

ЖС-595

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
**ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

2 - 8019

**ЖЕРЕГИ**  
**Федор Георгиевич**

**ДЕЛЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР ПОД ДЕЙСТВИЕМ**  
**ЧАСТИЦ И ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и**  
**космических лучей**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**

**(Диссертация написана на русском языке)**

Дубна 1974

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук В.С.БАРАШЕНКОВ,  
кандидат физико-математических наук В.Д.ТОНЕЕВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Б.Н.ЗАХАРЬЕВ,  
кандидат физико-математических наук Ю.Н.ШУБИН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Ленинград.

Автореферат разослан " " 1974 г.

Защита диссертации состоится " " 1974 г.

на заседании Ученого совета Лаборатории теоретической  
физики Объединенного института ядерных исследований,  
г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Р.А.Асанов

2 - 8019

**ЖЕРЕГИ**

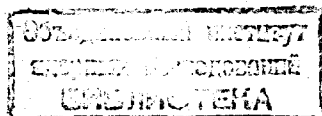
**Федор Георгиевич**

**ДЕЛЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ЧАСТИЦ И ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и  
космических лучей**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**(Диссертация написана на русском языке)**



Неупругое взаимодействие высокоэнергетической частицы или иона с атомным ядром представляет собой сложное, многогранное явление с участием большого числа частиц. Использование каких-либо уравнений или других традиционных "точных" подходов в этом случае весьма затруднительно, по крайней мере на современном уровне развития теории ядерных реакций высоких энергий. По-видимому, наиболее адекватным в настоящее время является статистический подход, основанный на непосредственном моделировании методом Монте-Карло внутриядерного каскада и последующего распада высоковозбужденного ядра-остатка. Такой подход применим в области энергий падающих частиц, больших нескольких десятков Мэв.

В рамках каскадной модели, учитывающей процессы мезообразования, диффузность ядерной границы и потенциала ядра-мишени, выполнение законов сохранения энергии и импульса при столкновении частицы с внутриядерным нуклоном, можно получить удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных величин в широкой области энергии падающих нуклонов и  $\pi$ -мезонов<sup>/1/</sup>,  $\gamma$ -квантов<sup>/2/</sup>, дейтронов<sup>/3/</sup> при взаимодействии со средними атомными ядрами. Изменение каскадного механизма взаимодействия

частиц с ядрами в области энергий падающих частиц выше нескольких Гэв, путем учета "эффекта траления" ядра, рассмотрено в работах /4,5/.

Однако до настоящего времени исследовались в основном ядерные реакции, когда мишенью служат средние ядра и процессом деления атомного ядра можно пренебречь.

Основной целью данной работы является изучение распада высоковозбужденных тяжелых ядер; т.е. конкуренции каналов эмиссии различных частиц с каналом высокоэнергетического деления под действием различных частиц высокой энергии и быстрых ионов гелия.

Возбужденные ядра с массовыми числами  $A \approx 150$ , остающиеся после каскадной стадии неупругого взаимодействия высокоэнергетических частиц или быстрых ядер с мишенью, а также образующиеся как компаунд-ядра в реакциях с тяжелыми ионами, энергии которых не сильно превосходят кулоновский барьер реакции, переходят в низшие энергетические состояния путем конкурирующих между собой процессов испарения и деления.

Вероятность первого из этих процессов достаточно хорошо описывается статистической теорией Вайскопфа, усовершенствованной в работах последующих авторов: небольшие отклонения расчетных данных от эксперимента, как правило, можно объяснить влиянием нестационарных процессов /6/. Иначе обстоит дело с расчетом вероятности деления ядра. До последнего времени /7/ здесь не было выполнено фактически ни одного достаточно подробного и систематического расчета; результаты вычислений в большинстве случаев были основаны на приближенном подборе параметров,

описывающих одну какую-то весьма ограниченную группу фактов, и в целом имеют лишь ориентировочное значение /8-II/.

К настоящему времени накоплено большое количество экспериментальных данных по барьерам деления и отношениям ширин испускания нейтрона  $\Gamma_n$  и деления  $\Gamma_f$ . Однако они весьма разрозненны и зачастую плохо согласуются между собой. Анализ и систематизации этих экспериментальных данных на основе весьма простых физических предположений и выяснению основных свойств поведения ширин как функций энергии возбуждения, атомного и массового чисел (см. рис. I) посвящена первая глава.

Хотя имеется большое количество экспериментальных данных по барьерам деления, эта информация далеко не достаточна для выполнения статистического расчета распада высоковозбужденного ядра-остатка после завершения каскадной стадии. Это связано с тем, что спектр остаточных ядер является достаточно широким как по массовым  $A$  и зарядовым  $Z$  числам, так и по энергиям возбуждения: часто остаточные ядра находятся далеко за пределами области  $\beta$ -стабильности или являются довольно легкими делящимися ядрами, точность оценки экспериментальных барьеров деления которых не очень высока или вообще такие оценки отсутствуют.

В первых двух параграфах первой главы предложен способ аппроксимации известных экспериментальных данных по барьерам деления /12/, являющийся по существу аналогом формулы Камерона для вычисления масс ядер. Этот способ позволяет в принципе рассчитать барьер деления любого остаточного делящегося ядра. Обсуждается влияние способа аппроксимации барьеров деления, нечетно-четных и оболочечных эффектов, углового момента и др. на

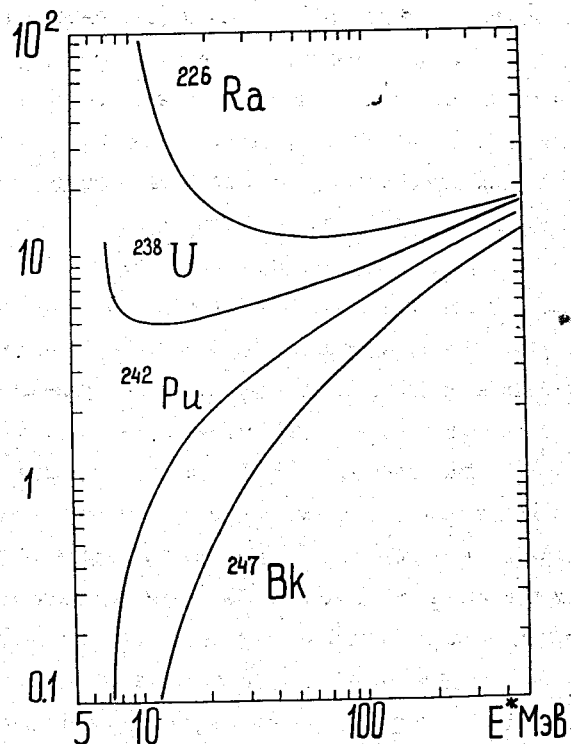


Рис. 1. Зависимость отношения  $\Gamma_n/\Gamma_f$  от энергии возбуждения для ядер с  $Z \geq 90$ .

величину отношения  $\Gamma_n/\Gamma_f$  /13/. Показано, что сильная зависимость величины отношения  $\Gamma_n/\Gamma_f$  от энергии возбуждения в трансурановой области не противоречит экспериментальным данным /14/. Последний (§5) параграф первой главы посвящен применению предложенного подхода к распаду делящихся ядер в реакциях с тяжелыми ионами /15/.

Вторая глава посвящена систематическому анализу взаимодействия быстрого протона с делящимся ядром в области энергий падающих протонов  $T \approx 0,1-30$  Гэв /16/. Обсуждается влияние "эффекта трения" на величину сечения деления /17/ и множественности сопровождающих частиц. Расчетные значения сечений деления удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными во всей области энергии падающих протонов и массовых чисел ядер-мишеней (см. рис. 2). Третий параграф посвящен сравнению расчетных и экспериментальных данных по выходам отдельных изотопов, когда мишенью служат ядра урана и висмута. Из полученной информации о свойствах остаточных ядер на различных этапах прохождения реакции деления делаются определенные выводы о механизме высокоэнергетического деления.

Хорошо известно, что основное предположение модели составного ядра состоит в том, что распад компаунд-ядра не зависит от способа его образования. Имея в виду это свойство составного ядра, а также удовлетворительное согласие между теоретическими и экспериментальными данными о неупругом взаимодействии протона с тяжелым ядром, в третьей главе рассматривается делимость тяжелых ядер под действием  $\gamma$ -квантов,  $\pi$ -мезонов и дейтронов высоких энергий. Сравняются расчетные сечения деления с имеющимися в литературе соответствующими экспериментальными данными (см. таблицу I).

Т А Б Л И Ц А I  
СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР ПОД ДЕЙСТВИЕМ  $\pi$ -МЕЗОНОВ И  
ДЕЙТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ T (мэВ)

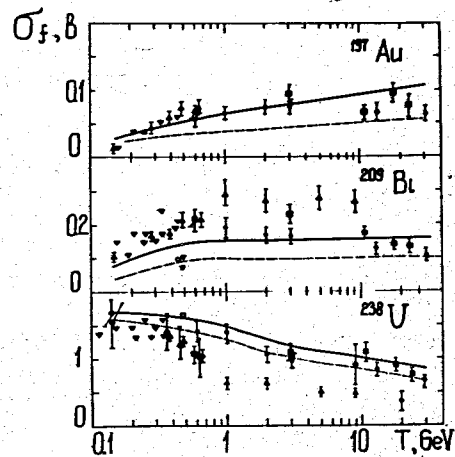


Рис. 2. Энергетическая зависимость сечений деления ядер золота, висмута и урана под действием протонов с энергией T. Сплошные и пунктирные кривые — расчет соответственно для  $a = A/10$  и  $a = A/15$  МэВ<sup>-1</sup>. Значками нанесены экспериментальные точки. Статистическая ошибка расчетных данных — около 7%.

Ядро	$\pi$ -мезоны (T=2,36 ГэВ)		дейтоны (T=2,1 ГэВ)	
	расчет	опыт <sup>*/</sup>	расчет	опыт <sup>*/</sup>
Au <sup>197</sup>	63,1 $\pm$ 3,2	107 $\pm$ 20	170 $\pm$ 12	157 $\pm$ 20
Bi <sup>209</sup>	149 $\pm$ 7,5	191 $\pm$ 40	358 $\pm$ 25	323 $\pm$ 60
U <sup>238</sup>	1097 $\pm$ 55	1090 $\pm$ 160	2760 $\pm$ 190	1654 $\pm$ 340

<sup>\*/</sup> L.Husain and S.Katcoff. Phys. Rev., c. 4, 263 (1971).

<sup>\*/</sup> F.Rahimi, D.Gheysari, G.Remy, J.Tripiet, J.Ralarosy, R.Stein, and M.Debeauvais. Phys. Rev., c. 8, 1500 (1973).



В связи с созданием пучков релятивистских ядер в Дубне и Брукхейвене разработка моделей, описывающих неупругие столкновения высокоэнергетических ядер с ядрами /18/, представляет сейчас особый теоретический интерес. С самого начала ясно, что расчет таких столкновений представляет собой весьма сложную задачу /19/ как в принципиальном отношении (например, неизвестно, как изменятся свойства ядер в процессе столкновения), так и с чисто расчетной точки зрения (например, необходимость учета очень большого числа частиц, которые участвуют во взаимодействии).

В четвертой главе предложена модель внутриядерных каскадов для расчета неупругих столкновений ионов гелия с энергией, большей нескольких десятков Мэв/нуклон с атомными ядрами /20/. Механизм взаимодействия быстрых ионов гелия с атомными ядрами обсуждается в двух вариантах. В одном из них рассматривается взаимодействие  $d$ -частицы как целого с нуклонами ядра-мишени; в другом - внутриядерный каскад инициируется отдельными нуклонами ядра гелия. Для расчета взаимодействия быстрых ядер важен точный учет диффузности ядерной границы. В связи с этим предложен эффективный метод расчета без использования традиционного разбиения ядра на сферические зоны с постоянной плотностью нуклонов /21/. Сравнение расчетных и известных экспериментальных данных по взаимодействию быстрых ионов гелия со средними атомными ядрами, выполненное в третьем параграфе, позволяет говорить об их удовлет-

ворительном согласии. В последнем (§4) параграфе обсуждается делимость ядер урана, висмута и золота под действием быстрых  $d$ -частиц (см. рис. 3) и сравниваются соответствующие расчетные и экспериментальные сечения деления.

В заключении содержится перечень основных результатов работы, которые коротко можно сформулировать следующим образом:

1. Сравнение эксперимента и теории показало, что механизм внутриядерных каскадов с учетом конкурирующих между собой процессов деления и испарения возбужденных остаточных ядер объясняет известные сейчас экспериментальные данные по взаимодействиям высокоэнергетических протонов с делящимися ядрами. Теоретические расчеты дают основания утверждать, что хотя имеется определенная вероятность деления высоковозбужденного тяжелого ядра на всех ступенях испарительного каскада, ядро, прежде чем разделиться, обычно становится более "холодным" и более легким из-за испарения частиц.

2. В области энергий падающих частиц  $T > 1$  Гэв очень важно принимать во внимание "эффект траления" ядра-мишени. Для выхода отдельных изотопов также важен точный учет диффузности ядерной границы.

3. Известные в настоящее время экспериментальные данные об относительной вероятности распада возбужденных ядер путем процессов испарения и деления можно объяснить в рамках статистической теории с плотностью ядерных уровней, соответствующей представлению о ядре как о нуклоном ферми-газе.



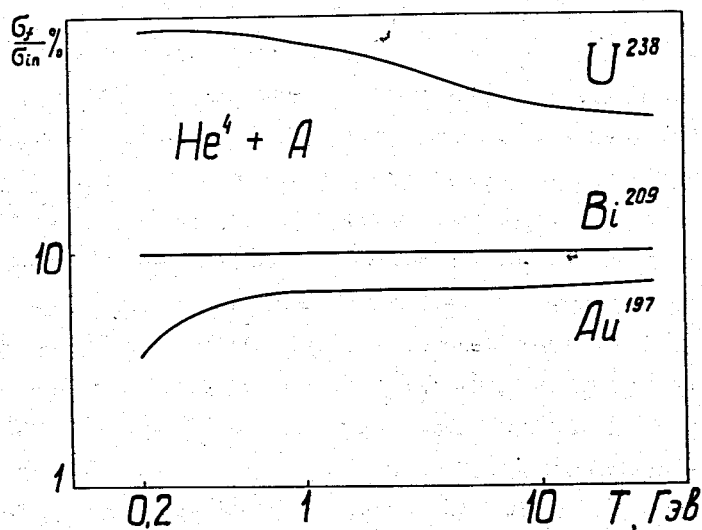


Рис. 3. Зависимость вероятности деления ядер золота, висмута и урана от энергии падающих  $\alpha$ -частиц  $T$ .

4. Результаты расчета распада возбужденных компаунд-ядер, образованных тяжелыми ионами, с учетом конкуренции процессов испарения и деления показали их значительную чувствительность к величине отношения параметров плотности уровней в делящемся и испаряющемся ядрах.

5. Величина отношения  $\Gamma_n/\Gamma_f$  для трансурановых элементов может существенно зависеть от энергии возбуждения. На опыте, как правило, измеряется не отношение  $\Gamma_n/\Gamma_f$ , а некоторая другая усредненная величина, которая, как в эксперименте, так и в теории оказывается практически не зависящей от энергии возбуждения.

6. Угловой момент ядра весьма существенно сказывается на результатах расчета взаимодействия тяжелых ионов с ядрами и должен обязательно приниматься во внимание при определении величины отношений  $\Gamma_n/\Gamma_f$  из экспериментальных функций возбуждения.

7. Для детального согласования экспериментальных значений  $\Gamma_n/\Gamma_f$  необходим более точный учет зависимости параметров плотности уровней  $a_n$  и  $a_f$  от энергии возбуждения, массового числа и заряда ядра.

8. Разработанная модель расчета внутриядерного каскада взаимодействия быстрого иона гелия с ядром успешно объясняет известные экспериментальные данные. Дальнейший прогресс в значительной степени определяется накоплением достаточно точных, а главное, достаточно полных экспериментальных данных.

Большая часть результатов данной работы получена на основе методики Монте-Карло. Моделирование процесса взаимодействия быстрого иона гелия (нуклона,  $\pi$ -мезона и др.) с атомным ядром

и распада возбужденного ядра запрограммировано на языке  
FORTRAN /22/.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опублико-  
ваны в работах /7, II-22/ и доложены на IV Международной конфе-  
ренции по физике высоких энергий и структуре ядра (Дубна, 1971),  
на Всесоюзной конференции "Ядерные реакции при высоких энерги-  
ях" (Тбилиси, 1972), на Конференции по ядерной химии (США, 1972),  
на совещании по программированию и математическим методам реше-  
ния физических задач (Дубна, 1973).

#### ЛИТЕРАТУРА

- I. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Сообщения ОИЯИ,  
P2-4313, P2-4346, Дубна, 1969.
2. К.К.Гудима, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Сообщение ОИЯИ,  
P2-466I, P2-4808, Дубна, 1969.
3. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Ядерная физика, 9,  
528 (1969), 10, 760 (1970).
4. V.S.Barashenkov, A.S.Iljinov, V.D.Toneev. JINR Communication  
E2-5282, Dubna, 1970.
5. В.С.Барашенков, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Ядерная физика,  
13, 743 (1971).
6. M.Blann. A Series of Lectures, presented at the Warsaw Univer-  
sity. Summer School on Nucl. Phys.; (Rudzicka, 1971); report  
of the University of Rochester UR-3591-20.
7. V.S.Barashenkov, F.G.Gereghi, A.S.Iljinov, V.D.Toneev.  
Nucl. Phys., A206, 131 (1973).
8. I.Dostrovsky, Z.Fraenkel, P.Rabinovitz. Proc. of the 2-nd UN  
Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva,  
1958, v. 15, p.301.
9. M.Lindner, A.Turkevich. Phys.Rev., 119, 1632 (1960).
10. В.С.Барашенков, В.М.Мальцев, В.Д.Тонеев. Изв. АН СССР,  
сер. физ. 30, 322, 337 (1966).
11. В.С.Барашенков, Ф.Г.Жереги, А.С.Ильинов, Н.М.Соболевский,  
В.Д.Тонеев. Труды IV Международной конференции по физике вы-  
соких энергий и структуре ядра, стр. 153, Дубна, 1971.

12. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, Ф.Г.Жереги, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Физико-технический институт АН УССР. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра. Вып. I (3), стр. 89, Харьков, 1973.
13. В.С.Барашенков, Ф.Г.Жереги, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Препринт ОИЯИ P7-7165, Дубна, 1973; ЭЧАЯ, 5, 479 (1974).
14. В.С.Барашенков, Ф.Г.Жереги, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Ядерная физика, 18, 37 (1937).
15. В.С.Барашенков, В.Г.Жереги, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Сообщение ОИЯИ, P7-6798, Дубна, 1972.
16. V.S.Varashenkov, F.G.Gereghi, A.S.Iljinov, V.D.Toneev. JINR Preprint, E2-7278, Dubna, 1973; Nucl.Phys., A222, 204(1974)
17. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, Ф.Г.Жереги, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Квантовая теория систем многих частиц, стр. III, Изд. "Штиинца", Кишинев, 1973.
18. V.S.Varashenkov, K.K.Gudima, F.G.Gereghi, A.S.Iljinov, V.D.Toneev. JINR, E2-6706, Dubna, 1972.
19. V.S.Varashenkov, K.K.Gudima, F.G.Gereghi, A.S.Iljinov, V.D.Toneev. Report "P" Nr 1447/I/PL (5th Summer School on Nucl.Phys. 20.08.-3.09.1972 Rudziska, Poland) Vol. 3, p. 1, Warszawa, 1973.
20. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, Ф.Г.Жереги, А.С.Ильинов, В.Д.Тонеев. Ядерная физика 17, 434 (1973).
21. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, Ф.Г.Жереги, В.Д.Тонеев. Сообщение ОИЯИ P2-6503, Дубна, 1972.
22. К.К.Гудима, Ф.Г.Жереги, А.С.Ильинов. Сообщение ОИЯИ, Б1-7186, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июня 1974 года.