

Т - 454

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

4 - 7593

ТИТОВ
Александр Иванович

ЭФФЕКТЫ СВЯЗИ КАНАЛОВ
В ТЕОРИИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

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, 1973

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук В.К. Лукьянов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук Е.В. Инопин,
кандидат физико-математических наук В.Н. Ефимов

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

Автореферат разослан " " 197 года.
Защита диссертации состоится " " 197 года
на заседании Ученого совета Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Р.А. АСАНОВ

4 - 7593

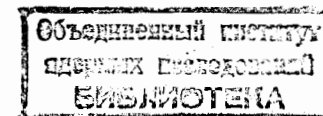
ТИТОВ
Александр Иванович

ЭФФЕКТЫ СВЯЗИ КАНАЛОВ
В ТЕОРИИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

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)



Значительный интерес к ядерным реакциям, протекающим в условиях сильной связи различных каналов, объясняется желанием выяснить, во-первых, особенности механизма таких реакций, во-вторых, извлечь дополнительные сведения о структуре ядра, и, наконец, получить новую информацию о характере взаимодействия сталкивающихся систем. Примерами таких реакций могут служить: неупругое рассеяние, приводящее либо к возбуждению ядра мишени, либо к изменению внутреннего состояния налетающих частиц /возбуждению, развалу/; многоступенчатые реакции передач, в которых существенную роль играет канал подвозбуждения ядра в процессе передачи нуклонов, и другие реакции.

В диссертации исследован ряд вопросов, связанных с многоступенчатыми, многоканальными эффектами в теории ядерных реакций. При этом изучалось влияние связи каналов на механизм реакции, характер взаимодействия сталкивающихся частиц, поведение соответствующих дифференциальных сечений, вероятностей возбуждения, корреляционных функций, анализировалась роль характерных параметров структуры ядра в таких процессах и т.д. В рамках специально разработанной модели проанализирована роль трехчастичного аспекта задачи в реакциях двухчастичного развала частиц в поле ядра.

Первая глава диссертации - вводная, в ней проводится краткий анализ уже имеющегося материала по данному вопросу, детально формулируются дальнейшие задачи, дано резюме полученных в диссертации результатов.

Во второй главе разработана теория неупругого рассеяния тяжелых ионов околобарьерных энергий $E \sim U_B = Z_1 Z_2 e^2 / (R_1 + R_2)$ ядрами с возбуждением в них состояний коллективной природы. Особенность этих реакций состоит в том, что они дают возможность детального изучения взаимодействия сложных ядер в области соприкосновения их поверхностей. Действительно, с приближением энергии тяжелого иона к энергии кулоновского барьера U_B наряду с механизмом чисто кулоновского возбуждения низколежащих состояний ядра мишени /1/ начинает действовать и другой, ядерный механизм возбуждения /2/. Это приводит к тому, что в энергетической зависимости сечения возбуждения при $E \sim U_B$ и в угловом распределении в области предельного кулоновского угла $\theta \sim \theta_c = 2 \arcsin(U / (2E - U))$ возникают интересные интерференционные явления, характер и величина которых весьма чувствительны к потенциалу ядерного взаимодействия и структуре возбуждаемых уровней. Рассмотрение ведется в рамках метода сильной связи каналов /3/.

Проанализирована зависимость вероятности возбуждения от параметров потенциала и структурных параметров ядра; исследована применимость теории возмущений для нахождения вероятности возбуждения в зависимости от энергии уровня и вероятности электромагнитного перехода.

Проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными по околобарьерному возбуждению низколежащих однофоновых 2^+ состояний в реакциях: $^3\text{He} + ^{58}\text{Ni}$; $^6\text{Li} + ^{58}\text{Ni}$; $^6\text{Li} + ^{120}\text{Sn}$; $^{16}\text{O} + ^{58}\text{Ni}$.

Результаты расчетов на основе решения системы связанных уравнений демонстрируют сильную зависимость поведения вероятности возбуждения от изменения параметров ядерного потенциала. Положение интерференционного минимума определяется в основном значениями

параметра радиуса $R_v = r_{0v} (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$, диффузности b_v и глубины V_0 действительной части ядерного потенциала. Первые две зависимости проиллюстрированы на рис. 1. Параметры потенциалов даны в таблице.

Таблица

Рисунок	Тип реакции	МэВ	ФМ	ФМ	МэВ	ФМ	ФМ	МэВ
1а	$^{16}\text{O} + ^{58}\text{Ni}$	22,65	0,533	1,37	2,35	1,37	0,375	44
1б	" "	" "	1,35	" "	" "	" "	" "	" "
2а	" "	" "	0,65	" "	" "	" "	" "	" "
2б	$^6\text{Li} + ^{58}\text{Ni}$	6,0	1,8	1,37	4,0	1,37	1,4	22,8

Примечание: Ядерный потенциал выбирался в виде:

$$U(r) = -V_0 f_v(r) - iW_0 f_w(r),$$

где

$$f_v = \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_x}{b_x}\right) \right]^{-1},$$

$$R_x = r_{0x} (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$$

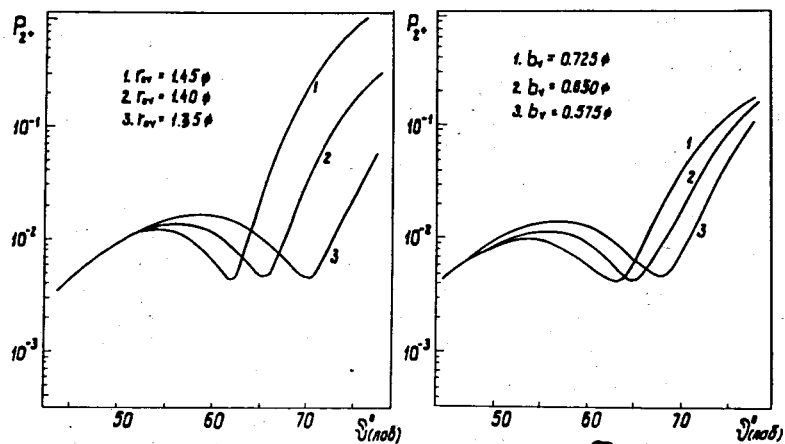


Рис. 1. Зависимость поведения вероятности возбуждения от вариации параметров радиуса r_{0v} /а/ и диффузности b_v /б/ реальной части взаимодействия.

Включение мнимой части потенциала взаимодействия влияет на глубину интерференционного минимума и на поведение вероятности возбуждения при $E \sim U_B$ или $\theta \sim \theta_c$. Общий ход кривых показывает, что расширение области действия ядерных сил за счет увеличения r_{0v} , b_v , V_0 приводит к включению ядерного взаимодействия на больших расстояниях от ядра, а значит, отклонения от плавного хода кривых чисто кулоновского возбуждения начинаются при меньших углах рассеяния.

Исследование применимости метода теории возмущений для описания реакций околобарьерного возбуждения ядер показало, что метод перестает работать /ошибка превышает 20%/ для ядер, в которых приведенная вероятность электромагнитного перехода из основного в возбужденное однофононное состояние есть: $B(E2) \geq 0,2e^2 b_n^2$. Таким образом, для расчета интерференционного эффекта на деформированных ядрах теория возмущений неприменима, так как ее ошибки могут превышать порядок величины. Обнаружена сильная зависимость сечений неупругого рассеяния от энергии возбуждения уровня.

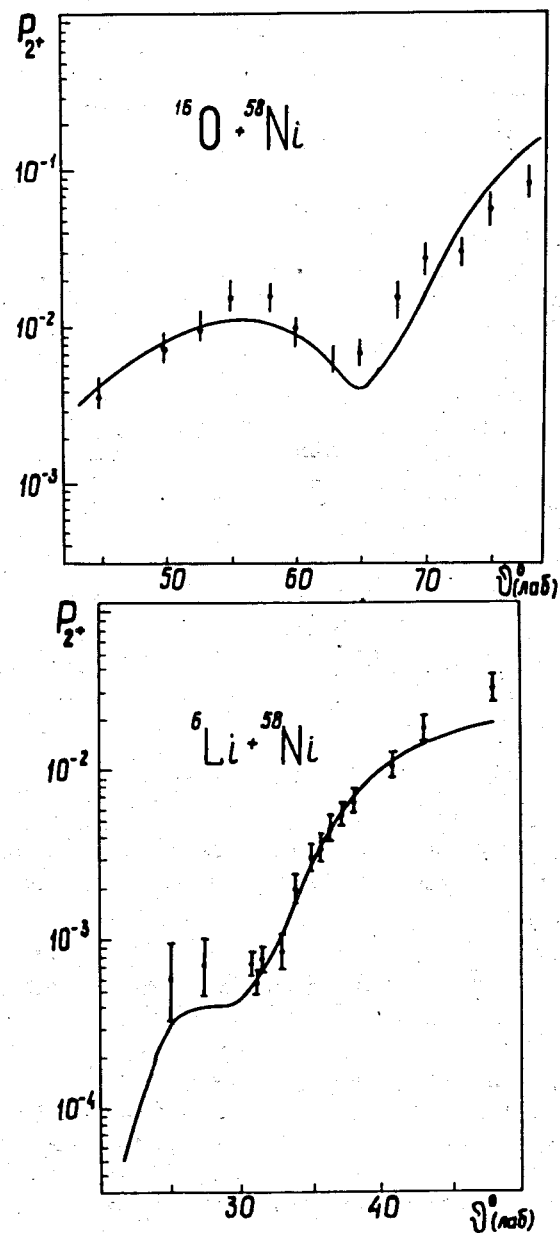


Рис. 2. Сравнение теоретических расчетов P_{2+} с экспериментом.

На рис. 2 приведен пример сравнения теоретических расчетов вероятности возбуждения с соответствующими экспериментальными данными ^{4,5/}. Видно, что разработанная квазиклассическая теория сильной связи каналов в основном правильно описывает эксперименты по интерференционному эффекту.

Анализ полученных параметров ядерного потенциала показал, что их общей особенностью является малая глубина по сравнению с обычно используемыми в задачах рассеяния легких частиц на ядрах. Возможно, эти параметры характеризуют потенциал U_{int} , приводящий к переходам, и только "хвост" среднего, отклоняющего ядерного потенциала U . В реакциях с ионами ${}^6\text{Li}$ параметр диффузности оказывается примерно в два-три раза больше, чем в реакциях с ${}^{16}\text{O}$. Этот факт коррелирует с известными данными о "рыхлой" структуре ядра ${}^6\text{Li}$ и о сильном влиянии канала развала.

Третья глава посвящена рассмотрению реакций расщепления налетающих частиц в поле ядра. Эти реакции несут в себе информацию как об особенностях механизма трехчастичных реакций, так и о влиянии канала развала на другие каналы.

Трудности теоретического рассмотрения реакций развала известны. Они связаны с тем, что прямые методы решения соответствующих уравнений, например, уравнений Фаддеева ^{6/}, разработаны пока для простейших систем из трех нуклонов и уже малоэффективны в задачах с участием сложных ядер при достаточно больших энергиях столкновения.

В первом параграфе третьей главы исследуются реакции расщепления частиц околобарьерных энергий ($E \sim U_B$) в рамках квазиклассического варианта метода сильной связи каналов.

В качестве примера рассмотрена реакция развала ядра лития на дейтрон и альфа-частицу в поле тяжелого ядра мишени на основе следующего механизма ^{7/}. Предполагается, что вначале идет возбуждение низколежащего ${}^3\text{D}_3$ состояния лития в непрерывном спектре с энергией 2,184 МэВ, а затем это состояние быстро распадается. Остальные состояния в процессе не участвуют, либо по-

тому, что их структура сильно отличается от структуры основного состояния, в результате чего и соответствующие матричные элементы перехода в возбужденное состояние, а также ширины их распада в $(a+d)$ -канал оказываются слабыми, либо потому, что они лежат гораздо выше по энергии. На этой основе проведены методические расчеты дифференциальных сечений расщепления, исследована зависимость сечений от структурных параметров ядра лития и роль кулоновского и ядерного взаимодействий в механизме реакции. Дано сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Основные результаты сводятся к следующему:

а. Сечение развала сильно зависит от выбора среднеквадратичного радиуса лития R и растет при его увеличении. Этот рост почти не зависит от энергии налетающих частиц и оказывается пропорциональным R^4 .

б. Включение ядерного взаимодействия приводит к резкому, примерно на порядок величины, росту сечения развала в околобарьерной области энергий, и при $E > U_B$ ядерное взаимодействие становится преобладающим.

в. Теоретические кривые полных сечений развала в основном правильно описывают имеющиеся экспериментальные данные по реакциям ${}^6\text{Li} + {}^{58}\text{Ni}$; ${}^{120}\text{Sn}$, ${}^{197}\text{Au}$, ${}^{208}\text{Pb}$.

Во втором параграфе разработана модель для рассмотрения реакций развала частиц с энергией, значительно превышающей кулоновский барьер. При формулировке модели используется возможность разложения трехчастичной амплитуды в ряд парциальных волн по гиперсферическим гармоникам и дифракционные методы построения соответствующих парциальных амплитуд ^{8/}. В результате получены сечения расщепления в явном аналитическом виде ^{9/}. Возможности такой модели продемонстрированы на примере квазиупругого развала дейтрона в поле тяжелых ядер. Рассчитаны типичные угловые и энергетические распределения нуклонов развала. Найденные зависимости свойственны расчетам в рамках других моделей дифракционного развала, использующих двухчастичные методы рассмотрения ^{10/}. Здесь, однако, следует еще раз подчеркнуть, что методы непосредственной параметриза-

ции трехчастичной матрицы рассеяния могут оказаться полезными как в плане практических приложений, так и в исследовании возможностей обобщения уже известных методов на случай более сложных реакций с участием трех частиц в конечном состоянии. Далее, разработанные в этом параграфе методы непосредственной параметризации амплитуд парциального разложения в ряд гиперсферических гармоник с помощью задания небольшого числа полюсов в области комплексных значений соответствующих квантовых чисел, могут оказаться полезными для описания других реакций такого же типа.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию многоступенчатых эффектов в ядерных реакциях однонуклонных передач. Ранее теоретический анализ таких реакций с учетом виртуального подвозбуждения низколежащих коллективных состояний проводился в рамках метода искаженных волн в основном для средних и тяжелых ядер. Было показано, что роль этих эффектов велика в случае деформированных ядер, где легко возбуждается много коллективных уровней и передача нуклона, таким образом, является многоступенчатой^{/11/}. В случае сферических ядер, в которых уровни возбуждаются сравнительно слабо, достаточно ограничиться двухступенчатым приближением, учитывая подвозбуждение только одного нижайшего коллективного уровня ядра. Этот факт показывает, что, по-видимому, для легких ядер можно также ограничиться двухступенчатым приближением. В четвертой главе для изучения двухступенчатого срыва/подхвата/ нуклона используются методы дисперсионной теории прямых ядерных реакций. Предполагается, что основной вклад в канал двухступенчатой передачи нуклона дает треугольная диаграмма, одна из вершин которой описывает виртуальное возбуждение ядра во входном или выходном каналах. На этой основе, используя периферийную модель прямых реакций^{/12/}, удалось получить явное аналитическое выражение для амплитуды двухступенчатой передачи^{/13/}. В качестве примера применения предложенного метода выполнены расчет и сравнение с экспериментом для реакции $^{12}\text{C}(d\ ^3\text{He})\ ^{11}\text{B}$ с передачей нуклона в основное $3/2^{(-)}$ и возбужденное $7/2^{(-)}$ состоя-

ния ядра ^{11}B . При соответствующем выборе параметров приведенных вершинных функций и параметра обрезания L_0 можно удовлетворительно описать экспериментальные данные при двух энергиях налетающих частиц. Выяснено, что только один одноступенчатый механизм подхвата не в состоянии объяснить совокупности экспериментальных данных по этой реакции без изменения значений приведенных вершинных функций с изменением энергии дейтронов.

Итак, основным результатом четвертой главы является разработка в рамках дисперсионной теории прямых ядерных реакций сравнительно простого метода расчета двухступенчатых реакций передач, удобного для анализа экспериментальных данных.

Пятая глава диссертации посвящена рассмотрению угловых корреляций в прямых ядерных реакциях типа $A + a \rightarrow B^* + b \rightarrow C + c + b$. Корреляционные опыты интересны тем, что они позволяют извлечь ценную, иногда уникальную информацию о структуре высоковозбужденных состояний промежуточного ядра B^* и, кроме того, понять механизм самой реакции.

В первом параграфе пятой главы получена общая формула для угловой корреляции в прямых ядерных реакциях на основе метода искаженных волн. Вначале анализируется частный случай плосковолнового приближения, затем изучено влияние эффектов искажения падающих и вылетающих частиц в поле соответствующих оптических потенциалов ядра мишени и конечного ядра^{/14/}. Их учет проведен в рамках высокоэнергетического приближения, справедливого при $E \gg U_B$. Оказалось, что учет искажения не меняет качественного хода корреляционной кривой, а приводит в основном к сдвигу ее на некоторый угол $\Delta\theta$ относительно корреляционной кривой плосковолнового приближения. На основе явных выражений высокоэнергетического приближения были сделаны оценки величины и знака углового сдвига $\Delta\theta$ в конкретной реакции $^{12}\text{C} + ^6\text{Li} \rightarrow ^{16}\text{O}^* + d \rightarrow ^{12}\text{C} + \alpha + d$ ^{/15/}. Найдено, что для данной реакции угловой сдвиг сильно зависит от величины радиуса канала срыва альфа-частицы R_0 и поэтому изучение $\Delta\theta$ может в принципе позволить сделать качест-

венные заключения относительно величины этих радиусов.

Далее, в §2 дана теория угловых корреляций и угловых распределений гамма-квантов в реакциях околбарьерного возбуждения ядер тяжелыми ионами в рамках квазиклассического приближения со связью каналов. Полученные выражения позволили сделать численные расчеты этих величин. Так, выяснилось, что поведение корреляционных функций в области $E - U_B (\theta - \theta_c)$ резко отличается от хода кривых, рассчитанных с учетом только кулоновского механизма возбуждения. Наблюдение таких зависимостей в экспериментах может дать ценную и весьма точную информацию о потенциале ядерного взаимодействия. Наоборот, при исследовании угловых распределений гамма-квантов оказалось, что их форма слабо меняется при включении ядерных сил. Так, в реакции околбарьерного возбуждения ядра ^{56}Fe ионами ^{16}O это изменение составляет всего 2%, что, по-видимому, трудно выявить из соответствующих экспериментов.

Итак, эффекты сильной связи каналов играют существенную роль в механизме многих ядерных реакций. Их учет, безусловно, необходим не только в исследовании самого механизма реакций, но также и в задачах получения из этих реакций информации о структуре атомных ядер.

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, были доложены на XXIII ежегодном совещании по ядерной спектроскопии, Международном семинаре по методам сильной связи каналов /Дубна, 1973 г./ и опубликованы в работах /3,7,9,13,14/.

Литература

1. К.А. Тер-Мартirosян. ЖЭТФ, 22, 284 /1952/.
К.Альдер, О.Бор, Т.Хус, Б.Моттelson, О.Винтер.
Деформация атомных ядер. ИЛ, Москва, 1958.
2. Е.А. Романовский. ЖЭТФ, 37, 83 /1959/.
В.К. Лукьянов. Изв. АН СССР, сер. физ., 28, 1212 /1964/.
3. В.К. Лукьянов, А.И. Тимов. ЯФ, 18, 306 /1973/.
Препринт ОИЯИ, Е9-6984, Дубна, 1973.

4. V.I. Chuev, Yu.A. Gluchov, V.I. Manko, B.G. Novatsky, A.A. Ogloblin, S.B. Sakuta, D.N. Stepanov. Phys. Lett., 42, B, 293, 1972.
5. F. Videbaek, I. Chernov, P.R. Christensen, E.E. Gross. Phys. Rev. Lett., 28, 1072.
6. Л.Д. Фаддеев. ЖЭТФ, 39, 1459 /1960/.
7. А.И. Тимов. Препринт ОИЯИ, Р4-7131, Дубна, 1973.
8. Е.В. Инопин. ЖЭТФ, 48, 1621 /1965/.
9. Б.Н. Захарьев, В.К. Лукьянов, А.И. Тимов. Изв. АН СССР, сер. физ., 37, 1920, 1973.
Препринт ОИЯИ, Р4-6278, Дубна, 1972.
10. Ю.А. Бережной, Е.В. Инопин, ЯФ, 6, 1197 /1967/.
Ю.А. Бережной, М.В. Евланов. Изв. АН СССР, сер. физ., 33, 167 /1969/. ЯФ, 8, 1151 /1968/.
11. Х. Вибике, В.К. Лукьянов, Г. Шульц. ЭЧАЯ, 3, вып. 4, 993 /1972/.
12. И. Борбей, Э.И. Долинский, В.В. Туровцев. ЯФ, 8, 492 /1968/.
13. В.К. Лукьянов, А.И. Тимов. Программа и тезисы XXIII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра: Тбилиси, 1973.
14. А.И. Тимов. Acta Phys. Polon., B4, 187, 1973.
Препринт ОИЯИ, Р4-6591, Дубна, 1972.
15. К.П. Артемов, В.З. Гольдберг, И.П. Петров, В.П. Рудаков, И.Н. Сериков, В.А. Тимофеев. ЯФ, 14, 292 /1971/;

Рукопись поступила в издательский отдел
10 декабря 1973 года.