

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



30/11-75

Б-287

P15 - 8917

2367/2-75.

Ю.А.Батусов, Ж.Ганзориг, О.Отгонсурэн,
Д.Чултэм

ДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР
ОСТАНОВИВШИМИСЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ
ПИОНАМИ

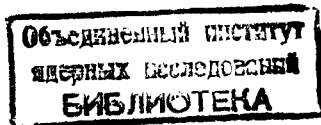
1975

P15 - 8917

Ю.А.Батусов, Ж.Ганзориг, О.Отгонсурэн,
Д.Чултэм

ДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР
ОСТАНОВИВШИМИСЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ
ПИОНАМИ

Направлено в ЯФ



Батусов Ю.А., Ганзориг Ж., Отгонсурэн О.,
Чултэм Д.

P15 - 8917

Деление тяжелых ядер остановившимися отрицательными
пионами

С помощью методики слюдяных детекторов определены относитель-
ные вероятности деления 15 тяжелых ядер от Ag до U.

Показано, что относительная вероятность деления падает в 10^3 - 10^5
 $\geq 10^6$ раз для ядер с $(Z - 1)^2/A$ равным -30, -25 и -20, соот-
ветственно, по сравнению с вероятностью деления изотопов урана и тория.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем, ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

Batusov Yu.A., Ganzoring D.Z., Otgonsuren O., P15 - 8917
Chultem D.

Fission of Heavy Nuclei Induced by Stopped
Negative Pions

Using a mica detector technique relative fission pro-
babilities of 15 heavy nuclei from Ag to U in negative
pion capture have been determined.

It is shown that for nuclei with $(Z - 1)^2/A$ -30, -25
and -20 the fission probabilities are $\sim 10^3$, $\sim 10^5$ and
 $\geq 10^6$ times lower than for thorium and uranium isotopes.

The investigation has been performed at the
Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1975

А. Введение

Важнейшим вопросом в исследованиях распада высоковозбужден-
ных состояний ядер является конкуренция между различными каналами
реакции. В частности, для тяжелых ядер, возбужденных до энергии
в несколько десятков МэВ, процесс девозбуждения происходит, в ос-
новном, путем испускания нейтронов в конкуренции с делением /1/.
Исследованию деления ядер при высоких энергиях возбуждения были
посвящены многочисленные экспериментальные работы, выполненные
с быстрыми протонами, альфа-частицами, гамма-квантами и тяжелыми
ионами.

Поглощение отрицательных пионов ядрами, при котором происхо-
дит большая передача энергии, представляет несомненный интерес
для данной проблемы. Известен ряд экспериментальных работ, посвя-
щенных исследованию деления пионами. В этих работах были использо-
ваны фотоэмульсионные /2-8/, радиохимические /9, 10/ и электрон-
ные /11, 12/ методы.

В настоящей работе определялись относительные вероятности
деления тяжелых ядер ($Z = 50 + 92$) остановившимися пионами с
использованием методики диэлектрических детекторов.

Б. Облучение и измерение

Облучение исследуемых мишеней производилось на медико-биологическом пионном пучке синхротрона ОИЯИ (Дубна). Пучок отрицательных пионов с энергией 29,5 МэВ был получен путем бомбардировки толстой медной мишени выведенными из ускорителя протонами с энергией 660 МэВ и интенсивностью $\sim 6 \cdot 10^{11}$ р/сек. Пионы, сфокусированные с помощью широкоугольной соленоидальной магнитной линзы [14], проходя через замедлитель из плексигласа толщиной 2,25 г/см², останавливались в мишени. Мишень состояла из тонких слоев исследуемых материалов толщиной порядка нескольких мг/см² и площадью 1 см² каждый. Эти слои находились в контакте с детектором из хорошо отожженной слюды толщиной ~ 60 микрон. Порог регистрации осколков такими детекторами по заряду равен $Z_{\text{пор}} \approx 18$. Это позволило надежно исключить фон легких заряженных фрагментов.

Для контроля неравномерности остановок пионов в разных частях мишени каждый из слоев был совмещен с мониторингным слоем урана, который в свою очередь просматривался аналогичным детектором из слюды. Каждая такая пара, состоящая из рабочего и мониторингового слоев с соответствующими детекторами, упаковывалась в алюминиевую фольгу толщиной 20 микрон. Каждый детектор регистрировал осколки деления только от одного слоя и в то же время в пределах пары плотность остановок пионов можно было считать равномерной.

Все слои закладывались в кадмиевую кассету с толщиной стенки в 0,5 мм для защиты мониторинговых слоев от тепловых нейтронов. Кассета имела полную толщину 1 г/см² и размер 4,5 x 4,5 см². Ее размеры хорошо вписывались в зону остановок пионов, которая была определена с помощью ядерной фотоэмульсии (рис. 2 и 3).

Измерение фона, вызванного быстрыми нейтронами и жесткими

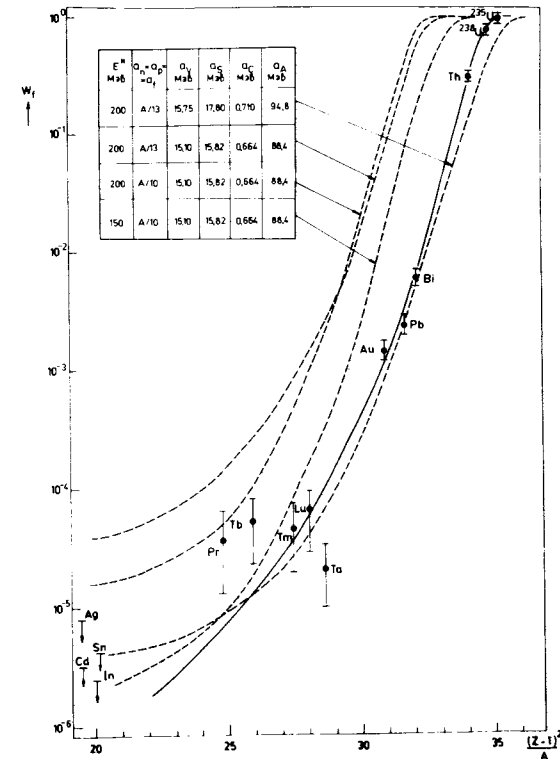


Рис. 1. Относительные вероятности деления тяжелых ядер остановившимися отрицательными пионами.

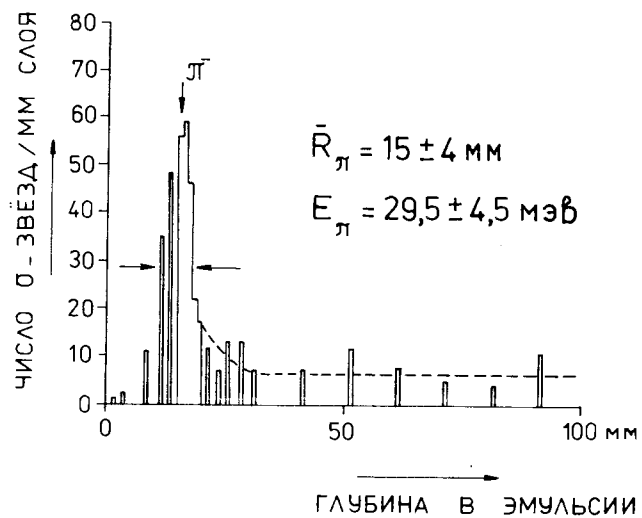


Рис. 2. Энергетический спектр пионов в пучке.

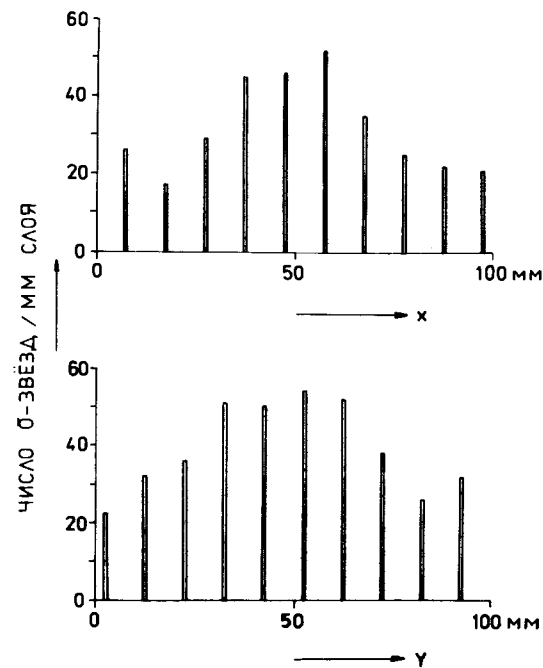


Рис. 3. Профиль пучка в зоне максимума остановок.

гамма-квантами, производилась с помощью фоновой кассеты, расположенной за кассетой-мишенью. Между кассетами располагался фильтр толщиной (3 г/см²). Фон быстрых нейтронов и гамма квантов может быть обусловлен генерацией их из медной мишени при бомбардировке протонами, а также из самой кассеты и фильтров при поглощении пионов.

Плотность остановок пионов в основной мишени составляла примерно $3 \cdot 10^4$ П/г.сек, а продолжительность облучения - 9 часов.

Как показывает распределение пробега пионов в пучке, снятое с помощью ядерной фотозмульсии (рис. 2), число остановок пионов в районе фоновой мишени составляет около 10% от числа остановок в основной мишени. В относительных измерениях это обстоятельство не имело значения при вычитании фона.

Для определения возможного фона, обусловленного примесью урана в материалах мишеней и детекторов, такие же слои (и детекторы) подвергались облучению тепловыми нейтронами на реакторе ИТР (Москва). Интегральный поток нейтронов составлял $1,0 \cdot 10^{15}$ нейтронов/см², что обеспечивало высокую чувствительность определения концентрации урана.

Такой же анализ производился и на реакторе ИБР-30 (ОИЯИ) с применением лавсановых детекторов.

После облучения на синхроциклотроне и реакторе слюдяные и лавсановые детекторы отделялись от слоев и травились в соответствующих растворах при соблюдении оптимального режима. Затем с помощью оптического микроскопа производился счет треков (табл. I).

Примесь урана в материалах мишеней и детекторов оказалась низкой и её вкладом в фон можно было пренебречь (табл. 2).

Таблица I. Количество треков на рабочих и мониторинжных детекторах

Элемент (изотоп)	Мишень	Её толщина (мг/см ²)	N_i	N_i' *)
235 U	U ₂ O ₃	1,5	9 · 10 ⁴	4,0 · 10 ⁴
238 U	U ₂ O ₃	0,75	6,9 · 10 ⁴	-
Th	Th(CO ₃) ₂	3,0	4,87 · 10 ⁴	4,3 · 10 ⁴
Bi	напылен. слой	3,0	2616	5,96 · 10 ⁴
Pb	напылен. слой	2,0	320	5,4 · 10 ⁴
Au	металл фольга	1,0	161	6,0 · 10 ⁴
Ta	металл фольга	8,0	9	6,9 · 10 ⁴
Lu	Lu ₂ O ₃	5,2	9	4,62 · 10 ⁴
Tm	Tm ₂ O ₃	5,2	5	3,9 · 10 ⁴
Tb	Tb ₄ O ₇	5,3	5	6,73 · 10 ⁴
Pr	Pr ₄ O ₇	5,3	2	3,97 · 10 ⁴
Sn	металл фольга	8,0	2	5,77 · 10 ⁴
In	напылен. слой	2,0	0	6,28 · 10 ⁴
Cd	напылен. слой	2,0	0	5,64 · 10 ⁴
Ag	металл фольга	1,0	0	5,04 · 10 ⁴

*) Здесь N_i' - не нормировано на толщину слоя U.

Таблица 2. Концентрация U в исследуемых мишенях в г/г

Мишени	на ИТР	на ИБР-30
Th	-	< 6,7 · 10 ⁻⁴
Bi	8,5 · 10 ⁻⁷	< 4,5 · 10 ⁻⁷
Pb	2,25 · 10 ⁻⁷	< 2,7 · 10 ⁻⁷
Ta	-	< 6,3 · 10 ⁻⁷
Lu	2,4 · 10 ⁻⁸	< 4,3 · 10 ⁻⁸
Tm	1,22 · 10 ⁻⁸	-
Tb	1,8 · 10 ⁻⁸	< 3,8 · 10 ⁻⁸
Pr	3,87 · 10 ⁻⁸	< 9,5 · 10 ⁻⁸
Sn	-	< 6,8 · 10 ⁻⁸

В. Обработка и анализ данных

Относительная вероятность деления определялась путем нормировки наблюдаемого числа треков на число ядер в эффективном слое мишени и на число остановок пионов в нем.

Число ядер исследуемого элемента в рабочем слое равно:

$$n_i = \frac{S \cdot \ell \cdot N_A \cdot P_i}{10^3 \cdot \sum_j P_j \cdot A_j}$$

где $\ell = d$, если $d < R_{eff}$
 $\ell = R_{eff}$, если $d > R_{eff}$

d и S - толщина и площадь мишени в $\text{мг}/\text{см}^2$ и см^2 .

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро.

Эффективный пробег осколков деления R_{eff} (толщина эффективно работающего слоя^{/14/}) достаточно хорошо описывается эмпирической формулой:

$$R_{eff} (\text{мг}/\text{см}^2) = 0,046 \sum_i a_i Z_i + 0,78,$$

где $a_i = \frac{P_i \cdot A_i}{\sum_j P_j \cdot A_j}$

(Z_i и A_i - атомный номер и атомный вес для каждого сорта атомов, входящего в состав мишени;

P_i - число атомов данного сорта в молекуле (в случае металлических мишеней равно единице).

Число случаев захвата пионов определенным сортом ядер зависит от химического состава мишени и связано с общим числом пионных остановок коэффициентом, для вычисления которого была принята простейшая форма Z -закона Ферми-Теллера^{/15/}

$$m_i = \frac{P_i \cdot Z_i}{\sum_j P_j \cdot Z_j}$$

Следует отметить, что эта формула имеет весьма приближенный характер. Однако в нашем случае точность её не имела особого значения.

Относительные вероятности деления исследуемых ядер определялись как

$$W_i = \frac{N_i}{n_i \cdot m_i \cdot N_i'}$$

(N_i - плотность треков в детекторе, находившемся в контакте с исследуемым слоем;

N_i' - плотность треков в соответствующем мониторном детекторе, нормированная на толщину слоя урана).

Экспериментальные результаты показаны на рис. I в зависимости от параметра делимости $(Z-1)^2/A$. На рисунке наряду с экспериментальными точками для сравнения приведены расчетные кривые вероятности деления при высоких (150-200 МэВ) энергиях возбуждения для различных значений параметров плотности уровней и параметров энергии связи в ядрах. Кривые взяты из работы Никса и Сасси^{/16/}. Предполагая, что для рассматриваемых нами ядер $\Gamma_n^i \gg \Gamma_f^i$, можно найти суммарную вероятность деления компаунд-ядра в процессе его девозбуждения:

$$W_f = \sigma_f / \sigma_c = 1 - \prod_i \frac{\Gamma_n^i}{\Gamma_n^i + \Gamma_f^i} \approx \sum_i \Gamma_f^i / \Gamma_n^i \approx \sum_i \frac{\rho_f^2}{m r^2} \cdot \frac{1}{A^{2/3}} \cdot \frac{a_n}{a_f} \cdot \frac{2\sqrt{a_f(E-B_f)} - 1}{E - B_n} \cdot \frac{2\sqrt{a_f(E-B_f)} - 2\sqrt{a_n(E-B_n)}}{e},$$

где E - энергия возбуждения, B_n - энергия связи нейтрона (нуклона), B_f - барьер деления; a_n и a_f - параметры плотности уровней, m - масса нуклона, r - радиус ядра.

Ход экспериментальной зависимости W_f от $(Z-1)^2/A$ качест-

венно согласуется с такими расчетами и опытными данными, полученными с протонами при $E_p \approx 150 \text{ МэВ}^{17/}$. Некоторая нерегулярность в области $(Z-1)^2/A = 25-28$ (редкоземельные мишени), по-видимому, связана с примесью тория, ядра которого с большой вероятностью делятся пионами.

Несмотря на то, что результат настоящего эксперимента выглядит весьма "тривиальным", он может быть оправдан тем, что деление ядер пионами не понято еще полностью. В качестве примера можно привести сложную форму и относительную мягкость спектра осколков, обнаруженные в работе^{/II/}.

Авторы выражают благодарность проф. В.П.Джелепову, И.В.Чувилу, С.М.Поликанову за поддержку и содействие при выполнении эксперимента, Н.А.Лебедеву, Н.Ненову, А.М.Абазову, Е.П.Череватенку за помощь, оказанную при приготовлении мишени и при их облучении.

Литература.

- I. I.Dostrovsky, Z.Fraenkel and P.Rabinowitz. Proc. of the Second UN Int.Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, Vol. 15, p. 301.
2. Г.Е.Беловицкий, Т.А.Романова, Л.В.Сухов, И.М.Франк. ЖЭТФ, т.29, 1955, вып. 5 (II) стр. 537.
3. Н.А.Перфилов, Н.С.Иванова. ЖЭТФ, т.29, 1955, вып. 5 (II), стр. 551.
4. Н.А.Перфилов, О.В.Ложкин, В.П.Шамов. ЖЭТФ, т.28, 1955, вып. 6, стр. 655.
5. Н.С.Иванова. ЖЭТФ, т.31, 1956, вып.4(II), стр.693.
6. Н.А.Перфилов. В кн. "Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии. Заседание отделения химических наук". 1955, М. Из-во АН СССР, стр. 79.
7. S.G.Al.Salam. Phys.Rev. 84, 1951, p. 254.
8. W.John, W.F.Fry. Phys.Rev. 91, 1953, p. 1234.
9. N.Sugarman and A.Haber. Phys.Rev. Vol.92, No.3, p.730, 1953.
10. I.J.Russel and A.Turkevich. "The Nuclear Properties of the Heavy Element III" by E.K.Hyde.
11. B.Budick, S.C.Cheng, E.R.Macagno, A.M.Rushton and C.W.Wu. Phys.Rev.Lett. Vol. 24, No.11, 1970, p.604.
12. D.Chultem, V.Cojocar, Dz.Ganzorig, Kim Si Khwan, T.Krogulski, W.D.Kuznetsov, H.G.Ortlepp, S.M.Polikanov, B.M.Sabirov, U.Schmidt, W.Wagner. JINR, E15-8134, 1974.
13. В.М.Абазов, В.П.Джелепов, Е.С.Кузьмин, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко, Г.П.Решетников, Е.П.Череватенко. ОИЯИ, П13-8079, Дубна, 1974.

14. Х.Абдуллаев, А.Капусцик, О.Отгонсүрэн, В.П.Перельгин,
Д.Чултэм.
Журнал "Приборы и техника эксперимента". 1968, № 2, стр.73.
15. E.Fermi and E.Teller. Phys.Rev. 72, 399 (1947).
16. J.R.Nix and E.Sassi. Nucl.Phys. 81, 1966, No.1, p.61.
17. В.А.Коньшин, Е.С.Матусевич, В.И.Регушевский.
ЯФ, т.2, вып.4, 1965, стр. 682.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 мая 1975 г.