра такого сорта имеют также и более длинные периоды полураспада, и наблюдавшийся американскими исследователями эффект обусловлен явлениями того же класса.

Ниже приводится сводная таблица результатов настоящей работы. Для сравнения указаны данные других авторов.

Т а б л и ц а

Ядро	Период спонтанного деления по данным:	
	Настоящей работы	других авторов
$Np^{237}$	$\approx 10^{18}$ лет	$\geq 4 \cdot 10^{16}$ лет
$Am^{241}$	$(2,3 \pm 0,8) 10^{14}$ лет	$\geq 1,4 \cdot 10^{13}$ лет
$Pu^{238}$	$(5,2 \pm 0,5) 10^{10}$ лет	$3,8 \cdot 10^{10}$ лет
	$(5,0 \pm 0,6) 10^{10}$ лет	$4,9 \cdot 10^{10}$ лет
$Pu^{240}$	$(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{11}$ лет	$1,22 \cdot 10^{11}$ лет
$Pu^{242}$	$(6,7 \pm 0,7) \cdot 10^{10}$ лет	$6,6 \cdot 10^{10}$ лет
	$(6,5 \pm 0,7) \cdot 10^{10}$ лет	$7,1 \cdot 10^{10}$ лет
$Cf^{246}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^3$ лет	$2,1 \cdot 10^3$ лет
$Cf^{248}$	$\geq 9 \cdot 10^4$ лет	$\geq 1,5 \cdot 10^4$ лет
$Fm^{252}$	$140 \pm 60$ лет	$\geq 8$ лет
$Fm^{256}$	2,7 часа	2,7 часа
$102^{254}$	$\geq 1$ мин	$\approx 6 \text{ сек} (?)$

Использование спонтанного деления в экспериментах по исследованию ядерных реакций с малыми сечениями

Основная трудность, которая встречается при решении задачи получения новых элементов с помощью тяжелых ионов, связана с малой величиной сечений ядерных реакций и с тенденцией к ее уменьшению при переходе к синтезу ядер с большим зарядом.

Эксперименты по делению ядер под действием многозарядных ионов <sup>14,15/</sup> показали, что сечение деления для  $Bi$ ,  $Th$ ,  $U$  становится сравнимым с расчетным сечением образования компаунд-ядра. Составное ядро в подавляющем числе случаев претерпевает деление и лишь в ничтожной доле случаев энергия возбуждения уносится одними нейтронами.

За счет влияния параметра  $Z^2/A$  на делимость составного ядра конкуренция со стороны деления будет менее существенна для ядра с максимальным массовым числом  $A$ . Поэтому сечение реакции будет оптимальным, если в качестве бомбардирующих частиц и мишеней использовать ядра наиболее тяжелых изотопов данных элементов. Поскольку  $N/Z$  в стабильных ядрах увеличивается с ростом  $Z$  (число нейтронов растет быстрее), то естественно возникает вопрос о возмож-

ности использования для синтеза трансурановых элементов реакций, связанных с испарением или прямым выбиванием заряженных частиц ( $p$  или  $\alpha$ -частиц). В этом случае для получения требуемого  $Z$  компаунд-ядра необходимо использовать более тяжелую частицу по сравнению с реакциями полного слияния и испарения только нейтронов.

В настоящей работе <sup>18/</sup> исследовалась функция возбуждения для образования  $Md^{256}$  при облучении урана ядрами неона. В предварительных экспериментах <sup>19/</sup> было показано, что при облучении толстой урановой фольги ионами  $Ne^{22}$  с энергией  $\sim 150$  Мэв среди продуктов реакций наблюдается  $Md^{256}$ . К его образованию может привести ядерная реакция  $U^{238}(Ne^{22}, 4n) 102^{256}$  с последующим электронным захватом ядра  $102^{256}$ , либо реакция  $U^{238}(Ne^{22}, p3n) Md^{256}$ . Детектирование  $Md^{256}$  осуществлялось путем регистрации спонтанного деления дочернего продукта  $Fm^{256}$ , для которого  $T_{sf} = 2,7$  часа. Изучение энергетической зависимости выхода  $Md^{256}$  позволяет ответить на вопрос, за счет какой из двух возможных реакций образуется менделеевий.

В результате облучения  $U^{238}$  ядрами  $Ne^{20}$  можно было получить те же самые продукты ( $Md^{256}$  и  $Fm^{256}$ ), очень удобные для исследования, если бы имела место реакция  $(Ne^{20}, p3n)$ . Производя таким образом облучение  $U^{238}, Ne^{20}$ , можно оценить сечение прямого выбивания двух нуклонов из ядра-мишени, которые способны унести подавляющую часть энергии возбуждения.

Облучение урановых мишеней ядрами  $Ne^{22}$  производилось на внутреннем пучке циклотрона интенсивностью до 3 мка. Мишень представляла собой стопку из шести двусторонних урановых слоев толщиной  $\sim 0,75$  мг/см<sup>2</sup>, нанесенных на алюминиевую фольгу (5,5 микрон). Энергия ионов измерялась по поглощению в алюминии. После облучения каждая из фольг помещалась в (Si-Au) счетчик осколков деления. Было изготовлено пять однотипных счетчиков, описанных выше, так что функция возбуждения могла быть получена в одном опыте.

Кривая выхода  $Fm^{256}$  в зависимости от энергии налетающих частиц имеет характерный испарительный максимум, который сдвинут относительно максимума кривой ( $Ne^{22}, 4n$ ) на  $\sim 15$  Мэв в сторону больших энергий. Это удовлетворительно согласуется с представлением об испарении из ядра протона, имеющего кулоновский барьер 13,7 Мэв. Оценка величины сечения реакции  $U^{238}(Ne^{22}, p3n) Md^{256}$  в максимуме при  $E_{ион} = 128$  Мэв дает значение  $2 \cdot 10^{-33}$  см<sup>2</sup>. Столь малая величина сечения качественно объясняется, по-видимому, тем, что отношение протонной и нейтронной ширин уровней для компаунд-ядра  $102^{280}$  очень мало в связи с наличием большого кулоновского барьера.

Что касается реакции  $U^{238}(Ne^{20}, p3n) Md^{256}$ , то в этом случае спонтанное деление  $Fm^{256}$  не наблюдалось. Среднее сечение такой реакции не превышает  $10^{-35}$  см<sup>2</sup>.

## Выводы

Основные итоги проделанной работы сводятся к следующему:

1. Определены константы спонтанного деления  $Np^{237}$ ,  $Am^{241}$  и  $Fm^{252}$ , для которых ранее известны были лишь нижние граничные значения периодов полураспада.
2. Уточнены периоды полураспада изотопов  $Pu^{238}$  и  $Pu^{242}$ , а также получено подтверждение данных для  $Pu^{240}$ ,  $Cf^{246}$  и  $Fm^{256}$ .
3. Установлены новые граничные значения периодов спонтанного деления  $Cf^{248}$  и  $102^{254}$ .
4. Показано, что коэффициенты запрета для спонтанного деления исследованных нечетных ядер лежат в пределах  $10^4 - 10^8$ .
5. Проведено сравнение экспериментальных коэффициентов запрета с выводами теории для  $Am^{241}$  и  $Np^{237}$ ; при этом обнаружено, что для  $Am^{241}$  имеется удовлетворительное согласие с теоретическими оценками, в то время как для  $Np^{237}$  фактор запрета, полученный экспериментально, в 100 раз больше теоретического. В связи с этим высказывается гипотеза об ином характере поведения уровня 93-го протона на диаграмме Нильссона в процессе деформации ядра.
6. Исправлена форма кривых, описывающих поведение периодов спонтанного деления различных изотопов калифорния и фермия в зависимости от числа нейтронов в ядре.
7. Благодаря уточнению и дополнению систематики внесены изменения в форму и положение экстраполяционных кривых для элементов 102 и 104; эти изменения позволяют с большей степенью надежности предсказывать периоды спонтанного деления некоторых изотопов новых элементов.
8. Путем детектирования осколков спонтанного деления  $Fm^{256}$ , образующегося в реакциях  $U^{238} + Ne^{22}$  и  $U^{238} + Ne^{20}$ , показано, что:
  - а) суммарное сечение испарения и прямого выбивания из ядра-мишени протона и нейтрона  $\leq 10^{-35}$  см<sup>2</sup>. Высказывается предположение, что многозарядный ион не может передать в одном акте соударения значительную долю своей энергии одному или двум нуклонам, которые оставили бы конечное ядро с небольшой энергией возбуждения. Этот путь, по-видимому, маловероятен для синтеза новых трансурановых элементов;
  - б) в связи с наличием большого кулоновского барьера для испарения протонов сечение реакции  $(Ne^{22}, p3n)$  составляет  $2 \cdot 10^{-33}$  см<sup>2</sup>. Тем не менее, эта реакция является, на наш взгляд, единственной, приводящей к образованию наиболее тяжелых изотопов трансурановых элементов с помощью многозарядных ионов. Она была

с успехом использована для синтеза  $Md^{256}$ , впервые полученного в сравнительно большом количестве ( $\sim 1000$  атомов на опыт) при облучении относительно легкой мишени  $U^{238}$  ионами  $Ne^{22}$ .

Основной материал, использованный в диссертации, опубликован в /4-7, 9, 16/ и доложен на II Всесоюзном совещании по физике деления ядер /10/.

В заключение считаю своим приятным долгом поблагодарить члена-корреспондента АН СССР Г.Н. Флерова за руководство работой и И.Брандштетра, В.Л. Михеева, В.П. Перельгина и Н.К. Скобелева за помощь в проведении экспериментов.

#### Л и т е р а т у р а

1. К.А.Петржак, Г.Н.Флеров. ЖЭТФ, 10, 1013 (1940).
2. S.A.E.Johansson. Nucl. Physics, 12, 449 (1959).
3. К.А.Петржак, Г.Н.Флеров. УФН, 73, 655 (1961).
4. В.Л. Михеев, Н.К.Скобелев, В.А.Друин, Г.Н.Флеров. ЖЭТФ, 37, 859 (1959).
5. В.А.Друин, В.Л. Михеев, Н.К.Скобелев. ЖЭТФ, 40, 1261 (1961).
6. В.А.Друин, В.П.Перельгин, Г.И.Хлебников. ЖЭТФ, 40; 1296 (1961).
7. В.А.Друин, И.Брандштетр, Я.Малы. Препринт ОИЯИ, Р-875 (1962).
8. Л.И.Гусева, К.В.Филиппова, Ю.Б.Герлит, В.А.Друин, Б.Ф.Мясоедов, Н.И.Тарантин. Атомная энергия, 2, 50 (1956).
9. Г.Бэранова, И.Брандштетр, В.Друин, В.Ермаков, Т.Зварова, М.Крживанек, Я.Малы, С.Поликанов, Су Хун-гуй. Препринт ОИЯИ, Р-866, Дубна (1962).
10. В.А.Друин, Г.Н.Флеров. Доклад на Совещании по физике деления ядер. Ленинград, апрель 1961 г.
11. А.Гиорсо. Атомная энергия, 7, 338 (1959).
12. Г.Н.Флеров, С.М.Поликанов, А.С.Карамян, А.С.Пасюк, Д.М.Парфанович, Н.И.Тарантин, В.А.Карнаухов, В.А.Друин, В.В.Волков, А.М.Семчинова, Ю.Ц.Оганесян, В.И.Хализев, Г.И.Хлебников, Б.Ф.Мясоедов, К.А.Гаврилов. ЖЭТФ, 38, 82 (1960).
13. 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. Препринт ОИЯИ, Р-898, Дубна (1962).
14. В.А.Друин, С.М.Поликанов, Г.Н.Флеров. ЖЭТФ, 32, 1290 (1957).
15. В.А.Друин, С.М.Поликанов. Сборник "Ядерные реакции при малых и средних энергиях" Москва, 1958 г., стр. 507.
16. В.А.Друин. Препринт ОИЯИ, Р-874, Дубна (1962).