

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К-18

4-84-108

УДК 539.17.01

КАМАЛОВ

Сабит Сабирьянович

**СОВМЕСТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ
С УЧАСТИЕМ ПИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ
НА ЛЕГКИХ ЯДРАХ**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

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

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

Доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Р. А. ЭРАМЕАН

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

М. ИМИТРО

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Л. Д. БЛОХИНЦЕВ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

А. В. ШЕБЕКО

Ведущее научно исследовательское учреждение:

Физический институт АН СССР им. П. Н. Лебедева, Москва.

Автореферат диссертации разослан " " _____ 1984 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1984 года
на заседании специализированного совета КО47.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В. И. ЖУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Взаимодействие элементарных частиц с ядрами при промежуточных энергиях – одна из важных областей современной физики. Решаемые здесь задачи обычно подразделяют на три класса: 1) изучение природы фундаментальных взаимодействий, 2) анализ механизмов реакций и 3) исследование структуры атомного ядра. Перечисленные задачи, конечно, тесно взаимосвязаны и это требует их одновременного рассмотрения с целью однозначной интерпретации получаемых результатов.

В настоящее время в связи с вводом в строй мезонных фабрик и дальнейшим совершенствованием ускорителей электронов резко возросли возможности исследований ядерных реакций с участием пионов и электронов, что привело к росту как числа, так и качества экспериментальных данных. При такой ситуации задача одновременного описания большой совокупности указанных процессов исходя из единой теоретической схемы становится особенно актуальной.

Актуальность поставленной задачи определяется также теми фундаментальными проблемами, с решением которых она связана. Среди них выделим такие, как изучение проявлений ненуклонных степеней свободы (мезоны, Δ – изобары, кварки) в ядрах, понимание механизмов пион-ядерного взаимодействия при низких энергиях и описание истинного поглощения пионов. Большую ценность представляют также вопросы, связанные с исследованием гигантских мультипольных резонансов в ядрах.

Основная цель работы – проведение совместного анализа процессов неупругого рассеяния электронов (e, e'), рассеяния (π, π') и фоторождения заряженных пионов (γ, π) на ядрах.

Для этого следует:

1. Развить формализм, позволяющий проводить совместный анализ рассматриваемых реакций.
2. Исследовать (e, e') реакцию с целью извлечения первоначальной информации о ядерных переходных плотностях.

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

3. Исследовать упругое рассеяние пионов с целью достижения наиболее корректного описания эффектов многократного перерассеяния пионов в неупругих (π, π') и (γ, π) реакциях на ядрах.

4. С помощью полученных ядерных переходных плотностей и амплитуд упругого рассеяния проанализировать парциальные ядерные переходы в неупругих (π, π') и (γ, π) реакциях.

Исследования в диссертации проводятся на примере ядер мишеней ^{12}C и ^{16}O , для которых имеется наибольшее число экспериментальных данных, что позволяет провести наиболее полный анализ рассматриваемых реакций.

Научная новизна и практическая ценность. Разработан метод описания процесса фоторождения пионов на ядрах в импульсном представлении, удовлетворяющий требованиям релятивистской и калибровочной инвариантности. Показано, что роль этих требований особенно важна в области возбуждения Δ_{33} резонанса.

С помощью уравнения непрерывности для электромагнитного ядерного тока получен новый оператор электрического перехода, используя который, впервые удалось одновременно описать продольный F_L и поперечный F_T формфакторы для изовекторного перехода на уровень $J^\pi = 2^+(E^* = 16, \text{II МэВ})$ в ядре ^{12}C (см. рис. 1). Для этого перехода также впервые устранены расхождения, во-первых, между теорией и экспериментом в процессе радиационного захвата пионов с атомных орбит и, во-вторых, между результатами многочастичной модели оболочек и обобщенной модели Хельма в процессе фоторождения π^+ -мезонов.

Выявлена сильная чувствительность характеристик (π, π') и (γ, π) - реакций к входной информации о структуре ядра. Показано, что совместный анализ (e, e') , (π, π') и (γ, π) - реакций позволяет дискриминировать разные варианты ядерных переходных плотностей, отдавая предпочтение тем, которые построены на микроскопической основе.

При анализе DWIA - подхода в (π, π') и (γ, π) реакциях обнаружен эффект доминирования "on-shell" распространения пионов в ядре. Развивая "on-shell" вариант DWIA. В рамках этого варианта впервые удалось описать экспериментальные данные для (γ, π^+) - реакции в области малых углов вылета пионов и новые данные для $^{16}\text{O}(\gamma, \pi^+)^{16}\text{N}$ (связанные состояния) - реакции (см. рис. 2).

Исследовано влияние выбора элементарных амплитуд на характеристики парциальных переходов в (γ, π^+) реакции на ядрах ^{12}C и ^{16}O . Выявлены различия в соотношении их спиновых и бесспиновых частей. При расчете дифференциальных сечений эти различия не проявляются в процессе фоторождения π -мезонов на нуклоне, но оказываются важными в процессе фоторождения на ядре.

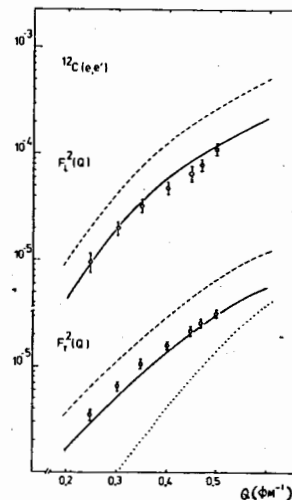


Рис. 1.

Неупругие E2-формфакторы для ^{16}O на уровне 16, II МэВ. Точечные и штриховые линии - результаты, полученные соответственно без и с использованием уравнения непрерывности. Сплошные линии - результаты, полученные в последнем случае путем введения фактора подавления $\beta^2 = 0,45$. Используются волновые функции, взятые из работы:

Cohen. S. and Kurath D. Nucl. Phys., 1965, v. 73, p. 1.

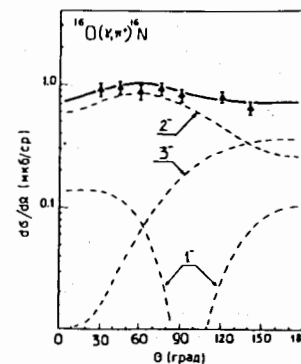


Рис. 2.

Дифференциальные сечения $^{16}\text{O}(\gamma, \pi^+)^{16}\text{N}$ (связанные сост.) реакции при энергии γ -кванта 180 МэВ. Используется "on-shell" вариант DWIA и волновые функции, взятые из работы:

Donnelly T.W., Walecka J.D. Phys. Lett. B, 1972, v.41, p. 275.

Предсказывается концентрация сил переходов в состоянии изовекторного монополярного резонанса в реакции перезарядки (π^-, π^0) на ядре ^{16}O (см. рис. 3). Показана возможность изучения спин-изоспиновой ветви гигантских мультипольных резонансов с помощью (γ, π^+) реакции.

Апробация работ. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах ЛТФ ОИЯИ, ИЯИ, НИИЯФ МГУ, ФИАН, на конференциях по ядерно-физическим исследованиям (Харьков, 1982 и 1983 г.), на сессии Отделения ядерной физики АН СССР (Москва, 1982 г.) на Всесоюзном семинаре по программе экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР (г. Звенигород, 1983 г.), на Международном совещании по перспективам ядерной физики при промежуточных энергиях (Италия, Триест, 1983).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано восемь работ.

Объем работ. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения и трех приложений, содержит 133 страницы машинописного текста, 22 рисунка и 18 таблиц. Библиографический список литературы включает 121 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I посвящена построению амплитуд рассеяния и фоторождения пионов на атомных ядрах.

В § I приводятся общие сведения об амплитудах (π, π') и (γ, π) реакций на свободных нуклонах.

В § 2 излагаются вопросы, связанные с преобразованием амплитуды при переходе из системы центра масс пион-нуклон в систему центра масс пион-ядро. В случае фоторождения пионов особое внимание уделено сохранению релятивистской и калибровочной инвариантности при осуществлении такого перехода.

В § 3 приводятся общие сведения о методе построения амплитуды рассеяния и фоторождения пионов на ядрах в рамках теории многократных столкновений.

В § 4 анализируются приближенные подходы для решения уравнений, которым удовлетворяют амплитуды рассеяния и фоторождения пионов на ядрах (импульсное приближение, приближение когерентности, метод связанных каналов). Рассматривается метод показанных волн при предпо-

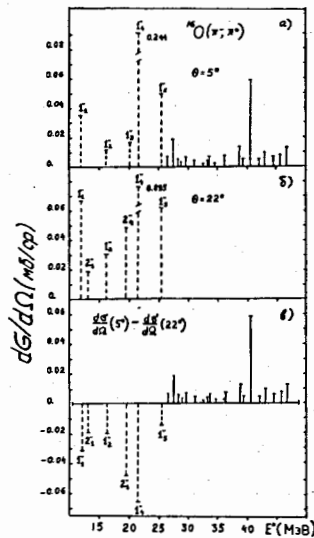


Рис. 3. Спектр возбуждения ядра ^{16}N в реакции $^{16}\text{O}(\pi^-, \pi^0)$ при $T_{\pi^-} = 164$ МэВ и углах вылета π^0 -мезонов $\theta = 5^\circ$ (а) и 22° (б). Сплошными линиями показаны интенсивности переходов в состоянии изовекторного монополярного резонанса. в) - разность дифференциальных сечений при $\theta = 22^\circ$ и 5° . Используются волновые функции работ: Eramzhyan R.A. et al. Nucl. Phys. A, 1977, v.290, p. 294.

ложении о доминирующем вкладе эффектов перерассеяния пионов на энергетической поверхности ("on shell" вариант DWIA).

В главе 2 на примере изовекторных переходов в низколежащие состояния ядер ^{12}C и ^{16}O рассматриваются вопросы, связанные с извлечением информации о разных типах ядерных переходных плотностей из анализа (e, e') реакции, а также процесса радиационного захвата пионов.

В § I приводятся сведения об используемых ядерных переходных плотностях, полученные как в рамках многочастичной модели оболочек со смешиванием конфигураций, так и с помощью феноменологических моделей (симметризованной ферми-плотности и обобщенной модели Хельма).

В § 2 в рамках импульсного приближения анализируются результаты расчетов продольного F_L и поперечного F_T формфакторов для $0^+ \rightarrow 1^+$ ($E^* = 15, 11$ МэВ) и $0^+ \rightarrow 2^+$ ($E^* = 16, 11$ МэВ) изовекторных переходов в ядре ^{12}C .

В § 3 с использованием уравнения непрерывности для ядерного электромагнитного тока получен новый вид оператора электрического перехода, с помощью которого удается одновременно воспроизвести F_L^2 и F_T^2 для $0^+ \rightarrow 2^+$ ($E^* = 16, 11$ МэВ) перехода в ядре ^{12}C . Рассчитаны электромагнитные формфакторы для изовекторных переходов в состоянии $J^\pi = 1^-, 2^-, 3^-, T=1$ ($E^* \approx 12$ МэВ) ядра ^{16}O . Показано, что результаты расчетов в микроскопическом подходе и в обобщенной модели Хельма различаются существенно.

В § 4 информация о ядерных переходных плотностях, извлеченная из анализа (e, e') данных, проверяется на примере исследования процесса радиационного захвата пионов с мезоатомных орбит.

В главе 3 рассматриваются процессы рассеяния и фоторождения заряженных пионов на ядрах ^{12}C и ^{16}O .

В § 1 анализируется упругое рассеяние пионов в области возбуждения Δ_{33} -резонанса. Показано, что эффекты связи каналов малы, а в области малых углов в дифференциальных сечениях доминируют вклады перерассеяния пионов на энергетической поверхности.

В § 2 рассматривается неупругое рассеяние пионов на ядре ^{12}C с переходами в состояния $J^\pi = \Gamma^+, 2^+$ ($E^* = 15, 11, 16, 11$ МэВ). Демонстрируется сильная чувствительность к выбору ядерных переходных плотностей. Результаты, полученные в рамках метода искаженных волн и ее "on-shell" варианта, сравниваются с экспериментальными данными. Исследовано влияние связи каналов на возбуждение 2^+ ($E^* = 16, 11$ МэВ) уровня.

В § 3 рассматривается процесс фоторождения π^+ -мезонов на ядре ^{16}O с переходом в группу связанных состояний дочернего ядра ^{16}N . Исследуются эффекты многократного перерассеяния пиона, ферми - движения нуклонов в ядре и чувствительность к выбору ядерных переходных плотностей. Показана необходимость учета релятивистских поправок при описании процесса фоторождения пионов в области возбуждения Δ_{33} -резонанса.

В § 4 анализируется процесс фоторождения π^- -мезонов для переходов в состояния $J^\pi = \Gamma^+, 2^+$ ($E^* = 15, 11, 16, 11$ МэВ). Исследуется чувствительность к выбору ядерных переходных плотностей и эффекты схода пиона с энергетической поверхности.

Глава 4 посвящена вопросам исследования элементарных амплитуд и гигантских мультипольных резонансов с помощью (γ, π) и (π, π') -реакций на атомных ядрах.

В § 1 исследуется зависимость парциальных характеристик (γ, π^+) реакции на ядре от выбора амплитуд процесса на свободном нуклоне.

В § 2 демонстрируется возможность концентрации сил переходов в состоянии изовекторного монопольного резонанса в реакции перезарядки пионов (π^-, π^0) на ядре ^{16}O .

В § 3 показана возможность использования (γ, π^+) реакции как инструмента для изучения спин-изоспиновой ветви гигантских мультипольных резонансов.

В заключении изложены основные результаты диссертации.

В приложениях даны формулы, необходимые для анализа (γ, π) и (π, π') реакций.

В приложении А приведены явные выражения для анализа фоторождения пионов на свободных нуклонах.

В приложении Б приведена нековариантная (двухкомпонентная) запись релятивистски-и калибровочно-инвариантной амплитуды фоторождения пионов.

В приложении В приводятся явные выражения для парциальных амплитуд (π, π') и (γ, π) реакций на ядрах

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ К ЗАЩИТЕ

1. Разработан формализм для описания процесса фоторождения пионов на ядрах в импульсном представлении, который удовлетворяет требованиям релятивистской и калибровочной инвариантности.

2. Выявлена сильная чувствительность (π, π') и (γ, π) реакций к входной информации о структуре ядра. Показано, что расхождение результатов, полученных с разными допустимыми ядерными переходными плотностями, могут во много раз превосходить эффекты, связанные с различным описанием механизмов этих реакций.

3. На основе уравнения непрерывности в (e, e') реакции на ядре ^{12}C одновременно описаны продольный и поперечный формфакторы для изовекторного перехода $0^+ \rightarrow 2^+$ ($E^* = 16, 11$ МэВ) в широкой области переданного ядру импульса. Полученные переходные плотности позволяют устранить существовавшие ранее расхождения между теорией и экспериментом в (γ, π) и (p, n) -реакциях, а также в процессе радиационного захвата пионов с мезоатомных орбит.

4. При анализе DWIA-подхода обнаружен эффект доминирования "on-shell" распространения пионов в ядре. Предлагается "on-shell" вариант DWIA для описания неупругого рассеяния и фоторождения пионов на ядрах.

5. Выявлены различия в соотношении спиновых и бесспиновых частей в разных вариантах элементарных амплитуд процесса фоторождения пионов. Показано, что эти различия существенно проявляются при исследовании парциальных переходов в (γ, π) реакции на ядре.

6. Показана возможность концентрации сил переходов в состоянии изовекторного монопольного резонанса в реакции перезарядки (π^-, π^0) на ядре ^{16}O .

7. В случае фоторождения заряженных пионов показана возможность выделения резонансов, сформированных переходами с переворотом спина, а также переходов на уровень $J^\pi = 4^-, T = 1$.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kamalov S.S. and Mach R.
Nuclear pion photoproduction: a theory and the $^{16}\text{O}(\gamma, \pi^+)^{16}\text{N}$ (bound) example. J. Phys. G: Nucl. Phys., 1983 v.9, p.605;
Препринт ИЯИ, P-0285, Москва, 1983. (Фоторождение пионов на ядрах: теория и пример $^{16}\text{O}(\gamma, \pi^+)^{16}\text{N}$ (связанные сост) -реакции).
2. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kaipov T.D., Kamalov S.S. Mach R.
Inelastic electron scattering and radiative pion capture to the lowest 1^+ and 2^+ isovector levels in $A = 12$ nuclei.
Continuity - equation effects. Сообщение ОИЯИ, Е4-83-543, Дубна, 1983. (Неупругое рассеяние электронов и радиационный захват пионов с изовекторными переходами в низшие 1^+ и 2^+ состояния ядер с $A = 12$. Эффекты, связанные с уравнением непрерывности).
3. Eramzhyan R.A., Gmitro M and Kamalov S.S. Pion photoproduction off nuclei: a sensitive test of the nuclear transition densities. Phys. Lett. B, 1983, v. 128, p. 371,
(Чувствительность процесса фоторождения пионов к выбору ядерных переходных плотностей).
4. Гмитро М., Камалов С.С., Каипов Т.Д., Эрамжян Р.А.
Спиновые возбуждения ядер в реакциях фоторождения пи-мезонов. В сб.: Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: ЦНИИ атоминформ, 1983 т. 2, с. 99.
5. Гмитро М., Камалов С.С., Эрамжян Р.А. Магнитные переходы в легких ядрах в реакциях (γ, π) и (π, γ) . Тезисы конференции по ядерно-физическим исследованиям (Харьков, 4-6 октября), ХФТИ АН УССР, Харьков, 1982, с.25.
6. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kaipov T.D., Kamalov S.S., Mach R.
Cross sections of the $^{12}\text{C}(\gamma, \pi^+)^{12}\text{B}(1^+_{g.s.}, 2^+)$ reaction.
Сообщение ОИЯИ, Е4-83-574, Дубна, 1983. (Дифференциальные сечения реакции $^{12}\text{C}(\gamma, \pi^+)^{12}\text{B}(1^+_{g.s.}, 2^+)$)
7. Камалов С.С., Каипов Т.Д. Исследование элементарных амплитуд в реакциях $^{12}\text{C}(\gamma, \pi^+)$ и $^{16}\text{O}(\gamma, \pi^+)$. Препринт ОИЯИ, P4-83-539, Дубна, 1983.
8. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kaipov T.D., Kamalov S.S., Mach R.
Pion photoproduction and radiative pion capture. Proc. of International Workshop on Perspectives in Nucl. Phys. Trieste, Italy, October, 1983, World Scientific, Singapore, 1984.
Сообщение ОИЯИ Е4-84-67, Дубна, 1984, (Фоторождение и радиационный захват пионов).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 февраля 1984 года.