

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

6-91-471

ЕГОРОВ
Вячеслав Георгиевич

УДК 539.165
539.12
539.14

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ УГЛОВЫХ
КОРРЕЛЯЦИЙ С УЧАСТИЕМ НЕЙТРИНО
В ПРОЦЕССАХ БЕТА-РАСПАДА,
ЭЛЕКТРОННОГО И МЮОННОГО ЗАХВАТА**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Актуальность темы диссертации

Слабые взаимодействия описывают такой обширный класс явлений, как β -распад ядер и нейтрона, мюонный и электронный захват, распады мезонов и странных частиц, обратный и двойной β -распад и т. д. Теория, описывающая эти процессы при относительно низких энергиях, носит феноменологический характер и включает в себя как общие соображения симметрии и релятивистской инвариантности, так и некоторые частные гипотезы (нарушение P -четности и т. п.). В наиболее общей форме гамильтониан слабого взаимодействия H_w , отвечающий за β -распад, может быть представлен в виде:

$$H_w = \frac{G}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^5 (\bar{\psi}_p O_i \psi_n) \cdot (\bar{\phi}_e O_i (g_1 + g'_1 \gamma_5) \phi_\nu) + \text{к.с.} \quad (1)$$

где ψ и ϕ - это волновые функции адронов и лептонов, O_i - операторы скалярного (S), векторного (V), тензорного (T), аксиально-векторного (A) и псевдоскалярного (P) взаимодействий, $g_i(q)$ - соответствующие этим взаимодействиям форм-факторы. Так как в процессе β -распада импульс (q), передаваемый между адронами и лептонами, обычно невелик, то эти форм-факторы принято называть константами связи C_i , причем константы C_i отвечают взаимодействиям, сохраняющим P -четность, а C'_i - не сохраняющим. Если учесть, что все эти константы, вообще говоря, комплексны, то оказывается, что формула (1) содержит 20 независимых параметров. Некоторые ограничения на эти параметры следуют из различных дополнительных гипотез, и потому их экспериментальное определение может служить критерием истинности таких гипотез.

Так, стандартная ($V-A$)-модель подразумевает наличие только двух вариантов взаимодействия: векторного и аксиального - и приводит, таким образом, к соотношению

$$C_s = C'_s = C_T = C'_T = C_P = C'_P = 0 \quad (2)$$

гипотеза о двухкомпонентности нейтрино утверждает, что

$$C_i = C'_i \quad (i = 1..5) \quad (3)$$

а из гипотезы о сохранении комбинированной CP -четности следует

$$\text{Im}(C_i) = \text{Im}(C'_i) = 0 \quad (4)$$

Перечисленные гипотезы в основном согласуются с большинством экспериментальных результатов, однако есть указания на то, что выполняются они не строго, а в некоторых случаях просто неверны

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

БРУДАНИН В. Б.
(ЛЯП ОИЯИ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

ГАПОНОВ Ю. В.
(ИАЭ)

доктор физико-математических наук

ГАНГРСКИЙ Ю. П.
(ЛЯР ОИЯИ)

Ведущая организация:

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии,
г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1991 г.
в _____ часов на заседании Специализированного совета
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (г. Дубна
Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1991 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук

БАТУСОВ Ю. А.

(примером может служить обнаруженное в 1964 году нарушение CP -четности в распаде K^0 -мезона). Что касается возможных примесей S -, T - или P -вариантов взаимодействия, то та точность, которая пока достигнута в экспериментах, не позволяет исключить их присутствия на уровне нескольких процентов. Такова же ситуация и в экспериментах по проверке гипотезы о двухкомпонентности нейтрино (поиск безнейтринного двойного β -распада, конечной массы покоя нейтрино и нейтринных осцилляций).

Кроме того, даже сами стандартные модели содержат много неопределенных параметров. Так, в случае мюонного захвата из-за большой величины передаваемого импульса в рамках $V-A$ -теории существенное значение приобретают форм-факторы индуцированных тензорного, скалярного и псевдоскалярного взаимодействий, а также слабого магнетизма. Численные оценки этих форм-факторов, получаемые из гипотез о сохранении векторного тока, G -инвариантности и частичном сохранении аксиально-векторного тока также нуждаются в экспериментальной проверке.

Таким образом, эксперименты, направленные на исследование различных эффектов, обусловленных возможными отклонениями от стандартной модели слабого взаимодействия, а также на определение различных параметров этой модели, являются весьма актуальными. Наиболее информативны из них эксперименты по измерению угловых корреляций в процессах распада. Именно в таких экспериментах было впервые открыто нарушение P -четности и измерена спиральность нейтрино. Однако, по целому ряду как принципиальных, так и чисто технических причин, такие эксперименты чрезвычайно сложны и очень немногочисленны. По-видимому, методика их проведения себя уже исчерпала, и для получения более точных результатов, а также для расширения круга исследуемых процессов, необходима разработка новых экспериментальных подходов.

Основными целями настоящей диссертации являлись :

а) Исследование спин-нейтринной угловой корреляции в распаде ядра ^{56}Co - определение знака магнитного момента этого ядра и измерение величины корреляционного коэффициента; разработка для этой цели новой методики, заключающейся в измерении доплеровского сдвига γ -излучения, сопровождающего ϵ -захват в поляризованных ядрах.

б) Разработка методики измерения спин-нейтринной угловой корреляции при ϵ -захвате по доплеровскому сдвигу поляризованного γ -излучения ; расчет характеристик поляриметра и величины ожидаемого эффекта.

в) Исследование бета-нейтринной угловой корреляции в β -распаде ядер ^{24}Na (определение времени жизни возбужденного уровня в дочернем ядре и величины корреляционного коэффициента, определение отношения фермиевского и гамов-теллеровского матричных элементов β -перехода); разработка для этой цели экспериментальной методики, основанной на измерении доплеровского сдвига γ -излучения, регистрируемого в совпадении с β -частицами; разработка адекватной модели поведения иона отдачи в веществе.

г) Разработка методики измерения различных угловых корреляций в ϵ -захвате и β -распаде по вторичному оптическому излучению ; расчет величины ожидаемых эффектов.

д) Проведение методических экспериментов по исследованию мюон-нейтринной угловой корреляции при захвате поляризованных мюонов ядрами ^{28}Si ; разработка методики определения времен жизни уровней дочернего ядра, заселяемых при μ -захвате, и величины форм-фактора индуцированного псевдоскалярного взаимодействия.

Научная новизна и практическая значимость работы

Впервые разработан метод измерения спин-нейтринной угловой корреляции в ϵ -захвате поляризованных ядер по доплеровскому сдвигу γ -квантов, излучаемых дочерним ядром отдачи после испускания нейтрино и регистрируемых Ge(Li) детектором в противоположных направлениях. Метод может использоваться также для определения степени поляризации ядер (включая ее знак) и в том случае, когда спин дочернего ядра равен $1/2$ или 0 . Данный метод признан изобретением и защищен авторским свидетельством; на его основе проведено исследование распада поляризованных ядер ^{56}Co , в результате чего впервые определен знак магнитного момента ядра ^{56}Co и измерен коэффициент спин-нейтринной угловой корреляции.

Новым является также предложенный в диссертации метод измерения спин-нейтринной угловой корреляции в ϵ -захвате по доплеровскому сдвигу циркулярно поляризованных γ -квантов, регистрируемых Ge(Li) детектором при противоположном направлении магнитного поля в комптоновском поляриметре; этот метод также признан изобретением. Проведенные расчеты показывают его применимость, например, для исследования распада ядер ^{56}Co .

Разработана методика измерения бета-нейтринной угловой корреляции по доплеровскому сдвигу γ -квантов, регистрируемых в совпадении с β -частицами, испускаемыми в противоположных направлениях. Работоспособность ее доказана при исследовании распада ядер ^{24}Na , в результате

чего измерены время жизни возбужденного состояния в ядре ^{24}Mg и корреляционный коэффициент; для объяснения поведения иона отдачи в твердом веществе разработана новая модель, учитывающая как наличие потенциальной ямы в узле решетки, так и фоновое взаимодействие с решеткой в целом.

Впервые разработаны способы измерения угловых корреляций в ϵ -захвате и β -распаде с использованием оптических методов. Проведенные расчеты ожидаемых эффектов доказывают применимость предложенного подхода для исследования распада ядер ^7Be и ^{37}Ag . Показана принципиальная возможность измерения оптическими методами тройной спин-бета-нейтринной корреляции, чувствительной к нарушению CP -четности. Часть материалов, составляющих основу данного метода, защищена тремя авторскими свидетельствами.

Предложенная в диссертации методика исследования мюон-нейтринной корреляции также является новой и ранее нигде не применявшейся. Ее работоспособность доказана в пробных экспериментах с кремниевой мишенью, в результате чего показана возможность одновременного измерения времени жизни возбужденных состояний и оценки форм-фактора индуцированного псевдоскалярного взаимодействия.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 40 и 41 Всесоюзных конференциях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ленинград и Минск), на Международной школе по слабым взаимодействиям при низких энергиях LEWI'90 (Дубна), на семинарах по физике атомного ядра ЛЯП ОИЯИ (Дубна), семинарах в Католическом университете (Лювен, Бельгия) и в Центре ядерной спектроскопии и масс-спектрометрии (Орсэ, Франция).

Главные положения диссертации отражены в 10 опубликованных работах; некоторые из материалов признаны изобретениями и защищены 5 авторскими свидетельствами.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, в котором кратко сформулированы общие выводы. Работа изложена на 109 страницах, содержит 5 таблиц и 42 рисунка. Список использованной литературы включает 100 наименований.

На защиту выносятся :

а) Метод измерения спин-нейтринной угловой корреляции в ϵ -захвате поляризованных ядер по доплеровскому сдвигу γ -излучения.

б) Исследование по этому методу распада ^{56}Co ; определение знака магнитного момента этого ядра ; измерение коэффициента спин-нейтринной угловой корреляции:

в) Метод измерения спин-нейтринной угловой корреляции при ϵ -захвате по доплеровскому сдвигу поляризованного γ -излучения.

г) Измерение бета-нейтринной угловой корреляции в β -распаде ядер ^{24}Na по доплеровскому сдвигу γ -излучения, совпадающего с β -частицами; разработка адекватной модели поведения иона отдачи в веществе ; определение времени жизни возбужденного уровня в дочернем ядре и коэффициента бета-нейтринной корреляции.

д) Методика измерения различных угловых корреляций в ϵ -захвате и β -распаде по вторичному оптическому излучению.

е) Исследование мюон-нейтринной угловой корреляции при захвате ядрами ^{28}Si поляризованных мюонов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проведения новых экспериментов по измерению различных угловых корреляций с участием нейтрино и необходимость разработки новых подходов к исследованиям в этой области, сформулированы цели и описана структура диссертации:

Первая глава посвящена экспериментам по исследованию спин-нейтринных угловых корреляций в электронном захвате.

В первом параграфе этой главы дается обзор ранее выполненных работ по измерению коэффициента $(I-\nu)$ корреляции B .

Второй параграф содержит описание ^{1.2/} предлагаемого нового метода для измерения этого коэффициента, когда в качестве I используется спин материнского ядра. Метод состоит в следующем. Исследуемые ядра, внедренные в ферромагнитную матрицу, помещаются в рефрижератор растворения $^3\text{He}/^4\text{He}$, охлаждаются до температуры 10..20 мК и поляризуются сверхтонким магнитным полем матрицы (рис.1), при этом степень ориентации ядер B_2 контролируется по изменению интенсивности γ -излучения известной мультипольности. Затем поочередно производится измерение энергии γ -квантов, излучаемых ядрами отдачи вдоль

поляризуемого магнитного поля и против него. Так как направление

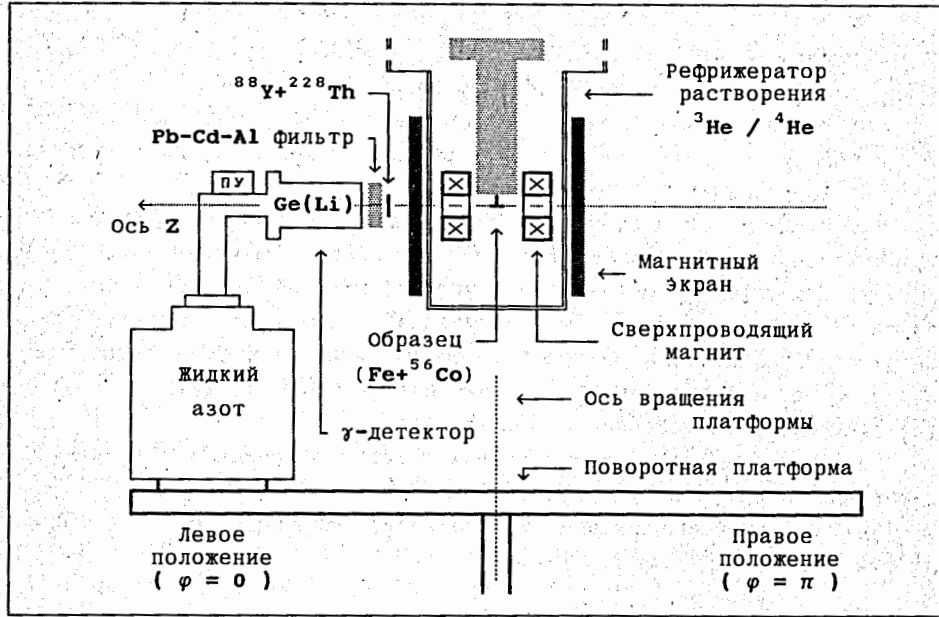


Рис. 1. Установка для измерения спин-нейтринной корреляции при распаде поляризованных ядер ^{56}Co .

отдачи ядра связано с корреляционным коэффициентом B и не является изотропным, то вследствие эффекта Доплера энергии измеренных γ -пиков отличаются на величину SE_γ , зависящую от искомого коэффициента B , степени поляризации ядер f_1 , с точностью до знака определяемой из B_2 , и фактора F , учитывающего замедление ядра отдачи при его движении в веществе матрицы:

$$SE_\gamma = E_\gamma^{\varphi=0} - E_\gamma^{\varphi=\pi} = -\frac{2}{3} \cdot B \cdot f_1 \cdot Q_1 \cdot F \cdot E_\gamma \cdot E_D / \text{MC}^2. \quad (5)$$

Для оценки фактора F можно использовать одну из предложенных в диссертации моделей. Следуя первой из них, ион отдачи совершает в узле решетки затухающие колебания с амплитудой, равной расстоянию между атомами. Вторая (более реальная) модель состоит в том, что движущимся считается не одиночный ион, а целая группа атомов, внутри которой за счет фоновонного взаимодействия существует термодинамическое равновесие, и размеры которой растут со скоростью звука. Это соответствует тому, как если бы ион отдачи имел "эффективную" массу, растущую по закону

$$M_{\text{eff}}(t) = M_0 + M_h \cdot \left[\frac{V_s \cdot t}{\lambda} \right]^3, \quad (6)$$

где M_h - масса атома решетки, а V_s - скорость звука в ней.

Таким образом, измерив доплеровский сдвиг SE_γ , можно по формуле (5) найти коэффициент B .

В третьем параграфе описана процедура исследования распада ядер ^{56}Co по предложенной методике; результаты эксперимента приводятся и обсуждаются в четвертом параграфе.

Эти результаты иллюстрируются рисунком 2, на котором приведены экспериментальные значения доплеровских сдвигов, полученные во второй серии измерений для γ -линии 2598 кэВ; там же показано их статистическое распределение (сумма гауссианов с дисперсиями, равными ошибкам каждого измерения).

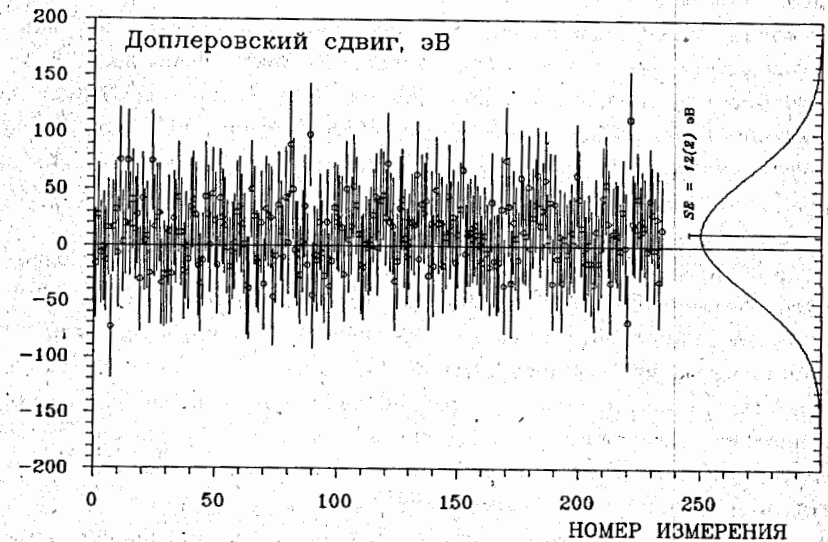


Рис. 2. Доплеровские сдвиги γ -линии 2598 кэВ.
(Каждая точка соответствует сдвигу между двумя 15-минутными измерениями при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$: $SE_\gamma^{\text{exp}} = E_\gamma^{\varphi=0} - E_\gamma^{\varphi=\pi}$.)

После усреднения результатов по всем сериям измерений и по всем исследованным γ -линиям получен вывод, что ядра ^{56}Co ориентируются "по полю", то есть, что магнитный момент ядра ^{56}Co положителен:

$$\text{sign}(\mu) = +1 \quad (7)$$

и что для двух использованных моделей торможения ионов отдачи величина корреляционного коэффициента B составляет, соответственно,

$$\langle B^{\text{exp. (1)}} \rangle = (-) 0.67 \pm 0.14, \quad (8)$$

$$\langle B^{\text{exp. (2)}} \rangle = (-) 0.84 \pm 0.15, \quad (9)$$

Таким образом, предложенный метод позволяет исследовать ядра, распадающиеся электронным захватом с образованием достаточно короткоживущих возбужденных состояний. Измеряемые при этом доплеровские сдвиги γ -линий несут в себе информацию о коэффициенте $(\nu - I)$ угловой корреляции, знаке и величине магнитного момента распадающегося ядра, а также о поведении иона отдачи в кристаллической решетке. Метод остается работоспособным и в случае $I_{0,1,2} = 1/2$, когда традиционные измерения асимметрии γ -излучения дают тождественно нулевой результат.

Метод может быть полезным при изучении слабых и сверхтонких взаимодействий, а также при исследованиях, связанных с физикой твердого тела. Следует, однако, отметить, что для получения с помощью предложенного метода более достоверных результатов необходимо или уточнить значения времен τ , или вообще избежать этих модельных оценок, например, поляризуя ядра в газе или атомном пучке путем оптической накачки.

В последнем, пятом параграфе первой главы описан альтернативный метод ^{13/} измерения $(I-\nu)$ корреляции по доплеровскому сдвигу E_{γ} , когда в качестве I выступает спин не материнского, а дочернего ядра. В этом случае эксперимент очень похож на широко известный эксперимент Гольдгабера, Гродзинса и Саньяра, но вместо резонансного рассеяния для определения доплеровского сдвига γ -квантов можно применить непосредственное измерение их энергии Ge(Li) детектором. Такой метод может дать существенные преимущества.

Во-первых, поскольку здесь не используется резонансное рассеяние, то нет необходимости выбирать для исследования только такие распады, в которых регистрируемый γ -переход идет на основное состояние стабильного изотопа, имеющего в природе большую распространенность (иными словами, нет нужды в существовании рассеивателя). Это сразу резко расширяет круг ядер, для которых можно было бы ставить такой эксперимент.

Во-вторых, поскольку не требуется обязательной для условия резонанса компенсации отдачи от нейтрино и γ -кванта, то допускается любое соотношение E_{γ} и E_{ν} , а это означает, что можно регистрировать

более "жесткие" γ -кванты и тем самым значительно повысить эффективность поляриметра δ , что может привести к качественно новым возможностям.

Действительно, в экспериментах Гольдгабера и др. главным источником погрешности было незнание точной величины δ , так как оно определяется степенью магнитного насыщения железа, его химическим составом и микроструктурой, а также краевыми эффектами, учесть которые очень трудно. Прокалибровать же величину δ практически было невозможно, так как для этого потребовался бы источник γ -излучения с точно известной ненулевой циркулярной поляризацией. Если же величина δ составляет не единицы, а десятки процентов, то появляется возможность точного измерения δ по разности счета прошедших неполяризованных γ -квантов при наличии и в отсутствие магнитного поля.

В этом же параграфе приводится предварительный расчет ожидаемого эффекта для случая распада ⁵⁶Co - для γ -линии 2598 кэВ измеряемый сдвиг должен составлять около 4 эВ.

Поскольку в предложенной постановке к источнику не предъявляется никаких ограничений по активности, возможно проведение таких измерений с применением кристалл-дифракционного γ -спектрометра, имеющего рекордное разрешение, но требующего интенсивных источников.

Вторая глава диссертации посвящена корреляционным экспериментам другого типа - исследованию бета-нейтринных корреляций в β -распаде.

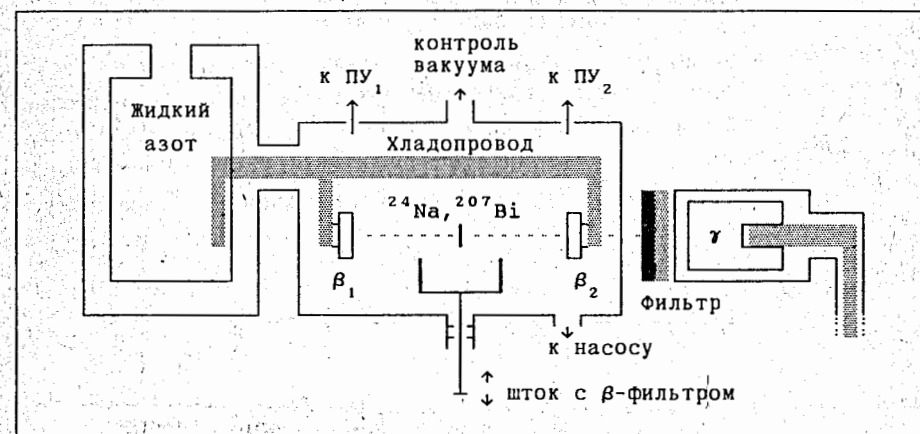


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения бета-нейтринной угловой корреляции при распаде ядер ²⁴Na.

В первом параграфе этой главы дан обзор экспериментов по измерению коэффициента $(\beta-\nu)$ корреляции α .

Во втором параграфе описана установка⁴⁴, разработанная для проведения таких исследований (рис.3), и детали эксперимента по измерению $(\beta-\nu)$ корреляции в распаде ядер ^{24}Na .

Тонкая алюминиевая фольга с находящимися в ней атомами ^{24}Na помещалась в вакуумную камеру и располагалась между двумя $\text{Si}(\text{Li})$ детекторами, регистрирующими β -частицы, вылетающие в противоположных направлениях. Снаружи камеры был установлен $\text{Ge}(\text{Li})$ детектор, который регистрировал γ -кванты в совпадении с этими β -частицами. Обработка данных заключалась в определении энергетического сдвига $\delta E_\gamma(E_\beta)$ между энергиями γ -квантов, совпадающих с β -частицами, испущенными параллельно и анти-параллельно им. Результаты этой обработки для двух γ -переходов (2754 кэВ и 1368 кэВ) приведены на рис.4. Как видно из рисунка, первый из этих переходов действительно "помнит" отдачу ядра после β -распада и потому имеет доплеровский сдвиг, определяемый как энергией β -частицы, так и углом вылета антинейтрино. Второй же γ -переход за время жизни уровня ($\tau \approx 2$ пс) успевает "забыть" отдачу.

В третьем параграфе описана комбинированная модель торможения иона отдачи, позволяющая корректно учесть как наличие потенциальной ямы в узле кристаллической решетки, так и фононное взаимодействие иона, вышедшего за пределы ямы, со всей решеткой в целом.

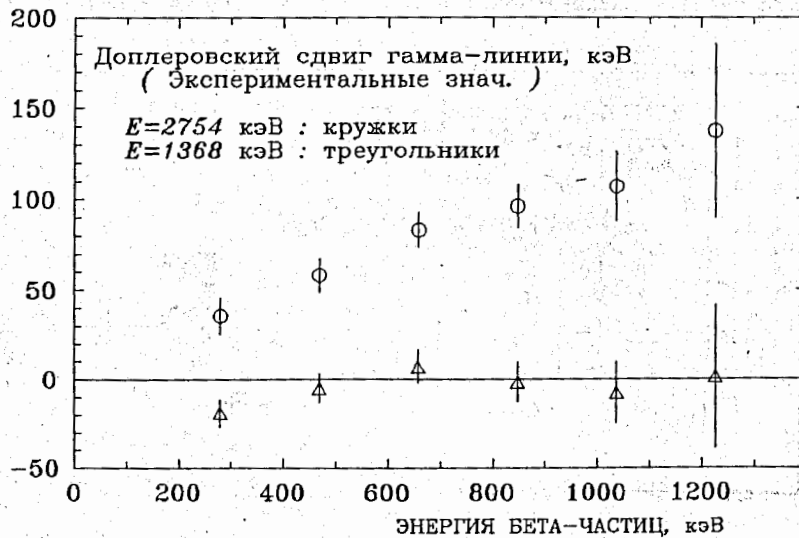


Рис. 4. Экспериментальные значения доплеровских сдвигов γ -линий 2754 кэВ (кружочки) и 1368 кэВ (треугольники).

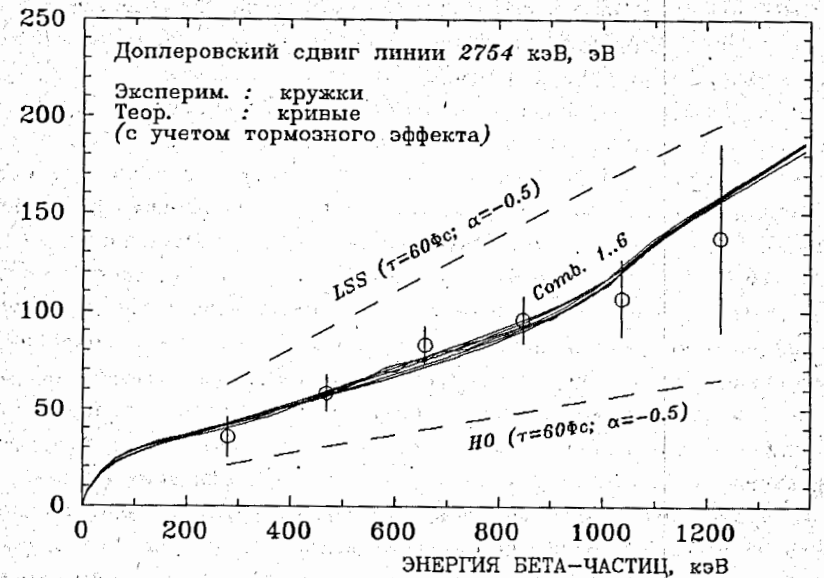


Рис. 5. Теоретические значения доплеровских сдвигов γ -линии 2754 кэВ, рассчитанные с учетом торможения ионов отдачи по модели Линдхарда-Шарфа-Шютта (LSS), модели гармонического осциллятора (HO) и комбинированной модели (Сomb.).
(Кружками обозначены экспериментальные значения).

В последнем параграфе приводятся результаты фитирования с использованием предложенной модели при различной форме потенциальной ямы (рис.5). Показано, что при этом возможно одновременное определение как времени жизни уровня (τ), так и корреляционного коэффициента (α). Оптимальные значения этих параметров, найденные в описанном эксперименте, составили :

$$\tau_{(4123\text{кэВ})} = 60 \pm 12 \text{ фс} \quad (10)$$

$$\alpha = -0.53 \pm 0.38 \quad (11)$$

что позволило дать оценку верхней границы примеси фермиевского матричного элемента в исследованном β -переходе :

$$|M_F| / |M_{CT}| \leq 0.25 \quad (12)$$

В третьей главе предлагается несколько принципиально новых методов исследования угловых корреляций в β -распаде и ϵ -захвате, использующих оптические эффекты /5.9/.

В качестве вторичного излучения, испускаемого ионом (атомом) отдачи, можно регистрировать фотоны оптического диапазона, которые излучаются электронной оболочкой при ее успокоении после возбуждения, сопровождающего ядерный распад. Процесс возбуждения и успокоения оболочки определяется электромагнитным взаимодействием и длится $10^{-12} \dots 10^{-10}$ с, после чего в течение $10^{-9} \dots 10^{-7}$ с изменяется состояние уже только валентных электронов, энергия связи которых составляет единицы эВ. Именно эти последние переходы в оболочке и сопровождаются излучением в оптическом диапазоне. Если среда, в которой происходит распад, имеет плотность, достаточно малую для того, чтобы ион отдачи не успел за указанное время существенно изменить свою скорость, то испускаемые фотоны должны (как и γ -кванты в предыдущих главах) иметь доплеровский сдвиг, который несет информацию о направлении отдачи.

В качестве примера рассмотрен распад ядер ^{37}Ag , находящихся в виде разреженного газа в оптически прозрачной кювете. Показано, что энергия отдачи ядра, равная 9.6 эВ, должна привести к доплеровскому уширению линии $\lambda_2 = 479.454$ нм на величину ± 14.79 ГГц, что в 20 раз больше естественного уширения линий, вызванного тепловым движением, и вполне поддается измерению с помощью чувствительного спектрографа.

Такой же эффект может наблюдаться и для линии $\lambda_1 = 542.323$ нм, на которой можно производить резонансное возбуждение при использовании лазера (в этом случае путем перестройки лазера на величину ± 13.07 ГГц сканируется длина волны λ_1 , а регистрация λ_2 служит лишь для определения наличия или отсутствия резонансного поглощения λ_1).

Измерение профиля такой уширенной линии λ_1 или λ_2 явилось бы первым в мире экспериментом по оптической регистрации ядер отдачи при испускании нейтрино.

Поскольку, благодаря наличию сверхтонкого взаимодействия, круговая поляризация фотонов связана с поляризацией ядер в атомах, излучающих (или поглощающих) эти фотоны (явление, обратное широко известной "оптической накачке"), то, промерив профиль линии при различной циркулярной поляризации фотонов λ_1 или λ_2 , можно определить линейную поляризацию этих ядер и, тем самым, найти коэффициент спин-нейтринной угловой корреляции V .

В качестве примера на рисунке 6 показан расчетный профиль линии λ_2 при различной поляризации (σ^+ и σ^-) регистрируемых фотонов.

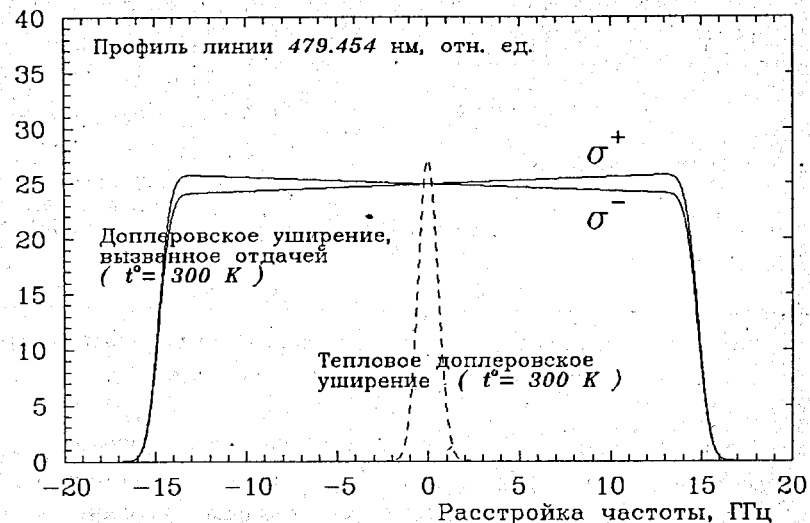


Рис. 6. Профиль линии $\lambda = 479.454$ нм, имеющей обычное тепловое доплеровское уширение (пунктир) и уширение, обусловленное отдачей после электронного захвата (сплошная кривая).

Если по описанной методике исследовать ядра, распадающиеся β -распадом, и кроме фотонов регистрировать также совпадающие с ними по времени β -частицы, то кроме $(I-\nu)$, можно исследовать $(I-\beta)$ и $(\beta-\nu)$ корреляции, причем такая информация будет получаться одновременно.

Описан также альтернативный вариант постановки корреляционных экспериментов с использованием оптических методов, когда регистрация поляризованных фотонов служит только для определения поляризации ядер отдачи, а для выделения направления их импульса (и, следовательно, импульса нейтрино) применяется поверхность твердой подложки, на которую тонким слоем нанесен исследуемый радиоактивный источник (рисунок 7).

Если произойдет распад такого ядра (например, ^7Be), находящегося на твердой поверхности, то в зависимости от направления вылета нейтрино (в левую или правую полусферу) ион отдачи либо оторвется от поверхности и будет двигаться в вакууме, испуская фотоны с длиной волны, характерной для $^7\text{Li}^+$, либо углубится в вещество подложки, и тогда излучаемые им фотоны (если они вообще смогут выйти из глубины подложки) будут иметь совершенно иную длину волны, характерную не для свободного иона $^7\text{Li}^+$, а для некоего (псевдо-) молекулярного его

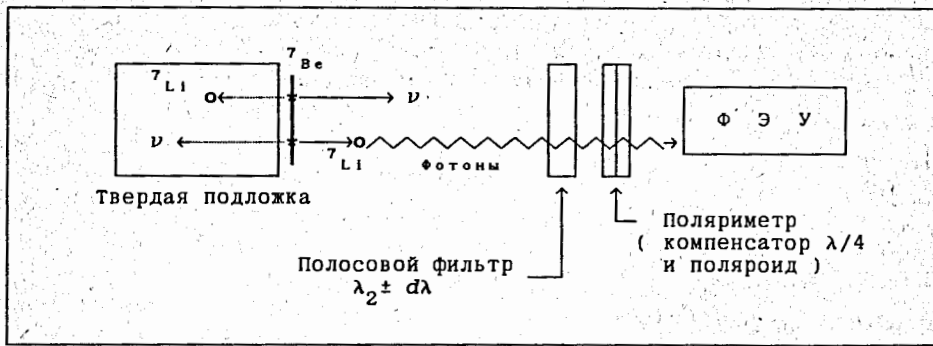


Рис. 7. Оптическая установка для исследования спин-нейтринной угловой корреляции в распаде ядер ${}^7\text{Be}$.

состояния. В этом случае для фильтрации таких фотонов не требуется интерферометр высокого разрешения, и установка значительно упрощается.

В заключение, в третьей главе предложен вариант установки, не имеющий осевой симметрии и позволяющий, в принципе, измерять тройную ($I-\beta-\nu$) корреляцию, чувствительную к возможному нарушению комбинированной CP -четности.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию угловых корреляций в процессе захвата ядрами отрицательных мюонов ^{10/}.

В первом параграфе этой главы даются теоретические предпосылки таких экспериментов, дающих информацию о величине форм-фактора индуцированного псевдоскалярного взаимодействия g_p .

Во втором параграфе изложен необходимый формализм угловых корреляций между вектором поляризации мюонов (\vec{P}), направлением вылета мюонного нейтрино ($\vec{\nu}$) и направлением регистрации γ -квантов, каскадно сопровождающих μ -захват, (\vec{k}). Эта корреляция выражается через набор коэффициентов (α, c_1, a_2, b_2), зависящих, в свою очередь, от отношения амплитуд $x_M = M_1(+2)/M_1(-1)$ или, в первом приближении, от отношения констант $x_C = G_p/G_A$.

При проведении корреляционного эксперимента величина \vec{P} измеряется по известной (μSR)-методике, \vec{k} задается взаимным расположением мишени, мюонного пучка и γ -детектора, а величина $\vec{\nu}$ определяется по доплеровскому сдвигу энергии E_γ , достигающему в случае легких ядер нескольких кэВ. При этом, поскольку кинетическая энергия ядер отдачи составляет сотни кэВ, фактор ослабления сдвига из-за торможения иона в веществе мишени достаточно надежно может рассчитываться по модели LSS .

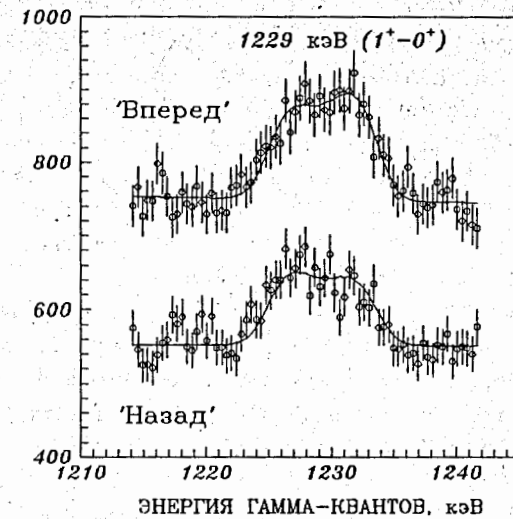


Рис. 8. Профиль γ -линии 1229 кэВ, измеренной в геометрии "вперед-назад" (точки) и расчетные кривые при оптимальных значениях параметров.

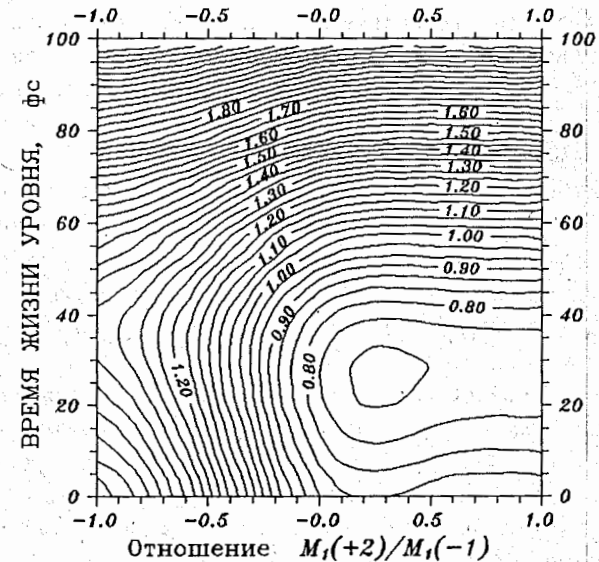


Рис. 9. Поверхность функционала χ^2 при совместном фитировании линий 1229 и 2171 кэВ в геометрии "вперед-назад" (по осям отложены время жизни уровня τ и отношение x_M).

В качестве примера приводятся расчеты уширения γ -линий при использовании мишеней из графита, магния и кремния.

В третьем параграфе дано подробное описание установки для исследования угловых корреляций при μ -захвате в кремниевой мишени, а также приводятся результаты двух пробных измерений в прямоугольной геометрии (при этом фактически измеряются только корреляционный коэффициент a_2 и время жизни уровня τ) и в геометрии "вперед-назад" (измеряются все корреляционные коэффициенты и τ).

На рисунках 8 и 9 представлены результаты фитирования одной из γ -линий и поверхность $\chi^2(x_M, \tau)$, позволяющие сделать вывод о работоспособности данной методики и о возможности с ее помощью одновременно измерять как корреляционные коэффициенты, так и времена жизни возбужденных состояний дочерних ядер.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертации:

Проведено исследование спин-нейтринной угловой корреляции в распаде поляризованных ядер ^{56}Co , в результате чего впервые определен знак магнитного момента ядра ^{56}Co и измерена величина корреляционного коэффициента "B". Для исследования был применен принципиально новый метод, который заключается в измерении доплеровского сдвига γ -квантов, излучаемых дочерним ядром. Метод может также использоваться для определения степени поляризации ядер (включая ее знак) и в том случае, когда спин дочернего ядра равен 1/2 или 0.

Разработан метод измерения спин-нейтринной угловой корреляции в ϵ -захвате по доплеровскому сдвигу циркулярно поляризованных γ -квантов, излучаемых дочерним ядром и регистрируемых при противоположном направлении магнитного поля в комптоновском поляриметре. Проведены расчеты ожидаемого эффекта в случае применения предложенного метода для исследования распада ядер ^{56}Co .

Проведено исследование бета-нейтринной угловой корреляции в распаде ядер ^{24}Na , в результате чего измерены время жизни возбужденного состояния в ядре ^{24}Mg и величина корреляционного коэффициента "а", а также оценена примесь фермиевского матричного элемента в β -переходе. Для исследования применялся метод, также основанный на измерении доплеровского сдвига γ -квантов, излучаемых дочерним ядром отдачи после разрешенного β -распада, но регистрируемых в совпадении с β -частицами, испускаемыми в противоположных направлениях. Для объяснения поведения иона отдачи в твердом веществе разработана комбинированная модель, учитывающая как наличие

потенциальной ямы в узле решетки, так и фонное взаимодействие с решеткой в целом.

Разработана методика измерения различных угловых корреляций в ϵ -захвате и β -распаде по вторичному оптическому излучению, испускаемому атомами (ионами) отдачи. Проведены расчеты ожидаемых эффектов в случае распада ядер ^7Be и ^{37}Ar . Показана принципиальная возможность измерения оптическими методами тройной спин-бета-нейтринной корреляции, чувствительной к нарушению CP-четности.

Проведены методические эксперименты по исследованию угловых корреляций в процессе ядерного захвата поляризованных мюонов в кремниевой мишени, в результате чего показана возможность одновременного измерения времени жизни возбужденных состояний дочерних ядер и оценки величины форм-фактора индуцированного псевдоскалярного взаимодействия. Для проведения таких экспериментов разработана методика, основанная на измерении доплеровского контура γ -линий, регистрируемых под разными углами к оси поляризации мюонного пучка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.Г.Егоров, "Способ определения степени ориентации радиоактивных ядер". Авт. Свид. SU 1633369, кл. G 01 T 1/32, 1989.
2. V.G.Egorov, V.B.Brudanin, O.I.Kochetov, V.N.Pavlov, J.Slovak, "Investigation of spin-neutrino correlation in decay of polarized ^{56}Co nuclei"; Nucl. Phys. A524 (1991) 425;
Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна, (1990) Д6-90-358;
Proc. of Int. School "Low Energy Weak Interactions", Dubna, September 4-13, (1990) 62.
3. В.Г.Егоров, "Способ определения спин-нейтринной угловой корреляции при электронном захвате". Авт. свид. SU 1612765, кл. G 01 T 1/38, 1989.
4. В.Г.Егоров, Ш.Бриансон, В.Б.Бруданин, В.Воробел, Ц.Вылов, А.Маринов, Я.Рак, А.В.Саламатин, И.Штэкл, "Исследование β - ν угловой корреляции в распаде ^{24}Na ". Сообщения Объединенного института ядерных исследований, Дубна, 1991, Д6-91-199.

5. В. Г. Егоров, А. А. Солнышкин, "Бета-нейтринные угловые корреляции". Сообщения Объединенного института ядерных исследований, Дубна, 1985, P15-85-862, 27.
6. В. Г. Егоров, А. А. Солнышкин. "Способ измерения бета-нейтринных угловых корреляций при бета-распаде и устройство для его осуществления" авт. свид. SU 1182452, кл. G 01 T 1/36, 1984.
7. В. Г. Егоров, А. А. Солнышкин. "Устройство для измерения угловых корреляций при бета-распаде". Авт. свид. SU 1257727, кл. H 01 J 49/40, 1984.
8. В. Г. Егоров, "Поиск нарушения T-инвариантности в бета-распаде". Сообщения Объединенного института ядерных исследований, Дубна, 1985, P15-85-862, 11.
9. В. Г. Егоров. "Устройство для измерения тройных угловых корреляций при бета-распаде". Авт. свид. SU 1285420, кл. G 01 T 1/29, 1985.
10. В. Г. Егоров, В. Б. Бруданин, В. Воробел, Ц. Вылов, А. К. Качалкин, Я. Рак, А. В. Саламатин, И. Штэкл, И. А. Ютландов, "Спин-нейтринные угловые корреляции при ядерном захвате поляризованных мюонов". Сообщения Объединенного института ядерных исследований, Дубна, 1991, P6-91-430.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 октября 1991 года.