

Т-37

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.17.01

4-85-209

ТЕТЕРЕВА

Татьяна Всеволодовна

РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ МЮОНОВ
СЛОЖНЫМИ ЯДРАМИ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Р.А.Эрамбян

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Н.П.Попов

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Д.В.Гапонов

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Воронежский
государственный университет.

Автореферат диссертации разослан " " ___ 1985 г.

Защита диссертации состоится " " ___ 1985 года на заседании
специализированного совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической
физики Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна,
Московской области.

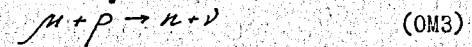
С диссертацией можно ознакомиться в
библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

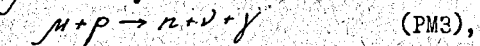
В.И.ЖУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Слабое взаимодействие мюонов с ядрами приводит к двум процес-
сам: обычному μ -захвату



и радиационному μ -захвату



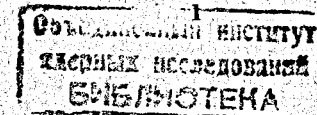
вероятность которого в 10^4 раз меньше, чем первого. Тем не менее
интерес к нему, возникший лет тридцать назад, не ослабевает и теперь.
Прежде всего это связано с сильной чувствительностью процесса РМЗ
к величине формфактора индуцированного псевдоскалярного взаимодей-
ствия g_p . Из четырех формфакторов (векторного, аксиально-векторного,
слабого магнетизма и псевдоскалярного), определяющих слабое взаимо-
действие нуклонов с лептонами, последний известен хуже всего. По-
пытки получить информацию о нем из других процессов β -распада,
ОМЗ - не оправдались из-за слабой чувствительности этих процессов к
величине g_p .

В настоящее время резко возросли возможности экспериментального
изучения РМЗ, о чем свидетельствуют последние эксперименты на мезон-
ных фабриках в Швейцарии и Канаде. Ввод в строй установок типа АРЕС
в ЛЯП ОИЯИ открывает новые возможности в экспериментальном изучении
РМЗ.

Практически в программу всех существующих мезонных фабрик вхо-
дит исследование РМЗ на атомных ядрах. Этим и объясняется большое
количество теоретических работ, в которых РМЗ рассматривается в раз-
личных подходах и приближениях.

Актуальность поставленной задачи определяется и тем, что в
ядерной среде элементарное мюон-нуклонное взаимодействие испытывает
сильное влияние соседних нуклонов. Эта сторона проблемы наименее
разработана. Для понимания и описания процесса μ -захвата на ядрах
на современном уровне необходимо дальнейшее развитие теории, которая
могла бы последовательно учесть это влияние.

Основная цель работы - разработка последовательной микроско-
пической теории радиационного μ -захвата на ядрах, учитывающей влия-
ние ядерной среды, и проведение на ее основе численных расчетов
различных характеристик РМЗ на ядрах.



Исследование проводилось на ядрах ^{16}O и ^{40}Ca , для которых имеется наибольшее число экспериментальных данных и достаточно развитые ядерные модели, описывающие большое число самых разнообразных характеристик.

Для достижения поставленной цели следует:

1. Развить формализм микроскопического подхода для анализа процесса РМЗ и вычисления основных характеристик процесса в импульсном приближении. Провести сравнение с имеющимися теоретическими результатами и экспериментальными данными по РМЗ и выявить роль ядерной модели при описании процесса.
2. Используя преимущества микроскопического подхода, исследовать вклад в общую вероятность процесса от переходов в связанные состояния дочернего ядра, как от наиболее надежного источника получения информации о структуре ядра.
3. Модифицировать гамильтониан мз-захвата, чтобы учесть влияние ядерной среды на элементарное взаимодействие мюона с нуклоном. Развить формализм, позволяющий учесть эту модификацию, и исследовать возникающие эффекты в конкретных ядрах. В первую очередь это относится к аксиально-векторному току, перенормировка которого давно обсуждается в литературе.
4. Проанализировать роль ядерного электромагнитного тока в формировании эффективного гамильтониана РМЗ. Использовать эффекты, возникающие в РМЗ в результате учета общих требований, накладываемых на ядерный электромагнитный ток; провести конкретные расчеты с учетом этих требований.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые радиационный мз-захват последовательно описан в микроскопическом подходе в рамках импульсного приближения.

На примере ядра ^{16}O было установлено, что относительные спектры γ -квантов и скорости РМЗ не зависят от деталей используемых представлений о волновых функциях ядерных состояний. Этот вывод позволил резко снизить требования к качеству ядерных волновых функций и привлечь для изучения РМЗ другие ядра (^{40}Ca), волновые функции состояний которых менее надежны.

Впервые оценен вклад в полную вероятность процесса РМЗ от переходов на связанные состояния, который оказался довольно велик (около 25%). В связи с этим и с дальнейшим совершенствованием экспериментальных возможностей исследования РМЗ поставлен вопрос о важности их выделения, поскольку характеристики таких переходов - надежный источник данных о величине g_p .

Показано, что влияние ядерной среды на величины формфакторов слабого аксиально-векторного тока, в частности, на g_p - значительное. Так, подавление g_p в РМЗ по сравнению с пустотным значением составляет 30-40%.

Однако перенормирующее влияние ядерной среды на относительные спектры и скорости РМЗ на ядре ^{40}Ca оказались меньшими - около 10% (см. рис.1). Из этого результата следует вывод, что расхождение теории

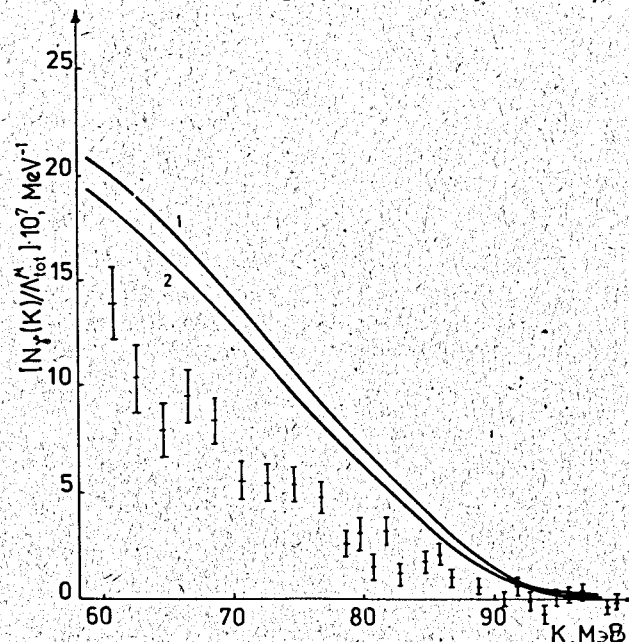


Рис.1

Фотонный спектр при РМЗ на ядре ^{40}Ca . Кривая 1 соответствует импульсному приближению, кривая 2 - учету перенормировки аксиально-векторного тока в гамильтониане РМЗ. \bar{f} - экспериментальные данные по РМЗ на ^{40}Ca (SIN).

$$g_p = 6,48 g_n$$

с экспериментом в описании РМЗ связано не только с перенормировкой аксиально-векторного тока. Возникает необходимость проанализировать ту часть гамильтониана РМЗ, которая связана с электромагнитным током.

В результате анализа роли ядерного электромагнитного тока в РМЗ и учета требования его сохранения показано, что характеристики РМЗ на ядрах ^{16}O и ^{40}Ca резко отличаются от тех, которые получены в импульсном приближении (почти в 2 раза). В результате учета условия сохранения электромагнитного тока в РМЗ фотонные спектры лучше согласуются с имеющимися экспериментальными данными (см. рис.2 и рис.3). Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что для описания РМЗ на ядрах важен как учет перенормировки слабого аксиально-векторного нуклонного тока, так и корректное описание электромагнитного тока.

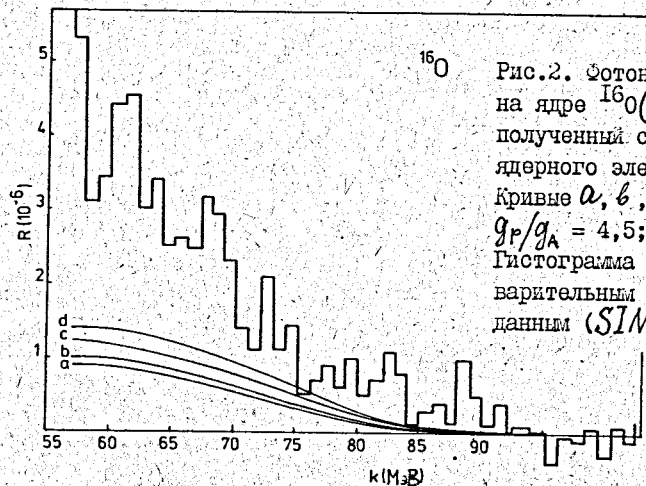


Рис.2. Фотонный спектр при РМЗ на ядре ^{16}O ($R(k) = N_T(k) / \Lambda_{\text{tot}}^M$), полученный с учетом сохранения ядерного электромагнитного тока. Кривые *a, b, c, d* соответствуют $g_p/g_A = 4,5; 7,5; 12$ и 16 . Гистограмма соответствует предварительным экспериментальным данным (SIN).

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах ЛТФ ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ИПФ АН МССР (г. Кишинев), на совещании молодых ученых по малонуклонным системам (Алма-Ата, апрель 1984 г.), на X Международной конференции по физике элементарных частиц и ядер (Гейдельберг 1984 г.). Цикл работ, вошедших в диссертацию, удостоен III премии на конкурсе работ молодых ученых НИИЯФ МГУ им. С.Н. Вернова.

Публикации: По результатам диссертации опубликовано шесть работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения и 6 приложений, содержит 132 страницы машинописного текста, 12 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список литературы включает 82 наименования.

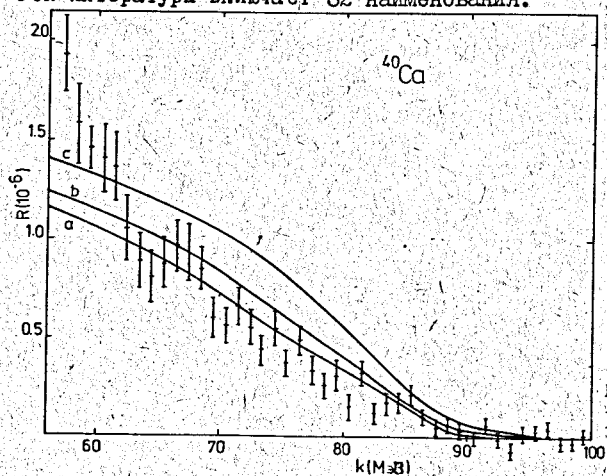


Рис.3. Фотонный спектр при РМЗ на ядре ^{40}Ca ($R(k) = N_T(k) / \Lambda_{\text{tot}}^M$), полученный с учетом сохранения ядерного электромагнитного тока. Кривые *a, b, c* соответствуют $g_p/g_A = 4,5; 7,5$ и 12 . \bar{I} - экспериментальные данные по РМЗ на ^{40}Ca (SIN).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I посвящена описанию радиационного μ -захвата (РМЗ) в стандартной диаграммной технике.

В §1 приводятся основные характеристики РМЗ: фотонные спектры, скорости, циркулярная поляризация фотонов и коэффициент угловой асимметрии.

В §2 рассматривается получение элементарной амплитуды процесса РМЗ в стандартном подходе и в подходе, основанном на использовании низкоэнергетических теорем. Поправки к стандартной амплитуде незначительны, что позволяет сделать заключение о том, что элементарная амплитуда определена довольно надежно и не с ней связаны трудности теории при описании процесса на ядрах.

В §3 анализируется построение эффективного гамильтониана в рамках импульсного приближения, который является отправной точкой для расчетов характеристик РМЗ.

В главе 2, на примере ядер ^{16}O и ^{40}Ca рассматривается процесс РМЗ в рамках импульсного приближения в микроскопическом подходе, проводится сравнение с экспериментальными данными.

В §1 приводится выражение для энергетического спектра γ -квантов в РМЗ в микроскопическом подходе.

В §2 проводится мультипольное разложение матричных элементов.

В §3 обсуждаются используемые ядерные волновые функции для ядер ^{16}O и ^{40}Ca . Для этих ядер используется приближение, в котором основное состояние рассматривается с полностью заполненными оболочками, а резонансное - как суперпозиция частично-дырочных конфигураций (модель А). Для ядра ^{16}O также использовалась улучшенная модель (С): в волновых функциях основного и возбужденных состояний учтены высшие конфигурации. Вклад квадрупольной ветви переходов учитывается в скорости обычного μ -захвата: для ядра ^{16}O их вклад - 10%, для ^{40}Ca - порядка 30%.

В §4 обсуждаются результаты расчетов фотонных спектров и скоростей РМЗ. Показано, что 25% интенсивности приходится на переходы в связанные состояния. Результаты расчетов скоростей РМЗ, нормированных на скорость обычного μ -захвата, для ядра ^{16}O отличаются меньше чем на 5% при использовании моделей А и С. Этот результат позволяет использовать для ядра ^{40}Ca упрощенную модель ядерных волновых функций (А). Вклад скоростных членов гамильтониана в величины фотонных спектров и скоростей РМЗ не превышает 10%. Результаты расчетов характеристик РМЗ в микроскопическом подходе близки к результатам, полученным в подходе, основанном на приближении полноты (различие порядка 10%), и плохо согласуются с экспериментальными данными для ядра ^{40}Ca .

В §5 приведены выражения и результаты вычислений для коэффициента угловой асимметрии фотонов и циркулярной поляризации.

Глава 3 посвящена вопросу перенормировки формфакторов слабого взаимодействия в ядерной среде и влиянию ее на РМЗ.

В §1 обсуждаются эффективные заряды нуклонной квазичастицы по отношению к изоспиновым внешним полям.

В §2 анализируется условие существования индуцированного псевдоскалярного взаимодействия в ядерном веществе и приводятся выражения для эффективного формфактора индуцированного псевдоскалярного взаимодействия Z_{eff} для ОМЗ и РМЗ. Показано, что в случае ОМЗ индуцированный псевдоскалярный формфактор в ядерном веществе существенно (на 55-70%) подавлен по сравнению с пустотным значением, в случае РМЗ это подавление меньше - 30-40%.

В §3 строятся эффективные гамильтонианы ОМЗ и РМЗ с учетом перенормировки формфакторов слабого взаимодействия.

В §4 приведены и обсуждаются расчеты характеристик ОМЗ и РМЗ на ядре ^{40}Ca . Показано, что полная скорость обычного M -захвата подавлена незначительно, фотонные спектры РМЗ в высокоэнергетической области подавлены на 10-15% по сравнению с пустотными характеристиками, отношение спектров РМЗ к полным скоростям обычного M -захвата подавлены на 10%. По сравнению с подавлением псевдоскалярного формфактора подавление характеристик РМЗ небольшое. Это объясняется тем, что основной вклад от псевдоскалярного формфактора идет от диаграммы, чей вклад порядка 20%, а также тем, что эффект подавления от перенормировки гамильтониана происходит в области, где переходная плотность мала.

Учет перенормировок привел к изменениям рассчитанных характеристик в нужную сторону, но не настолько, чтобы получить согласие с экспериментом.

В главе 4 рассматривается влияние условия непрерывности электромагнитного тока на процесс РМЗ.

В §1 показана процедура построения эффективного гамильтониана РМЗ с учетом сохранения электромагнитного тока в рамках импульсного приближения.

В §2 проводится вычисление матричных элементов РМЗ в модифицированном импульсном приближении, учитывающем свойства электромагнитного тока.

В §3 приведены результаты расчетов характеристик РМЗ в модифицированном импульсном приближении на ядрах ^{16}O и ^{40}Ca . Показано, что фотонные спектры и относительные скорости РМЗ почти вдвое меньше характеристик, полученных в стандартном импульсном приближении. Чувствительность характеристик РМЗ в модифицированном импульсном

приближении к Z_{eff} несколько слабее. Результаты вычислений согласуются с экспериментом при значениях Z_{eff} , не противоречащих гипотезе PCAS.

Основные результаты, представленные к защите:

1) Разработан формализм микроскопического подхода для описания процесса радиационного M -захвата в импульсном приближении. Рассчитаны основные характеристики РМЗ: фотонные спектры, относительные спектры, скорости, поляризация и коэффициент угловой асимметрии.

2) На примере ядра ^{16}O показано, что относительные характеристики РМЗ слабо зависят от используемых представлений о деталях ядерной структуры. Этот результат позволил подключить к исследованиям процесс РМЗ на ядре ^{40}Ca , где волновые функции построены на менее реалистической базе. Результаты расчетов совпадают с результатом традиционного подхода, основанного на теореме полноты.

3) В рамках концепции о доминирующей роли гигантских резонансов выявлены переходы, формирующие гигантский резонанс в ядрах ^{16}O и ^{40}Ca в результате РМЗ. Установлено, что в РМЗ основной вклад в вероятность процесса дают те же состояния ядра, которые формируют гигантский резонанс и в ОМЗ, хотя соотношение между интенсивностями переходов в этих двух процессах разное.

4) Показано, что вклад переходов в связанные состояния (для ядра ^{16}O) составляет около 25% от полной вероятности РМЗ. Это позволило поставить вопрос о выделении этих переходов на эксперименте.

5) Построены гамильтонианы ОМЗ и РМЗ, учитывающие перенормировку слабого аксиально-векторного нуклонного тока. С учетом перенормировок рассчитаны спектры фотонов и относительные характеристики РМЗ для ядра ^{40}Ca . Показано, что для скоростей ОМЗ эффект подавления незначителен, а для относительных спектров фотонов - около 10%, что значительно меньше, чем подавление индуцированного псевдоскалярного формфактора для РМЗ в бесконечной среде (30-40%). Сравнение с экспериментальными данными показывает, что учет перенормировок аксиально-векторного тока оказался недостаточен для получения согласия теории с экспериментом.

6) Обсуждена роль уравнения непрерывности электромагнитного тока в построении гамильтониана РМЗ. Рассчитаны характеристики РМЗ на ядрах ^{16}O и ^{40}Ca с учетом сохранения электромагнитного тока. Показано, что происходят резкие изменения в величинах всех характеристик РМЗ по сравнению с традиционным подходом. Эти изменения приводят к тому, что наблюдается лучшее согласие теории с экспериментом.

Таким образом, впервые выявлены практически все основные эффекты, связанные с влиянием ядерной среды на процесс РМЗ. Показано, что они

срабатывают в нужную сторону, уменьшая большое расхождение теории с экспериментом, существовавшее в случае РМЗ.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гмитро М., Камалов С.С., Москаленко Т.В., Эрамжян Р.А. Радиационный захват μ -мезонов на ядрах. Микроскопический расчет для ^{16}O и ^{40}Ca . Сообщение ОИЯИ, Р2-12942, Дубна, 1979.
2. Гмитро М., Камалов С.С., Москаленко Т.В., Эрамжян Р.А. Радиационный захват поляризованных μ -мезонов на ядрах ^{16}O и ^{40}Ca . Сообщение ОИЯИ Р4-12986, Дубна, 1979.
3. Камалов С.С., Москаленко Т.В. Радиационный захват мюонов легкими ядрами. Сборник "Взаимодействие и распад ядерных систем". Изд-во "Штиница", Кишинев, 1981, стр.41-66.
4. Gmitro M., Eramzhyan R.A., Kamalov S.S., Moskalenko T.V. Radiative muon capture on nuclei. Microscopic calculation for ^{16}O and ^{40}Ca . Czechoslovak Journal of physics, 1981, 499-510. (Радиационный захват мюонов на ядрах. Микроскопические вычисления для ^{16}O и ^{40}Ca).
5. Achmedov E.C., Eramzhyan R.A., Teterewa T.V. Radiative muon capture on complex nuclei beyond the impulse approximation. Препринт ИЯИ Р-0368, Москва, 1984. (Радиационный μ -захват на сложных ядрах вне рамок импульсного приближения).
6. Gmitro M., Ovchinnikova A., Teterewa T.V. Radiative muon capture on ^{16}O and ^{40}Ca within a modified impulse approximation. Тезисы X Международной конференции по физике элементарных частиц и ядер (Гейдельберг, 1984, июль 30- август 3).
Abstracts v.1.
(Радиационный захват мюонов на ^{16}O и ^{40}Ca в модифицированном импульсном приближении).

Рукопись поступила в издательский отдел
25 марта 1985 года.