

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Т-628

2 - 12063

ТОСУНЯН
Лейли Ашотовна

РОЛЬ ЯДЕРНОЙ СТРУКТУРЫ
В СЛАБЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССАХ
ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Р.А.Срамбян

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.Б.Беляев

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Н.М.Кабачник

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

Защита диссертации состоится " " _____ 1979 года на заседании Специализированного ученого совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Московская область, г. Дубна).

Автореферат разослан " " _____ 1979 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И.Журавлев

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В настоящее время все больший интерес приобретает изучение процессов взаимодействия элементарных частиц (γ -квантов, электронов, мюонов, пионов, нуклонов и т.д.) с атомными ядрами при промежуточных энергиях. Среди многочисленных процессов такого типа выделяется специфический класс, к которому относятся реакции неупругого рассеяния электронов с энергией до 100-150 МэВ, захват мюонов, радиационный захват пионов, реакции фото- и электророждения пионов и т.д. Элементарные акты в этих реакциях достаточно хорошо изучены, поэтому такие процессы можно использовать для изучения ядерной структуры.

Во всех перечисленных процессах в результате взаимодействия с налетающей частицей ядро переходит преимущественно в возбужденное состояние. Причем, главным образом, переходы идут в область локализации коллективных состояний ядер, формирующих гигантский резонанс. Тем самым во всех перечисленных процессах важную роль должно играть возбуждение гигантского резонанса.

Описание коллективных состояний легких ядер обычно базируется на модели оболочек. При этом для формирования коллективных состояний используется набор базисных частично-дырочных состояний. Если ограничиться таким описанием, т.е. отказаться от учета более сложной природы основного состояния и состояний гигантского резонанса, то происходит сильная концентрация сил переходов на нескольких состояниях, и таким образом теория сталкивается с проблемой разброса коллективных состояний. В действительности же суперпозиция простейших частично-дырочных ph -конфигураций составляет лишь каркас гигантского резонанса. Важной чертой этих конфигураций является их зацепление за более сложные, типа $2p2h$ и т.д.

Вопрос зацепления частично-дырочных конфигураций за более сложные в настоящее время является одним из самых актуальных в ядерной физике. Без учета разброса состояний гигантского резо-

нанса не представляется возможным количественное описание процессов.

Успешное подтверждение концепции о резонансном механизме поглощения мюонов атомными ядрами поставило вопрос о природе возбуждения и распада ядерной системы и в других процессах, идущих в атомных ядрах при промежуточных энергиях, в частности, в (π^-, γ) -процессе. В настоящее время этот вопрос становится все более важным и его исследование заслуживает пристального внимания.

Наконец, открытие нейтральных токов выдвинуло на передний план проблему определения их структуры. Этот вопрос в настоящее время приобретает все большую актуальность в связи с вводом в действие мезонных фабрик.

Основная цель работы. Построить ядерную модель с учетом высших возбуждений в функциях основного и возбужденных состояний. Проверить эту модель на хорошо изученном процессе (μ^-, ν_μ) , а затем применить ее для изучения процессов (π^-, γ) и (ν, ν') . Показать, что возбуждение гигантского резонанса в (π^-, γ) -процессе играет определяющую роль, и в свете этого рассмотреть основные закономерности расщепления ядра в процессе $^{16}\text{O}(\pi^-, \gamma)$ и предложить различные эксперименты для детальной проверки выдвинутой концепции. Детально исследовать процесс нейтринного возбуждения ядра ^{16}O с целью определения структуры нейтрального адронного тока.

Научная новизна и практическая ценность. В данной диссертации концепция о резонансном механизме возбуждения ядерной системы применяется к различным процессам, идущим при промежуточных энергиях.

Впервые построены ядерные волновые функции, учитывающие полный $2\hbar\omega$ -базис для функции основного состояния и возбуждений положительной четности, а также довольно широкий $3\hbar\omega$ -базис для возбужденных состояний отрицательной четности ядра ^{16}N .

В рамках такой ядерной модели впервые проводится совместное исследование процессов (μ^-, ν_μ) , (π^-, γ) и (ν, ν') на ядре ^{16}O . Установлена тесная связь и глубокая аналогия между различными процессами, идущими в атомных ядрах при промежуточных энергиях.

Подробно исследован процесс нейтринного возбуждения ядра ^{16}O . Предложены эксперименты для определения структуры нейтрального адронного тока.

Предложены эксперименты для всесторонней проверки концепции о резонансном механизме возбуждения ядра в процессе (π^-, γ) . Проведен микроскопический анализ роли квадрупольной ветви возбуждения. Впервые получила свое объяснение низкоэнергетическая часть γ -спектра. Вместе с этим появилась возможность описать высокоэнергетическую часть нейтронного спектра.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, Швейцарской мезонной фабрики (СИН), ЦЕРНа, на Сессии Отделения ядерной физики АН СССР (1976 г.), на УП-ой Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Цюрих, 1977 г.), на Ломоносовских чтениях в МГУ (1978 г.), а также на XXVII-ом (Ташкент, 1977 г.) и XXVIII-ом (Алма-Ата, 1978 г.) Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра и на Международной фотопионной конференции в Трое (США, штат Нью-Йорк, 1978 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано восемь работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения и трех приложений, содержит 141 страницу машинописного текста, 19 рисунков, 23 таблицы и библиографический список литературы из 108 названий.

Содержание работы

Введение содержит краткое обсуждение проблемы взаимодействия элементарных частиц с ядрами при промежуточных энергиях. Обсуждается необходимость усложнения ядерной модели. Сформулированы основные вопросы, рассматриваемые в диссертации. Кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе рассмотрены различные приближения для ядерных волновых функций. Сначала рассматривается простейшая модель со смешиванием частично-дырочных конфигураций. Затем строится модель, учитывающая вклад высших конфигураций в полном $2\hbar\omega$ -базисе для функции основного состояния, т.е. учитывающая все $2p2h$ -конфигурации. И, наконец, строится модель, учитывающая высшие возбуждения как в основном, так и в возбужденных состояниях ядра. Построены функции основного состояния ядра ^{16}O , возбужденных состояний ядра $^{16}\text{N} (^{16}\text{O})$ с учетом $2p2h$ -конфигураций и состояний дочернего ядра $^{15}\text{N} (^{15}\text{O})$ с учетом $1p2h$ -конфигураций.

Построена полная система волновых функций положительной четности в области $2\hbar\omega$ -возбуждений, т.е. учитываются все $2p2h$ -конфигурации. Система функций отрицательной четности построена в ограниченном, но достаточно широком $3\hbar\omega$ -базисе. Эти функции используются в последующих главах диссертации при расчете конкретных процессов.

Во второй главе в рамках подхода, основанного на концепции о резонансном механизме возбуждения ядра, проводится исследование процесса поглощения мюона ядром ^{16}O .

В §2 рассматриваются парциальные переходы в процессе (μ^-, ν_μ) . Рассчитаны парциальные скорости захвата с переходом в связанные состояния ядра ^{16}N , скорости захвата с возбуждением надпороговых уровней ядра ^{16}N , а также полная скорость захвата мюона ядром ^{16}O . В рамках различных приближений для ядерных волновых функций, рассмотренных в главе I, проанализирована роль ядерной структуры в процессе $^{16}\text{O}(\mu^-, \nu_\mu)$. Проводится сравнение с экспериментом и с результатами других расчетов. На основе такого сравнения для дальнейших исследований предлагается использовать построенную в главе I модель, учитывающую вклад высших конфигураций как в функции основного, так и в функциях возбужденных состояний ядра.

На основе этой модели в §3 рассчитаны полный и парциальные нейтронные спектры в (μ^-, ν_μ) -процессе. Для сравнения те же результаты рассчитываются в простейшей модели со смешиванием частично-дырочных конфигураций.

В §4 приводятся краткие выводы.

Основным моментом проведенного в данной главе исследования является проверка предлагаемой в главе I усложненной ядерной модели с целью дальнейшего ее применения при изучении других процессов.

В третьей главе рассмотрены проблемы, связанные с проявлением нейтральных токов.

В §1 исследуются нейтринные возбуждения ядра ^{16}O с целью определения структуры нейтрального адронного тока.

Открытие нейтральных токов выдвинуло на передний план проблему определения их структуры. В настоящее время, в связи с вводом в действие мезонных фабрик, становятся возможными необходимые для этого эксперименты в области промежуточных энергий.

В пункте I кратко излагаются различные теории, объясняющие безмюонное нейтринное рассеяние.

В пункте 2 описывается наиболее популярная модель Вайнберга-Салама для нейтрального адронного тока. Вводятся различные наборы констант для изоскалярной и изовекторной составляющих тока. И если в модели Вайнберга изоскалярная гамов-теллеровская компонента отсутствует: $f_{GT}^0 = 0$, то в предлагаемых моделях а) и б) для изоскалярной составляющей тока в диссертации рассматриваются два крайних случая: а) $f_{GT}^0 = 1$ и б) $f_{GT}^0 = 0$. Предлагаемые в данном параграфе эксперименты позволят определить величину f_{GT}^0 , а значит, заодно проверить теорию Вайнберга-Салама.

В пункте 3 рассматриваются парциальные переходы в ядре ^{16}O в процессе неупругого рассеяния нейтрино.

Выявлена возможность извлечения качественной информации о наличии гамов-теллеровской компоненты нейтрального тока при изучении парциальных переходов на уровни, лежащие ниже порога испускания нуклонов, и извлечения количественной информации о величине f_{GT}^0 из сечения возбуждения $J^\pi = 0^-, T=0$, $E^* = 10,95$ МэВ уровня ядра ^{16}O или полного сечения возбуждения подпороговых состояний.

Показано, что сравнение полного сечения возбуждения ядра от рассеяния нейтрино с полным сечением возбуждения от антинейтрино может дать возможность определить значение изовекторной ферми-компоненты нейтрального тока f_F .

Состояния как изоскалярного, так и изовекторного гигантского резонанса, возбужденные в процессе неупругого рассеяния нейтрино или антинейтрино, распадаются преимущественно путем испускания протонов и нейтронов. Нуклоны, испущенные в результате распада таких состояний, могут вызывать различные вторичные реакции, которые могут имитировать изучаемый процесс. Для того, чтобы оценить возможный фон от таких событий, необходимо рассчитать спектры распавших частиц. Поэтому в пункте 4 приводятся рассчитанные спектры нуклонов от распада состояний изоскалярного и изовекторного гигантского резонанса.

И наконец, в пункте 5 приводятся краткие выводы к §I.

В §2 проводится оценка сдвига уровней в мезоатомах за счет поляризации вакуума, обусловленной нейтральными токами. Показано, что роль эффектов, обусловленных нейтральными токами, в мезоатомных переходах пренебрежимо мала.

В четвертой главе рассматриваются эффекты несохранения четности в слабых нуклон-нуклонных взаимодействиях. Рассчитана циркулярная поляризация γ -кванта P_γ , излучаемого неполяризованным ядром ^{175}Lu . Выявлена роль ядерной структуры для правильного описания этого процесса. Показано, что в заторможенных электрических переходах в ядрах помимо обычного зарядового диполя Q , следует учитывать тороидный диполь T .

В пятой главе рассматривается процесс радиационного захвата пиона ядром ^{16}O .

Выдвигается концепция о доминирующей роли состояний типа гигантского резонанса в (π^-, γ) -процессе и на основе этой концепции проводится микроскопический анализ спектров возбуждения и распада ядра ^{16}O в этом процессе. В рамках различных приближений для ядерных волновых функций, описанных в главе I, проанализирована роль ядерной структуры в процессе $^{16}\text{O}(\pi^-, \gamma)$. Также как и в (μ^-, ν_μ) -процессе, за основу берется ядерная модель, учитывающая вклад высших конфигураций как в основном, так и возбужденных состояниях ядра.

В §2 выписаны основные формулы, по которым проводятся расчеты. Получена пионная волновая функция. Исследуется влияние мезоатомных параметров на скорости радиационного захвата пиона.

В §3 исследуются парциальные переходы в $^{16}\text{O}(\pi^-, \gamma)$ -процессе. В рассматриваемой ядерной модели получено согласие с экспериментом для возбуждения связанных состояний в этом процессе. Это является дальнейшим подтверждением рассматриваемой модели. Исследуется резонансная ветвь возбуждения. Рассматриваются возбуждения как отрицательной, так и положительной четности. В этом процессе, в отличие от μ^- -захвата, представляется возможность прямого экспериментального наблюдения возбуждения гигантского резонанса по спектрам γ -квантов, что дает возможность более детально проверить как используемую ядерную модель, так и основные положения теории рассматриваемого процесса.

В §4 рассчитывается спектр жестких γ -квантов. На рис. I этот спектр приводится вместе с экспериментальной гистограммой. Как видно из рисунка, резонансная часть γ -спектра формируется исключительно за счет дипольной ветви возбуждения. Квадрупольная ветвь не коллективизируется подобно дипольной, она оказывается разбросанной по широкому интервалу энергий и определяет собой низкоэнергетическую часть γ -спектра. Вклад этой ветви в полный

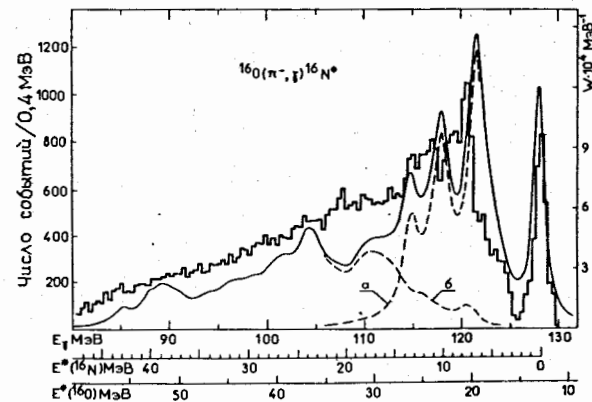


Рис. I. Энергетический спектр жестких γ -квантов в радиационном захвате π^- -мезона ядром ^{16}O . Кривые построены в предположении, что каждый резонанс имеет брейт-вигнеровскую форму с шириной 2 МэВ (в области энергий $E_\gamma \leq 125$ МэВ) и с шириной 1,25 МэВ для γ -линий, соответствующих переходам в связанные состояния. Пунктирной линией выделены вклад дипольной (а) и квадрупольной (б) ветвей резонанса. В виде гистограммы приведен экспериментальный спектр γ -квантов, взятый из работы: J.C.Alder et al. In Proc. VII Int. Conf. on High Energy Physics and Nucl. Structure, Zürich, Abstract, C16.

выход γ -квантов составил 44%. Исследуется захват пиона с различных мезоатомных орбит, оценивается их относительный вклад в полный выход γ -квантов. Показано, что вклад γ -спектра от захвата из S -орбиты очень мал, а низкоэнергетическая часть полного спектра γ -квантов определяется исключительно захватом с p -орбиты мезоатома.

В §5 рассчитаны полный и парциальные нейтронные спектры в процессе $^{16}_0(\pi^-, \gamma)$. На рис. 2 приводится полный спектр нейтронов в этом процессе.

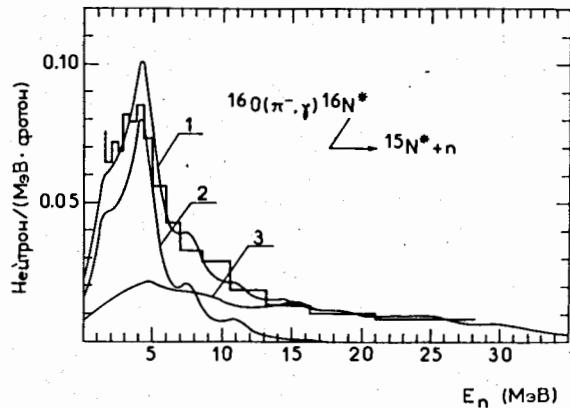


Рис. 2. Спектр нейтронов в процессе $^{16}_0(\pi^-, \gamma)$. Кривые получены в предположении, что каждая нейтронная линия имеет брейт-вигнеровскую форму с шириной 2 МэВ. Полный нейтронный спектр изображен в виде кривой 1. Выделены вклады дипольной (кривая 2) и квадрупольной (кривая 3) ветвей возбуждения. В виде гистограммы приводится экспериментальный спектр нейтронов, взятый из работы: W.-C. Lam et al. Phys.Rev. C10 (1974) 72.

Полученный результат (кривая 1) в целом довольно хорошо воспроизводит основные черты измеренного спектра. Так же как и в спектре возбуждения, в спектре нейтронов в $^{16}_0(\pi^-, \gamma)$ -процессе резонансная структура определяется дипольной ветвью возбуждения. Квадрупольная ветвь обуславливает выход быстрых нейтронов. Таким образом в рамках концепции о резонансном механизме возбуждения ядра появляется возможность описать высокоэнергетическую часть

спектра нейтронов. Получено, что на долю быстрых нейтронов приходится 32% от полного выхода нейтронов при $E_n > 10$ МэВ и 22% при $E_n > 15$ МэВ. Экспериментальная проверка этих предсказаний будет иметь важное значение для проверки многих положений теории.

Исследуется вклад двухнуклонного канала распада в полную вероятность расщепления ядра. Получено, что на долю этих каналов приходится 19% всех событий. Проверка этого результата также важна для исследования теории.

И наконец, в §6 приведены краткие выводы к главе V.

В Приложении А приводятся амплитуды парциальных переходов в процессе μ^- -захвата.

В Приложении В подробно выписаны основные формулы R -матричной теории.

В Приложении С приведены амплитуды фермиевских и гамма-теллеровских матричных элементов, а также интерференционные члены между ними, входящие в сечения нейтронного рассеяния.

В заключении приведены основные результаты диссертации, которые представляются к защите:

1. Построены волновые функции основного и возбужденных состояний ядер $A=16$ и $A=15$ с учетом высших ($2p2h, 1p2h$ и т.д.) конфигураций.

2. На основе выдвинутой концепции о резонансном механизме возбуждения ядра в (π^-, γ) -процессе и в рамках построенной ядерной модели исследованы различные характеристики возбуждения и распада ядерной системы в процессе $^{16}_0(\pi^-, \gamma)$. Получено согласие с экспериментом как для скоростей парциальных переходов в связанные состояния, так и для переходов в надпороговые состояния и для полной скорости захвата. Показано, что резонансная часть γ -спектра формируется исключительно за счет дипольной ветви возбуждения. Квадрупольная ветвь не коллективизируется подобно дипольной. Она оказывается разбросанной по широкому интервалу энергий и определяет собой низкоэнергетическую часть γ -спектра. Вклад квадрупольной ветви возбуждения составляет $\approx 44\%$ от полного выхода γ -квантов R .

3. Так же, как и в спектре возбуждения, в спектре нейтронов в (π^-, γ) -процессе резонансная структура определяется дипольной ветвью возбуждения. В нейтронном спектре, обусловленном квадрупольной ветвью возбуждения, наблюдается выход быстрых нейтронов.

польной ветвью возбуждения, резонансная структура практически не проявляется. Квадрупольная ветвь формирует высокоэнергетическую часть спектра нейтронов. В отличие от μ^- -захвата, где эта ветвь мала и, соответственно, мал выход быстрых нейтронов, в (π^-, γ) -процессе быстрые нейтроны вносят существенный вклад в полный выход нейтронов. Проанализирована также роль двухнуклонного канала распада. Экспериментальная проверка этих предсказаний позволит всесторонне проверить теорию, основанную на резонансном подходе.

4. Совместное рассмотрение результатов, полученных при исследовании процессов (μ^-, ν_μ) и (π^-, γ) подтверждает предположение о том, что существует тесная связь и глубокая аналогия между различными процессами, идущими в атомных ядрах при промежуточных энергиях. Тем самым можно распространить основные предпосылки при рассмотрении этих процессов, на другие процессы, протекающие в атомных ядрах при промежуточных энергиях, например, на процесс нейтринного возбуждения ядра ^{16}O .

5. В рамках проверенной на процессах (μ^-, ν_μ) и (π^-, γ) ядерной модели проведен микроскопический анализ процесса неупругого рассеяния нейтрино на ядре ^{16}O . Предложены различные экспериментальные проверки для определения структуры нейтрального адронного тока. В частности, показано, что измерение парциальных переходов в связанные состояния или суммарного сечения возбуждения подпороговых состояний позволяет извлечь информацию о величине изоскалярной гамов-теллеровской компоненты нейтрального тока f_{GT}^0 . Вычислены спектры распада в (ν, ν') -процессе, которые имеют важное значение для оценки различных фоновых эффектов в этом процессе.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. R.A.Eramzhyan, M.Gmitro, R.A.Sakaev, and L.A.Tosunjan, Nucl.Phys. A290 (1977) 294.
- R.A.Eramzhyan, M.Gmitro, R.A.Sakaev and L.A.Tosunjan, In Proc. VII Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Zürich, 1977, p. 33.
- R.A.Eramzhyan, M.Gmitro and L.A.Tosunjan, In Proc. VII Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Zürich, 1977, p. 337.

М.Гмитро, Р.А.Сакаев, Л.А.Тосунян, Р.А.Эрамжян, доклад на научной конференции "Ломоносовские чтения", изд-во МГУ, Москва, 1978, стр. 49.

2. М.Гмитро, Р.А.Сакаев, Л.А.Тосунян, Р.А.Эрамжян. ОИЯИ, P2-II5II, Дубна, 1978; в сборнике Тезисы XXVIII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Алма-Ата, 1978, стр. 298.
3. V.N.Folomeshkin, S.S.Gershtein, M.Yu.Khlopov, M.Gmitro, R.A.Eramzhyan and L.A.Tosunjan, Report ÚJF Th-58/75/1975/, ŘEŽ u Prahy.
4. V.N.Folomeshkin, S.S.Gershtein, M.Yu.Khlopov, M.Gmitro, R.A.Eramzhyan and L.A.Tosunjan, Nucl.Phys. A267 (1976) 395.
5. В.М.Дубовик, Л.А.Тосунян, Р.А.Эрамжян. Сообщения ОИЯИ, P2-9320, Дубна, 1975.
6. В.М.Дубовик, Л.А.Тосунян, Р.А.Эрамжян. Сообщения ОИЯИ, E4-9979, Дубна, 1976; в сборнике Тезисы XXIII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Ташкент, 1977, стр. 424.
7. R.A.Eramzhyan, M.Gmitro and L.A.Tosunjan, J.Phys. G: Nucl.Phys., 4 (1978) L233.
8. М.Гмитро, Л.А.Тосунян, Р.А.Эрамжян. ОИЯИ, P2-II562, Дубна, 1978.
- R.A.Eramzhyan, M.Gmitro, L.A.Tosunjan, In Proc. Int. Symposium on Photopion Nuclear Physics, Troy, New York, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 декабря 1978 года.