



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

6-2003-34

E-302

На правах рукописи

УДК 539.165

539.163.3

539.126.333.17

**ЕГОРОВ**  
Вячеслав Георгиевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ  
В ПОЛУЛЕПТОННЫХ ПРОЦЕССАХ**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

с 34.1e

Дубна 2003

Работа выполнена в *Лаборатории ядерных проблем*  
имени *В.П.Джелепова*  
*Объединенного института ядерных исследований.*

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор

ГАНГРСКИЙ  
Юрий Петрович

доктор физико-математических наук,  
профессор

КОРОТКИХ  
Владимир Леонидович

доктор физико-математических наук,  
профессор

ЛОБОВ  
Герман Александрович

**Ведущая организация:**

Российский исследовательский центр  
«Курчатовский институт»,  
г. Москва

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г. на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г.

Ученый секретарь совета  
доктор физико-математических наук

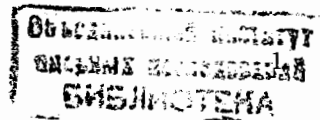
Батусов Ю.А.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Такие полуплептонные процессы, как ядерный  $\beta$ -распад и  $\mu$ -захват, могут, в принципе, описываться пятью независимыми видами слабого взаимодействия, отличающимися друг от друга своими свойствами пространственной симметрии и называемыми *Скалярным* ( $S$ ), *Векторным* ( $V$ ), *Аксиальным* ( $A$ ), *Тензорным* ( $T$ ) и *Псевдоскалярным* ( $P$ ). Формально это соответствует тому, что релятивистски-инвариантный гамильтониан слабого взаимодействия представляет собой линейную комбинацию пяти операторов, связанных с помощью констант  $C_i, C'_i$ . При этом, результаты многочисленных опытов по измерению *формы* разрешенных  $\beta$ -спектров и спиральности  $\beta$ -частиц, а также открытое в 1957 году несохранение четности в  $\beta$ -распаде и измеренная в электронном захвате спиральность нейтрино, свидетельствуют о том, что в природе реализуются (или, по крайней мере, существенно доминируют) только два фундаментальных вида слабого взаимодействия:  $V$  и  $A$ .

На основании этих и многих других экспериментальных фактов и теоретических посылок, был выдвинут ряд *гипотез*, налагающих существенные ограничения на величину констант связи и составляющих основу общепринятой в настоящее время *Стандартной Модели* ( $SM$ ) электрослабых взаимодействий: гипотеза о *временной* (или  $T$ -) инвариантности, что по  $CPT$ -теореме равносильно *сохранению комбинированной CP-четности*, гипотеза о *двухкомпонентности нейтрино* и гипотеза об *универсальном V-A взаимодействии*. В соответствии с ними, варианты  $S, T$  и  $P$  полагаются полностью отсутствующими, а оставшиеся константы – действительны и подчиняются условиям  $C'_i = C_i$  и  $C_A \simeq -C_V$ , причем эффективные константы  $G$  для  $\beta$ -распада,  $\mu$ -распада и  $\mu$ -захвата совпадают и представляют собой одну глобальную константу Ферми:  $G_F \simeq 1.4 \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3$ .

Если, находясь в рамках  $SM$ , учесть члены, пропорциональные передаваемому импульсу  $q$ , то на нуклонном уровне матричные элементы от векторной



и аксиальной частей слабого адронного тока будут содержать дополнительные слагаемые, индуцированные структурой нуклона и называющиеся *индуцированным скалярным, индуцированным псевдоскалярным, индуцированным тензорным взаимодействием и слабым магнетизмом*. Так как амплитуды соответствующих членов зависят от переданного импульса  $q$ , то называются они уже не константами связи, а форм-факторами  $g_i(q^2)$ .

Как и константы связи  $C_i$ , формфакторы  $g_i$  должны быть действительными в случае Т-инвариантности. Другие, более конкретные ограничения на величину формфакторов могут быть получены на основе дополнительных гипотез, справедливость которых в рамках *СМ*, вообще говоря, необязательна. К таким вспомогательным гипотезам относятся в первую очередь гипотеза о сохранении векторного тока (*СVC*), гипотеза о частичном сохранении аксиального адронного тока (*РСАС*) и гипотеза о *G*-инвариантности токов. Из этих гипотез вытекает, в частности, отсутствие  $g_S$  и  $g_T$ , а также известное соотношение Гольдбергера–Треймана:  $g_A(0) = -(1.33 \dots 1.35)$  и  $g_P(q^2) \simeq 7g_A(q^2) \simeq -8.7$ .

Имеющиеся экспериментальные данные, в основном, подтверждают *СМ*. Но в то же время, некоторые факты (неразрешенная проблема с дефицитом солнечных нейтрино, признаки присутствия во Вселенной *темной материи*, не вполне гладкое объяснение нарушения *СР*-четности в распаде *K*-мезона, искусственное постулирование сохранения барионного и лептонного зарядов, проблема иерархии, наличие *различных* масс у лептонов, ненормально большое количество свободных параметров, и т. п.) настоятельно напоминают о том, что *СМ* – хоть и стандартная, но всё же модель, и потому должна иметь некие границы применимости. Чтобы определить эти границы, надо ответить на вопрос, какие из перечисленных выше гипотез действительно выполняются и в какой степени.

При этом, наряду с поиском экзотических явлений (типа безнейтринного  $2\beta$ -распада, "тяжелого" нейтрино, ненулевой массы или магнитного момен-

та обычного нейтрино, его осцилляций и т. п.), необходимо решить несколько проблем, непосредственно связанных с измерением **относительной величины** констант связи  $C_S$  и  $C_T$ , а также форм-факторов  $g_P$ ,  $g_T$ ,  $g_S$ :

- Действительно ли нейтрино на 100% *левое*? (Существует ли хотя бы малая примесь *правых* нейтрино, обусловленных присутствием *токов второго рода*, то есть, наличием *S*- и/или *T*-взаимодействия?)
- Изменяется ли величина форм-факторов в  $\mu$ -захвате по сравнению с  $\beta$ -распадом и с процессом рассеяния электронов?
- Происходит ли изменение (подавление) индуцированных форм-факторов в ядрах по сравнению со свободными нуклонами? Зависит ли их величина от размеров ядра?

Заметим, что для ответа на эти конкретные вопросы вовсе необязательно строить гигантские ускорители или возводить циклопические нейтринные детекторы — достаточно с помощью современной прецизионной ядерно-спектрометрической техники измерить некоторые угловые корреляции в указанных полулептонных процессах.

Действительно, так как каждое из перечисленных (как фундаментальных, так и индуцированных) взаимодействий характеризуется присущими только ему пространственными свойствами (как это следует из названий), то его присутствие сказывается в первую очередь на пространственном распределении векторных и/или аксиально-векторных характеристик лептонов, участвующих в слабом процессе (то есть, в различных угловых корреляциях между импульсами и угловыми моментами испускаемых и поглощаемых частиц). Так, например, для фермиевских  $\beta$ -переходов *V*-взаимодействие приводит к преимущественному испусканию  $\beta$ -частицы и нейтрино в одном и том же направлении, тогда как в случае *S*-взаимодействия эти частицы испускались бы в противоположные стороны. Таким образом, *угловые корреляции являются наблюдаемыми*

величинами, наиболее чувствительными к относительным вкладам различных взаимодействий. Именно их измерение привело в свое время к открытию нарушения  $P$ -четности и может привести в дальнейшем к изменению Стандартной Модели.

К сожалению, зарегистрировать направление вылета нейтрино можно только косвенно, восстановив кинематику всех частиц, участвующих в процессе. Эта задача очень непростая, и потому количество корреляционных экспериментов с участием нейтрино, проведенных в мире на сегодняшний день, очень невелико. Большинство из них, такие как знаменитый *опыт Ву*, *опыты Аллена* или *опыт Гольдгабера*, *Гродзинса* и *Суньяра*, делались 30-40 лет назад и ставили своей целью лишь грубо определить, какое из взаимодействий превалирует –  $S$ ,  $V$ ,  $A$  или  $T$ , каких нейтрино больше – правых или левых, и т. д.

Сегодня *социальный заказ* таких экспериментов другой. Теперь от них требуется не качественный, а количественный ответ, причем речь идет о величине примеси запрещенных эффектов на уровне единиц процентов. Ясно, что для этого нужна совершенно иная постановка экспериментов, использующая последние достижения техники прецизионной ядерной спектроскопии в совокупности с уникальными пучками, доступными на существующих в мире базовых установках. Сочетать эти два фактора может далеко не каждая научная группа; сегодня, кроме нас, их только две: одна занимается исследованием ядерного  $\mu$ -захвата на ускорителе TRIUMF (Ванкувер, Канада), а другая исследует  $\beta$ -распад  $^{32}\text{Ag}$  на комплексе ISOLDE (ЦЕРН, Женева), причем их работы по угловым корреляциям носят лишь эпизодический характер.

Целью настоящей работы являлась разработка и осуществление ряда новых экспериментов, использующих технику и методы прецизионной полупроводниковой ядерной спектроскопии и направленных на исследование угловых корреляций с участием нейтрино в процессах ядерного  $\beta$ -распада и  $\mu$ -захвата.

Пути решения проблемы (организационный аспект). Для достижения указанной цели нами было решено разработать специальную программу исследований, придав ей статус отдельного проекта. Эта программа получила рабочее название **AnCor**, что представляет собой сокращение от слов **Angular Correlations** (Угловые Корреляции) и является сейчас одной из основных частей темы первого приоритета 1039 – “Исследование фундаментальных взаимодействий в ядрах методами ядерной спектроскопии”.

Являясь продолжением отдельных работ, начатых нами еще в 1991 году, эти новые эксперименты должны были сочетать в себе высокую культуру прецизионных измерений, наработанную за многие годы в Отделе ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, с широкими возможностями, предоставляемыми пользователям различными базовыми установками европейских исследовательских центров. Поэтому при реализации программы мы стремились не замыкаться только на существующих в ОИЯИ базовых установках, но по возможности использовать самые лучшие в мире пучки, наиболее отвечающие нашим потребностям, и в то же время привлекать к нашим работам заинтересованных физиков из других научных центров. Так возникла коллаборация, кроме ОИЯИ включающая в себя Центр ядерной спектроскопии и масс-спектрометрии (CSNSM, Орсе, Франция), два Католических университета в Бельгии (UCL, Лювен-ла-Нев, и KUL, Лёвен), а также, в зависимости от конкретного эксперимента, – Карлов университет в Праге, Институт Пауля Шеррера (PSI, Виллиген, Швейцария), Институт Лауэ–Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция), две лаборатории в Кане (GANIL и LPC, Франция), а также Физико-технический институт имени Иоффе в Санкт-Петербурге.

Пути решения проблемы (технический аспект). В основу большинства разработанных экспериментов положено прецизионное измерение энергий  $\gamma$ -,  $\beta$ - и других частиц, определение величины доплеровского (кинематического) сдвига, вызванного отдачей дочернего ядра, с последующим восстановлением всей

кинематической картины изучаемого процесса и нахождением соответствующих корреляционных коэффициентов. Для регистрации частиц используются пластические скинтилляторы, а для измерения их энергий – охлаждаемые Si(Li) и HPGe детекторы, причем в некоторых экспериментах – в виде сборок до 16 детекторов одновременно. В ряде случаев измерения проводятся в режиме совпадений, а иногда измеряется просто доплеровская форма спектральной линии. В зависимости от конкретной задачи используются различные способы селекции событий для подавления фона; измерения проводятся на твердых или газообразных мишенях оригинальной конструкции, облучаемых пучками мюонов, нейтронов, ионов  $^3\text{He}$  или других частиц при относительно низких энергиях, как в *on-line*, так и в *off-line*-режимах, при этом для транспортировки продуктов реакций используются механические устройства и газовые капилляры.

#### Научная новизна работы.

- Примененная нами для исследования корреляций в  $\beta$ -распаде методика (измерение *сдвига* линий в совпадении с вызвавшими этот сдвиг  $\beta$ -частицами) была известна ранее, но использовалась лишь однажды – для исследования запрещенного ( $\frac{1}{2}^+ - \frac{1}{2}^-$ )-распада  $^{11}\text{Be}$ , где величина сдвига очень большая и потому может быть измерена сравнительно легко.

Мы развили этот метод (в частности, увеличив в несколько раз число детекторов) и применили его в исследованиях **разрешенных** распадов, в том числе – фермиевских. Единственный ранее известный эксперимент по корреляциям в фермиевском распаде был выполнен с ядром  $^{32}\text{Ag}$  по другой (упрощенной) методике – в нем измерялся не *сдвиг*, а *ширина* линии в *одиночном* протонном спектре, что гораздо менее надежно.

Известны также две попытки измерить доплеровский сдвиг  $\gamma$ -лучей в распаде  $^{24}\text{Na}$ . Но, поскольку при этом использовался эффект резонансного рассеяния, то результат был неудовлетворительным: для первой линии  $\gamma$ -каскада доплеровский сдвиг существует, но нет резонансного рассеяния,

а для второй линии резонансное рассеяние возможно, но доплеровский сдвиг, как это показано в наших работах, многократно подавлен.

Таким образом, все наши эксперименты по угловым корреляциям в  $\beta$ -распаде выполнялись впервые. Также впервые изучалось нами влияние межатомных сил в молекуле и в кристалле на поведение ионов отдачи (при этом проводились измерения корреляций в металле, монокристалле NaCl и молекулах  $\text{CO}_2$ ).

- Эксперимент по измерению ( $I_i$ - $\nu$ ) угловой корреляции в распаде  $^{56}\text{Co}$  является пионерским (подтверждено Авторским свидетельством SU-1633369); ранее доплеровский сдвиг какого-либо излучения от поляризованных ядер вообще не измерялся.

В предложенной альтернативной постановке ( $I_f$ - $\nu$ )-корреляция будет измеряться по циркулярной поляризации последующего  $\gamma$ -излучения. Являясь по своей физической сути аналогом известного *эксперимента Гольдгабера, Гродзинса и Суньяра*, данный эксперимент отличается техническим решением, используя вместо резонансного рассеяния *прямое измерение доплеровского сдвига HPGe детектором*, что тоже никогда не делалось. Новизна этого решения также подтверждена Авторским свидетельством SU-1612765.

- Идея об исследовании угловых корреляций в мюонном захвате по форме доплеровски-уширенных  $\gamma$ -линий была предложена еще в 1968 году, но практически применялась лишь дважды, причем оба раза – с *неполяризованными* мюонами (при этом измеряется *только один* корреляционный коэффициент). Первая попытка в 1972 году в США была безуспешной (погрешность была столь велика, что физический смысл эксперимента терялся); второй же эксперимент проводился в Канаде одновременно с нашим, но существенно уступил ему в точности.

Мы впервые измерили угловую корреляцию в разрешенном ( $0^+ - 1^+$ )-захвате *поляризованных* мюонов ядрами  $^{28}\text{Si}$ , причем погрешность наша в оценке отношения  $g_P/g_A$  оказалась существенно меньше разброса теоретических предсказаний, выполненных по разным ядерным моделям.

Также впервые в мире нами была измерена угловая корреляция в запрещенном ( $0^+ - 1^-$ )-захвате, чувствительном к Скалярному взаимодействию. Этот эксперимент на кислородной мишени, как и проводящийся нами в настоящее время эксперимент на неоновой и аргоновой мишенях, впервые выполнялся в газе при атмосферном давлении (что позволяет существенно подавить возможную систематическую ошибку из-за торможения ядер отдачи).

- Попытки получить значение  $g_P/g_A$  из измеренного в эксперименте отношения парциальных скоростей  $\mu$ -захвата  $\lambda^+/\lambda^-$  делались и ранее, но только в нашем эксперименте такой результат был *действительно получен*.

Дополнительным свидетельством научной новизны описанных в диссертационной работе экспериментов является то, что при проведении на зарубежных базовых установках все они проходили международную экспертизу и принимались соответствующими Программными комитетами GANIL, PSI, ILL и IPN. В целом программа AnCor также была одобрена Программным консультативным комитетом ОИЯИ по низким энергиям.

**Практическая ценность работы** заключается, во-первых, в разработке нового для ОИЯИ направления исследований, которые, не требуя больших капиталовложений, позволяют получать фундаментальные физические результаты, касающиеся природы слабых взаимодействий.

Во-вторых, получена обширная информация о влиянии на исследуемые процессы различных *неядерных* явлений, связанных с торможением ионов отдачи в твердой и газовой среде.

В-третьих, в процессе подготовки и проведения данных экспериментов делается большое количество всевозможных технических разработок, которые сами по себе могут быть полезны в смежных областях науки. Так, например, нами была разработана проточная газовая мишень для работы на ионном пучке, позволяющая получать и исследовать затем в низкофоновых условиях короткоживущие изотопы с периодом полураспада от долей секунды и выше. При работе с мюонами мы также создали газовую мишень, позволяющую останавливать до 95% мюонов в газе при атмосферном давлении или в твердых образцах с толщиной менее  $10 \text{ мг/см}^2$  (данная разработка уже используется в эксперименте PSI R-02-02 для исследования редких изотопов). Создано большое количество компьютерных программ и алгоритмов для накопления спектрометрической информации и ее многомерного анализа, которые также широко используются в других экспериментах.

**Результат, выносимый на защиту:** Разработана экспериментальная программа AnCor, являющаяся частью первоприоритетной исследовательской темы 1039 – “Исследование фундаментальных взаимодействий в ядрах методами ядерной спектроскопии”. Эта программа включает в себя целый ряд новых экспериментов, использующих технику и методы прецизионной полупроводниковой ядерной спектроскопии и направленных на исследование угловых корреляций с участием нейтрино в процессах ядерного  $\beta$ -распада и  $\mu$ -захвата. Разработанные эксперименты подразделяются на четыре группы:

1. Эксперименты по измерению угловой ( $I-\nu_e$ )-корреляции в гамов-теллеровском  $\epsilon$ -захвате по доплеровскому сдвигу  $\gamma$ -линий.

В первом эксперименте, проведенном с поляризованными в железной матрице при низкой температуре ядрами  $^{56}\text{Co}$ , получен коэффициент ( $I_i-\nu$ )-корреляции, не противоречащий Стандартной модели; измерен знак магнитного момента ядра  $^{56}\text{Co}$  и изучено влияние твердой матрицы на движение ядра отдачи.

Во втором эксперименте, готовящемся к проведению, предложено измерить  $(I_f - \nu)$ -корреляцию для ядер  $^{56}\text{Co}$  в жидкости по циркулярной поляризации последующего  $\gamma$ -излучения.)

2. Эксперименты по измерению угловой  $(\beta - \nu_c)$ -корреляции в разрешенных  $\beta^\pm$ -распадах по доплеровскому (кинематическому) сдвигу сопровождающего распад излучения.

Дважды проведено измерение гамов-теллеровского  $\beta^-$ -распада ядра  $^{24}\text{Na}$  – в алюминиевой фольге и в монокристалле  $\text{NaCl}$ ; получено значение корреляционного коэффициента, соответствующее Аксиальному взаимодействию; показано, что процесс торможения иона отдачи в кристалле анизотропен относительно кристаллических осей.

Четырежды проведено измерение фермиевских  $\beta^+$ -распадов ядер  $^{18}\text{Ne}$  и  $^{14}\text{O}$  – с твердой мишенью  $\text{B}_2\text{O}_3$  и газовыми  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ; получены значения корреляционных коэффициентов, соответствующие Векторному взаимодействию и не противоречащие Стандартной модели; изучено влияние молекулярных сил на процесс отдачи.

Подготовлен эксперимент с фермиевским  $\beta^+$ -распадом ядра  $^{32}\text{Ar}$ , в котором предложено измерять кинематический сдвиг бета-задержанных протонов в совпадении с вызвавшими этот сдвиг позитронами; проведен ряд тестовых сеансов; проект одобрен Программным комитетом GANIL.

3. Эксперимент по измерению угловой  $(\sigma_\mu - I_i)$ -корреляции по отношению парциальных скоростей  $\mu$ -захвата из разных подсостояний сверхтонкой структуры мезоатома.

Измерение проведено трижды – с обогащенными изотопами  $^{10,11}\text{B}$  и с их натуральной смесью; для ядер  $^{11}\text{B}$  получено значение  $g_p/g_n$ , меньшее предсказанного гипотезой PCAC, но не противоречащее ей в пределах погрешности.

4. Эксперименты по измерению угловых  $(\nu_\mu - \gamma)$  и  $(\sigma_\mu - \nu_\mu - \gamma)$ -корреляций по доплеровскому профилю  $\gamma$ -линий, сопровождающих ядерный  $\mu$ -захват.

По разной методике выполнены два эксперимента с разрешенным захватом в ядре  $^{28}\text{Si}$ ; по их результатам получено значение корреляционного параметра, соответствующее (модельно-зависимому) выводу о существенном подавлении Индуцированного псевдоскалярного взаимодействия, что противоречит гипотезе PCAC.

Корреляционный коэффициент для однократно-запрещенного захвата в ядрах  $^{16}\text{O}$  измерен при различных давлениях газа  $\text{O}_2$ ; для мишени при атмосферном давлении получен (модельно-зависимый) вывод о возможном наличии Скалярного взаимодействия, что противоречит Стандартной Модели.

Подготовлено и начато измерение для переходов разной степени запрета на ядрах  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{40}\text{Ar}$ , чувствительных к Скалярному и Псевдоскалярному взаимодействиям; проведен тестовый сеанс; проект одобрен Программным комитетом PSI.

**Апробация работы.** Предложения (проекты) всех перечисленных экспериментов, проводившихся на зарубежных базовых установках (MP-Tandem IPN, PSI, ILL, GANIL), докладывались и принимались на заседаниях соответствующих Программных Комитетов. Текущее состояние работ по программе AnCor неоднократно докладывалось на заседаниях Программно-Консультационного Комитета ОИЯИ по физике низких и промежуточных энергий, а также регулярно отражалось в официально публикуемых научных отчетах ЛЯП ОИЯИ, PSI, FYNU UCL и CSNSM IN2P3.

Отдельные результаты и эксперименты, как и описание всей программы в целом, представлялись на международных конференциях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (СПб 1994, СПб 1995, Дубна 1999, СПб

2000, Москва 2002), по слабым и электромагнитным взаимодействиям в ядрах – WEIN-95 (Осака) и WEIN-98 (Санта-Фе), по неускорительной новой физике – NANP-99 и NANP-2001 (Дубна), международных конференциях по ядерной физике – INPC (Париж 1998) и по физике высоких энергий (Брюссель 1995), совещании по ядерным матричным элементам – MEDEX-2001 (Прага), а также на различных семинарах в ЛЯП ОИЯИ, КИ (Москва), CSNSM (Орсэ), ETH (Цюрих) и KUL (Лёвен).

Пять экспериментов из описанных семнадцати составили основу двух кандидатских диссертаций – самого соискателя, а также Ю.А.Шитова.

Отдельные работы в рамках программы AnCor были поддержаны Фондом Сороса, Российским фондом фундаментальных исследований (трижды), а также программой сотрудничества ОИЯИ-IN2P3 (Франция).

**Публикации.** Материалы диссертации отражены в 45 публикациях (включая два изобретения и кандидатскую работу соискателя), в том числе в реферируемых журналах: *Ядерная Физика* – 2, *Physical Review C* – 1, *Nuclear Physics A* – 5, *Czechoslovak Journal of Physics* – 2; одна статья находится в печати (*The European Physical Journal A*). Остальные работы – это материалы и тезисы докладов на международных конференциях, а также официально публикуемые научные отчеты различных институтов и Сообщения ОИЯИ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из Введения (раздел 1), двух больших глав (разделы 2 и 3) и Заключения (раздел 4). Она содержит 144 страницы, включая текст, 13 таблиц, 72 рисунка и список литературы.

**Первый раздел (Введение)** знакомит читателя с проблемами Стандартной Модели слабых взаимодействий и указывает возможные пути их решения через исследование угловых корреляций в бета-распаде, электронном и мюонном захвате. Там же сформирована цель данной работы (п. 1.2) и дается ее краткая характеристика (п. 1.3).

**Второй раздел** посвящен  $\beta$ -распаду, а также его частному случаю – электронному захвату. Вначале (п. 2.1) перечисляются всевозможные векторные и аксиально-векторные наблюдаемые в распаде величины, основные способы их регистрации и виды угловых корреляций. В следующих двух подразделах 2.2 и 2.3 речь идет, соответственно, о двух типах корреляций:  $(\beta-\nu)$  и  $(I-\nu)$ .

Анализ сложившейся экспериментальной ситуации с бета-нейтринными корреляциями (п. 2.2.1 и представленная в нем Таблица 1) показывает, что необходимо проведение новых измерений, особенно – для переходов *фермиевского* типа, информация о которых очень скудна и ограничена всего лишь *одним экспериментом* на ядре  $^{32}\text{Ag}$ .

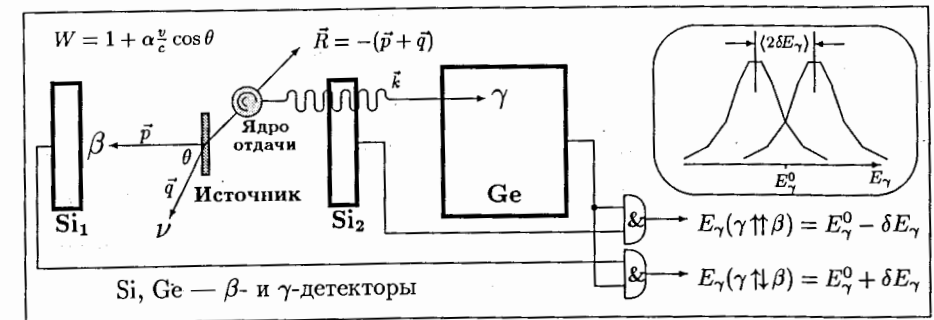


Рис. 1: Идея эксперимента по  $(\beta-\nu)$ -корреляции в  $\beta$ -распаде.

В п. 2.2.2 объясняется идея эксперимента (Рис. 1), основанная на том, что импульс нейтрино в  $\beta$ -распаде восстанавливается из величины импульсов  $\beta$ -частицы, регистрируемой Si(Li)-детектором, и импульса отдачи дочернего ядра.



В свою очередь, отдача ядра находится из величины доплеровского сдвига  $\gamma$ -излучения, сопровождающего распад и регистрируемого HPGe-детектором с высокой точностью. В Таблице 2 рассматриваются возможные ядра – кандидаты для таких измерений:  $^{14}\text{O}$ ,  $^{18}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Al}$ ,  $^{28}\text{P}$ ,  $^{32}\text{Cl}$  и  $^{40}\text{Sc}$ .

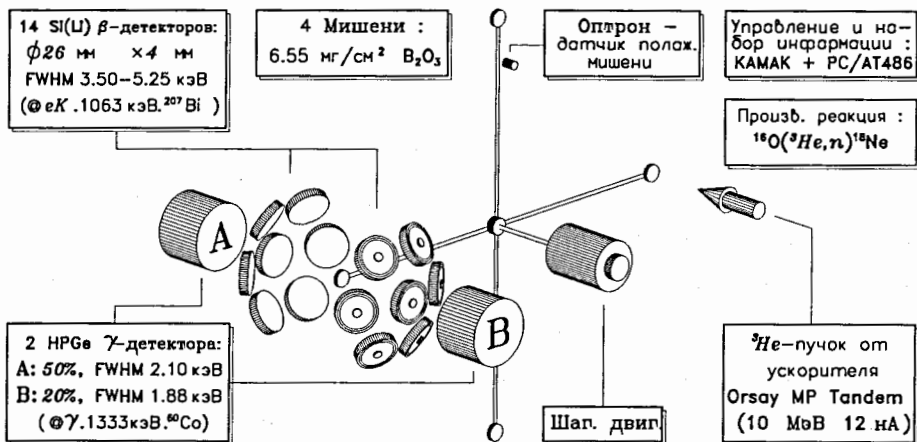


Рис. 2: Измерительная установка с системой транспортировки твердых мишеней.

После краткого описания методического *off-line* эксперимента с ядром  $^{24}\text{Na}$  (п. 2.2.3), показавшего нашу способность измерять доплеровские сдвиги с точностью в несколько эВ, следует изложение нескольких пробных *on-line* тестов на пучке  $^3\text{He}$  (п. 2.2.4). В первом тесте неподвижная тонкая мишень из окиси бора ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) облучалась импульсным пучком с периодичностью 3 секунды. Измерения проводились в интервалах между облучениями. Результатом теста явился вывод о том, что облучение и измерение необходимо разнести не только во времени, но и в пространстве. Для этого была создана механическая система транспортировки мишеней, которая и была испытана во втором тесте. Там же была проверена специально разработанная детекторная система, состоящая из 14 охлаждаемых планарных Si(Li)-детекторов для регистрации позитронов и 2 коаксиальных HPGe-детекторов большого объема для регистрации  $\gamma$ -квантов в совпадении с этими позитронами (Рис. 2).

В пункте 2.2.5 приведено использование этой установки в нашем первом физическом *on-line* эксперименте с ядром  $^{18}\text{Ne}$ , получаемым на твердой мишени  $\text{B}_2\text{O}_3$  в реакции  $^{16}\text{O}(^3\text{He}, n)$ . Там же дано описание системы накопления данных и последовательности их обработки, а также приводится полученный на 95% уровне достоверности результат:

$$\alpha = +1.06 \pm 0.19 \quad (\chi^2 = 0.42).$$

Соответствующий верхний предел на примесь Скалярного взаимодействия (тоже на 95% уровне достоверности и в предположении максимального несохранения четности для Векторного взаимодействия, т. е.,  $C_V = C'_V$ ) получился равным

$$\sqrt{|C_S|^2 + |C'_S|^2} \leq 0.29 \cdot |C_V|.$$

Эксперимент этот, хотя и позволил нам получить искомый корреляционный коэффициент, тем не менее, страдал рядом недостатков, обусловленных схемой распада  $^{18}\text{Ne}$  (большой фон и малая полезная статистика). Дело в том, что в этом ядре только 7.7% распадов дают нужные нам  $\gamma$ -кванты, а кроме того, дочернее ядро ( $^{18}\text{F}$ ), нарабатывающееся к тому же еще и в паразитной ( $^3\text{He}, p$ )-реакции, также является позитронным эмиттером. В итоге, фон аннигиляционного излучения (511 кэВ) оказалчя непомерно большим, а погрешность результата – неудовлетворительной.

В следующих двух параграфах диссертации (2.2.6 и 2.2.7) показаны наши попытки повторить этот эксперимент с другим ядром, свободным от указанного недостатка, –  $^{14}\text{O}$ . Поскольку в этом случае время жизни промежуточного состояния между  $\beta$ -распадом и испусканием  $\gamma$ -кванта велико (60 фс), то для предотвращения торможения ядра отдачи за это время измерения нужно проводить в газе. На разработку, создание и оптимизацию проточной газовой мишени (п. 2.2.6) ушло почти 2 года. При этом было обнаружено, что, во-первых, нельзя в качестве газа-мишени использовать углеводороды (диссоциация их молекул под действием пучка настолько сильна, что дает при последующей полимери-

зации макроколичества жидких и твердых продуктов, отравляющих газовую систему; вместо этого решено было использовать газ CO. Во-вторых, неэффективными были найдены различные пористые углеродные наполнители мишени, в том числе – с подогревом. В-третьих, весьма полезной для *on-line* очистки газа от долгоживущей паразитной активности оказалась низкотемпературная ловушка, работающая при  $-(100..120)^\circ\text{C}$ .

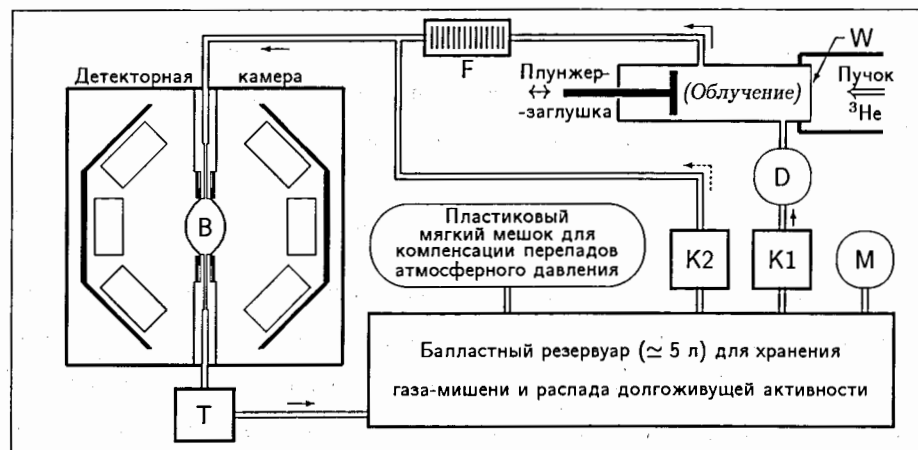


Рис. 3: Конструкция проточной газовой мишени.  $F$  – фильтр;  $W$  – входное окно;  $B$  – пузырек;  $T$  – ловушка;  $K1,2$  – компрессоры;  $D$  – дебитметр;  $M$  – манометр.

Конструктивно мишень (Рис. 3) состояла из замкнутого контура, по которому непрерывно циркулировал рабочий газ при атмосферном давлении. С помощью маленького мембранного компрессора этот газ из балластного резервуара по тefлоновому капилляру подавался в графитовую ампулу, куда через тонкое входное окно из никелевой фольги попадал пучок  $^3\text{He}$  с энергией 12 МэВ. После облучения газ проходил несколько фильтров и затем направлялся в измерительную ячейку – пузырек диаметром 25 мм из тонкого (10 микрон) майлара, установленный в центре вакуумной камеры с 14 охлаждаемыми Si(Li) детекторами. После измерения газ проходил низкотемпературную ловушку и снова попадал в балластный резервуар.

Во время одного из тестов было проведено исследование различных материалов на "прилипание" к ним  $^{14}\text{O}$ , а также проверка того, в виде какого химического соединения находятся изучаемые атомы  $^{14}\text{O}$ . Было экспериментально подтверждено, что это – молекулы  $\text{CO}_2$ , и что их прилипание минимально к поверхностям из тefлона, майлара и нержавеющей стали.

На установке с такой газовой CO-мишенью был проведен эксперимент (п. 2.2.7), в котором измерялся доплеровский сдвиг  $\gamma$ -линии 2313 кэВ в совпадении с позитронами, испускаемыми в противоположных направлениях. На Рис. 4 показан этот сдвиг, измеренный каждым из двух HPGe-детекторов (А и В) в совпадении с одним из 14 Si(Li)-детекторов (1 или 2).

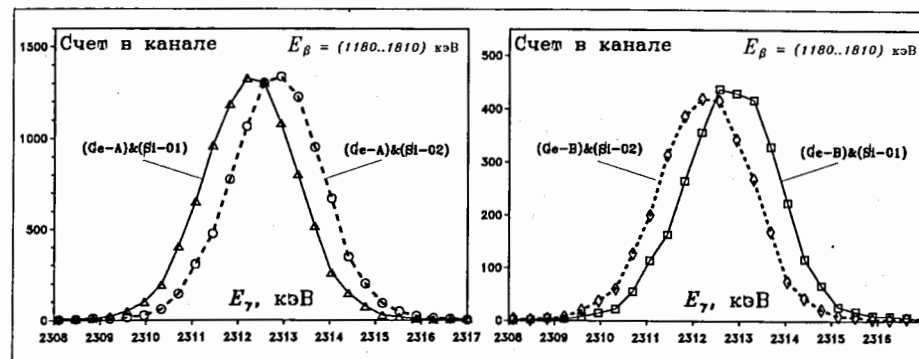


Рис. 4: Доплеровский сдвиг  $\gamma$ -линии 2313 кэВ в  $\beta$ -распаде  $^{14}\text{O}$ .

Обработка данных, полученных в этом эксперименте, делалась пятью различными способами, также описанными в п. 2.2.7; самый простой состоял в нахождении центра тяжести пика, а самый сложный – в одновременном фитировании двух пиков гауссианом с 4 свободными параметрами. Все они дали похожие результаты, что свидетельствует об отсутствии существенных систематических ошибок, связанных с процедурой обработки.

Величина усредненного по всем детекторам и по всей статистике доплеровского сдвига как функция энергии позитронов показана на Рис. 5. Из рисунка видно, что полученная кривая на 10-15% отличается от ожидаемой ( $\alpha = +1$ );

при этом, полученное отклонение невозможно объяснить ни наличием Скалярного взаимодействия, ни торможением ионов отдачи в среде. Найденное нами объяснение заключается в *молекулярном эффекте*: поскольку распадающееся ядро  $^{14}\text{O}$  не является свободным, а входит в состав молекулы  $\text{CO}_2$ , то после распада импульс отдачи дочернего ядра азота частично передается "бывшим соседям по молекуле", причем эта переданная часть зависит от потенциала меж-атомного взаимодействия на малых расстояниях.

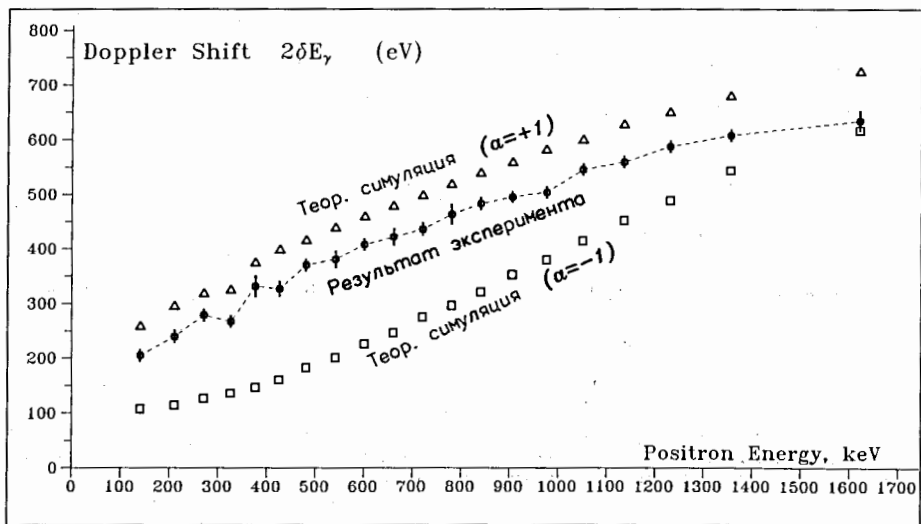


Рис. 5: Усредненные значения доплеровского сдвига  $\gamma$ -линии 2313 кэВ, сопровождающей  $\beta$ -распад  $^{14}\text{O}$ .

Таким образом, получилось, что влияние соседних атомов в молекуле на ядро отдачи искажает кинематику процесса намного сильнее, чем это могло бы вызываться искомой примесью Скалярного взаимодействия.

Дальнейшее развитие метода пошло по двум путям. Первый (п. 2.2.8) заключается в возврате к ядру  $^{18}\text{Ne}$ , не дающему молекулярных соединений. Для подавления фона, представлявшего собой главную проблему, исследование было проведено с газовой проточной мишенью. Это позволило, с одной стороны, быстро убирать из измерительной ячейки (пузырька) активные продукты распада,

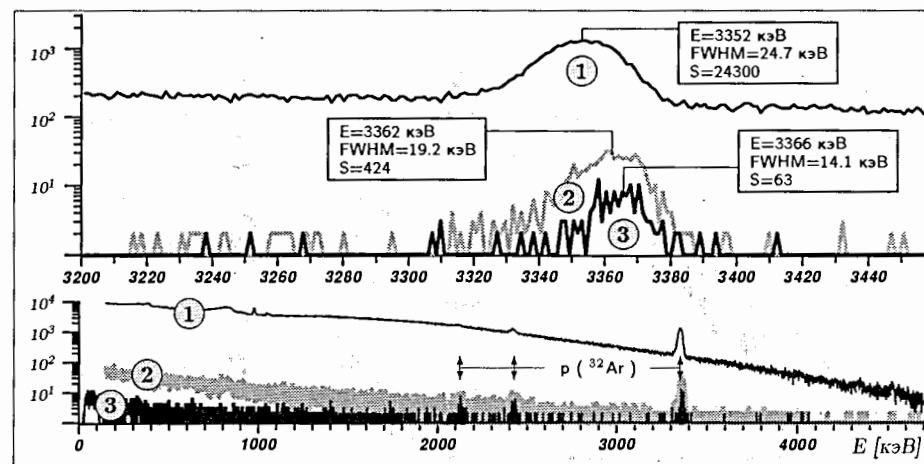


Рис. 6: Энергетические спектры, измеренные детектором Si-1 за 6 часов тестового сеанса на вторичном пучке  $^{32}\text{Ar}$  ускорителя GANIL. 1 - одиночный спектр; 2 - совпадения с Si-2; 3 - совпадения с телескопом (Si-2, Sc-B).

и, с другой стороны, с помощью проходного химического фильтра не допускать попадание в пузырек паразитной активности, не являющейся благородным газом. Эксперимент прошел вполне успешно, но результаты пока, к сожалению, до конца не обработаны.

Второй же путь (п. 2.2.9) состоит в переходе к исследованию  $\beta$ -распада, сопровождаемого излучением не  $\gamma$ -квантов, а протонов. В этом случае, во-первых, в десятки раз увеличивается масштаб измеряемого эффекта (не сотни эВ, а десятков кэВ), и, во-вторых, торможение ядра отдачи не может повлиять на результат из-за малого времени жизни промежуточного состояния. С другой стороны, сама постановка эксперимента здесь несколько сложнее (при регистрации протонов нельзя допустить энергетических потерь в мертвых слоях), да и ядра, дающие  $\beta$ -задержанные протоны (Таблица 4 в п.2.2.9), получить в необходимом количестве гораздо труднее. Нами были сделаны попытки получить ядра  $^{36}\text{Ca}$  на ISOL-установке ЯСНАПП-2 (Дубна), а также ядра  $^{24}\text{Si}$  и  $^{28}\text{S}$  на установке LISOL (Лювен-ла-Нев), но результат был отрицательным. В итоге, выбор

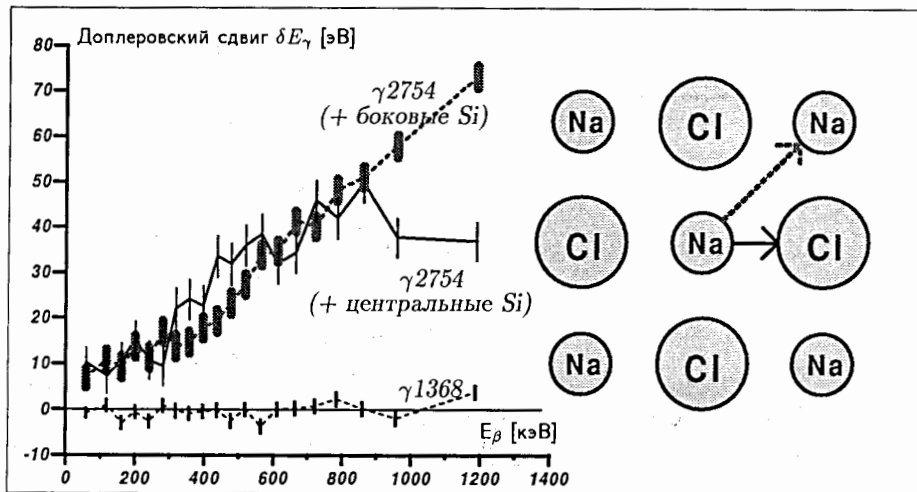


Рис. 7: Доплеровский сдвиг  $\gamma$ -линий 1368 и 2754 кэВ, сопровождающих распад ядер  $^{24}\text{Na}$  в монокристалле NaCl. Справа: торможение ядер отдачи в монокристалле зависит от направления.

пал на установку SIRA ускорителя GANIL в Кане. Выполненный там тестовый сеанс, описанный в п. 2.2.9, показал хорошие фоновые условия и интенсивность вторичного пучка ионов  $^{32}\text{Ag}$ , достаточную для надежного наблюдения кинематического сдвига протонной линии (Рис. 6). В настоящее время идет подготовка к сеансу, запланированному на начало 2003 года.

В разделе 2.2.10 описан эксперимент, выполненный нами параллельно по просьбе физиков-твёрдотельщиков из Гренобля на нейтронном пучке PF1 реактора ILL с монокристаллической мишенью NaCl. В нем  $(\beta-\nu_e-I_f)$ -корреляция использовалась для изучения поведения ионов отдачи с энергией около 20 эВ в кристалле (Рис. 7). Как и следовало ожидать, из-за большого времени жизни промежуточного уровня  $2^+$  линия 1368 кэВ вообще не имеет видимого сдвига. Для линии же 2754 кэВ этот сдвиг различен при регистрации электронов центральными и боковыми Si-детекторами, что объясняется анизотропией торможения иона относительно кристаллических осей.

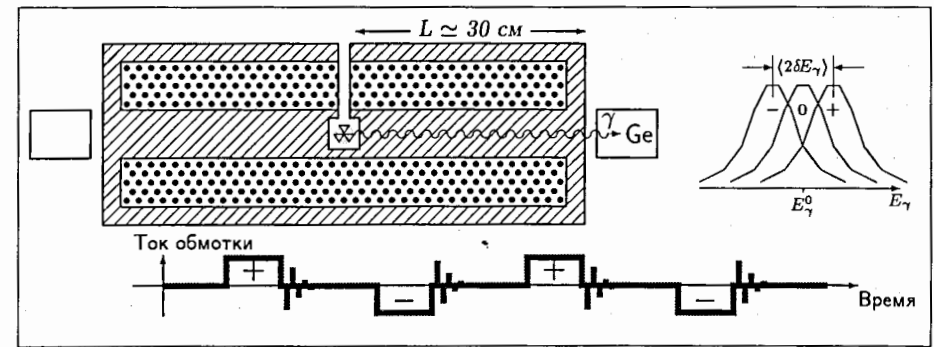


Рис. 8: Измерение спиральности нейтрино с использованием комптоновского поляриметра (идея эксперимента).

Угловым корреляциям между импульсом нейтрино и спином ядра посвящен подраздел 2.3, включающий в себя обзор предыдущих экспериментов такого типа (Таблица 5 в параграфе 2.3.1), описание нашего эксперимента по измерению доплеровского сдвига  $\gamma$ -излучения от ядер  $^{56}\text{Co}$ , поляризованных при низкой температуре (параграф 2.3.2), а также предложения нескольких новых экспериментов, большая часть которых пока только обсуждается (параграф 2.3.3), а один начнется в самое ближайшее время. В этом, последнем, эксперименте (п. 2.3.4) с помощью железного комптоновского поляриметра (Рис. 8) и прецизионных HPGe-детекторов будет измеряться доплеровский сдвиг энергии  $\gamma$ -лучей для двух противоположных направлений магнитного поля.

**Третий раздел** диссертации посвящен корреляциям в обычном<sup>1</sup> ядерном захвате отрицательных мюонов. Как уже отмечалось, этот процесс чувствителен к форм-факторам индуцированных взаимодействий. Способы измерения различных корреляций в  $\mu$ -захвате изложены в подразделе 3.1.

Ранее выполненные в этой области корреляционные эксперименты (их бы-

<sup>1</sup> Обычным (Ordinary Muon Capture – OMC) он называется в противовес другому процессу, не рассматриваемому в данной работе – радиационному захвату (RMC).

ло всего четыре) ставили своей целью определить форм-фактор индуцированного Псевдоскалярного взаимодействия  $g_p$ . Чувствительность к нему разрешенных переходов гамма-теллеровского типа показана в параграфе 3.2.1, а вообще этим переходам посвящен весь подраздел 3.2.

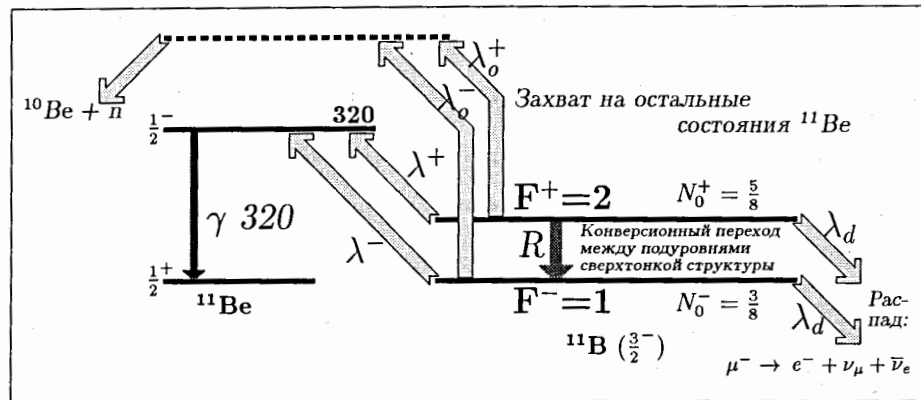


Рис. 9:  $\mu$ -захват из двух подсостояний сверхтонкой структуры в мезоатоме  $\mu^{11}\text{Be}$ .

Нами было выполнено три эксперимента по определению  $g_p$ . В первом из них (параграф 3.2.2), вначале с  $^{10}\text{Be}$ , а затем с  $^{11}\text{Be}$ , измерялась корреляция между ненулевым спином ядра мишени и спином захватываемого мюона (Рис. 9). Благодаря сверхтонкому взаимодействию,  $1s$ -состояние мезоатома расщепляется на  $F^+ = I + \frac{1}{2}$  и  $F^- = I - \frac{1}{2}$ ; из обоих подсостояний происходит как распад мюона, так и его захват на уровни дочернего ядра  $^{11}\text{Be}$ , причем скорости захвата  $\lambda^+$  и  $\lambda^-$  различны и зависят от отношения  $g_p/g_A$ . Изначальная статистическая заселенность двух подсостояний изменяется благодаря конверсии со скоростью  $R$ , и, следовательно, временной закон, по которому происходит захват на уровень 320 кэВ, не является экспоненциальным.

Суть нашего эксперимента заключалась в том, что измерялась временная эволюция  $\gamma$ -линии в дочернем ядре, и из нее по имеющимся данным о величине матричных элементов определялось отношение скоростей захвата  $\lambda^+/\lambda^-$ . Найденное значение соответствовало  $g_p/g_A = 4.3_{-4.3}^{+2.8}(\text{stat.}) \pm 0.5(\text{sys.})$ .

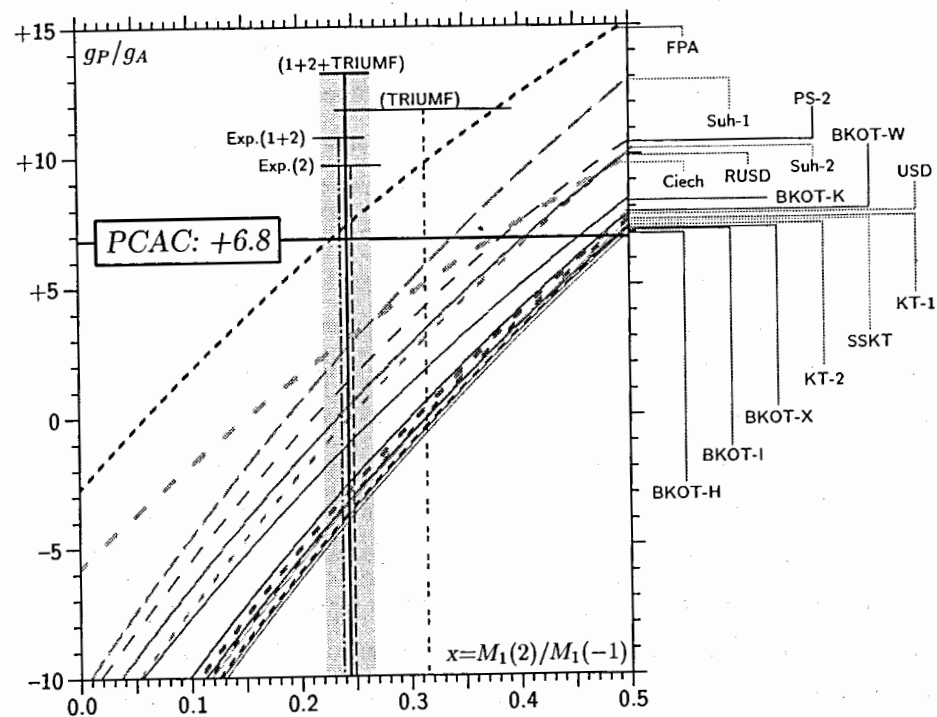


Рис. 10: Зависимость между отношением  $g_p/g_A$  и корреляционным параметром  $X$  при  $\mu$ -захвате в  $^{28}\text{Si}$  согласно нескольким теоретическим расчетам. Вертикальные полосы соответствуют экспериментально измеренным значениям  $X$ .

В параграфах 3.2.3 и 3.2.4 описаны два наших эксперимента с кремниевой мишенью, в которой изучался разрешенный захват типа  $0^+ \rightarrow 1^+$ . Ядра отдачи в таком процессе после испускания мюонного нейтрино имеют, во-первых, продольную поляризацию, определяемую Аксиальным взаимодействием  $g_A$ , а во-вторых – продольную выстроенность, зависящую от Псевдоскалярного форм-фактора  $g_p$ . Поскольку анизотропия  $\gamma$ -излучения в дочернем ядре также связана с его выстроенностью, а доплеровский сдвиг – со скоростью, то результирующий профиль доплеровски-уширенных  $\gamma$ -линий имеет весьма специфическую форму (общий наклон вершины и провал либо выпуклость в центре). Такие

профили, несущие в себе информацию о величине  $g_P/g_A$  и были предметом наших исследований. С помощью двух HPGe-детекторов они измерялись под разными углами к направлению остаточной поляризации мюонов, изначально совпадающему с осью пучка. Это достигалось либо перемещением подвижной платформы с детекторами (п. 3.2.3), либо вращением спина мюона в поперечном магнитном поле (п. 3.2.4). После выполнения некоторых дополнительных исследований, описанных в параграфе 3.2.5, результаты обоих экспериментов (1 и 2), а также аналогичного канадского эксперимента (TRIUMF) были обобщены (параграф 3.2.6 и Рис. 10), и по величине измеренного корреляционного параметра  $X$  сделан вывод о существенном подавлении  $g_P$ .

Аналогичный эксперимент, но для перехода первого запрета при  $\mu$ -захвате в кислороде, описан в подразделе 3.3. В этом случае корреляционный коэффициент, как это показано в параграфе 3.3.1, зависит от примеси Скалярного взаимодействия, а для его корректного измерения необходимо использование газовых мишеней при давлениях близких к атмосферному. Мы проделали сначала предварительный тест (параграф 3.3.2), в котором оптимизировали конструкцию газовой мишени и изучали зависимость доплеровского профиля  $\gamma$ -линии от плотности мишени вследствие торможения ядер отдачи (Рис. 11).

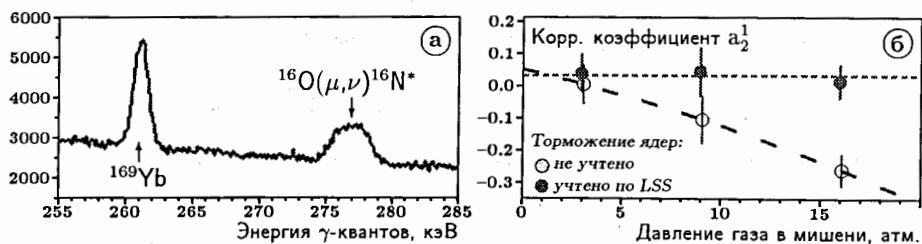


Рис. 11: а) Фрагмент  $\gamma$ -спектра при  $\mu$ -захвате в  $^{16}\text{O}$ , содержащий исследуемую уширенную линию 277 кэВ и опорную не уширенную линию 261 кэВ. б) результаты фитирования линии 277 кэВ, измеренной при разном давлении газа в мишени.

После теста мишень была существенно доработана: проходные сцинтилляционные счетчики, регистрирующие проходящие мюоны, вместе со своими

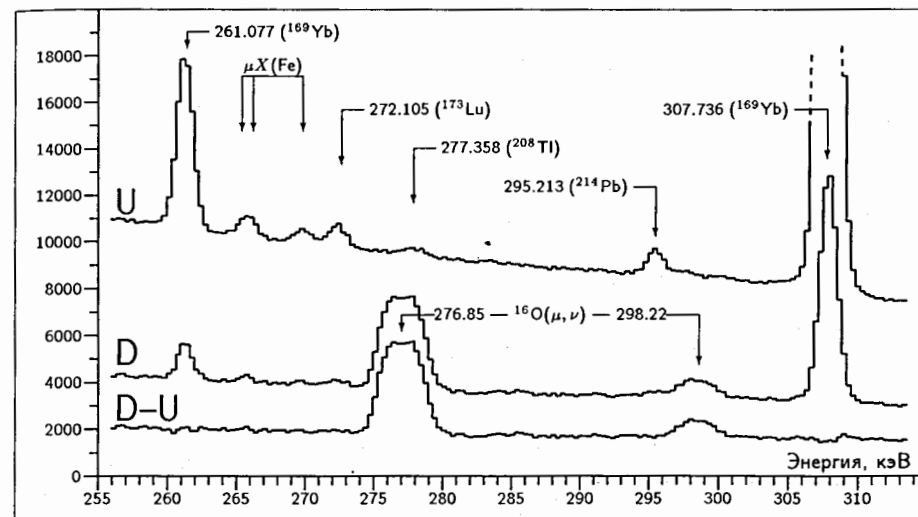


Рис. 12:  $\mu$ -захват в кислороде при 1 атм. Фрагмент задержанного  $\gamma$ -спектра (D), некоррелированного спектра (U) и их разности с учетом нормировки (D-U).

миниатюрными ФЭУ (Hamamatsu R7400) были включены в состав мишени и заменили собою входное окно. Исключив таким образом из конструкции мишени все элементы с большим  $Z$  и минимизировав толщину проходимого пучком вещества до величины порядка 150 мг/см<sup>2</sup>, мы смогли останавливать до 95% мюонов в газе при атмосферном давлении. В таких условиях был проведен реальный физический эксперимент (параграф 3.3.3) на кислороде. Кроме изучаемых ядерных  $\gamma$ -квантов, образующих задержанный относительно  $\mu$ -стопа спектр, в эксперименте регистрировались мгновенные мезо-рентгеновские спектры, а также фоновые спектры, не коррелированные с приходом мюона (Рис. 12). Измерения одновременно проводились тремя независимыми HPGe детекторами объемом по 100 см<sup>3</sup> в течение 3 недель.

Детальный анализ формы  $\gamma$ -линий дал (на 68% уровне достоверности) следующее значение корреляционного коэффициента, усредненное по всей полученной статистике:  $a_2^1 = +0.096 \pm 0.020$ . Для перехода от этого модельно-

независимого числа к величине скалярного взаимодействия необходимо знание ядерных матричных элементов. На Рис. 13 показан такой переход с использованием вычислений по трем различным моделям – ZWM, ZBMI и REWIL.

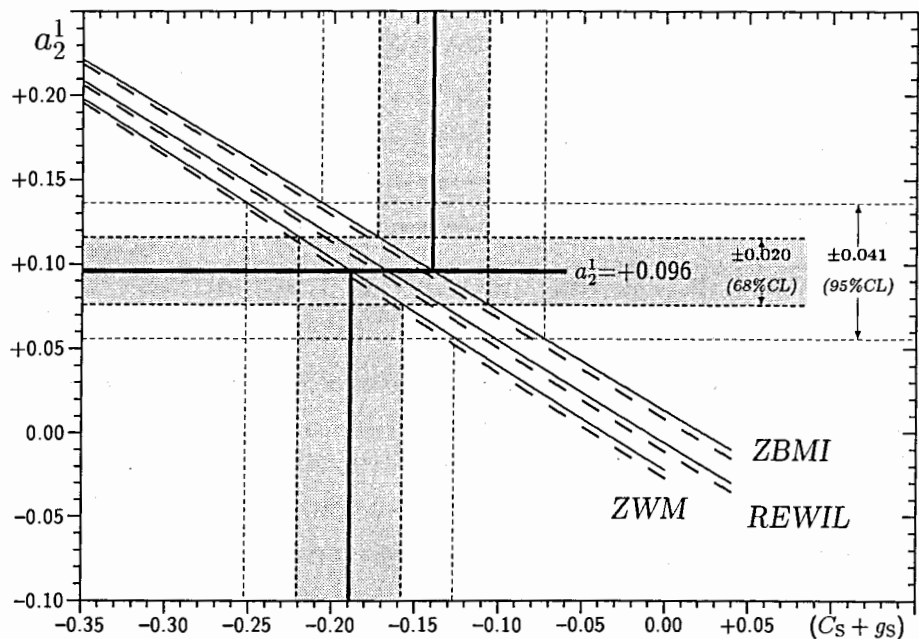


Рис. 13: Переход от корреляционного коэффициента  $a_2^1$  к значению  $C_s + g_s$ . Пунктирные кривые учитывают члены второго порядка, содержащие  $[101r]$  и  $[121r]$ .

Как видно, наш эксперимент показал нетривиальный результат – наличие Скалярного взаимодействия. Поскольку этот вывод сильно зависит от примененной ядерной модели, то для прояснения ситуации решено было повторить эксперимент с другим ядром. После тестов с различными мишенями в качестве первых кандидатов были выбраны  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{40}\text{Ar}$ . Измерения с неоном при атмосферном давлении уже начаты, и их описание дается в подразделе 3.4.

В Заключении (раздел 4) дается сводка разработанных нами экспериментов (см. Таблицу) и полученных в них физических результатов, а также приводится список основных публикаций и конференций, где они представлялись.

Таблица: Наши эксперименты по угловым корреляциям.

Исслед. процесс	Мишень или матрица	Пучок	Место провед.	Коррелирующие величины	Константы связи
<b>Эксперименты, выполненные в 1991–2000 годах :</b>					
$\beta^- (^{24}\text{Na})$	Al-фольга	$p$	ОИЯИ	$\beta^- \cdot \nu_e \cdot I_f$	$ C_T ^2/ C_A ^2$
$\epsilon (^{56}\text{Co})$	Fe (поляриз.)	—	ОИЯИ	$I_i \cdot \nu_e$	$ C_T ^2/ C_A ^2$
$\mu C (^{28}\text{Si})$	металлич. Si	$\mu^-$	ОИЯИ	$\sigma_\mu \cdot \nu_\mu \cdot I_f$	$g_P/g_A$
$\mu C (^{10}\text{B})$	металлич. $^{10}\text{B}$	$\mu^-$	PSI	$\sigma_\mu \cdot I_i$	$g_P/g_A$
$\mu C (^{28}\text{Si})$	мет. Si + $\mu\text{SR}$	$\mu^-$	ОИЯИ	$\sigma_\mu \cdot \nu_\mu \cdot I_f$	$g_P/g_A$
$\beta^+ (^{18}\text{Ne})$	пленка $\text{B}_2\text{O}_3$	$^3\text{He}$	IPN	$\beta^+ \cdot \nu_e$	$ C_S ^2/ C_V ^2$
$\mu C (^{11}\text{B})$	металлич. $^{11}\text{B}$	$\mu^-$	PSI	$\sigma_\mu \cdot I_i$	$g_P/g_A$
$\beta^+ (^{14}\text{O})$	газ $\text{CH}_4$ (1 атм)	$^3\text{He}$	IPN	$\beta^+ \cdot \nu_e$	$ C_S ^2/ C_V ^2$
$\beta^+ (^{14}\text{O})$	газ $\text{CO}$ (1 атм)	$^3\text{He}$	IPN	$\beta^+ \cdot \nu_e$	$ C_S ^2/ C_V ^2$
$\beta^- (^{24}\text{Na})$	монокрист. NaCl	$n$	ILL	$\beta^- \cdot \nu_e \cdot I_f$	$ C_T ^2/ C_A ^2$
$\mu C (^{16}\text{O})$	газ $\text{O}_2$ (3-16 атм)	$\mu^-$	PSI	$\nu_\mu \cdot I_f$	$(C_S + g_S)/g_V$
$\mu C (^{16}\text{O})$	газ $\text{O}_2$ (1 атм)	$\mu^-$	PSI	$\nu_\mu \cdot I_f$	$(C_S + g_S)/g_V$
$\beta^+ (^{18}\text{Ne})$	газ $\text{O}_2$ (1 атм)	$^3\text{He}$	IPN	$\beta^+ \cdot \nu_e$	$ C_S ^2/ C_V ^2$
<b>Эксперименты в стадии выполнения (2001–2002) или подготовки :</b>					
$\beta^+ (^{32}\text{Ar})$	$^{32}\text{Ar}$ - ион.пучок	SiRa	GANIL	$\beta^+ \cdot \nu_e$	$ C_S ^2/ C_V ^2$
$\mu C (^{20}\text{Ne})$	Ne - газ (1 атм)	$\mu^-$	PSI	$\nu_\mu \cdot I_f$	$g_P/g_A, g_S/g_V$
$\mu C (^{40}\text{Ar})$	Ar - газ (1 атм)	$\mu^-$	PSI	$\nu_\mu \cdot I_f$	$g_P/g_A$
$\epsilon (^{56}\text{Co})$	P-p $^{56}\text{Co}$ в $\text{H}_2\text{O}$	—	ОИЯИ	$I_f \cdot \nu_e$	$ C_T ^2/ C_A ^2$

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Способ измерения спин-нейтринных угловых корреляций в электронном захвате.*  
В.Г.Егоров  
Авторское свидетельство SU 1612765, кл. G 01 T 1/38 (1989).
2. *Способ измерения поляризации радиоактивных ядер.*  
В.Г.Егоров  
Авторское свидетельство SU 1633369, кл. G 01 T 1/32, (1989).
3. *Investigation of spin-neutrino correlation in decay of polarized  $^{56}\text{Co}$  nuclei.*  
V.G. Egorov, V.B. Brudanin, O.I. Kochetov, V.N. Pavlov, J. Slovak,  
Nuclear Physics A 524 (1991) 425–440.
4. *Measurement of the induced pseudoscalar form factor in the capture of polarized muons by Si nuclei.*  
V. Brudanin, V. Egorov, T. Filipova, A. Kachalkin, V. Kovalenko, A. Salamatin,  
Yu. Shitov, I. Štekl, S. Vassiliev, V. Vorobel, Ts. Vylov, I. Yutlandov, Sh. Zaparov,  
J. Deutsch, R. Prieels, L. Grenacs, J. Rak, Ch. Brianċon  
Nuclear Physics A 587 (1995) 577–595.
5. *Beta-Neutrino Angular Correlation in the Decay of  $^{18}\text{Ne}$ .*  
V. Egorov, Ch. Brianċon, V.B. Brudanin, J. Dionisio, J. Deutsch, V. Gorozhankin,  
Yu. Gurov, R. Prieels, V. Sandukovsky, N. Severijns, M. Simoes, Yu. Shitov,  
Ch. Vieu, V. Vorobel, Ts. Vylov, Sh. Zaparov  
Nuclear Physics A 621 (1997) 745–753.
6. *Experiment AnCor: search for scalar interaction in  $\beta$ -decay and  $\mu$ -capture.*  
Ch. Brianċon, V.B. Brudanin, J. Deutsch, V.G. Egorov, T.V. Filipova, J. Govaerts,  
C. Petitjean, R. Prieels, N. Severijns, Yu.A. Shitov, V. Vorobel, Ts. Vylov, V. Wiaux,  
I.A. Yutlandov, Sh. Zaparov  
Ядерная Физика, 61 (1998) 1395–1402.
7. *Muon capture on  $^{11}\text{B}$ : pseudoscalar coupling and the hyperfine effect.*  
V. Wiaux, J. Deutsch, J. Govaerts, J. Lehmann, T. Otto, R. Prieels, V.B. Brudanin,  
V.G. Egorov, J. Rak, K. Lou, C. Petitjean, P. Truöl  
Ядерная Физика, 61 (1998) 1403–1408.
8. *The spin-neutrino correlation revisited in  $^{28}\text{Si}$  muon capture: a new determination of the induced pseudoscalar coupling  $g_P/g_A$ .*  
Ch. Brianċon, V. Brudanin, J. Deutsch, V. Egorov, T. Filipova, M. Kudoyarov,  
V. Lobanov, T. Mamedov, A. Pasternak, R. Prieels, A. Salamatin, Ts. Vylov,  
I. Yutlandov, Sh. Zaparov  
Nuclear Physics A 671 (2000) p.647–657.
9. *Investigations of weak couplings measuring angular correlations in  $\mu$ -capture: impact of nuclear models.*  
Yu. Shitov, V. Egorov, V. Brudanin, I. Yutlandov, Ts. Vylov, Ch. Brianċon, J. Deutsch, R. Prieels, C. Petitjean, J. Suhonen  
Czechoslovak Journal of Physics 52 (2002) 459–465.
10. *Doppler-broadening of gamma rays following muon capture: search for scalar coupling.*  
Yu. Shitov, V. Egorov, Ch. Brianċon, V. Brudanin, J. Deutsch, T. Filipova, C. Petitjean,  
R. Prieels, T. Siiskonen, J. Suhonen, Ts. Vylov, V. Wiaux, I. Yutlandov, Sh. Zaparov  
Nuclear Physics A 699 (2002) 917–935.
11. *Muon capture by  $^{11}\text{B}$  and the hyperfine effect.*  
V. Wiaux, R. Prieels, J. Deutsch, J. Govaerts, V.B. Brudanin, V.G. Egorov, C. Petitjean, P. Truöl  
Physical Review C 65 (2002) 025503 1–8.
12. *Beta-neutrino angular correlation in the decay of  $^{14}\text{O}$ . Search for scalar coupling and sensitivity to interatomic interaction.*



- V. Vorobel, Ch. Briançon, V. Brudanin, J. Deutsch, V. Egorov, R. Prieels, N. Severijns, Yu.A. Shitov, Ch. Vieu, Ts. Vylov, I. Yutlandov, Sh. Zaporov  
The European Physical Journal A **16** (2003) 139–147.
13. *Эксперименты по измерению угловых корреляций с участием нейтрино в процессах бета-распада, электронного и мюонного захвата.*  
В.Г. Егоров  
Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Дубна, 1991; Автореферат диссертации: ОИЯИ 6-91-471.
14. *Исследование  $\beta$ - $\nu$  угловой корреляции в распаде  $^{24}\text{Na}$ .*  
В.Г.Егоров, Ш.Бриансон, В.Б.Бруданин, В.Воробел, Ц.Вылов, А.Маринов, Я.Рак, А.В.Саламатин, И.Штэкль  
Сообщения ОИЯИ, Дубна, 1991, Д6-91-199.
15. *Спин-нейтринные угловые корреляции при ядерном захвате поляризованных мюонов.*  
В.Г.Егоров, В.Б.Бруданин, В.Воробел, Ц.Вылов, А.К.Качалкин, Я.Рак, А.В.Саламатин, И.Штэкль, И.А.Ютландов  
Сообщения ОИЯИ, Дубна, 1991, P6-91-430.
16. *Measurement of the Induced Pseudoscalar Form Factor in the Capture of Polarized Muons by Si-28 Nuclei.*  
V. Brudanin, V. Egorov, A.Kachalkin, V.Kovalenko, A.Salamatin, I. Štekl, V.Vorobel, Ts.Vylov, I.Yutlandov, Sh.Zaporov, J.Rak, S.Vassiliev, J.Deutsch, R.Prieels, L.Grenacs, Ch.Briançon  
Тезисы докладов Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 17–20 мая 1994 г., Санкт-Петербург, с. 135.
17. *Эксперименты по проекту AnCог: угловые корреляции в полулептонных слабых процессах.*  
В.Г. Егоров

- Тезисы докладов Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 14–17 июня 2000 г., Санкт-Петербург, с. 182.
18. *Investigation of spin-neutrino angular correlations in processes of capture of polarized muons by light nuclei.*  
V. Brudanin, V. Egorov, A. Kachalkin, V. Kovalenko, A. Salamatin, Yu. Shitov, S. Vasiliev, V. Vorobel, I. Štekl, Ts. Vylov, I. Yutlandov, Sh. Zaporov, J. Deutsch, L. Grenacs, R. Prieels, Ch. Briançon  
Experiments in Laboratory of Nuclear Problems of Joint Institute for Nuclear Research in 1994–1995, Dubna, 1994, JINR 94-165, p.29.
19. *Investigation of beta-neutrino angular correlation in super allowed beta-decay of short-lived nuclei.*  
C. Belikov, V. Brudanin, V. Egorov, V. Kovalenko, A. Salamatin, I. Štekl, V. Tsupko-Sitnikov, S. Vasiliev, V. Vorobel, Ts. Vylov, Sh. Zaporov, Ch. Briançon, J. Dionisio, Ch. Vieu, J. Deutsch, R. Prieels, N. Severijns  
Experiments in Laboratory of Nuclear Problems of Joint Institute for Nuclear Research in 1994–1995, Dubna, 1994, JINR 94-165, p.47.
20. *Capture de Muons Polarisés par les Noyaux.*  
V. Brudanin, V. Egorov, T. Filipova, A. Kachalkin, A. Salamatin, Yu. Shitov, I. Štekl, S. Vassiliev, V. Vorobel, Ts. Vylov, I. Yutlandov, Sh. Zaporov, J. Rak, Ch. Briançon, J. Deutsch, L. Grenacs, R. Prieels  
Rapport d'Activité CSNSM-Orsay 1992–1994, p.49.
21. *Corrélations  $\beta - \nu$  dans les Transitions  $\beta$  Super-Permisses.*  
V.Brudanin, V.Egorov, Ts.Vylov, A.Salamatin, V.Tsupko-Sitnikov, S.Vasiliev, V.Vorobel, S.Zaporov, Ch.Briançon, C.Vieu, J.Dionisio, J.Deutsch, R.Prieels, N.Severijns  
Rapport d'Activité CSNSM-Orsay 1992–1994, p.51.
22. *Investigation of Beta-Neutrino Angular Correlation in Fermi Beta-Decay of Short-Lived Nuclei.*

- V. Brudanin, V. Egorov, V. Tsoupko-Sitnikov, Sh. Zaporov, Ts. Vylov, Ch. Briançon, Ch. Vieu, J. Dionisio, J. Deutsch, R. Prieels, N. Severijns, V. Vorobel, I. Štekl Workshop 95, Czech Technical University in Prague & Technical University in Brno, Prague, January 23–26, 1995, p.73.
23. *Investigation of Spin-Neutrino Angular Correlations in The Capture of Polarized Muons by Silicon Nuclei.*  
Ch. Briançon, V. Brudanin, J. Deutsch, V. Egorov, T. Filipova, L. Grenacs, R. Prieels, A. Salamatin, Yu. Shitov, I. Štekl, V. Vorobel, Ts. Vylov, I. Yutlandov, Sh. Zaporov Proc. of the IV Int. Symp. on WEIN, Osaka, Japan, 12–16 June 1995, ed. by H. Ejiri, T. Kishimoto and T. Sato, World Scientific, p.390.
24. *Investigation of Beta-Neutrino Angular Correlation in Super Allowed Beta-Decay of Short-Lived Nuclei.*  
Ch. Briançon, V. Brudanin, J. Deutsch, J. Dionisio, V. Egorov, V. Kovalenko, R. Prieels, A. Salamatin, N. Severijns, Ch. Vieu, V. Vorobel, Ts. Vylov, Sh. Zaporov Abstracts of WEIN'95 — The IV Int. Symp. on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei, June 12–16, 1995, Osaka, Japan, p.186.
25. *Investigation of The Spin-Neutrino Angular Correlation in The Capture of Polarized Muons by Si Nuclei.*  
V. Brudanin, V. Egorov, T. Filipova, A. Kachalkin, V. Kovalenko, T. Mamedov, A. Salamatin, Yu. Shitov, I. Štekl, V. Vorobel, Ts. Vylov, I. Yutlandov, Sh. Zaporov, J. Deutsch, L. Grenacs, R. Prieels, Ch. Briançon  
Тезисы докладов Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Санкт-Петербург, 17–30 июня 1995 г., с. 177.
26. *Эксперименты по исследованию бета-нейтринных угловых корреляций в сверхразрешенном бета-распаде короткоживущих ядер.*  
В.Б.Бруданин, В.Воробел, Ц.Вылов, В.М.Горожанкин, В.Г.Егоров, Ш.Э.Запаров, В.Э.Коваленко, А.В.Саламатин, Ю.А.Шитов, И.Штекл, Ш.Бриансон,

- Х.Дионисио, Ш.Вью, Ж.Дойч, Р.Приилс, Н.Северинс  
Тезисы докладов Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Санкт-Петербург, 17–30 июня 1995 г., с. 178.
27. *Investigation of  $\beta$ - $\nu$  Angular Correlation in Super Allowed Beta-Decay of Short-Lived Nuclei.*  
V.G.Egorov, V.B.Brudanin, V.V.Tsoupko-Sitnikov, V.Vorobel, I.Štekl, Sh.Zaporov, Ts.Vylov, Ch.Briançon, Ch.Vieu, J.Dionisio, J.Deutsch, R.Prieels, N.Severijns Proc. of the Int. Europhysics Conf. on High Energy Physics, Brussels, Belgium, 27Jul–2Aug 1995, "World Scientific", p.509.
28. *Doppler-broadening of gamma-rays following muon capture: search for scalar coupling.*  
V. Brudanin, V. Egorov, T. Filipova, Yu. Shitov, Ts. Vylov, I. Yutlandov, et al. Laboratory of Nuclear Problems of Joint Institute for Nuclear Research in 1996–2000, Dubna, **99-153** (1999) 60.
29. *Investigation of beta-neutrino angular correlation in superallowed beta decay of short-lived nuclei.*  
V. Brudanin, V. Egorov, A. Salamatin, Yu. Shitov, V. Vorobel, Ts. Vylov, et al. Laboratory of Nuclear Problems of Joint Institute for Nuclear Research in 1996–2000, Dubna, **99-153** (1999) 62.
30. *Doppler-broadening of gamma rays following muon capture: search for scalar coupling.*  
V.Egorov, Ch.Briançon, V.Brudanin, J.Deutsch, T.Filipova, J.Govaerts, C.Petitjean, R.Prieels, Yu.Shitov, T.Siiskonen, J.Suhonen, Ts.Vylov, V.Wiaux, I.Yutlandov, Sh.Zaporov  
Abstracts of Contributed Papers, International Nuclear Physics Conference, UNESCO, Paris, 24–28 August 1998, 712.

31. *Measurement of ( $\beta$ - $\nu$ ) correlation through the Doppler shift of  $\gamma$ -rays following the decay of  $^{14}\text{O}$ ,  $^{18}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Na}$ .*  
V.Egorov, H.Börner, Ch.Briançon, V.Brudanin, J.Deutsch, M.Jentschel, R.Prieels, N.Severijns, Yu.Shitov, V.Vorobel, Ts.Vylov, I.Yutlandov, Sh.Zaparov  
Abstracts of Contributed Papers, International Nuclear Physics Conference, UNESCO, Paris, 24-28 August 1998, 713.
32. *Измерение индуцированного псевдоскалярного формфактора в захвате поляризованных мюонов ядром Si.*  
В.Б. Бруданин, В. Воробел, Ц. Вылов, В.Г. Егоров, Ш.Э. Запаров, А.К. Качалкин, В.Э.Коваленко, Т.Н.Мамедов, А.В.Саламатин, Ю.А.Шитов, И.Штекл, Т.В.Филипова, И.А.Ютландов, Л.Гренач, Ж.Дойч, Р.Приилс, Ш.Бриансон  
Мюоны и пионы в веществе. Труды III Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом, 18-21 октября, Дубна, 1995, с. 156-161.
33. *Doppler broadening of gamma rays following muon capture: search for scalar coupling. (Exp. R-97-03)*  
V. Egorov, Ch. Briançon, V. Brudanin, J.Deutsch, T. Filipova, J.Govaerts, C. Petitjean, R. Prieels, Yu. Shitov, Ts. Vylov, V. Wiaux, I. Yutlandov, Sh. Zaparov  
PSI Scientific Report 1998, v.1 (Particles and Matter) 18.
34. *Measuring the induced pseudoscalar coupling in nuclei: muon capture on  $^{11}\text{B}$  and the hyperfine effect. (Exp. R-92-04)*  
V. Wiaux, V. Brudanin, J.Deutsch, V. Egorov, J.Govaerts, J.Lehmann, K. Lou, T. Otto, C. Petitjean, R. Prieels, J.Rak, P. Truöl  
PSI Nuclear and Particle Physics Newsletter (1995) 25.
35. *The induced pseudoscalar coupling in nuclei: muon capture on  $^{11}\text{B}$  and the hyperfine effect. (Exp. R-92-04)*  
V. Wiaux, V. Brudanin, J.Deutsch, V. Egorov, J.Govaerts, J.Lehmann, T. Otto,

- C. Petitjean, R. Prieels, J.Rak, P. Truöl  
PSI Nuclear and Particle Physics Newsletter (1997) 26.
36. *Doppler broadening of gamma rays following muon capture: search for scalar coupling. (Exp. R-97-03)*  
V.Egorov, Ch.Briançon, V.Brudanin, J.Deutsch, J.Govaerts, C.Petitjean, R.Prieels, Yu.Shitov, T.Siiskonen, J.Suhonen, Ts.Vylov, V.Wiaux, I.Yutlandov, Sh.Zaparov  
PSI Nuclear and Particle Physics Newsletter (1997) 30.
37. *Doppler-broadening of gamma-rays following muon capture: search for scalar coupling. (Exp. R-97-03)*  
Yu.Shitov, V.Egorov, Ch.Briançon, V.Brudanin, J.Deutsch, T.Filipova, C.Petitjean, R.Prieels, T.Siiskonen, J.Suhonen, Ts.Vylov, V.Wiaux, I.Yutlandov, Sh.Zaparov  
PSI Scientific Report 2001, v.1 (Particles and Matter) 21.
38. *Measuring the induced pseudoscalar coupling in nuclei: muon capture on  $^{11}\text{B}$  and the hyperfine effect. (Exp. R-92-04)*  
V. Brudanin, J.Deutsch, V. Egorov, J.Govaerts, J.Lehmann, K. Lou, C. Petitjean, R. Prieels, J.Rak, P. Truöl, V. Wiaux  
PSI Annual Report 1994, Annex I, p.36-37.
39. *Measurement of the induced pseudoscalar coupling constant using hyperfine conversion in nuclear muon capture by  $^{10}\text{B}$  and  $^{11}\text{B}$  nuclei. (Exp. R-92-04)*  
V.Brudanin, H.Daniel, J.Deutsch, V. Egorov, J.Govaerts, L.Grenacs, J.Lehmann, J.Hartmann, J.Lehmann, K.Lou, C.Petitjean, R.Prieels, J.Rak, W.Schott, P. Truöl  
PSI Nuclear and Particle Physics Newsletter 1992, p.53-55.
40. *Measuring the Induced Pseudoscalar Coupling in Nuclei: Muon Capture on  $^{11}\text{B}$  and the Hyperfine Effect. (Exp. R-92-04)*  
V.Brudanin, J.Deutsch, V. Egorov, J.Govaerts, J.Lehmann, K. Lou, C. Petitjean, R. Prieels, J.Rak, P. Truöl, V.Wiaux  
PSI Nuclear and Particle Physics Newsletter 1993 p.63-65.

41. *Doppler-broadening of gamma-rays following  $\mu$ -capture in oxygen: search for scalar coupling.*  
V. Egorov, Ch. Briançon, V. Brudanin, J.Deutsch, T. Filipova, J.Govaerts, C. Petitjean, R. Prieels, Yu. Shitov, Ts. Vylov, V. Wiaux, I. Yutlandov, Sh. Zaparov  
Тезисы докладов Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 21–24 апреля 1999 г., Дубна, с. 404.
42. *Гамма-излучение, сопровождающее захват мюонов в аргоне и неоне.*  
П.Глинко, М.Ширченко, С.Васильев, В.Егоров, Ю.Шитов, И.Ютландов  
Тезисы докладов Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 18–22 июня 2002 г., Москва, с. 323–324.
43. *Muon capture on  $^{16}\text{O}$ : a search for a genuine scalar coupling in the electroweak interaction.*  
J.Deutsch, J.Govaerts, R.Prieels, V.Wiaux, V.Brudanin, V.Egorov, Yu.Shitov, Ts.Vylov, I.Yutlandov, Sh.Zaparov, C.Petitjean, Ch.Briançon, T.Siiskonen, J.Suhonen  
Université catholique de Louvain, CYCLONE, Rapport d'activité 1997, 79–82.
44. *Muon capture in  $^{11}\text{B}$ : pseudoscalar coupling and the hyperfine effect.*  
V. Wiaux, J.Deutsch, J.Govaerts, J.Lehmann, T.Otto, R. Prieels, V. Brudanin, V. Egorov, J.Rak, C. Petitjean, P. Truöl  
Université catholique de Louvain, CYCLONE, Rapport d'activité 1997, 74–79.
45. *Recherche d'une interaction scalaire dans les désintégrations semi-leptoniques par l'étude de la corrélation angulaire  $\beta$ -neutrino en émission  $\beta$ .*  
J.Deutsch, R. Prieels, N.Severijns, Ch.Briançon, J.Dionisio, Ch.Vieu, V. Brudanin, V. Egorov, T. Filipova, Yu. Shitov, V.Vorobel, Ts. Vylov, I. Yutlandov, Sh. Zaparov  
Université catholique de Louvain, CYCLONE, Rapport d'activité 1997, 91–93.

Получено 20 февраля 2003 г.