

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  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$

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

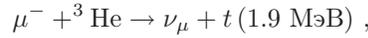
**Актуальность проблемы.** Явление поглощения отрицательного мюона ( $\mu^-$ ) ядром, открытое более 40 лет назад, несет уникальную информацию о структуре слабого тока ядра. Самым простым ядром является протон (p). Слабый ток протона параметризуется шестью форм-факторами  $g_V, g_M, g_A, g_P, g_S, g_T$ , 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  $\mu^-$  протоном ( $\Lambda_c$ ) с точностью 0.1 – 0.3%, что является на сегодня не выполнимой задачей. Существующие эксперименты по измерению  $\Lambda_c$  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  $F_\pi$ . Имеющаяся до настоящего момента экспериментальная точность измерений скорости поглощения  $\mu^-$  ядром  $^3\text{He}$  ( $\lambda_t$ ) 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  $^3\text{He}$ .

**Цель работы.** Основной целью данной работы является измерение скорости поглощения отрицательного мюона ядром  $^3\text{He}$  по каналу образования тритона:



( $\lambda_t$ ) 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  $^3\text{He}$  по каналу образования тритона, а также получить другие параметры, характеризующие как сам процесс поглощения, так и сопровождающие его процессы. Прецизионное измерение  $\lambda_t$  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):

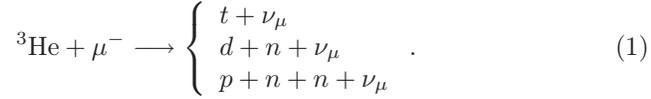
- 1) Ионизационная камера с системой газового наполнения и с системой подачи высокого напряжения.
- 2) Мониторный блок входного пучка.
- 3) Электронные и нейтронные счетчики.
- 4) Аппаратура, обеспечивающая регистрацию событий, чтение и запись информации.

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  $\lambda_t$  составляет  $+6.45\%$  и связана с ограничением времени появления тритона ( $\leq 6 \text{ мкс}$ ). Остальные поправки к  $\lambda_t$ , рассмотренные в работе, связаны с потерей тритонов при отборе событий и составляют  $0.74\%$ .

Все источники ошибок, учтенные при определении  $\lambda_t$  приведены в таблице 1. Статистическая ошибка  $\lambda_t$  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	$\pm 0.136$	0.17
2	Ошибка определения числа тритонов	$\pm 0.100$	
Систематические ошибки , %			
3	Ошибка определения количества фона под пиком тритона	$\pm 0.15$	0.17
4	Ошибка поправок к числу тритонов	$\pm 0.07$	
5	Ошибка определения числа мюонов	$\pm 0.02$	
Неопределенности связанные с кинетикой , %			
6	Влияние квазистабильного 2s-уровня	+0.16	0.22
7	Влияние переворота спина	+0.16	

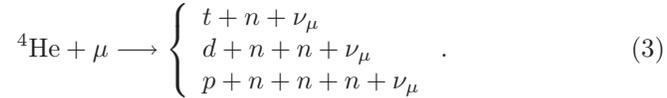
Таблица 1: Рассмотренные источники ошибок и вычисленные их значения для измеренной скорости  $\lambda_t$ .

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 ( ${}^3\text{He}\mu$ )<sup>+</sup> 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  $\lambda_t$  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  $\mu^-$ . Скорость поглощения мюона по каналам развала  $\lambda_b$  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  $F_\pi$  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  $\lambda_t$ , 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  $\lambda_t$ , в работе [5] вычислен эффективный параметр  $\pi$ - ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{H}$  взаимодействия  $G^{eff} = 45.8 \pm 2.4$ . Точность  $G^{eff}$  в этих расчетах почти на порядок превосходит точность экспериментов по рассеянию  $\pi$ -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  $\lambda_t$  соответствует статистической заселенности уровней сверхтонкой структуры  ${}^3\text{He}\mu$  - атома.
4. Прецизионное измерение скорости  $\mu$  - захвата  $\lambda_t$  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  $\lambda_t$  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  $\lambda_t$ .

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.

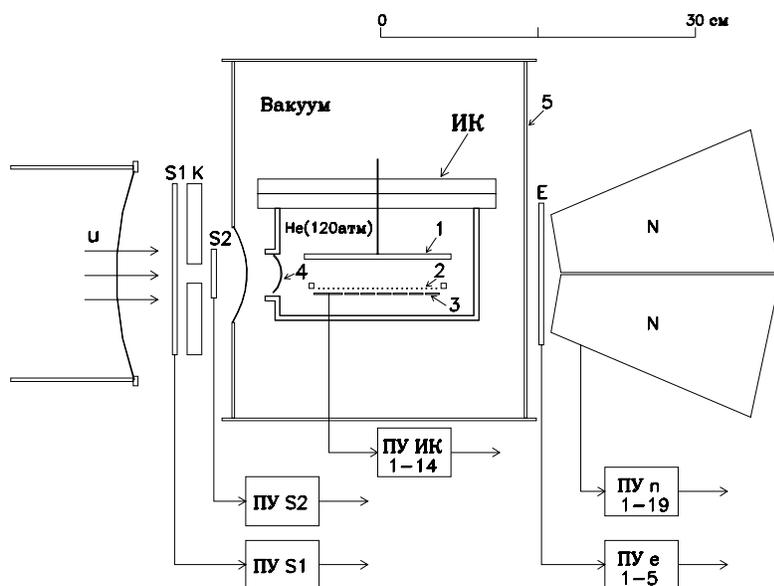


Рис. 1: Схема экспериментальной установки. Обозначения: ИК — ионизационная камера (1, 2, 3, 4 — катод, сетка, анод, бериллиевое окно); 5 — охранный объем; S1 и S2 — мониторные счетчики; К — коллиматор пучка; Е — электронные счетчики; N — нейтронные счетчики; ПУ — предусилители.

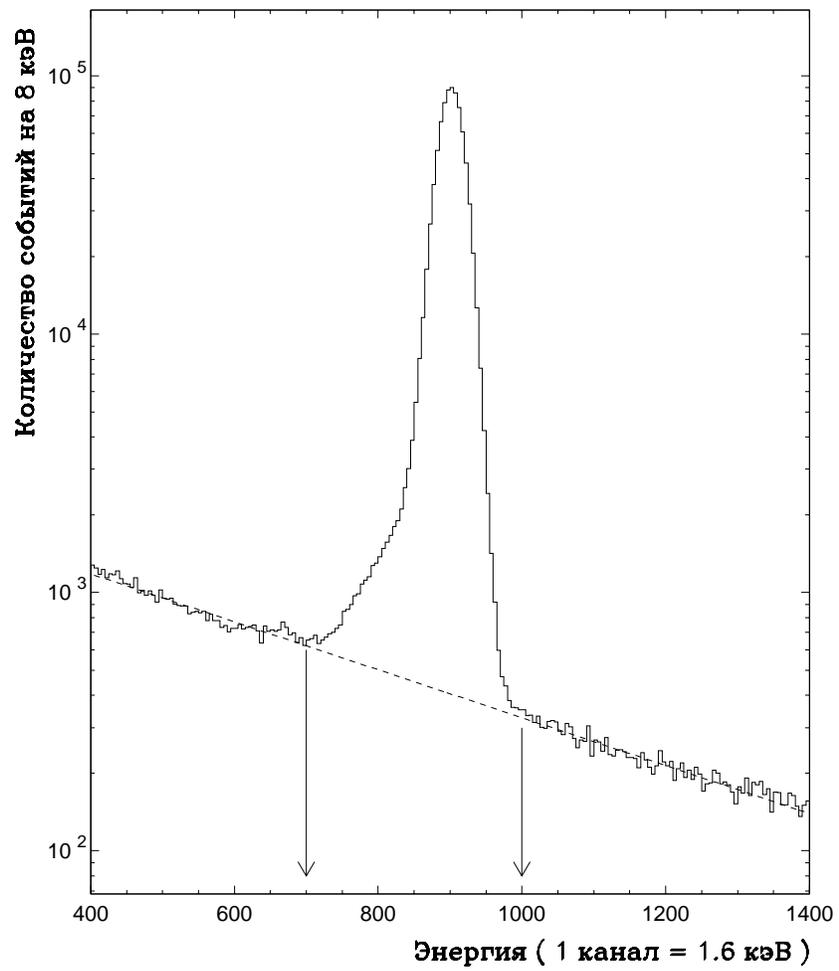


Рис. 2: Энергетический спектр сигналов от продуктов поглощения мюона ядром  $^3\text{He}$ , соответствующих основному типу событий, в которых треки от тритона полностью уложились на одном аноде.

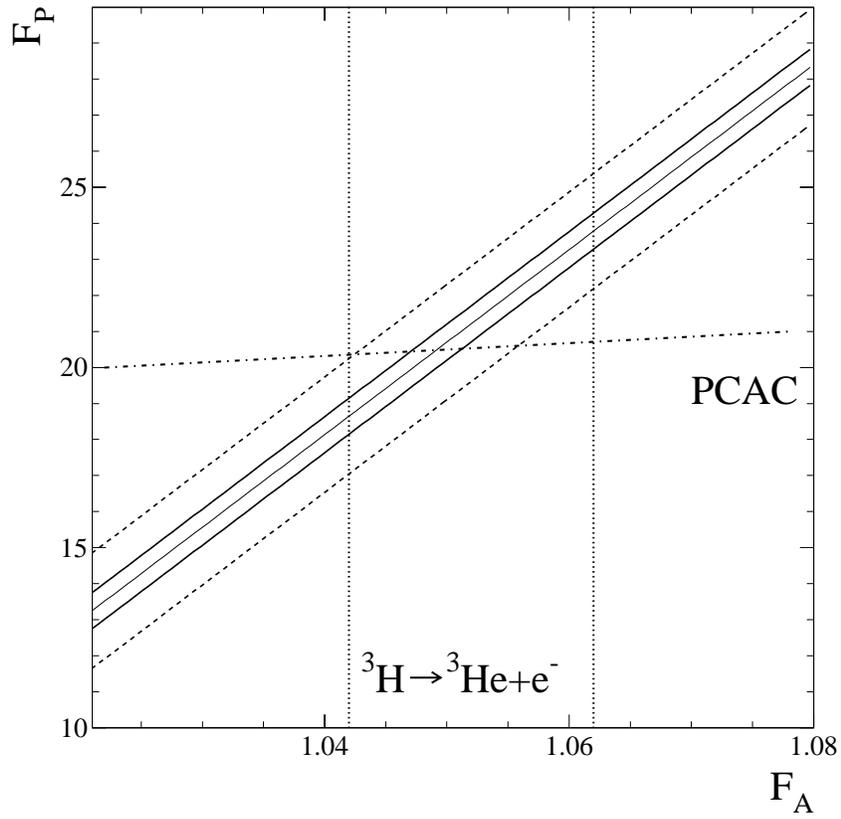


Рис. 3: Ограничения на возможные значения аксиального  $F_A$  и псевдоскалярного  $F_P$  форм-факторов. Коридор из сплошных кривых это результат измеренной нами  $\lambda_t$  с учетом только ошибки эксперимента ( $\pm 1\sigma$ ), пунктиром показано как расширяется коридор если учесть ошибки  $F_V$  и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