

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К - 206

4-80-248

КАПТАРЬ
Леонид Петрович

ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ
С ПЕРИФЕРИЧЕСКИМИ СТОЛКНОВЕНИЯМИ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ЯДРАМИ

Специальность: 01.04.16 -
физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

А.И. Титов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
профессор

В.В. Балашов

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.С. Ставинский

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, Москва.

Защита диссертации состоится " " 1980 г.
на заседании Специализированного ученого совета К047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Московская обл., г. Дубна).

Автореферат разослан " " 1980 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И. Журавлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последнее время получает развитие относительно новая область ядерной физики – реакции столкновения тяжелых ионов с ядрами при релятивистских энергиях. При этом основные надежды здесь связывают с предполагаемой возможностью прямого изучения ядерных систем в экстремальных условиях – высоких температур, возникновения коллективных эффектов типа ударных волн, пионного конденсата, проявления кварковой структуры ядер и т.д.

Все эти эффекты должны, по-видимому, наиболее ярко проявляться в центральных столкновениях ядер. Вместе с тем, анализ показал, что большое значение и интерес имеет исследование реакций периферического столкновения релятивистских тяжелых ионов. Это связано, во-первых, с открывающейся здесь принципиальной возможностью получения и непосредственной регистрации в быстродействующих стримерных камерах экзотических атомных ядер (сильно нейтроно- или протоноизбыточных, гиперядер и т.д.). Во-вторых, с интересом к исследованию особенностей механизма ядерных реакций при релятивистских энергиях и возможностью использования этих реакций для получения дополнительной информации о структуре атомных ядер. Поэтому исследования периферических реакций с релятивистскими ионами являются важнейшей частью всех экспериментальных программ, проводимых (или планируемых) в физических центрах, имеющих или создающих ускорители релятивистских тяжелых ионов.

Основная цель работы состоит в исследовании эффектов, возникающих в периферических столкновениях релятивистских тяжелых ионов с атомными ядрами. При этом ставится задача проанализировать особенности механизмов взаимодействия, основные закономерности в поведении полных сечений и импульсных распределений, влияние структуры сталкивающихся ядер. Так, при рассмотрении кулоновского механизма расщепления релятивистских ядер ставилась задача исследовать зависимость сечения от энергии пучка, спектров возбуждения и зарядов ядер и других структурных факторов, анализа вклада кулоновского механизма в полное сечение фрагментации и сравнение с имеющимися экспериментальными данными, выяснить вопрос о возможности использования кулоновского механизма взаимодействия релятивистских ионов для получения дополнительной информации об их структуре.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

При анализе процессов перезарядки в реакциях с релятивистскими тяжелыми ионами ставилась цель выяснить вклад возможных механизмов в полное сечение, в частности, исследовать относительный вклад подпроцессов с рождением Δ -изобар в сечение перезарядки, попытаться дать объяснение наблюдаемым экспериментальным данным, выяснить роль структуры сталкивающихся ядер. Кроме того, ставилась задача проанализировать подпроцессы с рождением странных частиц, дать теоретическую оценку сечений образования быстрых гиперядер и рассмотреть возможность получения гиперядер в пучках релятивистских ионов для их непосредственного исследования.

Научная новизна и практическая ценность. В данной диссертации выполнен теоретический анализ ряда эффектов, возникающих в периферических столкновениях релятивистских тяжелых ионов с ядрами. Впервые проведено детальное исследование механизма кулоновского расщепления релятивистских ядер: исследована зависимость сечения от начальной энергии, структуры сталкивающихся ядер, заряда ядра мишени и от энергии возбуждения. Показано, что вклад кулоновского механизма довольно большой и в ряде случаев достигает величины 30% от полного сечения фрагментации. Рассчитаны сечения кулоновского расщепления релятивистских ядер ионов углерода ^{12}C и кислорода ^{16}O в канале с выходом нуклона в зависимости от начальной энергии и заряда мишени. Показано, что в этом случае основной вклад в сечение дает возбуждение в ионе гигантского E1-резонанса и его распад с испусканием нуклона. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Впервые исследован процесс кулоновской фрагментации ионов углерода на три альфа-частицы. Рассмотрена возможность использования периферических процессов в целях получения дополнительной информации о структуре возбужденных состояний ядер.

Исследованы реакции ядерной перезарядки. Впервые дан последовательный анализ вклада диаграмм с образованием Δ -изобар в полное сечение, проанализировано влияние структуры ядер на вероятность процесса. Дано объяснение экспериментальных данных и, в частности, наблюдаемого эффекта сильного подавления вероятности ядерной перезарядки по сравнению с элементарным процессом NN -перезарядки. Впервые дана оценка сечений образования быстрых гиперядер в периферических процессах; указано на возможность

экспериментального исследования гиперядер на пучках релятивистских ионов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ; представлялись и докладывались на VII Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра в г. Цюрихе, 1977 г. (Швейцария), на Всесоюзном совещании по ядерной спектроскопии и структуре ядра в г. Алма-Ате, 1978 г., на IX Международном симпозиуме по динамике множественных процессов при высоких энергиях, г. Табор, 1978 г. (ЧССР), на Международной школе по физике тяжелых ионов при высоких энергиях, г. Эриче, 1979 г. (Италия).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано шесть работ.

Объем работы. Диссертация состоит из четырех глав, заключения и двух приложений, содержит 92 страницы машинописного текста, 14 рисунков, 3 таблицы и библиографический список литературы из 95 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматривается место периферических столкновений релятивистских ионов среди других процессов с участием тяжелых ионов, анализируется роль периферических процессов в исследованиях релятивистской ядерной физики. Дается краткий обзор экспериментальной ситуации, анализируются основные наблюдаемые эффекты в периферических реакциях, исследуется информация, которую можно извлечь из этих экспериментов. Сформулированы основные вопросы, рассматриваемые в диссертации, дается краткое ее содержание.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу кулоновского механизма взаимодействия релятивистских ядер.

В §1 дается постановка задачи с указанием эффектов, в которых наиболее ярко проявляется кулоновский механизм взаимодействия в реакциях фрагментации релятивистских ядер. Дается краткое содержание второй главы.

В §2 проводится теоретическое рассмотрение кулоновского механизма фрагментации релятивистских ядер. В рамках длинно-волнового приближения получено выражение для сечения кулоновского возбуждения ядер, анализируются основные закономерности поведения сечения: зависимость от начальной энергии, структуры ядер, от заряда ядра-мишени и т.д. Показано, что сечение определяется вероятностью фотопоглощения в данном ядре и числом "эквивалентных" фотонов. Показано, что в ультрарелятивистском пределе полученные выражения для вероятности кулоновского возбуждения переходят в хорошо известную, классическую формулу Вильямса-Вайцзеккера. Рассмотрена возможность использования кулоновского механизма для возбуждения и исследования высоколежащих ядерных состояний.

В §3 исследуются вклад кулоновского механизма в реакциях типа $A \rightarrow (A - I)$. На двух конкретных примерах ($^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C} + n$ и $^{16}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{O} + n$) показано, что основной вклад в таких процессах дает возбуждение в ионе состояний гигантского ЕI-резонанса с последующим распадом в интересующий канал. Проведены расчеты сечений кулоновской фрагментации ядер в указанных процессах в зависимости от начальной энергии, заряда мишени и сорта ускоряемых ядер. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Типичные результаты приведены на рис. 1 и 2. Сравнение численных расчетов с экспериментальными данными показало, что кулоновский механизм дает существенный вклад в реакции фрагментации и в отдельных случаях достигает 30% от полного сечения.

Проанализировано импульсное распределение вторичных фрагментов в процессах $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C} + n$ и $^{16}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{O} + n$. Показано, что сдвиг в импульсном распределении по $P_{||}$ обусловлен как ядерным, так и кулоновским механизмом взаимодействия. С ростом относительного вклада кулоновского механизма в реакциях фрагментации величина сдвига $\langle P_{||} \rangle$ падает.

В §4 исследуется процесс кулоновского расщепления ионов углерода на три альфа-частицы. Рассчитано полное сечение процесса в зависимости от начальной энергии и заряда ядра-мишени. Показано, что основные закономерности поведения сечения такие же, как и для процесса $A \rightarrow (A - I)$, а относительный вклад кулоновского механизма в полное сечение расщепления релятивистских ионов углерода на три альфа-частицы доходит до 10%.

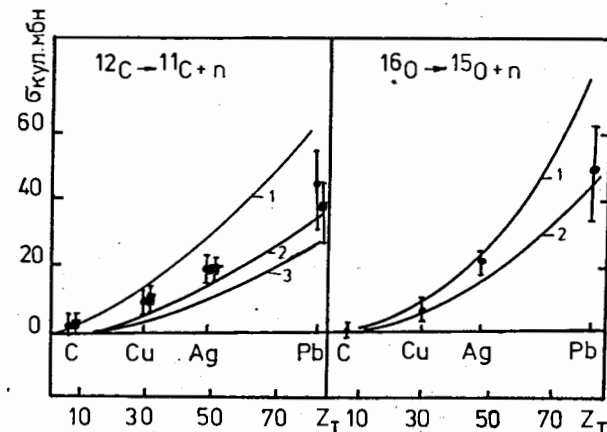


Рис. 1. Зависимость сечения кулоновской фрагментации от начальной энергии. Кривая 1 - $E_0 = 5$ ГэВ/нукл., кривая 2 - $E_0 = 2,1$ ГэВ/нукл., кривая 3 - $E_0 = 1,05$ ГэВ/нукл. Экспериментальные точки взяты из работ: Greiner D.E. et al. Phys.Rev.Lett., 1975, 35, p. 152.

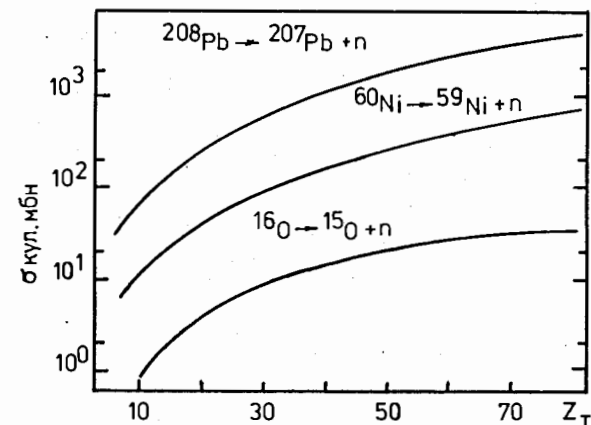


Рис. 2. Зависимость сечения кулоновской фрагментации от сорта ускоряемых ядер; $E_0 = 2,1$ ГэВ/нукл.

Проанализировано энергетическое распределение вторичных альфа-частиц. Результаты вычислений показывают, что поведение сечения $d\sigma/dE_\alpha$ в основном повторяет соответствующее сечение фоторасщепления, однако из-за большого числа "эквивалентных" фотонов в интервале энергии возбуждения $\omega, \omega + d\omega$ ($\omega \approx 10-20$ МэВ), сечение кулоновского расщепления в несколько раз превосходит сечение фоторасщепления (см. рис. 3)

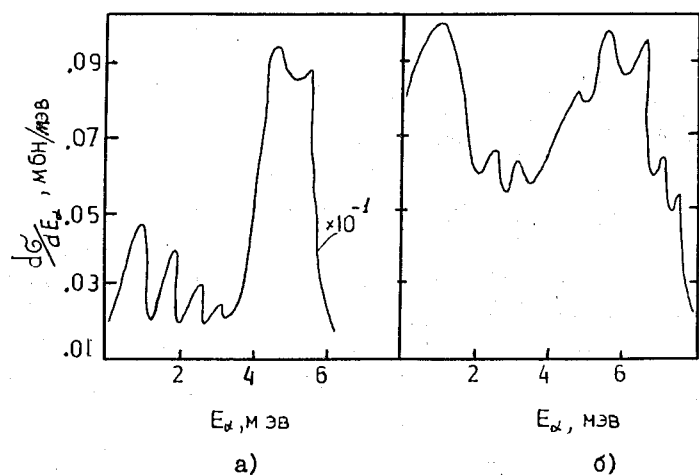


Рис. 3. Дифференциальное сечение фоторасщепления $\gamma + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (а) и кулоновского расщепления ${}^{12}\text{C} + {}^{208}\text{Pb} \rightarrow 3\alpha$ при энергии $E_0 = 10$ ГэВ/нуклон (б).

Расчеты, выполненные в четвертом параграфе, носят в основном предсказательный характер и указывают на возможность экспериментального исследования данного процесса.

В § 5 даются выводы второй главы.

В третьей главе исследуется наиболее характерный механизм "ядерного взаимодействия" – реакции перезарядки релятивистских тяжелых ионов в периферических процессах.

В §2 в рамках механизма многократного столкновения получено выражение для сечения перезарядки, найден вид структурных факторов, влияющих на величину вероятности процесса. Показано, что расчеты сечений чувствительны к выбору поведения волновых функций вблизи поверхности ядра, проведены соответствующие методические расчеты.

В §3 выполнены конкретные расчеты сечений ядерной перезарядки релятивистских ионов углерода и кислорода. Исследован вклад в сечение перезарядки подпроцессов с рождением Δ -изобар. Оказалось, что вклад диаграмм с образованием Δ -изобар при энергии 1,05 ГэВ/нукл. составляет около 40% от полного сечения и растет с ростом начальной энергии. Получено хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными для разного сорта конечных фрагментов и при двух начальных энергиях. Результаты сравнения с экспериментом даны в таблице. Исследован эффект сильного подавления вероятности ядерной перезарядки по сравнению с элементарным процессом NN-перезарядки. Показано, что это ослабление связано со структурой сталкивающихся ядер (принцип Паули, оболочечные эффекты и др.).

Таблица

$\begin{smallmatrix} A \\ P \end{smallmatrix} Z$	$\begin{smallmatrix} A \\ F \end{smallmatrix} Z$	E_0 , ГэВ/нукл.	$\sigma_{\text{теор.}}$, мбн	$\sigma_{\text{эксп.}}$, мбн
${}^{12}\text{C}$	${}^{12}\text{N}$	2, I	0,095	$0,08 \pm 0,01$
		1,05	0,075	$0,05 \pm 0,05$
	${}^{12}\text{B}$	2, I	0,13	$0,1 \pm 0,01$
		1,05	0,1	$0,1 \pm 0,01$
${}^{16}\text{O}$	${}^{16}\text{N}$	2, I	0,11	$0,13 \pm 0,02$

В четвертой главе рассматривается возможность образования быстрых гиперядер в реакциях периферических столкновений релятивистских тяжелых ионов с ядрами.

В §1 дан краткий обзор экспериментальных данных в гиперядерной физике и сформулирована постановка задачи.

В §2 на основе метода, развитого в третьей главе, проанализировано образование релятивистских гиперядер. Проведен конкретный расчет сечения реакции $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}_{\Lambda}\text{B}$ в зависимости от начальной энергии и типов переходов нуклона в ядре ^{12}C в Λ -гиперон в ядре $^{24}_{\Lambda}\text{B}$. Показано, что вероятность образования быстрых гиперядер быстро растет с ростом начальной энергии от $E_0 = 2$ ГэВ/нуклон до $E_0 = 5$ ГэВ/нуклон; при дальнейшем увеличении начальной энергии скорость роста сечений уменьшается (см. рис. 4). Расчет показал, что при энергии $E_0 \geq 5$ ГэВ/нукл. сечения достаточно велики для экспериментального получения и исследования гиперядер.

В §3 даются основные выводы четвертой главы.

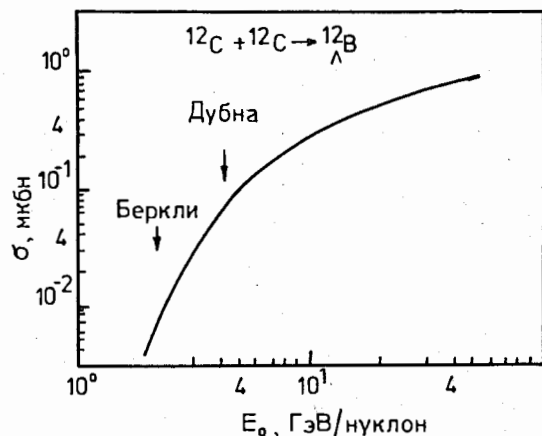


Рис. 4. Сечение образования быстрых гиперядер в процессе $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}_{\Lambda}\text{B}$ в зависимости от начальной энергии. Стрелки соответствуют максимально возможным значениям энергии пучков релятивистских ионов в Беркли (США) и в Дубне (ОИЯИ).

В заключении приведены основные результаты диссертации, которые представляются к защите:

1. Проведено детальное исследование механизма кулоновского возбуждения релятивистских ядер. Получено выражение для полного сечения возбуждения, показано, что в длинноволновом приближении

это сечение определяется вероятностью фотопоглощения в данном ядре и числом "эквивалентных" фотонов в интервале энергий возбуждения $\omega, \omega + d\omega$.

2. Показано, что вероятность кулоновского возбуждения сильно растет с ростом начальной энергии, увеличением заряда ядра мишени и массы ускоряемых ядер и зависит от энергии возбуждения (спектр "эквивалентных" фотонов падает с ростом ω).

3. Проанализирован вклад кулоновского механизма в реакции расщепления релятивистских ионов в процессах типа $A \rightarrow A-1$ и $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$. Показано, что в первом случае основной вклад в сечение дает возбуждение в ионе состояний гигантского E1-резонанса с последующим его распадом в конечный фрагмент, а во втором — возбуждения с переходами различной мультипольности. Исследовано импульсное и энергетическое распределение вторичных фрагментов. Показано, что кулоновский механизм дает существенный вклад в полное сечение фрагментации и в некоторых случаях достигает величины 30% от полного сечения.

4. Исследован механизм перезарядки релятивистских ионов в периферических процессах. Анализируется вклад различных диаграмм в полное сечение. Показано, что относительный вклад диаграмм с образованием Δ -изобар при начальной энергии 1,05 ГэВ/нуклон составляет около 40% и растет с ростом начальной энергии. Дано объяснение эффекта ослабления вероятности ядерной перезарядки по сравнению с перезарядкой в элементарном нуклон-нуклонном взаимодействии и показано, что этот эффект обусловлен влиянием структурных факторов сталкивающихся ядер. Получено хорошее согласие с экспериментом.

5. Рассмотрена возможность использования периферических процессов для экспериментального получения и исследования гиперядер. Получено выражение для сечения образования быстрых гиперядер, исследована чувствительность расчетов к выбору волновых функций, показана целесообразность использования для гиперядер волновых функций потенциала Саксона-Вудса. Рассчитаны сечения в зависимости от начальной энергии и показано, что эксперименты по образованию и исследованию свойств гиперядер могут быть начаты уже сейчас на имеющихся пучках релятивистских ионов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

- Kaptari L.P., Lukyanov V.K., Titov A.I. - On the Photodesintegration Contribution to the Fragmentation of Relativistic Heavy Ions. - In: Int.Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure. (VII-th, Zürich, 1977). - Villigen, 1977, p. 175.
- Каптарь Л.П., Титов А.И. Кулоновское расщепление релятивистских ионов. В кн.: Сопещение по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра 28-е. Алма-Ата, 1978, с.233.
- Каптарь Л.П., Титов А.И.. Кулоновское расщепление релятивистских ионов. - ЯФ, 1978, т.28, вып. 3(9), с.647-653.
- Каптарь Л.П., Титов А.И. Кулоновское расщепление релятивистских ионов. - Дубна, 1977 - I4 с. - (ОИЯИ - P2-II006).
- Каптарь Л.П. Кулоновская фрагментация релятивистских ионов. - В сб. статей: "Микроскопические расчеты структуры ядра и ядерных реакций." Изд. Штинца, Кишинев, 1980. - с.64-79.
- Kaptari L.P., Titov A.I. The Coulomb Desintegration of Relativistic Carbon Ions into three Alpha Particles. - Acta Phys. Pol., 1979, v. B10, No.3, p.263-269.
- Каптарь Л.П., Титов А.И. Кулоновское расщепление релятивистских ионов углерода на три альфа частицы. - Дубна, 1979. - I3с. - (ОИЯИ - P2-II300).
- Каптарь Л.П., Титов А.И., Реакции перезарядки в периферических столкновениях релятивистских тяжелых ионов с ядрами. - ЯФ, 1980, т.31, вып. I, с.I51-I55.
- Каптарь Л.П., Титов А.И. Реакции перезарядки и образования быстрых гиперядер в периферических столкновениях релятивистских тяжелых ионов с ядрами. - Дубна, 1979, - I2 с. - (ОИЯИ - P2-I2455).
- Каптарь Л.П., Титов А.И. Образование быстрых гиперядер при столкновениях релятивистских ионов с ядрами. - ЖЭТФ, Письма, 1979, т.29, вып. 6, с.375-378.
- Каптарь Л.П., Титов А.И. Образование быстрых гиперядер при столкновениях релятивистских ионов с ядрами. - Дубна, 1979. - 6 с. - (ОИЯИ - P2-I2190).

Рукопись поступила в издательский отдел
27 марта 1980 года.