

Г-559



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.17.01

4-85-444

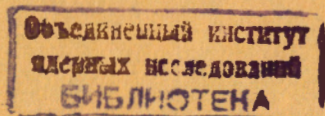
ГМИТРО Мариан

**СОВМЕСТНОЕ ОПИСАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ,
ВЫЗВАННЫХ ФОТОНАМИ, ЛЕПТОНАМИ, π -МЕЗОНАМИ
И ПРОТОНАМИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1985



Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук профессор	Я. А. СМОРОДИНСКИЙ
доктор физико-математических наук профессор	Г. Ф. ФИЛИППОВ
доктор физико-математических наук профессор	Г. М. ВАГРАДОВ

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Автореферат разослан "___" _____ 198__ г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 198__ г. на заседании Специализированного совета Д047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета

В. И. ДУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В восьмидесятые годы ядерная физика, как теоретическая, так и экспериментальная, снова начала привлекать пристальное внимание. Прошедший период накопления данных начинает приносить плоды. Последнее пятилетие ознаменовано окончательным закреплением представления о ядре как о системе, составленной не только из нуклонов, но обязательно требующей в целом ряде случаев явного рассмотрения мезонных степеней свободы. Мезонные обменные токи в течение нескольких десятилетий, рассматривались на качественном уровне. В 70-е и 80-е годы была впервые разработана теория, которая позволила количественно правильно объяснить ряд явлений ядерной физики. Затем на повестку дня встал вопрос о взаимоотношении нуклон-мезонной картины ядра и кварк-глюонной модели самих составляющих. В физике элементарных частиц возникшая стройная схема квантовой хромодинамики требует обобщения на область больших расстояний. Современный квантовохромодинамический аппарат ограничен по своей применимости областью асимптотической свободы. Ядерная физика может и должна представить убедительные примеры кооперативных явлений (если они существуют в природе), объяснение которых нуждается в явном рассмотрении кварковых и глюонных степеней свободы. Динамика ядерных систем, однако, очень сложна и многообразна. Поэтому решить задачи, поставленные в настоящее время перед ядерной физикой, можно, на наш взгляд, лишь изменив стратегию исследований. Изучение отдельных ядерных явлений, переходов, реакций, становится недостаточным, и информация, получаемая при таких исследованиях, является ограниченной. Задачей первоочередной важности в ядерной физике становится построение схем, моделей, теорий, которые охватывают возможно более широкий круг явлений, происходящих при малых и средних энергиях (естественным надо считать ограничение масштабом 1 ГэВ), и в достаточно широкой области передач импульса, и разнообразие зондов, "прощупывающих" ядро. Современная ситуация благоприятствует расширению этих работ, необходимость которых мы только что попытались сформулировать в общих чертах. Существующие и строящиеся высокоэнергетические ускорители протонов, мезонов и электронов позволяют получать экспериментальные данные высокой точности с требуемым разнообразием условий, в которых изучается ядро. Такая ситуация позволяет провести широкомасштабную апробацию наших теоретических представлений и выделить те элементы, которые, возможно, нуждаются в коренной перестройке. Примером фундаментального характера может служить вопрос о существовании и свойствах трехчастичного взаимодействия нуклонов. Выявление та-

кой формы взаимодействия, безусловно, представляло бы общефизический интерес. Задачей ядерной физики является, с одной стороны, поиск явлений, в которых этот эффект можно будет обнаружить, а с другой стороны, феноменологическая конструкция такого взаимодействия, основанная, по-видимому, на новой картине, содержащей мезонные и кварковые обмены. Многочисленные феноменологические попытки моделирования трехнуклонных сил надо, видимо, считать лишь поисковыми, так как изобилие свободных параметров в такой задаче вряд ли позволит получить окончательный ответ каким-либо путем, отличным от подгонки.

Наряду с названными широкомащштабными задачами ядерной физики средних энергий в этой области решаются актуальные специфические задачи. Изучение ядерных процессов при низких и средних энергиях было и остается одним из важнейших источников получения информации не только о ядерной структуре, но и о характере фундаментальных взаимодействий. В частности, исследование ядерных процессов с участием лептонов позволило получить важную информацию о свойствах слабого взаимодействия. Изучение процессов с участием ядер дало, например, следующие результаты: обнаружено несохранение пространственной четности и нарушение инвариантности относительно зарядового сопряжения, показано, что $V-A$ структуре эффективного гамильтониана не противоречат имеющимся данным, подтверждена гипотеза сохранения векторного тока и частичного сохранения аксиального тока, получены доказательства $\mu-e$ универсальности и т.д. Продолжая это направление исследований, в настоящей работе, наряду с фотопионными реакциями и процессами рассеяния, рассматриваем радиационный μ -захват (РМЗ) и $\mu \rightarrow e$ конверсию на ядрах. Показано, что экспериментальное исследование этих процессов позволило бы получить важную информацию о структуре гамильтониана слабого взаимодействия.

Целью работы является развитие аппарата микроскопического описания пионных (радиационный захват и фоторождение, упругое и неупругое рассеяния, перезарядка π -мезонов) и лептонных (рассеяние электронов, захват и радиационный захват μ -мезонов) процессов на легких ядрах при средних энергиях, пригодного для а) изучения характеристик основных взаимодействий и б) выявления возможных противоречий нуклон-мезонной модели ядра, указывающих на необходимость рассмотрения в явном виде кварк-глюонных степеней свободы. Предлагается проведение экспериментов, которые позволили бы получить такую информацию.

Научная новизна и практическая ценность. Новым достижением является разносторонняя проверка практической ценности гипотезы существования универсального отклика ядра при его возбуждении разнообразными (электроны, μ -мезоны, протоны, π -мезоны) налетающими (поглощаемыми)

частицами средних энергий. На основе микроскопического подхода унифицированным способом описывается широкий круг ядерных реакций на легких ядрах. Основываясь на опыте изучения более доступных процессов, мы смогли, благодаря эффективному использованию свойства универсального отклика, приступить к реалистическому анализу редких и мало изученных реакций.

Разработан новый метод построения элементарной амплитуды радиационного захвата мюонов. Метод основан на использовании гипотезы о величине одновременных коммутаторов токов и условий сохранения слабых токов. Получена и, с учетом q^2 -зависимости слабых формфакторов, решена система уравнений для радиационных формфакторов, входящих в элементарную амплитуду РМЗ. Полученное калибровочно-инвариантное выражение для амплитуды удовлетворяет условиям сохранения векторного тока (СВТ), частичного сохранения аксиального тока (ЧСАТ) и в низшем порядке согласуется с результатами теории возмущений. На основе разработанного метода получены выражения для амплитуд РМЗ ядрами ${}^3\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$. При этом ядро рассматривалось как элементарная частица.

Предложен новый метод модификации импульсного приближения (ИП) для двухступенчатых ядерных радиационных процессов. С помощью уравнения непрерывности ядерного электромагнитного тока удается вырезать существенную часть амплитуды изучаемого радиационного процесса в терминах плотности заряда. Для нее использование импульсного приближения можно считать хорошо оправданным. Предложенная модификация ИП эффективным образом включает существенную часть поправок, связанных с мезонными обменными токами.

Вычислены спектры жестких фотонов РМЗ в стандартном и модифицированном подходе; показано, что предложенная модификация существенно влияет на результаты расчета. Проведенный теоретический анализ использовался при планировании и интерпретации экспериментальных исследований РМЗ ядрами ${}^{16}\text{O}$ и ${}^{40}\text{Ca}$.

Получены оценки выхода жестких фотонов РМЗ в области спектра, чувствительной к величине массы m_ν мюонного нейтрино. Предложены ядра-мишени; удобные для экспериментального исследования эффектов, связанных с возможным ненулевым значением m_ν .

Рассмотрен процесс $\mu \rightarrow e$ конверсии на ядре ${}^{16}\text{O}$. Оценен вклад переходов с возбуждением ядра в полную вероятность процесса $\mu \rightarrow e$, интенсивно изучаемого в настоящее время в связи с вопросом о возможном несохранении лептонных чисел в слабых взаимодействиях.

Большую практическую ценность могут представлять разработка методов связанных каналов для задачи рассеяния π -мезонов ядрами и его программная реализация, позволяющая рассмотреть в данной задаче IO-15

связанных каналов. Аналогичным способом реализованы программы для расчета эффективных сечений реакции фоторождения пионов ядрами.

Апробация диссертации. Основные материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики и Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, на заседаниях секций по теоретической физике и по физике низких энергий Ученого совета ОИЯИ. Большая часть материалов докладывалась на семинарах Института ядерной физики ЧСАН в Ржеже (Чехословакия), Института ядерных исследований АН СССР в Москве, Института теоретической физики АН УССР в Киеве, НИИЯФ Московского государственного университета, теоретического отдела ЦЕРН в Женеве (Швейцария), Швейцарского института ядерных исследований в Филлигене, на семинарах физических институтов университетов в Цюрихе и Лозанне (Швейцария). Ряд результатов был представлен и доложен на VII, VIII, IX и X Международных конференциях по физике высоких энергий и структуре ядра в Цюрихе (1977), Ванкувере (1979), Версале (1981) и Гейдельберге (1984), на V семинаре "Электромагнитные взаимодействия при малых и средних энергиях" (Москва, 1981), на VIII Международном симпозиуме "Механизмы ядерных реакций" (Гауссиг, ГДР, 1978), на международном семинаре "Мезоны и легкие ядра" (Либлице, ЧССР, 1981) и на других конференциях, школах и совещаниях (Алушта 1980, Звенигород 1981, Харьков 1983 и др.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 39 статей. Значительная часть результатов вошла в обзоры /5, II, 22, 23, 25, 29/.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав основного содержания, заключения и математического дополнения; она содержит 299 страниц машинописного текста, 49 рисунков, 36 таблиц и список цитируемой литературы из 254 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко изложена постановка физической задачи и дано обоснование актуальности и важности исследуемых проблем.

В **первой главе** анализируется состояние современных исследований по радиационному захвату π -мезонов (РЗП) с мезоатомной орбиты. Представлены последние достижения и подчеркнута важность вклада работ по РЗП в понимание некоторых фундаментальных проблем ядерной и мезоядерной физики (вопрос о зарядовой симметрии ядерных сил, проверка предположения о частичном сохранении аксиально-векторного тока слабого взаимодействия). Приведены аргументы в пользу изучения спин-изоспиновых возбуждений ядер с использованием РЗП.

В § 2 дан обзор формализма, применяемого для расчета спектров жестких γ -квантов, связанных с РЗП, проведено мультипольное разложение и определен выход γ -квантов, т.е. величина, которая может быть сравнена с экспериментальными данными.

Детальному анализу РЗП ядром ^{16}O посвящен § 3. В этом параграфе описан способ построения и некоторые свойства оболочечных волновых функций основного состояния ^{16}O и состояний конечного ядра ^{16}N в рамках $np-nh$ ($n = 0, 1, 2$) конфигурационного пространства; показано, что учет корреляций типа $2h\omega$ в основном состоянии ^{16}O и наиболее важных компонент типа $3h\omega$ при построении волновых функций состояний $0^-, 1^-, 2^-, T=1$ позволяет получить вполне реалистическую оценку спектра и выходе наиболее жестких γ -квантов. В то же время учет спин-квадрупольных возбуждений ($1^+, 2^+, 3^+; T=1$), волновые функции которых построены по полному базису конфигураций типа $2h\omega$, дает количественно правильное описание средней части спектра фотонов и позволяет объяснить 43% выходе γ -квантов. Таким образом, впервые количественно показано, что процесс РЗП в легких ядрах ($A \leq 20$) связан с возбуждением двух ветвей коллективных ядерных состояний: спин-дипольной и спин-квадрупольной. Расчет спектров нейтронов, вылетающих в результате распада конечного ядра ^{16}N по каналу $^{16}\text{N} \rightarrow ^{15}\text{N}+n$, полностью подтвердил сделанный вывод.

В § 4 анализируются две парциальных переходы при РЗП ядром ^{12}C . Эти переходы связаны с образованием основного 1^+ и первого возбужденного 2^+ состояний ядра ^{12}B , которые очень часто изучались в ядерной физике. В последующих главах мы систематически будем возвращаться к этим примерам. Покажем, что единый подход к изучению родственных процессов позволяет получать количественно правильные результаты как в области высоколежащих ядерных состояний, так и в области связанных состояний.

В **главе II** представлены результаты совместного анализа переходов в состоянии спин-дипольного резонанса, обусловленных электромагнитным, слабым и сильным взаимодействиями.

В параграфе первом проанализирована структура операторов, описывающих неупругое рассеяние электронов, μ^- -захват и радиационный π -захват, и показана их тесная связь. Проведены конкретные расчеты для ядер с $A=16$ и перечислены результаты совместного анализа этих процессов для ряда других ядер p -оболочки. Полученные результаты позволяют сделать вывод о существовании универсального отклика ядерной системы в реакциях с умеренной передачей импульса. Несмотря на наличие индивидуальных весовых факторов, возникающих при количественном описании специфических реакций, gross-структура ядерного отклика сохраняется, а главные пики формируются каждый раз одними и теми же конфигурациями.

В § 2 проведен расчет дифференциальных сечений для реакции зарядового обмена (p, n) на ядре ^{16}O . Приведены результаты расчетов сечений (p, n) реакции при энергии $E_p=135$ МэВ для переходов с возбуждени-

ем изовекторных уровней отрицательной четности в ядре ^{16}F -изобар аналогов переходов, изученных в реакциях (π^+, γ^-) , (μ^+, ν^-) и (e, e^-) . Показано, что представление об универсальном отклике ядра может быть успешно применено не только к электромагнитным, фотопионным и слабым процессам, рассмотренным выше, но и к процессу, вызванному сильным взаимодействием.

В главе III описан метод сильной связи каналов, используемый в работе для расчетов упругого, неупругого рассеяния и перезарядки π -мезонов. На основе теории многократного рассеяния Гольдбергера-Ватсона с использованием импульсного приближения получена потенциальная матрица, представляющая собой обобщение оптического потенциала на случай задачи связанных каналов. Описаны исходные π -нуклонные данные и введено преобразование от системы центра масс пион-нуклон в систему π -ядро, обеспечивающее правильные свойства симметрии полученной матрицы потенциала. Разработан метод решения возникающей системы связанных интегральных уравнений, который сводится к регуляризации ядра уравнений и сведению системы путем гауссовского интегрирования к системе линейных алгебраических уравнений. Описана также модель двухнуклонного поглощения для феноменологического описания истинного поглощения пионов в процессе рассеяния.

В § 3 представлены результаты расчетов дифференциальных сечений упругого рассеяния π -мезонов на легких ядрах: ^3He , ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{24}Mg . Рассматривается также упрощенная модель "on-shell" рассеяния; показано, что для энергий вблизи Δ_{33} -резонанса модель может служить хорошим инструментом для проведения быстрых полуколичественных оценок величины сечений.

В § 4 приведены результаты расчетов неупругого рассеяния π -мезонов на ^{12}C , приводящего к образованию изовекторных состояний $1^+(15.1 \text{ МэВ})$ и $2^+(16.1 \text{ МэВ})$, изобар - аналоги которых были рассмотрены в главе I.

Далее представлены результаты для дифференциальных сечений неупругого рассеяния на ядрах s-d оболочки, приводящего к образованию коллективных ядерных 2^+ , 4^+ состояний вращательного типа. Как следует из непосредственного расчета и сравнения с результатами других авторов, для успешного анализа недостаточно знания механизма реакции. Количеством правильных результатов могут быть и в этом случае получены лишь при условии совместного анализа родственных процессов, который позволяет получить реалистические ядерные переходные плотности.

Приведены результаты расчета двойного зарядового обмена (π^+, π^-) в случае дважды-изобар-аналоговых переходов $(^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne}$, $^{26}\text{Mg}(\pi^+, \pi^-)^{26}\text{Si})$. Показано, что энергетический ход сечений реакций

перезарядки вперед, полученный в нашей модели, удивительно хорошо воспроизводит данные. Надо отметить, что на полуколичественном уровне достаточно точно воспроизводятся одновременно экспериментальные данные для упругого рассеяния и для реакции двойной перезарядки, отличающиеся по величине на шесть порядков.

В главе IV изложен формализм, предложенный для описания реакции фоторождения π -мезонов и представлены результаты расчета. В соответствии с основной идеей о совместном рассмотрении родственных процессов был предложен метод, аналогичный методу анализа пионного рассеяния, который обсуждался в предыдущей главе.

При помощи уравнения Липпмана-Швингера для пион-ядерной системы получено выражение для амплитуды фоторождения пионов на атомных ядрах в виде суммы плосковолновой амплитуды и интегрального члена, описывающего многократное перерассеяние пиона в конечном состоянии. Амплитуда пион-ядерного (упругого) рассеяния, полученная в предыдущей главе, используется в качестве входной информации при построении этого интегрального члена. Конструкция амплитуды проводится опять в импульсном представлении, что технически значительно упрощает преобразование π -нуклонной амплитуды фоторождения в систему центра масс пион-ядро.

В § 3 представлены результаты расчета дифференциальных и интегральных сечений при π -фотообразовании ядром ^{16}O в каналах, соответствующих связанным состояниям $(0^-, 1^-, 2^-, 3^-)$ конечного ядра ^{16}N при энергиях $E_\pi \leq 360 \text{ МэВ}$. Продемонстрированы эффекты учета многократного перерассеяния, ферми-движения нуклонов и восстановления релятивистской и градиентной инвариантности амплитуды фоторождения.

В § 4 рассмотрены парциальные переходы, связанные с образованием двух нижайших уровней ядра ^{12}B - уровней 1^+ и 2^+ , T=1. На основе имеющегося в настоящее время экспериментального материала на этот раз анализируется процесс фоторождения пионов низких энергий ($E_\pi \leq 50 \text{ МэВ}$). Показано, что наряду с ранее замеченными обязательными элементами механизма фоторождения существенную роль при низких энергиях может играть истинное поглощение пионов. Даже простой феноменологический учет этого эффекта позволил существенно улучшить согласие рассчитанных и экспериментальных эффективных сечений. Проведено сравнение "полного" расчета, учитывающего распространение пионов "на оболочке" и вне энергетической оболочки с простой "on-shell" моделью. Приведены примеры кинематических условий, при которых учет поведения амплитуды вне энергетической оболочки позволяет существенно приблизить расчетные сечения к экспериментальным данным.

Глава У посвящена построению амплитуды РМЗ протоном (элементарной амплитуды) и ядрами ${}^3\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$.

В § 1 рассмотрены различные методы построения элементарной амплитуды: метод теории возмущений, метод низкоэнергетических теорем и метод, в котором используются свойства слабых токов и так называемая гипотеза линейности. Последний метод и методы теории возмущений и низкоэнергетических теорем приводят к существенно различным результатам. Указаны причины этого различия и обсуждается вопрос о необходимости пересмотра выражения для элементарной амплитуды.

В § 2 излагается новый метод построения амплитуды. Рассмотрена связь трех процессов: РМЗ, безрадиационного μ^- -захвата и фоторождения пиона. Тензор $J_{\mu\lambda}$ — адронный матричный элемент, входящий в амплитуду РМЗ — имеет вид преобразования Фурье хронологического произведения электромагнитного и слабого ядерных токов. Тензор $J_{\mu\lambda}$ представлен в виде разложения по набору лоренц-ковариантов. Налагая условия сохранения электромагнитного и векторного токов (СВТ) и частичного сохранения аксиального тока, получаем уравнения, связывающие радиационные формфакторы, входящие в разложение $J_{\mu\lambda}$ по ковариантам, с формфакторами выше указанных родственных процессов: безрадиационного μ^- -захвата и фоторождения пионов.

В случае реакции с тремя частицами в конечном состоянии нетривиальной оказалась задача выделения независимых лоренц-ковариантов. В § 3 даны примеры решения этой задачи.

В § 4 построена новым методом элементарная амплитуда РМЗ; полученное выражение анализируется и сравнивается с результатами других авторов.

В § 5 разработанный метод применяется к построению ядерной амплитуды РМЗ. Для этого ядро характеризуется лишь спином, изоспином и четностью, а вся информация о его структуре содержится в соответствующих слабых ядерных формфакторах. Для рассмотренных случаев РМЗ ядрами ${}^3\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$ эти формфакторы получены из экспериментальных данных по β -распаду, μ^- -захвату и электромагнитным переходам в ядрах. В последней части § 5 получены спектры фотонов, соответствующие РМЗ протоном, ${}^3\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$. В заключение отмечается, что метод "ядро как элементарная частица" в случае двухступенчатых процессов, каким является и РМЗ, должен применяться лишь с определенной предосторожностью, так как здесь, кроме прочих проблем, возникает и трудный вопрос о способе учета многочисленных промежуточных состояний ядерной системы.

В главе VI рассмотрены ограничения, накладываемые уравнением непрерывности (УН) ядерного электромагнитного тока, на амплитуды двухступенчатых радиационных процессов.

В § 1 в качестве введения обсуждается связанная с УН модификация выражений для поперечного формфактора электрического типа в случае простого, одноступенчатого процесса, каким является рассеяние электронов. На примерах изовекторного и изоскалярного формфакторов квадрупольных переходов в ${}^{12}\text{C}$ (возбуждение состояний $2^+T=0,4.44$ МэВ и $2^+T=1,16.1$ МэВ) показано, что эффекты УН могут быть численно очень большими. Их учет позволил впервые объяснить абсолютные величины продольных и поперечных формфакторов, наблюдаемые на эксперименте. Отмечен другой простой процесс — фоторасщепление дейтерия, где также было обнаружено значительное влияние УН.

В § 2 рассмотрена модификация импульсного приближения в случае РМЗ. Этот процесс отличается от вышеуказанных (e, e') и $\gamma+d \rightarrow n+p$ тем, что в формировании амплитуды принимают участие два тока, — и вместо одного оператора электромагнитного тока мы имеем хронологическое произведение двух операторов: электромагнитного тока и слабого тока. Сначала дается краткий обзор современного состояния теории РМЗ ядрами и указывается на существование открытых мест теории, предлагается их решение; далее в этом параграфе получена модифицированная форма гамильтониана РМЗ ядрами и проведена его нерелятивистская редукция.

В § 3 метод модификации импульсного приближения, основанный на применении УН, реализуется в случае реакции фоторождения пионов. Представлен окончательный вид эффективного гамильтониана после выполнения нерелятивистской редукции в форме, удобной для проведения конкретных расчетов.

В главе VII представлены результаты расчетов в рамках импульсного приближения некоторых слабых процессов на ядрах, которые представляют интерес с точки зрения установления структуры гамильтониана слабого взаимодействия.

В § 1 дается характеристика современного состояния теоретических исследований по радиационному μ^- -захвату. В двух последующих параграфах представлены методика расчета и результаты вычислений спектров жестких γ -квантов в РМЗ ядрами ${}^{16}\text{O}$ и ${}^{40}\text{Ca}$.

В § 2 применяется стандартная теория импульсного приближения. В § 3 расчет ведется на основе модифицированного гамильтониана РМЗ, который был получен в главе VI с помощью уравнения непрерывности электромагнитного тока в ядрах. Рассмотрены две формы выделения градиентной части вектор-потенциала и показано, что их использование приводит к близким результатам. Из сравнения расчетов, проведенных в рамках стандартного и модифицированного импульсного приближения, видно, что эффективный учет мезонных обменных токов, к которому сводится наша

модификация ИП, приводит к существенной редукции рассчитанного выхода γ -квантов в РМЗ. Таким образом, в микроскопическом подходе, основанном на вычислении и суммировании парциальных спектров, впервые получены результаты, не противоречащие оценкам, найденным в рамках феноменологической модели.

§ 4 посвящен вопросу о возможности определения величины массы мюонного нейтрино m_{ν_μ} . Показано, что высокоэнергетическая часть спектра фотонов РМЗ чувствительна к величине m_{ν_μ} . Однако эта же часть спектра сильно зависит от величины псевдоскалярного формфактора g_p . Чтобы избежать связанных с этим неопределенностей, рассмотрены характеристики, слабо зависящие от g_p . В качестве таковых рассмотрены относительный выход γ -квантов $N_\gamma(k) = N_p(k)/I$ и величина $r = \int N_\gamma(k) dk$, где $I = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} N_p(k) dk$, $\Delta = 2$ МэВ, а $N_\gamma(k)$ - вычисленный спектр γ -квантов РМЗ.

В § 5 рассмотрен процесс $\mu \rightarrow e$ конверсии на ядре ^{16}O . Коротко обсуждается возможность того, что закон сохранения лептонных чисел не является точным. Если этот закон действительно нарушается, то могут существовать процессы типа $\mu \rightarrow e\gamma$, $\mu \rightarrow 3e$, $A(\mu, e)A^*$. Вычисляется относительная вероятность $\mu \rightarrow e$ конверсии $^{16}\text{O}(\mu, e)^{16}\text{O}^*$ с учетом возможных возбуждений ядра (неупругие переходы). Для расчетов в качестве лептонной модели рассмотрена модель со смешиванием нейтрино с тяжелыми нейтральными лептонами. В качестве ядерной модели - оболочечная модель с np - $\bar{n}\bar{h}$ корреляциями ($n=0,1,2$), многократно впробированная в предыдущих главах. Приведены результаты численных расчетов, из которых следует, что основной вклад в неупругий процесс дают переходы, соответствующие возбуждению спин-дипольного и дипольного изовекторных гигантских резонансов. Показано, что отношение вероятностей неупругого и упругого переходов составляет в ^{16}O $\sim 13\%$, т.е. переходы с возбуждением ядра подавлены примерно в Z раз (Z - заряд ядра). Такой вывод справедлив и для других лептонных моделей. Это связано с тем, что скорости упругого и неупругого переходов обнаруживают примерно одинаковую зависимость от лептонной модели и ее параметров.

В математическом дополнении построен аппарат релятивистских тензорных гармоник в случае двух переменных.

В § 1 коротко обсуждаются достоинства формализма тензорных гармоник и указаны работы, в которых были построены релятивистские тензорные гармоники для случая одной переменной.

В § 2 введен набор единичных ортогональных четырехмерных векторов, по которым будут определяться проекции тензорных полей. Построен тензорный базис второго порядка.

В § 3 построены сферические гармоники, зависящие от двух переменных; их число бесконечно велико. Вводится понятие независимых гармоник, которые нельзя выразить в виде линейных комбинаций друг друга со скалярными коэффициентами, и предлагаются правила построения независимого набора.

В § 4 дано определение тензорных сферических гармоник второго порядка двух переменных в сферическом базисе. Приведены их основные свойства. Получена формула для определения числа независимых тензорных гармоник двух переменных произвольного порядка.

В § 5 показано, как выглядит разложение адронного матричного элемента $J_{\mu\lambda}$ амплитуды РМЗ по набору независимых релятивистских тензорных гармоник двух переменных.

В заключении изложены основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ, КОТОРЫЕ ВЫДВИГАЮТСЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ:

1. Реализован унифицированный подход к широкому кругу ядерных процессов, протекающих при средних энергиях с характерной умеренной передачей импульса. Выявлены универсальные черты ядерного отклика в таких процессах. Показано, что входная информация о структуре начальных и конечных ядерных состояний, как правило, оказывается наиболее слабым звеном анализа.

2. Для интерпретации спектра жестких фотонов РЗП ядрами p - и n -чл sd -оболочки предложено наряду со спин-дипольной ветвью привлечь и спин-квевдрупольную ветвь возбуждений конечного ядра. В количественном расчете продемонстрирована эффективность такой интерпретации спектра РЗП ядром ^{16}O .

3. Разработан формализм описания процесса фоторождения пионов на ядрах в импульсном представлении, который обеспечивает единый подход к процессам π -рассеяния и π -фоторождения и удовлетворяет требованиям релятивистской и калибровочной инвариантности.

4. Рассмотрен РМЗ протоном, ^3He и ^{12}C . На основе разработанного в диссертации метода найдены выражения для амплитуды процесса на протоне (элементарная амплитуда) и ядерных амплитуд (подход "ядро как элементарная частица"). Полученные выражения для амплитуд являются калибровочно-инвариантными, удовлетворяют условиям СВТ и ЧСАТ.

5. Построен аппарат релятивистских тензорных гармоник двух переменных в сферическом и спиральном базисах. Этот аппарат использовался для построения базиса независимых ковариантов в задаче РМЗ.

6. Предложен способ модификации импульсного приближения для двухступенчатых ядерных радиационных (γ -абсорбционных) процессов, основанный на использовании уравнения непрерывности ядерного электромагнитного тока. Такая модификация позволяет эффективно учесть поправки,

связанные с мезонными обменными токами. Построены рабочие выражения модифицированных эффективных гамильтонианов для РМЗ и π -фоторождения.

7. В микроскопической модели, основанной на концепции универсального ядерного отклика, вычислены спектры жестких фотонов РМЗ ядрами ^{16}O и ^{40}Ca в рамках стандартного и модифицированного импульсного приближений. Показано, что учет предложенной модификации ИП численно важен и приводит к внутренне непротиворечивой теоретической картине РМЗ.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах:

1. Alberi G., Gmitro M., Hambro L. Proton and electron inelastic scattering and the shell model for ^{12}C .- *Nuovo Cimento*, 1977, v. 38A, p. 239-259.
2. Gmitro M., Tinková E., Rimini A., Weber T. Spreading of the giant quadrupole resonance in ^{16}O .- *Lettere Nuovo Cimento*, 1977, v. 20, p. 449-452.
3. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Sakaev R.A., Tosunjan L.A. Towards a better understanding of ^{16}O nuclear structure: Muon capture and radiative pion capture reactions.- *Nucl. Phys.*, 1977, v. A290, p. 294-314.
4. Gmitro M., Tinková E., Rimini A., Weber T. Positive parity giant multipole resonances in ^{16}O .- *Czech. J. Phys.*, 1979, B29, p. 155-174.
5. Гмитро М., Мезон-ядерные взаимодействия при средних энергиях.- Дубна, ОИЯИ, 1978.- 19 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядер. исслед.: P5-II303).
6. Гмитро М., Сакаев Р.А., Тосунян Л.А., Эрамжян Р.А. Изучение структуры резонансных состояний ядра ^{16}O по продуктам реакций с π -мезонами и мюонами.- Дубна, ОИЯИ, 1978.- 13 с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P2-II511).
7. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Tosunjan L.A. What new information may the coincidence spectra of the nuclear radiative pion capture provide? - *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, 1978, v. 4, p. L233-L238.
8. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Tosunjan L.A. One- and two- nucleon emission following the nuclear radiative pion capture.- *Czech. J. Phys.*, 1979, v. B29, p. 370-378.
9. Гмитро М., Овчинникова А.А. Вероятность μ -е конверсии в реакции $^{16}\text{O}(\mu, e)^{16}\text{O}^+$.- *ЯФ*, 1979, т. 30, с. 330-335.
10. Gmitro M., Mach R., Coupled channel method for the π - ^4He elastic and inelastic scattering.- *Zeit. Phys.*, 1979, v. A290, p. 179-183.
11. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kissener H.-R. Lepton- and meson-induced excitation in nuclei.- *Dresden, ZfK*, 1979.- p. 81-89. (8-th Internat. Symp. "Nuclear Reaction Mechanisms"/ZfK-382).

12. Gmitro M., Ovchinnikova A.A. Elementary particle treatment of the radiative muon capture. I. Method.- *Dubna, JINR*, 1979.- 16 p. (Report/Joint Inst. Nucl. Res.: E2-12639).
13. Gmitro M., Ovchinnikova A.A. Elementary particle treatment of the radiative muon capture. II. Boson-like targets ^{12}C and ^{16}O .- *Dubna, JINR*, 1979.- 20 p. (Report/Joint Inst. Nucl. Res.: E2-12640).
14. Dogotar G.E., Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kissener H.-R., Tinková E. M2 giant resonance in light nuclei.- *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, 1979, v. 5, p. L221-L226.
15. Eramzhyan R.A., Gmitro R., Kissener H.-R. Giant M2 and transversal E1 resonances in light nuclei.- *Nucl. Phys.*, 1980, v. A338, p. 436-450.
16. Gmitro M., Ovchinnikova A.A. Two variable relativistic tensor harmonics.- *J. Math. Phys.*, 1982, v. 23, p. 310-314.
17. Gmitro M., Kamalov S.S., Moskalenko T.V., Eramzhyan R.A. Radiative muon capture on nuclei. Microscopic calculation for ^{16}O and ^{40}Ca .- *Czech. J. Phys.*, 1981, v. B31, p. 499-510.
18. Gmitro M., Ovchinnikova A.A. On the construction of independent Lorentz-covariants for reactions with three particles in the final state.- *Acta physica slovacica*, 1981, v. 31, p. 23-28.
19. Gmitro M., Ovchinnikova A.A., Current divergences, pion photoproduction and radiative muon capture.- *Nucl. Phys.*, 1981, v. A356, p. 323-344.
20. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kamalov S.S., Micelmacher G.V., Řízek J. A method to determine the muon-neutrino mass.- *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, 1981, v. 7, p. L231-L235.
21. Гмитро М., Доготарь Г.Е., Киссенер Г.-Р., Сакаев Р.А., Эрамжян Р.А. Радиационный захват пионов легкими ядрами.- В сб.: микроскопические расчеты структуры ядра и ядерных реакций, Изд-во "Штиница", Кишинев, 1980, с.3-24.
22. Gmitro M., Radiative muon capture.- *Czech. J. Phys.*, 1982, v. B32, p. 168-175.
23. Гмитро М., Эрамжян Р.А. Неупругое рассеяние частиц средних энергий на ядрах.- В сб.: Труды Международной школы по структуре ядра (Алушта, 14-25 апреля, 1980 г.), ОИЯИ, Д4-80-385, Дубна, 1980, с.142-167.
24. Gmitro M., Kvasil J., Mach R. Elastic and inelastic scattering of 180 MeV π^\pm on ^{24}Mg .- *Phys. Lett.*, 1982, v. 113B, p. 205-208.
25. Гмитро М., Киссенер Х.-Р., Трюоль П., Эрамжян Р.А. Основные механизмы радиационного захвата π -мезонов.- *УЧАН*, 1982, т. 13, с. 1230-1283.

26. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kamalov S.S., 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. 605-619.
27. Gmitro M., Ovchinnikova A.A. Elementary-particle treatment of the radiative muon capture in ^{12}C .- Nucl. Phys., 1983, v. A399, p. 503-514.
28. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kamalov S.S. Pion photoproduction off nuclei: a sensitive test of the nuclear transition densities.- Phys. Lett., 1983, v. 128B, p. 371-374.
29. Гмитро М., Киссенер Х.-Р., Трюль П., Эрамжян Р.А. Радиационный захват π -мезонов и спин-изоспиновые возбуждения атомных ядер.- ЭЧАЯ, 1983, т. 14, с. 773-834.
30. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kaipov T.D., Kamalov S.S., Mach R., Pion photoproduction and radiative pion capture on nuclei.- In: Proceedings of the workshop on Perspectives in nuclear physics at intermediate energies (Trieste, 10-14 October 1983).
31. Гмитро М., Квасил Я., Овчинникова А.А. Помогает ли уравнение непрерывности электромагнитного тока лучше понять радиационные процессы на ядрах? - В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика, Харьков, 1983, вып. I(22), с. 41-43.
32. Гмитро М., Камалов С.С., Мах Р., Сялужников М.Г. Эффекты схода пиона с энергетической поверхности в упругом рассеянии π -мезонов.- Дубна, ОИЯИ, 1983, - 14 с. (Препринт/Объед. инст. ядер. исслед.: Р4-83-403); ЯФ, 1984, т. 40, в. I(7), с. 108-116.
33. Gmitro M., Ovchinnikova A.A. Radiative muon capture: Impulse approximation and the continuity equation.- Dubna, JINR, 1983.- 9 p. (Report, Joint Inst. Nucl. Res.: E4-83-446).
34. Gmitro M., Kvasil J., Ovchinnikova A.A. Continuity-equation constraint for the radiative muon capture and pion photoproduction amplitude.- In: Particles and Nuclei, 10-th International Conference, Heidelberg, 1984, Abstract A65.
35. Gmitro M., Ovchinnikova A.A., Tetereva T.V. Radiative muon capture on ^{16}O and ^{40}Ca within a modified impulse approximation.- In: Particles and Nuclei, 10-th International Conference. Heidelberg, 1984, Abstract A66.
36. Eramzhyan R.A., Gmitro M., Kamalov S.S., Kaipov T.D., Mach R. Pion photoproduction and inelastic scattering in $A=12$ nuclei: Transitions to the lowest isovector 1^+ and 2^+ levels.- Nucl. Phys. 1984, v. A429, pp. 403-428.
37. Гмитро М., Каипов Т.Д., Ржизек Й. Анализ факторов электрических переходов в легких ядрах с использованием уравнения непрерывности электромагнитного тока.- Дубна, ОИЯИ, 1984.- с. II (Собрание/Объед. инст. ядер. исслед. Р4-84-443).
38. Christillin P., Gmitro M., Radiative muon capture on ^{16}O .- Phys. Lett., 1985, v. 150B, pp. 50-52.
39. Gmitro M., Kvasil J., Mach R. Pion elastic and inelastic scattering on s-d shell nuclei in the Δ_{33} -resonance region.- Coupled channel analysis.- Phys. Rev., 1985, v. C31, pp. 1349-1359.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июня 1985 года.