

УБа 242388  
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени В. И. ЛЕНИНА

На правах рукописи

МЕТЕЛИЦА ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ

ВРЕМЕННЫЕ БИЕНИЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПАДНЫХ  
КВАНТОВ ПРИ ТРЕХФОТОННОЙ АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНИЯ  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

01.04.02. - теоретическая и математическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск 1991

Работа выполнена в НИИ ядерных проблем при Белгосуниверситете  
ин. В. И. Ленина.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,  
профессор Барышевский В. Г.

Официальные оппоненты - член кор. АН БССР, доктор физико-  
математических наук, профессор  
Тонильчик Л. М.

кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник  
Завтрак С. Т.

Ведущая организация - Ленинградский институт ядерной  
физики имени Б. П. Константинова

Защита состоится 7 июня 1991 г. в 10 часов на заседании Специа-  
лизованного совета К 056.03.09 в Белгосуниверситете ин. В. И. Лени-  
на (220050, г. Минск, Ленинский проспект, 4, гл. корпус, ауд. 206).

Автореферат разослан            апреля 1991 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

А. В. Ивашин

Актуальность работы. Исследования взаимодействия позитронов, нюонов с веществом позволяют получать полезную, иногда уникальную информацию. Так, эксперименты по нюонному спиновому вращению ( $\mu\text{SR}$ ) позволяют получать информацию о сверхтонких взаимодействиях нюона (сила атона нюония) с веществом. Позитронные методы анализа дают возможность, например, найти распределение электронов металлов по скоростям, используются в химии. В настоящее время продолжается совершенствование старых и поиск новых методов неразрушающего контроля и исследования вещества. Актуальность этих исследований обуславливается прежде всего тем, что может привести к возможности получения новой информации, недоступной в других экспериментах.

Атом позитрония ( $\text{Ps}$ ) является удобным объектом для проверки квантовой электродинамики так как в нем отсутствует ядро, взаимодействие с которым не может быть учтено в рамках этой теории. Тестирование квантовой электродинамики связанного состояния важно еще и потому, что позволяет заодно проверить некоторые положения квантовой хронодинамики, в которой существуют определенные трудности. В настоящее время существует расхождение в рассчитанных теоретически и измеренных на эксперименте времени жизни атона  $\text{Ps}$ , величины сверхтонкого расщепления основного состояния атона позитрония, что приводит к необходимости дальнейших исследований. В связи с этим представляют интерес другие методы измерения этих величин. Особую актуальность приобретают также новые реалистические предложения по тестированию квантовой электродинамики с помощью позитрония.

Состояние вопроса. В работах В.Т.Барышевского [1-3] было впервые показано, что при аннигиляции позитрония в магнитном поле существует новое явление - временные биения ориентации плоскости распада на три  $\gamma$ -кванта. На основе этого явления можно реализовать новый метод исследования вещества с помощью позитронов. Идея этого метода состоит в следующем [1-3]: поляризованные позитроны тормозятся в веществе и образуют поляризованные атомы позитрония. Внешнее магнитное поле вызывает осцилляции поляризационных характеристик образовавшегося позитрония. Анизотропия углового распределения

10.03.2010

242388

квантов  $\Sigma\gamma$ -распада поляризованного позитрония приведет к биениям во времени скорости счета, которые могут наблюдаться, например, в опытах по регистрации запаздывающих совпадений ядерного  $\gamma$ -кванта ( $\text{Na}^{22}$ ) и аннигиляционных квантов. Новый метод близок по своей идеологии к известному методу ньюниевского спинового вращения  $\mu\text{SR}$ , и, по аналогии с последним, назван методом позитрониевого спинового вращения  $\text{PsSR}$ . Метод  $\text{PsSR}$  основан на определении динамики поляризационных характеристик позитрония в веществе по осцилляциям углового распределения распадных  $\gamma$ -квантов.

В работах [3, 4] было показано, что нормаль к плоскости трехфотонного распада действительно испытывает временные осцилляции. В работах [3, 5] получено кинетическое уравнение, описывающее поведение атома позитрония в среде. Показано также, что обменное взаимодействие вызывает расщепление вырожденных уровней  $m = \pm 1$ .

Необходимо отметить, что главной задачей первых работ являлось обоснование самого факта наличия биений. Прямое экспериментальное наблюдение биений нормали к плоскости  $\Sigma\gamma$ -распада затруднительно. Действительно, в экспериментах непосредственно измеряется распределение направлений импульсов образованных квантов, а не распределение нормали к плоскости распада. Однако, скорость счета неподвижных детекторов будет также испытывать биения, так как взаимное положение наиболее вероятной плоскости распада позитрония и плоскости детекторов (или взаимное положение единственного детектора по отношению к плоскости наиболее вероятного распада) будет осциллировать во времени. В связи с этим возникает необходимость развития теории, позволяющей связать поляризационные характеристики атома позитрония и наблюдаемые экспериментально осцилляции скорости счета, а также позволяющей предсказать наиболее удобные условия наблюдения явления.

Распад поляризованного позитрония был рассмотрен ранее только в работе [6], где приведены квадраты амплитуд аннигиляции позитрония в стационарных состояниях. Результатов этой работы недостаточно для построения теории биений при аннигиляции позитрония. Более того, даже выражения для амплитуд аннигиляции стационарных состояний позитрония приходится пересчитывать, так как в работе [6] не приведены относительные фазы этих амплитуд. Сохранение этих фаз

необходимо ввиду того, что биения являются следствием квантовой интерференции различных стационарных состояний атома позитрония. Для нахождения оптимальной геометрии эксперимента необходим также подробный анализ углового распределения распадных квантов.

**Цель работы.** Цель диссертационной работы состояла в теоретическом обосновании нового метода исследования вещества с помощью позитронов  $P\bar{s}SR$ . Для достижения этой цели необходимо построить теорию временных осцилляций (биений) углового распределения распадных  $\gamma$ -квантов в магнитном поле; проанализировать характерные особенности этих биений и найти оптимальные условия для их экспериментального наблюдения; решить вопрос о характере информации, которую можно получить при экспериментальном наблюдении биений.

**Научная новизна.** Достижение поставленной в диссертационной работе цели требует решения ряда новых задач.

На основе теории жизни виртуальных состояний (Гольдбергер и Ватсон "Теория столкновений") построена общая теория аннигиляции атома позитрония из состояния, являющегося суперпозицией стационарных состояний атома  $P\bar{s}$  в произвольном внешнем поле. Исходя из построенной теории, получены условия применимости импульсного приближения к рассматриваемому кругу задач.

Квадрат амплитуды аннигиляции позитрония может быть параметризован с помощью пяти скалярных величин, в качестве которых можно, например, взять компоненты единичных векторов  $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$  в направлениях импульсов распадных квантов ( $\vec{n}_i = \vec{k}_i / \omega_i$ ), связанных условием копланарности  $\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2 \times \vec{n}_3 = 0$ . Для нахождения оптимальных условий эксперимента необходим поиск экстремума сечения при вариации пяти переменных, что представляет собой сложную математическую задачу. Для решения этой задачи в диссертационной работе введено понятие тензора распада (или тензора аннигиляции), содержащего всю информацию об угловом распределении распадных  $\gamma$ -квантов, не связанную с поляризационной матрицей плотности позитрония. Исследованы свойства этого тензора. Определено понятие анизотропии многочастичного распада. Показано, что амплитуда биений пропорциональна степени анизотропии распада.

С помощью развитого формализма исследованы угловые распределения  $\gamma$ -квантов при регистрации трех (двух, одного) из них, вычис-

лены соответствующие сечения, найдены оптимальные условия наблюдения анизотропного распределения распадных квантов.

Построена поляризационная матрица плотности позитрония в среде в момент его образования. Разработаны методы численного аналитического решения кинетического уравнения для матрицы плотности атома  $Ps$  в поляризованной среде. Получены выражения для энергий стационарных состояний позитрония в среде, найдены столкновительные сдвиги уровней.

Пути разложения матрицы плотности позитрония по неприводимым тензорным операторам продемонстрирована возможность восстановления матрицы плотности по результатам наблюдения осцилляций углового распределения распадных  $\gamma$ -квантов. Причем, угловое распределение распадных квантов в заданный момент времени позволяет определить только значение выстроенности, остальные мультиполи состояния могут быть получены из анализа временной зависимости матрицы плотности.

Развитая в диссертационной работе теория углового распределения распадных квантов и изученные свойства матрицы плотности позитрония были использованы при построении теории временных биений при аннигиляции атома позитрония в магнитном поле. На основе этой теории в работе исследованы основные особенности временных биений при аннигиляции позитрония в неполяризованной (поляризованной) среде, рассмотрены различные методы наблюдения этого явления, для каждого рассмотренного метода найдена оптимальная геометрия эксперимента.

В диссертационной работе сформулированы также предложения по использованию нового явления, предложены конкретные схемы экспериментов по тестированию квантовой электродинамики.

Таким образом, комплекс проведенных исследований осцилляций углового распределения распадных  $\gamma$ -квантов при аннигиляции позитрония явился достаточным для формулировки требований к проектируемым экспериментальным установкам и, более того, позволил снять ряд вопросов, стоящих на пути создания реальных установок для исследования процессов взаимодействия позитронов с веществом методом  $PsSR$ .

**Практическая ценность:** Разработанный в диссертационной работе ап-

парат и полученные соотношения являются теоретической основой нового метода исследования вещества с помощью позитронов  $P_{\pm}SR$ .

Разработанная теория была использована при подготовке, проведении и интерпретации результатов первого эксперимента по наблюдению биений, проведенного совместно лабораторией ядерной спектроскопии института физики АН БССР и НИИ ядерных проблем при БГУ им. В. И. Ленина.

**Апробация работы.** Материалы выполненных научных исследований неоднократно обсуждались на научных семинарах НИИ ядерных проблем при БГУ, института физики АН БССР. Основные результаты диссертации докладывались на 2-н Всесоюзном семинаре по временной жизни возбужденных состояний ядер (Ленинград, 1988г.), 2-н Всесоюзном совещании по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий (Ална-АТА, 1989г.), а также были представлены на VII семинаре по точным измерениям в ядерной спектроскопии (Сильяус, 1988г.), VII Международной конференции по сверхтонким взаимодействиям (Прага, 1989г.).

**Публикации.** Материалы диссертации содержатся в 8-ми опубликованных работах.

**Автор защищает:**

- общую теорию аннигиляции позитрония в электромагнитном поле и данное на ее основе доказательство применимости импульсного приближения для решения рассматриваемого круга задач;

- теорию анизотропии углового распределения  $\gamma$ -квантов распада атома  $P_{\pm}$ , результаты анализа углового распределения распадных квантов в случае различных схем регистрации  $E\gamma$ -распада и соответствующие сечения;

- методы машинного аналитического решения кинетического уравнения для матрицы плотности позитрония в среде и результаты расчетов;

- теорию временных биений углового распределения распадных  $\gamma$ -квантов позитрония в магнитном поле и выполненный на ее основе анализ различных экспериментальных схем наблюдения указанного явления.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и семи приложений. Она содержит 167 страниц.

Из них 137 страниц основного текста, одна таблица, 25 страниц с рисунками. Список литературы включает 53 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация посвящена развитию теории временных биений при аннигиляции атома позитрония в магнитном поле и оптимизации, на основе развитой теории, геометрии эксперимента по исследованию вещества с помощью  $P_sSR$ .

В первой главе диссертационной работы приведены используемые в дальнейшем основные свойства атома позитрония. Изложена разработанная в работах [1-3] теория временных биений нормали к плоскости распада.

Вторая глава посвящена обоснованию импульсного приближения при аннигиляции позитрония в веществе в магнитном поле. На основе теории времен жизни виртуальных состояний (Гольдбергер, Ватсон) построена общая теория аннигиляции атома  $P_s$ . Показано, что квадрат амплитуды аннигиляции атома позитрония

$$|K(t)|^2 = \sum_{m,n} M_m \rho_{mn}(t) M_n^* = \sum_{m,n} M_m \rho_{mn}(0) M_n^* \exp \left\{ -i(E_m - E_n)t - \frac{\gamma_m + \gamma_n}{2} t \right\} \quad (1)$$

где  $M_m$  - амплитуда аннигиляции позитрония в  $m$ -ом стационарном состоянии атома  $P_s$  в веществе в электромагнитном поле,  $\rho_{mn}(t)$  - матрица плотности позитрония в момент времени  $t$ ,  $\hbar=1$ , действительно испытывает затухающие временные биения. В выражении (1) используются точные значения энергий стационарных состояний атома позитрония в веществе  $E_m$  и распадных ширин этих состояний  $\gamma_m$ . В то же время, при расчете амплитуд аннигиляции  $M_m$  энергией связи электрона и позитрона в позитронии и энергией взаимодействия этих частиц с веществом можно пренебречь. В этом и состоит суть импульсного приближения, справедливость которого для рассматриваемого круга задач (в первом порядке теории возмущений) доказана в главе 2.

Как следует из выражения (1), биения происходят на частотах, являющихся разностями энергий стационарных состояний атома  $P_s$ . Для

позитрония в магнитном поле в вакууме:

$$\begin{aligned}\Omega_1 &= E_1 - W_1 = \frac{1}{2} (W_1 - W_0) \left( \sqrt{1 + x^2} - 1 \right) \\ \Omega_2 &= W_1 - E_0 = \frac{1}{2} (W_1 - W_0) \left( \sqrt{1 + x^2} + 1 \right) \\ \Omega_3 &= \Omega_1 + \Omega_2 = E_1 - E_0 = (W_1 - W_0) \sqrt{1 + x^2}\end{aligned}\quad (2)$$

где  $E_i$  - энергия  $i$ -ого состояния позитрония в магнитном поле,  $W_1$  и  $W_0$  - энергии основного состояния орто- и парапозитрония, соответственно,  $x=0.0275$  н (кГс).

Наиболее просто наблюдать биения в слабых  $x \ll 1$  полях на частоте  $\Omega_1$ , поскольку  $\Omega_2, \Omega_3 \sim 10^{12}$  сек $^{-1}$  и осциллирующие на частотах  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$  члены при усреднении по временному разрешению детектора ( $\sim 10^{-9}$  сек) обратятся в нуль. В этом случае на эксперименте будут наблюдаться только биения на частоте  $\Omega_1$ . Теоретическая зависимость скорости счета схемы совпадений от времени при различных положениях плоскости детекторов, а также зависимость частоты биений от напряженности магнитного поля изображены на рис. 1, 2.

Третья глава диссертационной работы посвящена вычислению угловых распределений распадных  $\gamma$ -квантов.

В первом параграфе этой главы получены выражения для амплитуд аннигиляции свободного позитрония в стационарных состояниях:

$$\begin{aligned}M_{00} &= 0 \\ M_{10} &= (4\pi)^{3/2} \frac{e^3}{m} \sqrt{2} u_z^* \\ M_{11} &= (4\pi)^{3/2} \frac{e^3}{m} \left[ u_y^* - i u_x^* \right] \\ M_{1-1} &= (4\pi)^{3/2} \frac{e^3}{m} \left[ u_y^* + i u_x^* \right]\end{aligned}\quad (3)$$

где  $M_{lm}$  - амплитуда аннигиляции позитрония в состоянии с полным спином  $l$  и его проекцией на ось  $Z$  м. Квадраты амплитуд аннигиляции (3) совпадают с известными выражениями [6], полученными ранее. В данном параграфе найдены также выражения для амплитуд аннигиляции позитрония в стационарных состояниях в магнитном поле.

Во втором параграфе вводится понятие тензора распада (силы аннигиляции) и анализируется его физический смысл. Выражение (1)

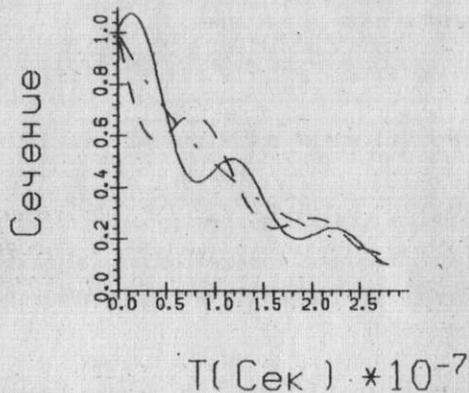


Рис. 1. Зависимость сечения (относительные единицы)  $3\gamma$ -аннигиляции позитрония в магнитном поле от времени при различных положениях плоскости детекторов: сплошная кривая -  $H = 0.59$  кГс, пунктирная кривая -  $H = 0.5$  кГс; штрих-пунктирная кривая -  $H = 0.59$  кГс, плоскость перпендикулярна магнитному полю.

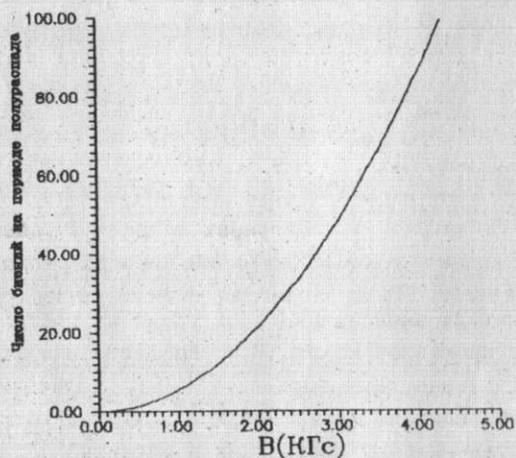


Рис. 2. Зависимость частоты биений от величины магнитного поля.

можно переписать в виде:

$$|M(\tau)|^2 = \frac{(\delta\pi)^3 e^{\delta}}{m^2} S\rho(\rho, \mathcal{Y})$$

$$\mathcal{Y}_{mn} = \frac{m^2}{(\delta\pi)^3 e^{\delta}} M_m^* M_n^*$$

численный множитель введен для удобства.

Анализ показывает, что величины  $\mathcal{Y}_{mn}$  являются циклическими компонентами некоторого декартового тензора F. Просуммированное по поляризациям распадных  $\gamma$ -квантов выражение для тензора распада F имеет вид:

$$F_{ik} = (\delta_{ik} - n_{4i} n_{4k}) (1 - \vec{n}_2 \cdot \vec{n}_3)^2 + (\delta_{ik} - n_{2i} n_{2k}) (1 - \vec{n}_4 \cdot \vec{n}_3)^2 + (\delta_{ik} - n_{3i} n_{3k}) (1 - \vec{n}_2 \cdot \vec{n}_4)^2 \quad (4)$$

где  $\vec{n}_m$  - направление вылета m-го кванта. Тензор F содержит информацию об угловом распределении распадных квантов.

Тензор F (4) является симметричным. Величина главных значений тензора определяется только взаимным положением векторов  $\vec{n}_m$  в плоскости распада. Одна из главных осей тензора F направлена по нормали к плоскости распада, положение двух других осей определяется положением векторов  $\vec{n}_m$  в этой плоскости.

Введение тензора F позволяет явным образом выделить зависимость сечения от взаимной ориентации плоскости распада и поляризационных характеристик распадающегося позитрония, что приводит к существенному упрощению процедуры анализа угловых распределений распадных квантов.

В третьем и четвертом параграфах найдены выражения для инвариантов, главных осей и главных значений тензора распада, обсуждается их физический смысл. Введено понятие степени анизотропии распада,

$$a \sim \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} \quad (5)$$

где  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  - максимальная и минимальная скорости счета при повороте плоскости детекторов как целое. Предполагается, что при этом относительное расположение детекторов в плоскости остается неизменным. Показано, что степень анизотропии распада

$$\alpha = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

где  $\lambda_{\max} = \max(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  и  $\lambda_{\min} = \min(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ ,  $\lambda_i$  - главные значения тензора распада  $F$ .

Наблюдаемая на эксперименте степень анизотропии распада зависит от способа наблюдения распада (регистрация трех, двух или одного распадного кванта). Действительно, сечение аннигиляции позитрония необходимо проинтегрировать по неизменяемым на эксперименте параметрам. При этом компоненты матрицы плотности можно выносить за знак интеграла, что приводит к тому, что различным методам наблюдения распада будет соответствовать свой тензор, полученный из тензора распада (4) путем интегрирования по ненаблюдаемым в данном эксперименте параметрам. В параграфах 4-9 третьей главы рассмотрен вопрос об угловых распределениях распадных квантов при регистрации квантов тремя, двумя, одним детектором, а также при регистрации направления нормали к плоскости распада. Получены соответствующие сечения, изучены свойства соответствующих тензоров.

В случае регистрации двух (из трех) распадных квантов

$$d\sigma = \frac{e^6}{48 \pi^2 m^2 v} S \rho \left( \rho F^{(2)} \right) d^2 n_1 d^2 n_2$$

$$F_{mn}^{(2)} = A_1 \delta_{mn} + A_2 \left( n_{1m} n_{1n} + n_{2m} n_{2n} \right) + A_3 \left( n_{1m} n_{2n} + n_{2m} n_{1n} \right)$$

$$A_1 = 2 \left\{ -\ln \left( (1+n_{12})/2 \right) + \frac{2-3n_{12}}{1-n_{12}^2} (1-B) \right\}$$

$$A_2 = 2 + \frac{1-3n_{12}}{1-n_{12}^2} \ln \left( (1+n_{12})/2 \right) + 2 \frac{3n_{12}^2 - n_{12} - 1}{1-n_{12}^2} B$$

$$A_3 = \frac{3B-1}{1+n_{12}} + \frac{2}{1-n_{12}^2} \ln \left( (1+n_{12})/2 \right)$$

$$B = \sqrt{\frac{1+n_{12}}{1-n_{12}}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1-n_{12}}{1+n_{12}}}, \quad n_{12} = \vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2$$

роль тензора распада  $F$  выполняет тензор  $F^{(2)}$ . На рис. 3 изображена

зависимость главных значений тензора  $F^{(2)}$  от угла между детекторами.

Сечение регистрации  $3\gamma$ -распада одним детектором имеет вид:

$$\sigma = \frac{e^6 \Delta\Omega}{3 \pi^2 m^2 v} S\rho \left( \rho F^{(4)} \right)$$

$$F_{mn}^{(4)} = \left[ \frac{(\pi^2 - \Theta)}{2} - \frac{1}{12} \right] \delta_{mn} - \left[ 3 \frac{(\pi^2 - \Theta)}{2} - \frac{1}{12} \right] n_{1m} n_{1n}$$

где  $\vec{n}_1$  - единичный вектор в направлении на детектор, телесный угол  $\Delta\Omega$  из точки распада на окно детектора предполагается малым.

Максимальное значение степени анизотропии распада (5) не меняется от 0.213 при регистрации только одного из распадных квантов до 0.5 в случае регистрации всех трех квантов.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена изучению свойств поляризационной матрицы плотности позитрония в веществе. В первом параграфе найдена матрица плотности атона  $P_s$  в момент его образования.

Во втором параграфе рассмотрен вопрос о восстановлении матрицы плотности позитрония по результатам экспериментального наблюдения углового распределения распадных  $\gamma$ -квантов. Показано, что в случае регистрации трех или только двух (одного) из квантов угловое распределение распадных квантов содержит одинаковую информацию о поляризационной матрице плотности, т.е. потери информации не происходит. Поляризационную матрицу плотности можно разложить по неприводимым тензорным операторам. По результатам экспериментального наблюдения углового распределения распадных квантов можно восстановить тензор выстроенности (а также монополь) позитрония. Вывод о независимости углового распределения квантов распада от вектора поляризации позитрония следует из закона сохранения четности в электромагнитных взаимодействиях: состояния  $|1\pm 1\rangle$  приводят к одинаковому угловому распределению  $\gamma$ -квантов. Мультиполи состояния на протяжении одного периода биений  $(E_1 - E_0)/\hbar$  (см. выражение (1)) переходят друг в друга. Это позволяет вычислить значения всех остальных мультиполей состояния, кроме  $\langle T(1)_{10}^+ \rangle$ . И, наконец, если мы предполагаем теорией, описывающей поведение матрицы плотности позитрония в веществе, можно полностью восстановить по результатам эксперимента матрицу плотности позитрония и, кроме того, определить

неизвестные параметры среды. Такая теория рассмотрена в параграфах 3 и 4. С помощью системы аналитических вычислений Reduce решается кинетическое уравнение, описывающее поведение атома в поляризованной среде, полученное в работе [5]. Программа позволяет по произвольно заданному гамильтониану сверхтонкого взаимодействия атома Ps со средой определить энергии стационарных состояний позитрония в среде, вычислить столкновительные сдвиги уровней. В третьем и четвертом параграфах проделаны также конкретные вычисления для гамильтониана, учитывающего обменное взаимодействие [5].

В пятой главе диссертационной работы построена теория временных осцилляций при аннигиляции позитрония в магнитном поле.

Основные закономерности биений наиболее просто прослеживаются в случае аннигиляции атома Ps в неполяризованной среде. Усредненный по высокочастотным осцилляциям  $\Omega_2$ ,  $\Omega_3$  квадрат амплитуды аннигиляции позитрония в слабом  $x \ll 1$  магнитном поле имеет вид:

$$|M|^2 \sim (1 - P \cos \theta) F_{xx} \exp(-\gamma_1 t) + (F_{xx} + F_{yy}) \exp(-\gamma_1 t) + 2P \sin \theta \left( -\frac{x}{2} F_{xx} \cos \Omega_1 t + F_{xy} \sin \Omega_1 t \right) \exp(-(\gamma_1 + \gamma_2) t / 2) \quad (6)$$

где  $\Omega_1 = (W_1 - W_0) x^2 / 4$ ,  $\gamma_1 = x^2 \gamma_0 / 4 + \gamma_1$ ,  $\gamma_2 = \gamma_1$ ,  $\gamma_0$  и  $\gamma_1$  - распадные ширины пара- и ортопозитрония, соответственно. В выражении (6) сохранены члены  $\sim x$ . Ось Z направлена вдоль внешнего магнитного поля, ось X направлена таким образом, чтобы вектор поляризации позитронов  $\vec{P}$  лежал в плоскости XZ,  $\theta$  - угол между осью Z и вектором  $\vec{P}$ . Тензор распада  $F$  определен выше (4).

В первом параграфе главы введено понятие глубины модуляции биений, равной отношению амплитуды осцилляций к величине неосциллирующего члена. Показано, что при аннигиляции позитрония в неполяризованной среде

$$h = 2P |\sin \theta| \frac{F_{zy}}{F_{xx} + F_{yy} + F_{zz}} \quad (7)$$

где  $P$  - степень поляризации влетающих в мишень позитронов,  $\theta$  - угол между вектором поляризации влетающих в мишень позитронов и направлением внешнего магнитного поля. Зависимость глубины модуляции биений от направления на детектор (в эксперименте с одним, регистрирующим кванты  $3\gamma$ -распада, детектором) изображена на рис. 4.

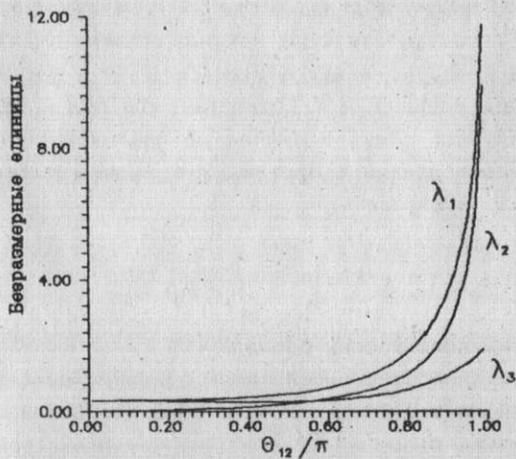


Рис. 3. Регистрация двух (из трех)  $\gamma$ -квантов. Зависимость главных значений тензора распада от угла разлета квантов  $\Theta_{12}$ .

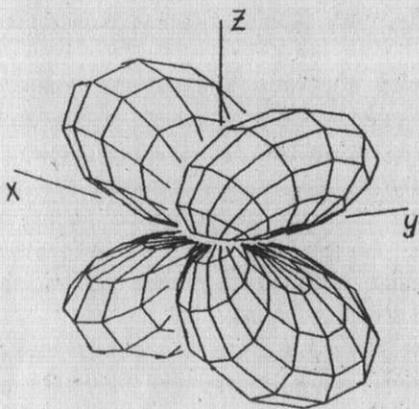


Рис. 4. Зависимость глубины модуляции биений от направления на «точечный» детектор.

Во втором параграфе главы найдены оптимальные условия наблюдения биений. Глубина модуляции биений  $h$  максимальна, если главные оси тензора  $F$ , соответствующие максимальному и минимальному главным значениям тензора, лежат в плоскости  $ZY$  и составляют углы  $\pi/4$  с координатными осями  $X$  и  $Y$ . Отметим, что ось  $Z$  направлена вдоль внешнего магнитного поля. В случае оптимальной геометрии эксперимента вектор поляризации  $\vec{P}$  влетающих в нишень позитронов параллелен оси  $X$ . В этом случае

$$h = P \alpha = P \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (8)$$

где  $\alpha$  - степень анизотропии распада (5).

В третьем параграфе рассмотрены основные особенности биений в поляризованной среде. Согласно [5], обильное взаимодействие приводит к расщеплению вырожденных в магнитном поле уровней позитрония  $|1\pm 1\rangle$ . В диссертационной работе показано, что наблюдать биения на частоте расщепления этих уровней можно, если направление магнитного поля не совпадает с направлением поляризации среды. Начальная фаза этих биений может быть выбрана путем поворота плоскости детекторов. Рассмотрен также вопрос о нестатистическом разбросе результатов эксперимента, вызванном наличием неразрешаемых детектором частот  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$ .

Четвертый параграф посвящен анализу возможности экспериментального наблюдения анизотропного углового распределения распадных квантов. Показано, что подобный эксперимент может использоваться для определения степени поляризации влетающих в нишень позитронов.

Измерение степени анизотропии углового распределения распадных квантов позволит измерить спиральные амплитуды аннигиляции атома позитрония. Данный эксперимент может использоваться для тестирования квантовой электродинамики.

В пятом параграфе показано, что при определенной величине магнитного поля усреднение биений по времени приведет к дополнительной анизотропии углового распределения распадных квантов, которая также может быть измерена на эксперименте.

В последнем параграфе пятой главы производится сравнение теории с результатами первого эксперимента по наблюдению биений. Пе-

риод, амплитуда и фаза наблюдаемых экспериментально биений в пределах точности эксперимента соответствуют теоретически рассчитанным значениям.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена общая теория аннигиляции позитрония в электромагнитном поле. Получены условия применимости импульсного приближения к рассматриваемому кругу задач.

2. Построена теория анизотропии углового распределения  $\gamma$ -квантов распада атома позитрония. В рамках этой теории исследованы угловые распределения  $\gamma$ -квантов при регистрации трех (двух, одного) из них, вычислены соответствующие сечения, найдены оптимальные условия наблюдения анизотропного распределения распадных квантов.

3. Развита методика решения кинетического уравнения для матрицы плотности, описывающей атом позитрония в веществе. В рамках системы аналитических вычислений REDUCE написана программа, позволяющая находить матрицу плотности позитрония в случае произвольного гамильтониана взаимодействия атома  $P_s$  со средой. Проведены соответствующие расчеты.

4. Построена теория временных биений углового распределения распадных  $\gamma$ -квантов, образованных позитронием в магнитном поле. Исследованы основные особенности временных биений при аннигиляции позитрония в неполяризованной (поляризованной) среде, рассмотрены схемы различных методов наблюдения этого явления, для каждой из них найдена оптимальная геометрия эксперимента.

5. Продемонстрирована возможность восстановления матрицы плотности позитрония по результатам экспериментального наблюдения распадных  $\gamma$ -квантов. Проведено сравнение теории с результатами первого эксперимента по наблюдению биений.

6. Предложены новые эксперименты по изучению физики взаимодействия позитронов с веществом, а также эксперименты по тестированию квантовой электродинамики.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Барышевский В.Г., Метелица О.Н. Угловые распределения  $\gamma$ -квантов распада позитрония в магнитном поле // Вестник БГУ, сер.

Физ.мат.н. - 1985, № 2. - С. 7-10.

2. С.К. Андрухович, В.Г. Барышевский, А.В. Берестов, О.Н. Метелица, Э.А. Рудак, В.В. Тихомиров - К наблюдению временных биений при аннигиляции ортопозитрония в магнитном поле. - Препринт ИФ АН БССР № 483, Минск, 1987.
3. Андрухович С.К., Барышевский В.Г., Берестов А.В., Марцынкевич Б.А., Метелица О.Н., Рудак Э.А., Тихомиров В.В. Осцилляции углового распределения квантов  $3\gamma$ -аннигиляции позитрония в магнитном поле. - в сб. Вопросы точности ядерной спектроскопии., Вильнюс 1988, С.98-103.
4. Baryshevsky V.G., Metelitsa O.N. Time oscillation of angular distribution and polarization of orthopositronium decay photons in a magnetic field - VIII International conference on hyperfine interactions, Prague, 1989, p. C-31.
5. Барышевский В.Г., Метелица О.Н. Временные биения углового распределения и поляризации распадных  $\gamma$ -квантов ортопозитрония в магнитном поле. - III Всесоюзное совещание по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий, Ташкент доклады, Алма-Ата, 1989, С. 36.
6. Андрухович С.К., Барышевский В.Г., Берестов А.В., Марцынкевич Б.А., Метелица О.Н., Рудак Э.А., Тихомиров В.В. Наблюдение временных осцилляций при трехфотонной аннигиляции позитрония в магнитном поле. - Там же, С. 37.
7. Andukhovich S.K., Baryshevsky V.G., Berestov A.V., Martsinkevich B.A., Metelitsa O.N., Rudak E.A., Tichomirov V.V. Observation of time oscillation in  $3\gamma$ -annihilation of positronium in a magnetic field. // Phys. Lett. A - 1989, V.136, P.428-432.
8. Baryshevsky V.G., Metelitsa O.N., Tichomirov V.V. Oscillations of the positronium decay  $\gamma$ -quantum angular distribution in a magnetic field // J.Phys.B: At.Mol.Opt.Phys. - 1989, V. 22. - P. 2835- 2847.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барышевский В.Г. Временные биения анизотропии излучения позитрония, мюноклонных атомов и мессбауэровских ядер в магнитоупорядоченных веществах // ДАН БССР - 1976 -Т.20, № 3. - С. 212.

2. Барышевский В.Г. Ядерная оптика поляризованных сред. - Мн.: Иад-во БГУ, 1976. - 118 с.
3. Baryshevsky V.G. Positronium spin rotation and time oscillation of the normal to the three-photon positronium decay plane in magnetic field // Physica status solidi b - 1984, V. 124. - P. 619-623.
4. Барышевский В.Г., Турко А.Н. Временные биения нормали к плоскости трехфотонных распадов ортопозитрония // Известия АН БССР - 1978, Т. 5. - С. 128-131.
5. Барышевский В.Г., Ивашин А.В. О теории взаимодействия атомов (мюония, позитрония) с намагниченными веществами. // ЛЭТФ.- 1973, Т. 65, №4(10). - С. 1407-1472.
6. Drisco R.M. Spin and polarization effects in the annihilation of triplet positronium. // Phys.Rev. - 1966, V. 102. - P. 1542-1544.

242388

0-06

Бел. 2005  
Дружанск.

Бел. 2005



80000004 163502

Метелица Олег Николаевич  
ВРЕМЕННЫЕ БИЕНИЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
РАСПАДНЫХ КВАНТОВ ПРИ ТРЕХФОТОННОЙ  
АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Специальность 01.04.02 -  
теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

---

Подписано к печати 22.04.91.  
Формат 60×84 1/16. Бунага № 1  
Объем 1.0 п. л. Заказ № 305  
Тираж 100 экз. Бесплатно.  
Отпечатано на ротапринте  
Белгосуниверситета им. В. И. Ленина.  
220050, г. Минск, Бобруйская, 7.