

41058

K-983

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

4-92-332

КУРМАНОВ
Рамиль Султангареевич

УДК 539.171.017/018+539.172

РЕАКЦИИ ПЕРЕЗАРЯДКИ
ПРИ СРЕДНИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ
С НУКЛОНАМИ И ЛЕГКИМИ ИОНАМИ

Специальность: 01.04.16 - физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1992

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник Ф. А. Гареев
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник С. Н. Ершов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Р. В. Джолос
доктор физико-математических наук
профессор И. В. Копытин

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

Защита диссертации состоится " " 1992
г. в час. на заседании специализированного
Совета К.047.01.01 при Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна,
Московской области.

Автореферат разослан " " 1992 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Учёный секретарь специализированного Совета
кандидат физико-математических наук А. Е. Дорохов

Актуальность работы: Исследования нуклон-ядерных столкновений в области энергий $E_N > 100$ МэВ в прямых ядерных реакциях постоянно привлекают внимание исследователей. Относительная простота механизма протекания этих реакций при малых переданных импульсах позволяет проверить приближения, лежащие в основе изучения динамики ядерных процессов, исследовать различные компоненты эффективного NN-взаимодействия и модели, описывающие структуру ядра.

Наиболее доступны для теоретического анализа процессы взаимодействия нуклонов с легкими ядрами. За последнее время появилось большое количество экспериментальных данных по рассеянию нуклонов на ${}^6\text{Li}$ при промежуточных энергиях $E_N \geq 100$ МэВ. Были измерены дифференциальные сечения и спиновые наблюдаемые до переданных импульсов $q \leq 2$ фм $^{-1}$ в упругих, неупругих переходах и реакциях перезарядки. Для систем из шести нуклонов были развиты трехчастичные $\alpha+2N$ модели, описывающие единым образом широкий спектр электромагнитных и β -распадных процессов. Это дает возможность развить микроскопические модели квазиупругих процессов и проверить физические предположения, лежащие в основе теоретического анализа исследуемых механизмов реакции.

Исследования зарядово-обменных возбуждений в реакциях с нуклонами на средних и тяжелых ядрах оказались очень плодотворными. В реакциях перезарядки были обнаружены новые типы резонансов (в том числе гамов-теллеровский $\Delta L=0$, $\Delta S=1$). Было открыто подавление силы гамов-теллеровских переходов в низко-энергетических спектрах ядер по сравнению с модельно-независимым правилом сумм, которое привело к широкой дискуссии о роли ненуклонных степеней свободы в ядрах. Недавно были получены новые данные по измерению спектров возбуждений в (p,n) и (n,p) реакциях на ${}^{54}\text{Fe}$ при энергии налетающих нуклонов $E_N \approx 300$ МэВ. На основе развитой и проверенной на легких ядрах модели квазиупругих реакций был

проведен анализ спектров зарядово-обменных возбуждений в ^{54}Fe с использованием переходных плотностей, полученных в теории конечных ферми систем.

Для ядро-ядерных взаимодействий на первый план выходят вопросы, связанные с механизмом реакции. Причинами этого является возрастание роли многоступенчатых процессов и наличие сильного поглощения. Экранировка внутренней области ядро-ядерного взаимодействия в упругом рассеянии и квазиупругих реакциях из-за сильного поглощения приводит к тому, что дифференциальные сечения чувствительны к поведению оптических потенциалов и формфакторов реакции на периферии ядра в области радиуса сильного поглощения. При исследовании упругого рассеяния тем не менее была обнаружена так называемая ядерная радуга, наблюдающаяся в рассеянии легких ионов при энергиях порядка 15-20 МэВ/нуклон. Упругие сечения оказываются чувствительными к поведению оптических потенциалов на малых расстояниях (меньших радиуса сильного поглощения). Можно полагать, что аналогичные явления существуют в ядерных реакциях, а угловое распределение будет чувствительно к поведению формфакторов внутри ядра. В институте имени И.В.Курчатова радужно-подобные эффекты были обнаружены в реакциях перезарядки ($^3\text{He}, t$) на изотопах углерода при энергии 72 МэВ. Изучение реакций в условиях наблюдения радуги является новым перспективным методом исследования радиальной зависимости формфакторов прямых реакций на малых расстояниях.

Основные цели работы: развитие самосогласованной микроскопической модели квазиупругого рассеяния нуклонов на ядре ^6Li при промежуточных энергиях. Анализ на её основе спектров зарядово-обменных реакций (p,n) и (n,p) на ^{54}Fe при энергиях налетающих нуклонов $E_N \approx 300$ МэВ с использованием переходных плотностей, полученных в теории конечных ферми систем (ТКФС). Исследование в рамках предложенного микроскопического варианта метода искаженных волн (МИВ) радужных эффектов в реакциях перезарядки ($^3\text{He}, t$). Изучение поведения формфакторов реакций на расстояниях малых по сравнению с радиусом сильного поглощения.

Научная новизна и практическая ценность: В диссертации развита самосогласованная микроскопическая модель квазиупругого рассеяния нуклонов в приближении метода искаженных волн при средних и промежуточных энергиях. На её основе в импульсном приближении без введения свободных параметров были описаны неупругие переходы и реакции перезарядки на ядре ^6Li при $E_N > 100$ МэВ и малых переданных импульсах $q \leq 1$ фм $^{-1}$ с точностью ~20%.

С использованием феноменологического оптического потенциала и переходных плотностей, рассчитанных в ТКФС, в импульсном приближении МИВ, впервые были проанализированы спектры, измеренные в реакциях перезарядки (p,n) и (n,p) на ^{54}Fe при энергии налетающих нуклонов $E_N \approx 300$ МэВ. Получено описание спектров в области низких энергий возбуждения при введении эффективного локального заряда квазичастиц $e_q(\sigma) = 0.8$. Величина $e_q(\sigma)$ согласуется с оценками, полученными из других данных.

Впервые изучены радужно-подобные эффекты в реакциях перезарядки ($^3\text{He}, t$) на изотопах углерода. Проведен анализ поведения формфакторов реакций и оптических потенциалов в условиях радужного рассеяния. Показана большая чувствительность дифференциального сечения реакций ($^3\text{He}, t$) при энергии $E_{He} = 72$ МэВ к поведению формфакторов на расстояниях меньших радиуса сильного поглощения.

Апробация работы: Основные результаты, полученные в диссертации, доложены на научных семинарах ЛТФ ОИЯИ, на 39-ом совещании по электромагнитным переходам в атомных ядрах (г.Ташкент, 1989), на международной конференции по избранным вопросам структуры ядра (г.Дубна, 1989), на 3-м международном весеннем семинаре по ядерной физике (Ischia, 1990).

Публикации: По теме диссертации опубликовано 6 работ.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст диссертации изложен на 128 страницах, содержит 59 рисунков. Список литературы содержит 50 наименований.

Во введении обсуждается актуальность вопросов, рассмотренных в диссертации и кратко излагается содержание работы.

В главе 1 приводятся основные формулы и приближения, используемые для описания нуклон-ядерных и ядро-ядерных столкновений в приближении метода искаженных волн, вводятся понятия формфактора реакции, переходных плотностей. При промежуточных энергиях налетающих частиц в квазиупругих реакциях при небольших переданных импульсах доминирует одноступенчатый механизм реакции. В этом случае амплитуда реакции определяется искаженными волнами, описываемыми относительное движение фрагментов во входном и выходном каналах, переходными плотностями и эффективными взаимодействиями, вызывающими данный переход. Искаженные волны вычисляются в оптическом потенциале, который описывает упругое рассеяние. Обычно оптические потенциалы выбираются феноменологическим образом. Более последовательным является микроскопический расчет и оптических потенциалов и формфакторов реакции на основе единого NN - взаимодействия. Такой подход называется самосогласованным.

В главе 2 развивается самосогласованная модель реакций перезарядки (p, n) , (n, p) и неупругого рассеяния (p, p') на ${}^6\text{Li}$ при $E_N > 100$ МэВ с переходом на изотриплет ${}^6\text{Be}(E_x = 0.0 \text{ МэВ}) - {}^6\text{He}(E_x = 0.0 \text{ МэВ}) - {}^6\text{Li}(E_x = 3.56 \text{ МэВ})$ с $(J^\pi = 0^+, T=1)$. Приводятся основные формулы и физические основания описания структуры ядер с $A=6$ в рамках трехчастичной $\alpha+2N$ модели.

Продемонстрировано, что модель воспроизводит широкую совокупность экспериментальных данных по материальным радиусам, магнитному моменту, описывает неупругий $M1$ формфактор, полученный из электронного рассеяния до переданных импульсов $q \leq 1.8 \text{ фм}^{-1}$. Поэтому используемая модель структуры ядра является хорошим базисом для изучения механизма квазиупругих реакций на ядрах из шести нуклонов.

В п.2.3. обсуждается сравнение рассчитанных дифференциальных сечений по упругому рассеянию протонов с энергиями $E_p = 155, 185, 200$ МэВ на ${}^6\text{Li}$ с экспериментальными. Оптические потенциалы вычисляются в tp - модели с учетом скалярной материальной плотности ρ ${}^6\text{Li}$, а в качестве эффективного NN - взаимодействия используется: 1) параметризация свободной нуклон-нуклонной t - матрицы рассеяния и 2) её модификации, учитывающей влияние ядерной среды. Учет тензорной части в оптическом потенциале не приводил к существенным изменениям в дифференциальных сечениях упругого рассеяния; что позволило с хорошей степенью точности пренебречь ею. При энергиях 155 МэВ и 200 МэВ проводились расчеты с феноменологическими оптическими потенциалами. Таким образом оптические потенциалы содержали только центральную и спин-орбитальную части.

Расчеты со свободным t - матричным взаимодействием воспроизводят экспериментальную форму угловых распределений упругого рассеяния, но превышают по абсолютной величине приблизительно в два раза. Влияние ядерной среды сказывается на всей области переданных импульсов, приводя к улучшению согласия при $q < 1 \text{ фм}^{-1}$ и ухудшая описание при больших импульсах. Микроскопические вычисления качественно воспроизводят экспериментальные данные по азимутальной асимметрии, причем расчеты с учетом поправок среды выглядят предпочтительнее. С увеличением энергии налетающих нуклонов теоретическое описание улучшается.

В п.2.4. исследуются (p, n) , (n, p) и (p, p') процессы. Для реакций перезарядки (p, n) и (n, p) теоретические самосогласованные расчеты воспроизводят не только форму угловых распределений, но и абсолютную величину дифференциальных сечений с точностью $\sim 20\%$. Использование феноменологических оптических потенциалов ухудшает описание. В случае неупругого рассеяния экспериментальная ситуация более неопределена. В отличие от реакций перезарядки, где экспериментальные данные при разных энергиях налетающих

нуклонов ложатся на одну кривую в зависимости от переданного импульса, в неупругом рассеянии при небольших импульсах наблюдается значительный разброс. При $q < 1 \text{ фм}^{-1}$ выводы из теоретических расчетов, сделанные для зарядово-обменных процессов, остаются справедливыми и для неупругого рассеяния. Таким образом в рамках развитого подхода получено количественное описание совокупности экспериментальных данных при малых переданных импульсах без введения свободных параметров.

Глава 3 посвящена микроскопическому анализу инклюзивных спектров и поляризационных характеристик реакции (\vec{p}, \vec{n}) и (\vec{n}, \vec{p}) на ^{54}Fe при энергии $E_p \approx 300$ МэВ. Амплитуда реакции при малых переданных импульсах рассчитывалась в импульсном приближении метода искаженных волн, с использованием t-матричного взаимодействия и переходных плотностей из ТКФС.

В п. 3.2 приводится схема расчетов переходных плотностей в ТКФС.

В п. 3.3 обсуждаются результаты расчетов. Были рассчитаны спектры реакций $^{54}\text{Fe}(p, n)^{54}\text{Co}$ при энергии $E_p = 300$ МэВ и углах рассеяния $\theta_{c.m.} = 0.9, 2.5, 5.0^\circ$ и реакции $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ при энергии $E_n = 298$ МэВ и $\theta_{c.m.} = 1.8, 2.9, 5.4^\circ$. Теоретические расчеты с использованием локального заряда квазичастиц $e_q(\sigma\tau) = 0.8$ воспроизводят форму экспериментальных энергетических спектров на интервалах $E_x = 0 \div 10$ МэВ и $E_x = 0 \div 14$ МэВ для реакций (n, p) и (p, n) , соответственно. При более высоких энергиях возбуждения ядра теоретические спектры лежат ниже экспериментальных. Был проведен мультипольный анализ спектров возбуждений. При $\theta_{c.m.} \approx 0^\circ$ для рассмотренных реакций доминирует вклад гамма-теллеровских переходов. С увеличением угла рассеяния роль мультипольных переходов с $L > 0$ увеличивается.

Дополнительная информация о спектральном распределении силы мультипольных возбуждений может быть извлечена из экспериментов с поляризованными частицами. В области $E_x \approx 0 \div 2$ МэВ для реакции (\vec{p}, \vec{n}) доминирует вклад 0^+ -изобар-аналогового состояния (ИАС).

В области энергий возбуждения $E_x = 2 \div 14$ МэВ усредненное значение $D_{yy} = -0.25 \div 0.30$, что говорит о преимущественном вкладе гамма-теллеровских возбуждений.

Для реакции (\vec{n}, \vec{p}) рассчитанные распределения $D_{yy}(E_x)$ для $\theta_{c.m.} = 1.8; 2.9^\circ$ указывают о преимущественном вкладе возбуждений с переворотом спина во всем исследованном энергетическом интервале.

Прямое сравнение расчетных и экспериментальных инклюзивных спектров реакций (p, n) и (n, p) на немагическом ядре ^{54}Fe при промежуточных начальных энергиях показывает, что при небольших энергиях возбуждения ядра достигается хорошее описание экспериментальных спектров при использовании $e_q(\sigma\tau) = 0.8$, характеризующим подавление силы спин-изоспиновых переходов в ТКФС.

В главе 4 исследуются радужно-подобные эффекты в реакциях перезарядки $(^3\text{He}, t)$ при энергии $E_{\text{He}} = 72$ МэВ на $^{13}\text{C}, ^{14}\text{C}, ^{14}\text{N}$. В п. 4.1. приводится качественная картина радужного рассеяния в оптике и классической механике, дается квазиклассическая трактовка радуги в ядро-ядерном рассеянии. Обычно, внутренняя область экранируется сильным поглощением и поэтому дифференциальные распределения упругого рассеяния и реакций не чувствительны к поведению оптических потенциалов (ОП) и формфакторов реакции (ФР) на расстояниях меньших радиуса сильного поглощения. Наблюдение ядерного радужного рассеяния показывает, что вклад в дифференциальное сечение ДС частиц, приходящих из внутренних областей взаимодействия, значителен. Это дает возможность исследовать поведение ФР и ОП на малых расстояниях и пытаться разрешить проблему неоднозначности при их феноменологическом анализе.

В п. 4.2. обсуждаются проявления радуги в упругом рассеянии ^3He на ядрах $^{14}\text{C}, ^{13}\text{C}$ и ^{14}N при энергии $E_{\text{He}} = 72$ МэВ. Близость угловых распределений для этих ядер указывает на слабую изотопическую зависимость оптических потенциалов, что оправдывает их выбор при расчетах во входном и выходном каналах реакции перезарядки одинаковыми. При этой энергии используются три семейства потенциалов, дающих одинаковое

качество описания эксперимента, но имеющих различные объёмные интегралы J_v реальной и J_v мнимой частей. Включение в анализ данных по спиновым наблюдаемым позволяет провести отбор среди них. В п.4.3. рассматриваются реакции перезарядки, которые дают качественно новую информацию о радужных эффектах. Присутствие в амплитуде реакции формфактор реакции выделяет некоторые области взаимодействия, увеличивая чувствительность к ним дифференциальных сечений. Переходы $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$ (2.31 МэВ и 3.95 МэВ) $^{13}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N}$ (о.с.), $^{13}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N}$ (3.51 МэВ + 3.55 МэВ) являются радужно-подобными, а $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$ (о.с.) $^{14}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{O}$ (о.с.) - дифракционными. Анализ показал, что если формфактор реакции имеет объёмный характер, то наблюдается радужный максимум. Напротив, локализация формфактора реакции в поверхностной области подавляет его и наблюдается обычная дифракционная картина. Для описания реакций ($^3\text{He}, t$) была разработана микроскопическая модель квазиупругого рассеяния. Переходные плотности легкой системы вычислялись с использованием трехчастичных волновых функций, полученных в вариационных расчетах. Волновые функции ядер с $A=14$ для всех состояний описывались как двухдырочные в конфигурационном пространстве, ограниченном $1p$ оболочкой. Эффективные NN взаимодействия включали центральную и тензорную компоненты. Было получено качественное описание экспериментальных данных. Вычисления с использованием более реалистических переходных плотностей легкой системы, полученных методом К-гармоник не привело к улучшению теоретического описания. Количественное описание экспериментальных данных было получено при безмодельном анализе. При этом исходные теоретические формфакторы реакции значительно изменились. Необходимо отметить, что включение в безмодельный анализ экспериментальных данных на больших углах рассеяния может вносить искажения, вызванные существенным вкладом многоступенчатых процессов, не учитываемых в рамках борновского приближения метода искаженных волн. Добавим, что как и в упругом рассеянии, анализ спиновых наблюдаемых в

реакции позволяет значительно уменьшить неопределенности теоретического анализа.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Развита самосогласованная модель для описания квазиупругих реакций (p, n), (n, p) и (p, p') при промежуточных энергиях $E_N \geq 100$ МэВ и малых переданных импульсах на ядрах с $A=6$. Все составные части модели фиксированы из описания другого рода данных: эффективное нуклон-нуклонное взаимодействие - по данным свободного NN рассеяния; волновые функции, описывающие структуру ядра - по описанию β -распада, электронных данных и по геометрическим характеристикам ядер; оптический потенциал вычислялся самосогласованным образом. Без введения свободных параметров получено описание абсолютных сечений зарядово-обменных реакций при малых переданных импульсах $q < 1$ фм $^{-1}$ с точностью $\sim 20\%$, что свидетельствует о реалистичности физических предположений, лежащих в основе модели.

2. В импульсном приближении метода искаженных волн с использованием переходных плотностей теории конечных ферми систем проанализированы спектры зарядово-обменных реакций (p, n) и (n, p) на ядре ^{54}Fe при энергии налетающих нуклонов $E_N \approx 300$ МэВ. Описание экспериментальных данных достигается при величине локального заряда квазичастиц $e(\sigma\tau) = 0.8$, что согласуется с другими оценками и подтверждает его универсальность. Проведен теоретический анализ распределения спиновых наблюдаемых по спектру возбуждения, который дает дополнительную информацию о мультипольных переходах в атомных ядрах.

3. Впервые были исследованы радужно-подобные явления в квазиупругих реакциях ($^3\text{He}, t$) на изотопах углерода при энергии 72 МэВ в рамках одноступенчатой модели реакции. Показано, что наблюдение указанных эффектов обуславливает большую чувствительность к поведению формфакторов реакций на расстояниях меньших радиуса сильного поглощения. Изучение радужно-подобных явлений является новым перспективным методом исследования квазиупругих реакций.

4. Совместный анализ дифференциальных сечений и спиновых наблюдаемых в упругом рассеянии и реакциях перезарядки уменьшает неопределенность в определении феноменологических оптических потенциалов и формфакторов реакций.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ershov S.N., Gareev F.A., Kurmanov R.S., Svinareva E.F., Kazacha G.S., Dem'yanova A.S., Ogloblin A.A., Goncharov S.A., Vaagen J.S., Bang J.M., Do Rainbows observed in light ion Scattering really pin down the optical potential? - Phys. Lett.B, 1989, 227B, #3-4, pp.315-320.
2. Dem'yanova A.S., Ogloblin A.A., Ershov S.N., Gareev F.A., Kurmanov R.S., Svinareva E.F., Goncharov S.A., Adodin V.V., Burtebaev N., Bang J.M., Vaagen J.S., Rainbows in Nuclear Reactions and the Optical Potential - Physica Scripta, 1990, v.T32, pp89-106.
3. Ершов С.Н., Курманов Р.С., Свинаярева Е.Ф., Упругое рассеяние и реакции перезарядки ионов ^3He на изотопах углерода и неоднозначности оптических потенциалов - Международная конференция по избранным вопросам структуры ядра, Дубна, 20-24 июня 1989г., с.87.
4. Danilin B.V., Zhukov M.V., Ershov S.N., Gareev F.A., Kurmanov R.S., Vaagen J.S., Rogde T., Nuclei with $A=6$ Probes for Selective Excitations of Nuclear States in Charge-Exchange Reactions - 3rd International Spring Seminar on Nuclear Physics, Understanding the variety of nuclear excitations, Ischia, May 21-25, 1990, edited by Aldo Covello, World Scientific, 1991, pp.155-156.
5. Борзов И.Н., Гареев Ф.А., Ершов С.Н., Курманов Р.С., Трыков Е.Л., Фаянс С.А., Микроскопический анализ инклюзивных спектров и поляризационных характеристик реакций (p,n) , (n,p) , (\vec{p},\vec{n}) и (\vec{n},\vec{p}) на ^{54}Fe при энергии $E_N=300$ МэВ. - ЯФ., 1992, вып.1, т.55, с.107-122.
6. Danilin B.V., Zhukov M.V., Ershov S.N., Gareev F.A., Kurmanov R.S., Vaagen J.S., Bang J.M., Dynamical

multicluster model for electroweak and charge-exchange reactions. - Phys. Rev. C., v.43, #6., pp.2835-2843.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июня 1992 года