

К 68

4-89-563

КОРОВИН
Павел Павлович

УДК 539.172.12+
539.172.15+
539.172.6

МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
КВАЗИУПРУГИХ СТОЛКНОВЕНИЙ НУКЛОНОВ
И ИОНОВ С ЯДРАМИ
ПРИ НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник ф. А. Гарев
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник С. Н. Ершов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник В. А. Ходоль
кандидат физико-математических наук
доцент В. И. Заграбаев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерных исследований АН СССР, Москва.

Автореферат разослан " _____ " 1989 года.

Защита диссертации состоится "1" ноября 1989 года на заседании специализированного совета К 47.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Учёный секретарь совета
кандидат физико-математических наук


А. Е. Дорохов

Актуальность работы. В последние годы повышенное внимание уделяется исследованию ядерных столкновений в области промежуточных энергий, характеризующихся доминированием прямых одноступенчатых механизмов. Относительная простота механизмов протекания таких процессов, особенно квазиупругих, позволяет развивать и эффективно применять различные микроскопические подходы.

Также, появилось большое количество достаточно надёжных экспериментальных данных, включая измерения углового распределения сечений и спиновых наблюдаемых в широком диапазоне энергий, массовых чисел и переданных импульсов, требующих теоретического описания. Примером таких данных может служить резкое расхождение при больших переданных импульсах ($q \approx 1.0 + 1.5 \text{ фм}^{-1}$) расчётного и экспериментального сечений в реакции перезарядки $^{16}\text{O}(p, n)^{16}\text{F}$ с переходом в нижайшие состояния и в переходах $^{16}\text{O}(p, p')^{16}\text{O}^*$ в изобар-аналоговые состояния.

Другим интересным фактом является экспериментальное обнаружение квазиупругих процессов при столкновении лёгких ионов, угловое распределение дифференциальных сечений которых аналогично соответствующим сечениям упругого рассеяния при наблюдении ядерной радуги. Экспериментальное указание на наличие такого эффекта в реакциях перезарядки $^{14}\text{C}(^6\text{Li}, ^6\text{He})^{14}\text{N}$ были получены в ИАЭ им. И. В. Курчатова в 1985 году. Упомянутый эффект обусловлен притягивающей компонентой оптического потенциала. Наличие таких эффектов позволяет зондировать оптические потенциалы и радиальные формфакторы в области сильного поглощения взаимодействующих ядер.

Цель работы – развитие микроскопической модели процесса квазиупругого рассеяния нуклонов и ионов на ядрах, учёт принципа Паули для полной взаимодействующей системы с использованием многочастично-многодырочных волновых функций взаимодействующих ядер и включение в рассмотрение центральных, спин-орбитальных и тензорных эффективных сил.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней:

- разработан формализм построения нелокальной амплитуды реакции в терминах переходных плотностей с использованием центральных, спин-орбитальных и тензорных компонент эффективных сил, позволяющий точно учитывать обменное выбивание;

- развитый подход применён к описанию квазиупругих реакций с нуклонами $^{16}\text{O}(p, p')^{16}\text{O}^*$, $^{16}\text{O}(p, n)^{16}\text{F}$ и лёгкими ионами (^6Li , ^6He) и (^3He , t) на изотопах углерода;

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

- на случай квазиупругих реакций обобщен метод прямого разложения амплитуды рассеяния на ближнюю и дальнюю компоненты;

- теоретически подтверждено наличие радужноподобных эффектов в реакциях перезарядки (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) и (${}^3\text{He}, t$).

Практическая значимость работы. Разработанные в диссертации методы теоретического описания могут быть применены как при обработке результатов уже проведённых, так и при планировании новых ядернофизических экспериментов в широком диапазоне энергий, а также для анализа различных ядерных моделей, эффективных нуклон-нуклонных сил и потенциалов относительного движения ядер. Результаты работы представляют интерес для ЛТФ, ЛВЭ и ЛЯР ОИЯИ, ИАЭ им. И. В. Курчатова, ФЭИ(г. Обнинск), ИЯИ (г. Москва), ЛИЯФ (г. Ленинград).

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, доложены на научных семинарах ЛТФ ОИЯИ, а также на 35 (Ленинград, 1985) и 36 (Харьков, 1986) Совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра и Международном симпозиуме по рассеянию нуклонов и антинуклонов промежуточных энергий (Бад Хоннеф, ФРГ, 1985).

Публикации. По теме диссертации опубликовано семь статей, три препринта и тезисы трёх докладов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Текст диссертации изложен на 128 страницах, содержит 27 рисунков, 8 таблиц. Список литературы включает 136 наименований.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

- формализм построения нелокальной амплитуды квазиупругой реакции, отвечающей точному учёту принципа Паули для каждой пары взаимодействующих нуклонов;
- метод разложения амплитуды квазиупругой реакции на дальнюю и ближнюю компоненты;
- расчётные программы для обменной амплитуды квазиупругого рассеяния нуклонов;
- описание в рамках развитой модели квазиупругих реакций ${}^{16}\text{O}(p, n){}^{16}\text{F}$ и ${}^{16}\text{O}(p, p'){}^{16}\text{O}^*$ при энергиях $35 \leq E_p \leq 135$ МэВ с возбуждением нижайших состояний отрицательной чётности;
- теоретическое подтверждение наличия радужноподобных эффектов в реакциях перезарядки (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) и (${}^3\text{He}, t$) на изотопах углерода в области энергий $15 \leq E_p \leq 35$ МэВ/нуклон;
- анализ чувствительности сечения реакций (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) и (${}^3\text{He}, t$) на изотопах углерода к различным аспектам разработанной модели.

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

В главе I приводится математический аппарат и приближения, характерные для предлагаемого формализма. В первом разделе даётся краткое описание теории и обсуждается нелокальность, возникающая вследствие учёта принципа Паули в полной системе сталкивающихся ядер. Также описаны основные приближения теории и вводится терминология.

В настоящее время существуют достаточно разработанные микроскопические теории квазиупругих процессов, построенные в рамках метода искажённых волн (МИВ). Однако все они характеризуются рядом проблем. Наиболее сложной и нерешённой в настоящее время является задача удовлетворительного согласования потенциала относительного движения сталкивающихся ядер и потенциала, вызывающего переход в рассматриваемый канал. Формально такое согласование выглядит крайне просто: полный гамильтониан системы разделяется на три части, описывающие внутреннюю структуру взаимодействующих ядер, их относительное движение в упругом канале и эффективные силы, вызывающие переход из входного в выходной каналы. Однако известные неоднозначности в воспроизведении потенциала упругого рассеяния вместе с необходимостью извлекать информацию о структуре ядер и эффективных силах из качественно различных процессов и сложностью работы с гамильтонианом системы многих частиц, создают указанную проблему. Одним из следствий указанной неопределённости является необходимость введения перенормировки теоретически полученных абсолютных величин сечений.

Учёт принципа Паули для полной системы сталкивающихся ядер приводит к необходимости расчёта нелокальных матричных элементов даже при использовании локальных потенциалов в прямом канале. Это обстоятельство приводит к резкому увеличению обрабатываемой информации и, следовательно, времени счёта и объёма памяти ЭВМ. Существующие в настоящее время теории позволяют проводить точную антисимметризацию каждой пары взаимодействующих нуклонов (так называемое обменное выбивание), однако при этом используют одночастичные внутренние волновые функции.

Современные ядерные модели, описывающие тонкие детали структуры оперируют со сложными, например, многочастично-многодырочными, волновыми функциями. В связи с этим, в настоящее время получает развитие формализм переходных плотностей. Локальной переходной плотностью называется матричный элемент от одночастичного тензорного оператора вида

$$\hat{T}_{\lambda_1}^{LSJ, M}(n) = \{ \{ Y_{\lambda}(\hat{r}_n) \otimes \hat{L}(\hat{r}_n) \} \otimes \hat{\sigma}^S(n) \} \quad (1)$$

Индекс n указывает на выделенный n-й нуклон.

Во втором разделе проводится разложение оператора эффективных сил по операторам (1) и частичное разложение локальной амплитуды реакции. При этом радиальные формфакторы (коэффициенты разложения амплитуды по сферическим гармоникам) выражаются в терминах локальных переходных плотностей:

$$\hat{P}_{\lambda_1}^{LSJ, T}(r_n) = \langle J_b T_b \parallel \frac{\delta(r_n - r'_n)}{r_n^2} \hat{T}_{\lambda_1}^{LSJ, M}(n) \hat{\tau}^T(n) \parallel J_a T_a \rangle.$$

Основным достоинством предлагаемой теории является точный учёт обменного выбивания в рамках формализма переходных плотностей. Третий раздел посвящен обсуждению нелокальной компоненты, соответствующей обменному выбиванию. Показано, что антисимметризатор не изменяет структуры спин-изоспиновой части оператора эффективных сил, приводя лишь к смешиванию глубин потенциалов всех прямых спин-изоспиновых каналов.

Для рассеяния нуклонов проведено частичное разложение обменной компоненты амплитуды, и нелокальные радиальные формфакторы (коэффициенты разложения по бисферическим гармоникам) выражены через нелокальные переходные плотности:

$$\hat{P}_{\beta\alpha; t}^{LSJ, T}(r_\alpha, r_\beta) = \langle J_b T_b \parallel \frac{\delta(r_\beta - r'_\beta) \delta(r_\alpha - r'_\alpha)}{r_\beta^2 r_\alpha^2} Y_{J_t}^{(1 t_1 p) L_t; S}(\hat{r}'_\alpha, \hat{r}'_\beta; t) \hat{\tau}^T(t) \parallel J_a T_a \rangle.$$

В обоих выражениях для переходных плотностей штрихами обозначены координаты внутреннего интегрирования в матричном элементе.

Более подробно рассмотрены формфакторы, описывающие рассеяние нуклонов на ядрах. В качестве примера представлены выражения для переходных плотностей в рамках простой одночастичной оболочечной модели. Продемонстрировано также различие в правилах отбора между прямым и обменным каналами.

В четвёртом параграфе приведена полная расчётная схема для случая рассеяния нуклонов на ядрах. Рассмотрение нуклонов в качестве лёгкой системы заметно упрощает расчётные выражения по сравнению с общим ион-ионным случаем, что связано с представлением нуклона материальной точкой. Приведённая расчётная схема полностью реализована в пакетах программ MDWUCK и FERMF на ЭВМ CDC 6500.

Глава II посвящена применению предложенной модели к описанию реакций (p, p') и (p, n) на ^{16}O при $35 \leq E_p \leq 135$ МэВ, с возбуждением низколежащих состояний отрицательной чётности.

В первом разделе освещено состояние проблемы. Основное внимание уделено $0^+ \rightarrow 0^-$ переходам, что связано с их высокой селективностью: состояния 0^- возбуждаются только продольными внешними полями типа $(\hat{\sigma} \cdot \hat{r})$ и спин-орбитальные компоненты эффективных сил не дают вклада в сечение процесса. Кроме того переходы $0^{\pm} \rightarrow 0^{\mp}$ на ядрах $A=16$ достаточно хорошо изучены в других процессах (μ -захват и β -распад). В этом переходе существенно проявляется индуцированное псевдоскалярное взаимодействие (константа g_p и он может быть использован для получения информации о перенормировке g_p в ядерной среде. Отметим также обсуждение расчётов изовекторных 0^- состояний в ^{16}O в связи с вопросами близости ядер к точке π -конденсатной неустойчивости (см. ссылки в тексте диссертации).

В разделах 2, 3 приведены описание и численные значения параметров эффективных сил и переходных плотностей, использованных при анализе исследуемых реакций.

Раздел 4 посвящён анализу реакций $^{16}\text{O}(p, p')^{16}\text{O}^*$ и $^{16}\text{O}(p, n)^{16}\text{F}$ при $35 \leq E_p \leq 135$ МэВ с возбуждением низколежащих состояний отрицательной чётности. В расчётах использованы волновые функции ^{16}O с учётом $(2p, 2h)$ корреляций в основном состоянии. Показано, что по сравнению с одночастично-однодырочными конфигурациями они систематически уменьшают величину расчётных сечений от 10% до фактора 2, практически не изменяя характер угловых распределений. Также показано, что применение различных эффективных сил и оптических потенциалов сказывается, в основном, лишь на нормировке сечений ($\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{theor}}$). Отмечены важность учёта плотностной зависимости эффективных NN-сил, особенно при расчётах анализируемой способности реакции.

Наглядно продемонстрирована важность вклада обменных компонент в сечение рассматриваемых реакций (см. Рис. 1). В качестве меры вклада каждой компоненты рассматривалось сечение, построенное из амплитуды, в которую включена лишь данная компонента. При квазиупругом рассеянии протонов рассматривались лишь прямая (П) и обменная (О) компоненты амплитуды, в которые включались центральные (Ц) и тензорные (Т) силы. Таким образом, обозначения введённые на Рис. 1: 1- Ц(П+О), 2- Т(П+О), 3- (Ц+Т)(П+О), 4- (Ц+Т)П, 5- (Ц+Т)О, 6- ТП, 7- ТО, 8- ЦП, 9- ТО. Отметим, что представленный случай доминирования тензорной обменной компо-

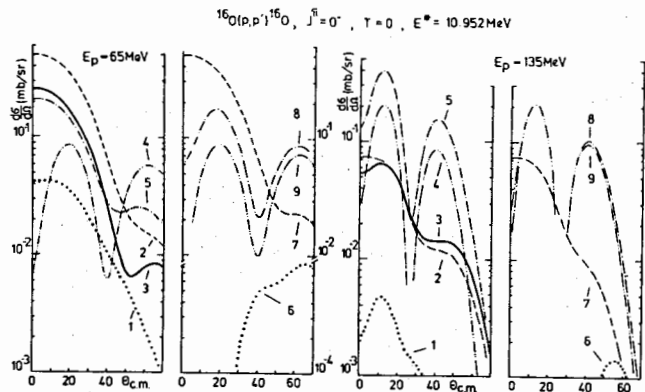


Рис. 1

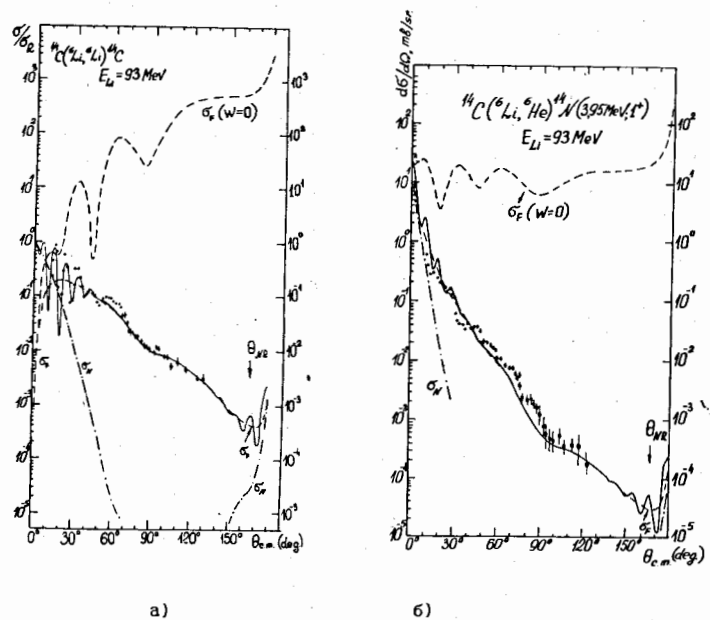


Рис. 2

ненты в реакции $^{16}\text{O}(p,p')^{16}\text{O}$ ($J^{\pi}=0^{-}, T=0$; 10.952 МэВ) при $E_p=65$ МэВ является исключением. Но в остальных рассмотренных случаях также нельзя говорить о малости вклада обменных компонент.

Глава III посвящена описанию реакций перезарядки ($^6\text{Li}, ^6\text{He}$) и ($^3\text{He}, t$) на изотопах углерода. Эти реакции оказались интересными в связи с обнаружением в них так называемых радужноподобных эффектов.

Явление ядерной радуги, хорошо известное из упругого рассеяния лёгких ионов при энергиях налетающей частицы $\sim (10 + 30)$ МэВ/нуклон, обусловлено доминированием волн, преломлённых притягивающей компонентой потенциала на дальнем крае рассеивающего центра. Наличие потенциала, обеспечивающего доминирование волн, преломлённых дальним краем (дальняя компонента), над волнами, отражёнными от ближнего края (ближняя компонента), делает угловые распределения сечений чувствительными к поведению потенциалов и радиальных формфакторов на расстояниях, меньших радиуса сильного поглощения. Анализ показал, что следы ядерной радуги обнаруживаются даже в случае, когда коэффициент пропускания соответствующих парциальных волн $\sim (2+3)10^{-5}$ (т.е. $|S_L| \sim 0.5\%$).

В 1985 году в ИАЭ им. И. В. Курчатова были получены экспериментальные указания на наличие радужноподобных эффектов в реакции $^{14}\text{C}(^6\text{Li}, ^6\text{He})^{14}\text{C}$ при $E_{Li}=93$ МэВ. В связи с этим возникла необходимость теоретической интерпретации данного эффекта и обобщения понятия ядерной радуги на случай квазиупругих процессов.

Основными положениями предлагаемого подхода являются следующие:

- радужноподобные эффекты (эффекты преломления) в квазиупругих процессах обусловлены доминированием дальней компоненты и приводят к специфической картине поведения углового распределения сечений, аналогичной ядерной радуге в упругом рассеянии;

- вследствие указанной аналогии появление данных эффектов следует ожидать в реакциях, в упругом канале которых имеет место ядерная радуга и при условии, что соответствующий формфактор перехода не слишком сильно искажает картину;

- радужноподобные эффекты должны быть чувствительны к деталям ядерной структуры и оптического потенциала в области сильного поглощения.

В соответствии со сказанным выше, третья глава построена следующим образом. В первом разделе рассмотрено понятие ядерной радуги и показана экспериментальная аналогия между угловыми распределениями сечений квазиупругих и соответствующих упругих процессов. Второй раздел посвящён теоретическим методам описания рассматриваемых реакций в рам-

ках предлагаемого подхода. Кроме того введено обобщение разложения амплитуды рассеяния на ближнюю и дальнюю компоненты для случая квазиупругих процессов. В разделе третьем рассмотрены характерные особенности поведения различных параметров описания упругого рассеяния при наличии ядерной радуги. В четвертом разделе показано, что аналогичные особенности имеют и при описании рассматриваемых квазиупругих процессов.

Таким образом, теоретически подтверждено, что экспериментально обнаруженная аналогия в характере поведения угловых распределений сечений реакций перезарядки (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) и (${}^3\text{He}, t$) на изотопах углерода при $E_p = 15+25$ МэВ/нуклон и соответствующих упругих процессов обусловлена наличием в обоих случаях радужноподобных эффектов. Показано доминирование дальней компоненты в реакциях перезарядки (в качестве иллюстрации, см. Рис. 26 в сравнении с соответствующим упругим рассеянием, приведённым на Рис. 2а). В результате анализа обнаружена чувствительность сечения к областям $g \sim 2.5\text{ф.м.}$, что значительно меньше радиуса сильного поглощения (в данном случае $R \approx 6.4\text{ф.м.}$). Также была продемонстрирована чувствительность сечений к выбору формфактора и оптических потенциалов, в том числе, внутри области сильного поглощения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. Развита микроскопическая модель квазиупругих процессов в терминах переходных плотностей с точным учётом принципа Паули для взаимодействующей пары нуклонов (обменное выбивание), с использованием переходных плотностей для описания структуры сталкивающихся ядер и с включением центральных, спин-орбитальных и тензорных компонент в эффективные силы.

2. В рамках предлагаемого подхода впервые получены и программно реализованы нелокальные радиальные формфакторы, соответствующие обменной компоненте амплитуды реакции, для случая, когда лёгкой системой является нуклон.

3. В едином подходе получено удовлетворительное описание реакций ${}^{16}\text{O}(p, p'){}^{16}\text{O}^*$ и ${}^{16}\text{O}(p, n){}^{16}\text{F}$ в области энергий $35 \leq E_p \leq 135$ МэВ и переданных импульсов $q \leq 1.5 \text{ ф.м.}^{-1}$.

4. Продемонстрирована существенность вклада обменного выбивания в реакциях с нуклонами.

5. Проведено тестирование волновых функций ${}^{16}\text{O}$ с учётом ($2p, 2h$) корреляций в основном состоянии. Показано, что их использование не изменяет формы угловой зависимости сечения и анализирующей способности, однако систематически уменьшает абсолютные значения сечений на от 10% до фактора 2, улучшая согласие с экспериментом.

6. Продемонстрирована чувствительность сечения и анализирующей способности реакций (p, p') и (p, n) к выбору эффективных сил и оптических потенциалов. Показано, что различие используемых потенциалов скажется на нормировке сечений.

7. Показано, что учёт плотностной зависимости эффективных нуклон-нуклонных сил улучшает описание реакции, и в первую очередь анализирующей способности.

8. Обобщён на случай квазиупругих реакций метод разложения амплитуды реакции на ближнюю и дальнюю компоненты, соответствующие волнам, пришедшим от ближнего и дальнего края рассеивающего центра. Указанное обобщение позволяет идентифицировать наличие преломляющих эффектов в квазиупругих процессах.

9. Теоретически подтверждено наличие радужноподобных эффектов в реакциях перезарядки (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$), (${}^3\text{He}, t$) на изотопах углерода, экспериментально обнаруженных в ИАЭ им. И.В. Курчатова.

10. Получено удовлетворительное описание дифференциальных сечений реакций перезарядки (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) и (${}^3\text{He}, t$) на изотопах углерода в широком диапазоне углов в области энергий $15 + 25$ МэВ/нуклон. Показано, что учёт тензорных компонент эффективных сил в рассматриваемых процессах сглаживает дифракционные осцилляции, не оказывая заметного влияния на область больших углов.

11. Продемонстрирована чувствительность сечения реакций (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) и (${}^3\text{He}, t$) к радиальным формфакторам и оптическим потенциалам, включая расстояния, малые по сравнению с радиусом сильного поглощения.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Gareev F.A., Gmitro M., Ershov S.N., Korovin P.P., Goncharov S.A. Microscopic DW calculations of $0^+ \rightarrow 0^-$ transitions in ${}^{16}\text{O}(p, p'){}^{16}\text{O}$ and ${}^{16}\text{O}(p, n){}^{16}\text{F}$ reactions at $35 \leq E_p \leq 135$ MeV. - In: Lecture Notes in Physics, v.243, Medium Energy Nucleon and Antinucleon Scattering. Ed. by H.V. von Geramb. - Springer-Verlag, 1985, pp.255-259.
2. Gareev F.A., Gmitro M., Ershov S.N., Korovin P.P. Investigation of the $0^+ \rightarrow 0^-$ transitions in ${}^{16}\text{O}(p, p'){}^{16}\text{O}$ and ${}^{16}\text{O}(p, n){}^{16}\text{F}$ reactions at

- at $35 \leq E_p \leq 135$ MeV. - JINR comm., E4-86-21, Dubna, 1986. - 10 pp.
3. Гареев ф. А., Гмитро М., Гончаров С. А., Ершов С. Н., Коровин П. П. Исследование $0^+ \rightarrow 0^-$ переходов в реакциях $^{16}\text{O}(p, p')^{16}\text{O}$ и $^{16}\text{O}(p, n)^{16}\text{F}$. - Изв. АН СССР, Сер. физ., 1986, т. 50, N5, с. 865-873.
 4. Брагин В. Н., Гареев ф. А., Гончаров С. А., Демьянова А. С., Ершов С. Н., Коровин П. П., Лебедев А. Л., Оглоблин А. А., Изучение эффектов преломления в квазиупругих процессах с тяжёлыми ионами. - Письма в ЖЭТФ, 1986, т. 43, вып. 11, с. 504-507.
 5. Demyanova A. S., Bragin V. N., Ogloblin A. A., Lebedev A. L., Bang J. M., Goncharov S. A., Ershov S. N., Gareev F. A., Korovin P. P. Angular distributions of elastic, inelastic and charge exchange reactions of $^6\text{Li} + ^{14}\text{C}$ at $E_{\text{Li}} = 93$ MeV. - Phys. Lett., 1987, B184, N2, 3, pp. 129-132.
 6. Demyanova A. S., Ogloblin A. A., Lyashko Yu. V., Adodin V. V., Burtebaev N., Ershov S. N., Gareev F. A., Korovin P. P., Bang J. M., Goncharov S. A., Vaagen J. S. Observation of a nuclear rainbow phenomenon in the $(^3\text{He}, t)$ charge-exchange reaction. - Phys. Rev., 1988, C38, N4, pp. 1975-1978.
 7. Demyanova A. S., Ogloblin A. A., Ershov S. N., Gareev F. A., Korovin P. P., Goncharov S. A., Lyashko Yu. V., Adodin V. V., Burtebaev N., Bang J. M. Rainbow effects in charge exchange reactions. - Nucl. Phys., 1988, A482, N1, pp. 383-390c.

Рукопись поступила в издательский отдел

25 июля 1989 года