

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им.Б.П.КОНСТАНТИНОВА

УДК 539.17

На правах рукописи

ВОРОПАЕВ
Николай Иванович

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ
МЮОНА ЯДРАМИ ^3He и ^4He

01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидат физико-математических наук

Санкт-Петербург
1998

Работа выполнена в Петербургском институте ядерной физики им.Б.П.Константинова РАН.

Научные руководители —

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

Г.Г.СЕМЕНЧУК,

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корр. РАН

А.А.ВОРОБЬЕВ.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

В.Г.ЗИНОВ,

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корр. РАН

С.С.ГЕРШТЕЙН,

Ведущая организация — Российский Научный Центр Курчатовский Институт

Защита состоится " _____ " 199 г. в ____ час на заседании диссертационного совета Д - 002.71.01 при Петербургском институте ядерной физики им.Б.П.Константинова РАН по адресу: 188350, г.Гатчина, Ленинградской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан " _____ " 199 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А.Митропольский

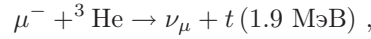
Актуальность проблемы. Явление поглощения отрицательного мюона (μ^-) ядром, открытое более 40 лет назад, несет уникальную информацию о структуре слабого тока ядра. Самым простым ядром является протон (p). Слабый ток протона параметризуется шестью форм-факторами $g_V, g_M, g_A, g_P, g_S, g_T$, каждый из которых является функцией квадрата переданного четырехимпульса q^2 ($q_0^2 = -0.88m_\mu^2$ — при поглощении мюона протоном, $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$). Векторный и магнитный форм-факторы g_V и g_M , в силу гипотезы сохранения векторного тока, равны соответствующим электромагнитным форм-факторам, которые надежно определяются из экспериментов по рассеянию электронов на протоне. Форм-факторы второго класса g_S и g_T для всех значений q^2 считаются пренебрежимо малыми. Аксиальный форм-фактор g_A , при $q^2 = 0$, определяется по времени жизни нейтрона, а его зависимость от q^2 хорошо изучена в экспериментах по квазиупругому рассеянию антинейтрино на нуклоне. Экспериментально не исследованным остался наведенный псевдоскалярный форм-фактор нуклона g_P . Интерес к g_P вызван и тем, что измерение этого форм-фактора дает возможность проверки теории, основанной на фундаментальном принципе в Квантовой Хромодинамике — киральной симметрии. Киральная теория возмущения предсказывает значение g_P с точностью 1 – 3%: $g_P(q_0^2) = 8.21 \pm 0.09$ [1], $g_P(q_0^2) = 8.44 \pm 0.23$ [2]. Для того, что бы экспериментально определить g_P с такой точностью, необходимо измерить скорость поглощения μ^- протоном (Λ_c) с точностью 0.1 – 0.3%, что является на сегодня не выполнимой задачей. Существующие эксперименты по измерению Λ_c не превышают по своей точности 7%, чего явно недостаточно для проверки теории.

Реакция поглощения мюона ядром ${}^3\text{He}$ по каналу образования тритона $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow \nu_\mu + t(1.9 \text{ МэВ})$ является аналогом реакции поглощения мюона протоном. Квадрат переданного четырехимпульса в этом процессе q_1^2 близок к q_0^2 : $q_1^2 = -0.954m_\mu^2$. В Модели Элементарной Частицы (ЕРМ), ядра ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ рассматриваются как члены одного изотопического дублета, в полной аналогии с дублетом протон-нейтрон (p, n), с заменой форм-факторов нуклона на соответствующие форм-факторы ядра ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{H}$ — $F_V, F_M, F_A, F_P, F_S, F_T$. Аналогично нуклонным, форм-факторы F_V и F_M определены в экспериментах по рассеянию электронов. Аксиальный форм-фактор F_A при $q^2 = 0$ определен с точностью $\sim 0.5\%$ по времени жизни тритона (${}^3\text{H}$). Экстраполяция F_A в область q_1^2 осуществляется с точностью $\sim 1\%$. Теоретические расчеты форм-фактора F_P , выполненные на основе

гипотезы Частичного Сохранения Аксиального Тока (PCAC), приводят к значению $F_P^{PCAC} = 20.7 \pm 0.2$. Необходимо отметить, что значение F_P^{PCAC} получено в предположении одинаковой q^2 зависимости форм-фактора F_A и псевдоскалярного параметра $\pi-^3\text{He}-^3\text{H}$ взаимодействия F_π . Имеющаяся до настоящего момента экспериментальная точность измерений скорости поглощения μ^- ядром ^3He (λ_t) составляет $\sim 3\%$, что дает возможность оценить F_P с точностью не лучше 30%. Это явно недостаточно для проверки гипотезы PCAC, являющейся следствием киральной симметрии сильного взаимодействия.

В связи с созданием в ПИЯФ новой экспериментальной методики, основанной на ионизационной камере высокого давления, появилась возможность существенного повышения точности измерения скорости поглощения мюона ядром ^3He .

Цель работы. Основной целью данной работы является измерение скорости поглощения отрицательного мюона ядром ^3He по каналу образования тритона:



(λ_t) с точностью не хуже достигнутой в теории, т.е. $\sim 1\%$.

Научная новизна работы. Создана оригинальная экспериментальная установка на основе спектрометрической многоанодной ионизационной камеры (ИК) высокого давления с сеткой, являющейся мишенью и детектором одновременно. Впервые данная методика применена для исследования процесса поглощения мюона ядрами. Уникальные характеристики установки позволили в десять раз улучшить экспериментальную точность значений скорости поглощения мюона ядром ^3He по каналу образования тритона, а также получить другие параметры, характеризующие как сам процесс поглощения, так и сопровождающие его процессы. Прецизионное измерение λ_t позволило проверить теоретические предсказания наведенного псевдоскалярного форм-фактора F_P , дало возможность проверки существования мезонных обменных токов в ядре, позволило определить псевдоскалярный параметр $\pi-^3\text{He}-^3\text{H}$ взаимодействия с рекордной точностью.

Практическая ценность. Полученные результаты демонстрируют большие возможности использованной методики, которые заключаются в выделении остановок мюона в чувствительной области камеры с точностью лучше 10^{-4} и регистрации заряженных частиц с эффективностью 100%. Уникальные возможности новой методики, стимулируют ее применение в других экспериментах.

Структура и объем диссертации. Предлагаемая диссертация состоит из 5-и глав, которые включают в себя 11 таблиц и 24 рисунка.

В первой главе представлен обзор теоретических и экспериментальных работ в области поглощения мюона ядрами и поставлена задача исследований.

Во второй главе описывается экспериментальная установка. Основными частями установки являются (см. рис. 1):

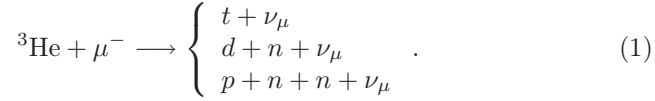
- 1) Ионизационная камера с системой газового наполнения и с системой подачи высокого напряжения.
- 2) Мониторный блок входного пучка.
- 3) Электронные и нейтронные счетчики.
- 4) Аппаратура, обеспечивающая регистрацию событий, чтение и запись информации.

Основной установкой является спектрометрическая многоанодная ионизационная камера (ИК) высокого давления с сеткой. ИК предназначена для регистрации и спектрометрического анализа сигналов от мюонов и появившихся после них тритонов с эффективностью 100%. Камера работала при давлении газа $P = 120$ атм и температуре $T = 300$ К, при электрическом напряжении на катоде 30 кВ и на сетке 3.5 кВ. Мониторные счетчики S1 и S2 регистрировали мюоны пучка. Электронные E и нейтронные N счетчики предназначены для регистрации электронов от распада мюонов и нейтронов от канала развала ядра соответственно.

В третьей главе описывается логика работы online триггера, методика выделения полезных сигналов с ИК при offline анализе и условия отбора событий для статистического анализа. Триггер обеспечивал запись только таких событий, когда в течении 8 мкс перед влетевшим в камеру мюоном и 9 мкс после него не было другого мюона, при этом на одном из центральных анодов камеры должен появиться хотя бы один сигнал. Для преобразования аналоговой информации с ИК в цифровую использовались 8-битные аналого-цифровые преобразователи — FADC, с ценой канала 10 нс. Методику выделения полезных сигналов с FADC на фоне электронического шума, можно разделить на 3 этапа. На первом этапе — сигналы с FADC сглаживались с помощью двух последовательных цифровых фильтров по шести и тринадцати каналам FADC соответственно. На втором этапе — определялся пьедестал FADC в каждом событии и осуществлялся поиск полезных сигналов. И на третьем этапе — вычислялись основные характеристики сигналов — заряд, начало сигнала и его конец, по

которым отбирались события для статистического анализа. Условия отбора событий, описанные в этой главе, обеспечивают низкую примесь мюонов, остановившихся за пределами чувствительной области камеры или в непосредственной близости от катода или сетки. Примесь таких событий, как показано в работе, не превышает уровня 10^{-4} .

В четвертой главе описывается методика статистической обработки экспериментальных данных и приводятся полученные результаты. Поглощение мюона ядром ${}^3\text{He}$ идет по трем каналам:



Скорость поглощения мюона по каналу образования тритона определялась по формуле

$$\lambda_t = \frac{N_t}{N_{\mu \rightarrow e}} \cdot \lambda_0 , \quad (2)$$

где N_t — количество тритонов, $N_{\mu \rightarrow e}$ — количество мюонов, не захватившихся ядром, $\lambda_0 = 0.45516 \text{ мкс}^{-1}$ — скорость распада мюона. Тритоны считались в узком энергетическом окне (см. рис. 2). Фон под пиком тритонов полностью связан с каналом развала ядра и определялся линейной интерполяцией. Основная поправка к скорости поглощения λ_t составляет $+6.45\%$ и связана с ограничением времени появления тритона ($\leq 6 \text{ мкс}$). Остальные поправки к λ_t , рассмотренные в работе, связаны с потерей тритонов при отборе событий и составляют 0.74% .

Все источники ошибок, учтенные при определении λ_t приведены в таблице 1. Статистическая ошибка λ_t равная 0.136% , связана с погрешностью определения количества мюонов. Эта ошибка возникает из-за необходимости пересчета остановившихся мюонов, чтобы не загружать излишней информацией аппаратуру. Основная систематическая ошибка связана с погрешностью интерполяции фона в энергетическом спектре вторых сигналов под пик тритонов (см. рис. 2) и составляет 0.15% . В результате эксперимента была набрана следующая статистика: количество тритонов — $N_t = 1141263$, количество пересчитанных мюонов с распадом — $N_{\mu \rightarrow e}^k = 349479$ (k — коэффициент пересчета). В эксперименте были использованы три коэффициента пересчета $k=500, 1000$ и 2000 , с учетом которых полное количество мюонов равно $N_{\mu \rightarrow e}^0 = 374028500$. Поправляя тритоны на 7.18% и используя формулу (2), для скорости поглощения получим:

$$\lambda_t = 1496.2 \pm 2.6(\text{стат.}) \pm 2.5(\text{сис.}) \pm_{0.0}^{3.4}(\text{кин.}) \text{ с}^{-1}.$$

Статистические ошибки , %			
1	Ошибка определения числа мюонов	± 0.136	0.17
2	Ошибка определения числа тритонов	± 0.100	
Систематические ошибки , %			
3	Ошибка определения количества фона под пиком тритона	± 0.15	0.17
4	Ошибка поправок к числу тритонов	± 0.07	
5	Ошибка определения числа мюонов	± 0.02	
Неопределенности связанные с кинетикой , %			
6	Влияние квазистабильного 2s-уровня	+0.16	0.22
7	Влияние переворота спина	+0.16	

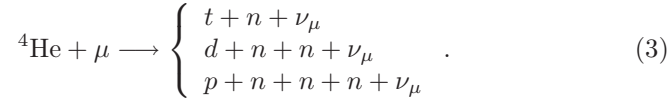
Таблица 1: Рассмотренные источники ошибок и вычисленные их значения для измеренной скорости λ_t .

Ошибка, связанная с кинетикой $\pm_{0.0}^{3.4}$ (кин.), вызвана экспериментальной погрешностью для скорости переворота спина в 1s-состоянии и времени жизни 2s-состояния мезоиона (${}^3\text{He}\mu$)⁺ и вычислена на основании данных этого же эксперимента. Если опираться на теорию, которая предсказывает скорость разрядки 2s-состояния $\lambda_{2s} = 30 \text{ мкс}^{-1}$ [3], тогда эта ошибка перейдет в поправку к λ_t равную $+1.4 \text{ с}^{-1}$. Теория для скорости переворота спина в 1s-состоянии дает пренебрежимо малое значение.

Кроме тритонов в эксперименте регистрировались и другие два канала поглощения μ^- . Скорость поглощения мюона по каналам развала λ_b определялась так же по формуле (2), однако процедура вычисления количества этих событий отличается от вычисления количества тритонов. Вторые сигналы для событий развала ядра отбирались в диапазоне времени $2.2 \div 6 \text{ мкс}$, чтобы полностью исключить фон случайных совпадений от двойных и повторных мюонов. Эффективность регистрации каналов развала ядра камерой вычислялась экстраполяцией энергетического спектра вторых сигналов в ноль и составила $\varepsilon_b = 17 \pm 2\%$. В итоге для скорости поглощения по каналам развала было получено значение:

$$\lambda_b = 632 \pm 4(\text{стат.}) \pm 14(\text{сист.}) \text{ с}^{-1}.$$

В этом же эксперименте проводились измерения скорости поглощения мюона ядром ${}^4\text{He}$, которое идет по трем каналам:



Все три канала имеют заряженную частицу, что позволяет регистрировать их ионизационной камерой. Процедура вычисления скорости поглощения по этим каналам была аналогична вычислению скорости поглощения по каналам развала ${}^3\text{He}$. Эффективность регистрации каналов развала ${}^4\text{He}$ составила

$$\varepsilon_b({}^4\text{He}) = 12.0 \pm 0.3(\text{стат.}) \pm 2.6(\text{сист.}) \%$$

Таким образом, для скорости поглощения мюона ядром ${}^4\text{He}$ получено значение:

$$\lambda_b({}^4\text{He}) = 383 \pm 4(\text{стат.}) \pm 10(\text{сист.}) \text{ с}^{-1}.$$

Все приведенные скорости поглощения мюона впервые измерены с высокой точностью одной методикой.

В пятой главе (Заключение) суммируются преимущества экспериментальной методики, позволившие измерить скорость поглощения мюона ядром ${}^3\text{He}$ с точностью 0.3%. Таковыми являются:

- 1) эффективное выделение остановок мюонов в чувствительной области камеры, изолированной от катода и сетки, с точностью лучше чем 10^{-4} .
- 2) 100% эффективность регистрации тритонов от захвата мюона ядром ${}^3\text{He}$.
- 3) высокое энергетическое разрешение установки ($\Delta E = 30\text{кэВ}$), позволяющее значительно снизить фоновое количество событий от канала развала ядра под пиком тритонов.
- 4) возможность определения в самом эксперименте параметров кинетики, влияющих на результат измерения, таких как скорость переворота спина в 1s-состоянии и время жизни 2s-состояния мезоиона ${}^3\text{He}\mu$.

Основным результатом проведенных исследований стала скорость поглощения мюона по каналу образования тритона, измеренная с высокой точностью $\lambda_t = 1496 \pm 4 \text{ с}^{-1}$, и как следствие определение псевдоскалярного форм-фактора $F_P = 20.8 \pm 2.8$ по плоту $F_A(F_P)$, приведенному на рисунке 3. Значение для F_P в точности совпало с предсказанием PCAC, подтверждая правильность гипотезы и то, что q^2 зависимость параметров F_P и F_π приблизительно одинакова для малых значений q^2 .

Кроме основных результатов данной работы, приведенных в качестве защищаемых пунктов, в заключении приводятся также и другие результаты, которые появились как следствие представляемой работы:

- 1) На основе результата измерения λ_t , в "микроскопическом" описании

ядра ${}^3\text{He}$, определен форм-фактор нуклона $g_F(q^2) = 8.53 \pm 1.53$ [4], значение которого хорошо согласуется с теорией [2],[1]. Вычисления проведены в импульсном приближении с учетом обменных мезонных токов ядра. 2) На основании результата измерения λ_t , в работе [5] вычислен эффективный параметр π - ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{H}$ взаимодействия $G^{eff} = 45.8 \pm 2.4$. Точность G^{eff} в этих расчетах почти на порядок превосходит точность экспериментов по рассеянию π -мезонов на ядре ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{H}$. 3) Используя энергетический спектр тритонов (см. рис. 2), вычислена новая граница примеси тяжелого мюонного нейтрино в диапазоне масс 28 – 40 МэВ [6].

Апробация работы. Результаты данной работы были доложены на следующих конференциях:

- 1) На 15-ой Европейской конференции по проблемам малонуклонных систем (Пенискола, Испания, 5-9 июня 1995),
- 2) На Международном симпозиуме по мюонному катализу и физике экзотических атомов и молекул (Дубна, 19-24 июня 1995 Россия),
- 3) На Международном симпозиуме по электро-слабым взаимодействиям и объединенным теориям (Морионд, Франция, 1998),
- 4) На Международном совещании по экзотическим атомам, молекулам и мюонному катализу (19-24 июль, 1998, Аскона, Швейцария).

Публикация результатов эксперимента. Результаты данной работы опубликованы в следующих изданиях:

- 1) D.V. Balin et al., // Few-Body Systems Suppl. 8, Springer-Verlag, Wien (1995) 248.
- 2) D.V. Balin et al., // Precision Measurement of Nuclear Muon Capture by ${}^3\text{He}$, Preprint 2067 (1995), PNPI, Russia, Gatchina, p. 12.
- 3) A.A. Vorobyov et al., // Hyperfine Interactions 101/102 (1996) 413.
- 4) P. Ackerbauer et al., // Preprint PSI-PR-97-21 (August 1997) p. 13.
- 5) P. Ackerbauer et al., // Phys. Lett. B417 (1998) 224.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Впервые для исследования реакции поглощения мюона ядрами ${}^3\text{He}({}^4\text{He})$ применена ионизационная камера высокого давления, служащая одновременно мишенью и детектором остановившихся мюонов и заряженных продуктов реакций поглощения. Методика обеспечивает высокую эффективность и прецизионность в измерении скорости поглощения. С помощью созданной в ПИЯФ экспериментальной установки выполнены измерения скорости поглощения мюона ядрами ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ на пучке Швейцарской мезонной фабрики.
2. Измерена скорость поглощения мюона ядром ${}^3\text{He}$ по каналу образования тритона: $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow t + \nu_\mu$. Результат измерения: $\lambda_t = (1496 \pm 4) \text{ c}^{-1}$. Достигнутая точность измерения более чем на порядок превзошла точность предыдущих экспериментов.
3. Показано экспериментально, что скорость разрядки $2s$ - метастабильного состояния в мезоатоме ${}^3\text{He}\mu$ в условиях данного эксперимента высока ($\tau_{2s} < 48\text{нс}$) и, наоборот, скорость перехода между состояниями мезоатома $F=0 \rightarrow F=1$ мала ($\tau > 0.15\text{мкс}$). Эти результаты доказывают, что измеренное значение λ_t соответствует статистической заселенности уровней сверхтонкой структуры ${}^3\text{He}\mu$ - атома.
4. Прецизионное измерение скорости μ - захвата λ_t позволило надежно определить значение псевдоскалярного форм-фактора слабого заряженного тока F_P для изотопического дублета ${}^3\text{He} - {}^3\text{H}$: $F_P(q_c^2) = 20.8 \pm 2.8$ ($q_c^2 = -0.954m_\mu^2$). Эта величина оказалась в точном соответствии с предсказанием, основанном на гипотезе частичного сохранения аксиального тока (PCAC): $F_P^{PCAC}(q_c^2) = 20.7$.
5. Измеренное значение λ_t оказалось на 30% выше скорости поглощения мюона на ядре ${}^3\text{He}$, вычисленной в импульсном приближении, что указывает на большую роль мезонных токов в этом процессе. В последних теоретических расчетах, учитывающих мезонные токи в ядре ${}^3\text{He}$, удалось добиться хорошего согласия с полученном в диссертации значением скорости λ_t .

6. Измерены скорости поглощения мюона ядрами ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ по каналам развала этих ядер, с точностью в 10 и 4 раза (соответственно) превышающую точность предыдущих экспериментов:

$$\lambda_b({}^3\text{He}) = 632 \pm 15 \text{ c}^{-1}, \quad \lambda_b({}^4\text{He}) = 383 \pm 11 \text{ c}^{-1}.$$

Список литературы

- [1] H.W.Fearing и др. // Phys.Rev. D56(1997)1783.
- [2] V.Bernard и др. // Phys.Rev. D50(1994)6899.
- [3] L.I.Menshikov и др.,// Z.Phys.D-Atoms,Molecules and Clusters **7** (1987) 203-211.
- [4] J.G.Congleton, E.Truhlik. // Phys.Rev. C53(1996)956.
- [5] N.C. Mukhopadhyay and K. Junker, PSI-PR-96-36 RPI-96-N112 (Nov.1996).
- [6] W. Schott и др., // Hyperfine Interactions **101/102** (1996) 445-449.

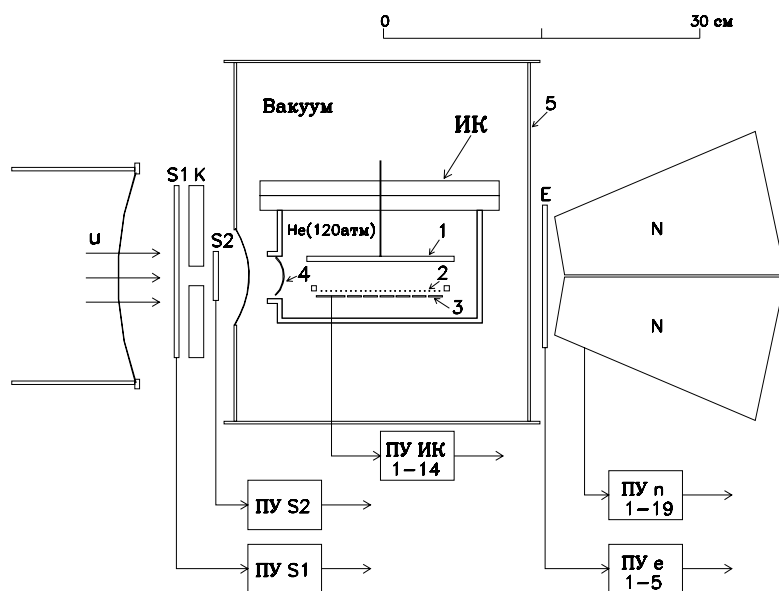


Рис. 1: Схема экспериментальной установки. Обозначения: ИК — ионизационная камера (1, 2, 3, 4 — катод, сетка, анод, бериллиевое окно); 5 — охранный объем; S1 и S2 — мониторные счетчики; К — коллиматор пучка; Е — электронные счетчики; N — нейтронные счетчики; ПУ — предусилители.

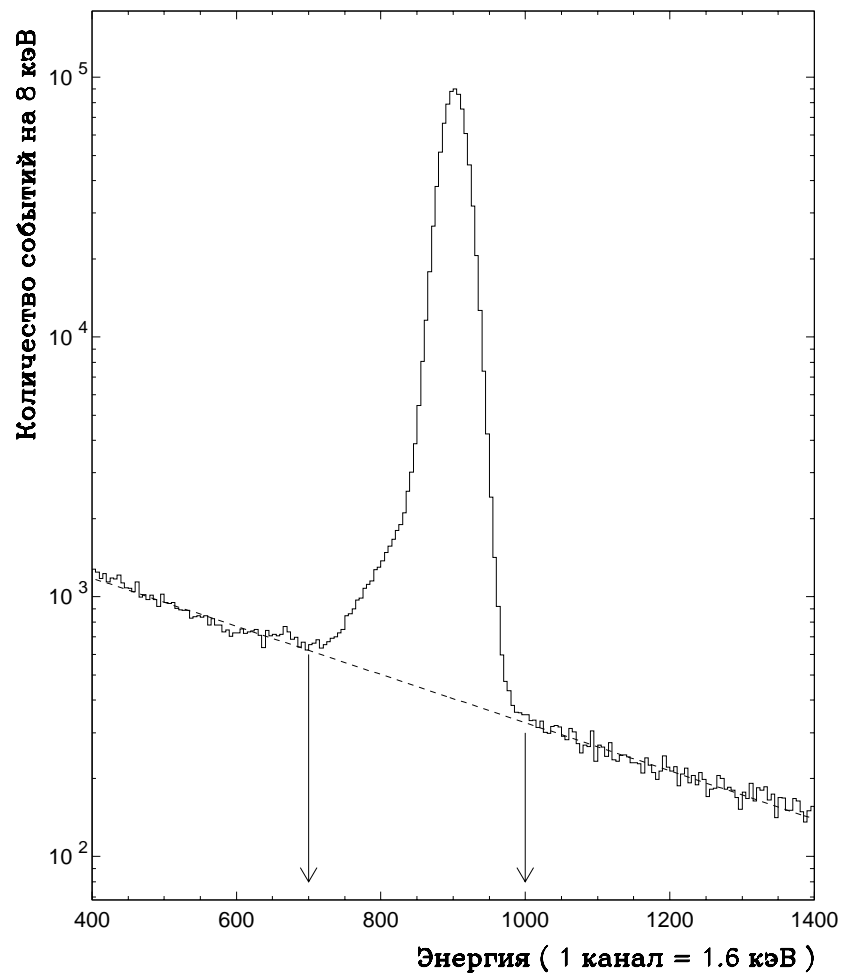


Рис. 2: Энергетический спектр сигналов от продуктов поглощения мюона ядром ^3He , соответствующих основному типу событий, в которых трек от тритона полностью уложился на одном аноде.

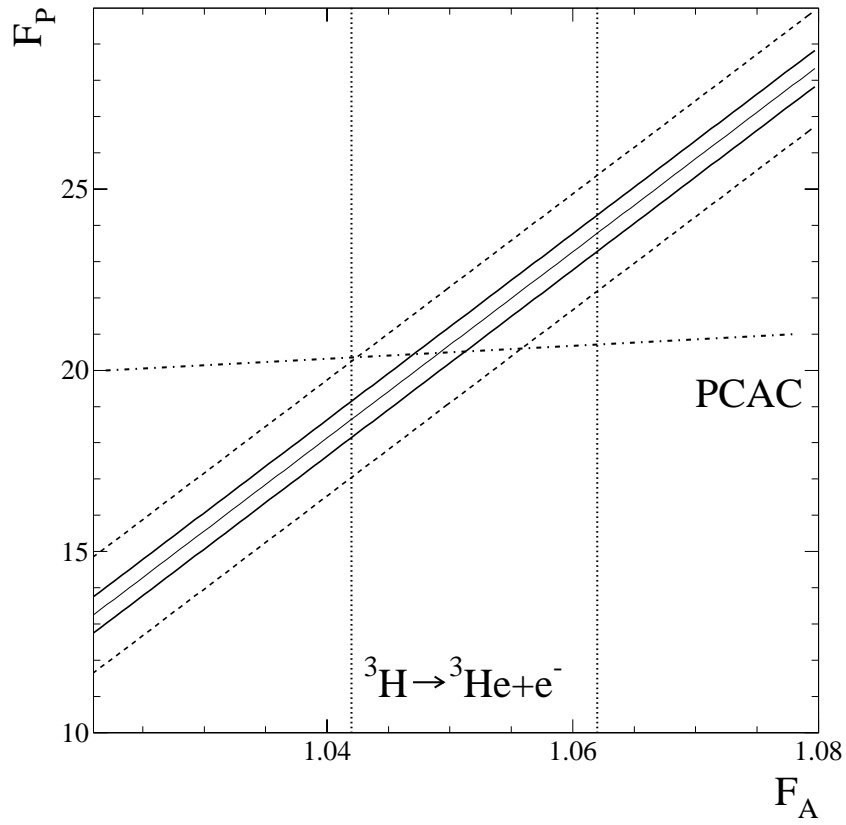


Рис. 3: Ограничения на возможные значения аксиального F_A и псевдоскалярного F_P форм-факторов. Коридор из сплошных кривых это результат измеренной нами λ_t с учетом только ошибки эксперимента ($\pm 1\sigma$), пунктиром показано как расширяется коридор если учесть ошибки F_V и F_M . Вертикальные линии — экстраполяция для F_A из β -распада ${}^3\text{H}$. Горизонтальная линия соответствует гипотезе частичного сохранения аксиального тока (PCAC).