

P13-2003-102

**СПЕКТРОМЕТР РИВЕТА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
РЕДКИХ И ЗАПРЕЩЕННЫХ РАСПАДОВ  
МЮОНОВ И ПИОНОВ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Э. Фрлеж<sup>1</sup>, Д. Почанич<sup>1</sup>, В. Ли<sup>1</sup>, Р. Майнхарт<sup>1</sup>, Л. Смит<sup>1</sup>, В. Стефенс<sup>1</sup>,  
К. Зионк<sup>1</sup>, В. Бергл<sup>2</sup>, Р. Хорисбергер<sup>2</sup>, С. Ритт<sup>2</sup>, Р. Шнидер<sup>2</sup>, Х. П. Виртц<sup>2</sup>,  
В. А. Баранов<sup>3</sup>, В. А. Калинин<sup>3</sup>, В. В. Карпухин<sup>3</sup>, Н. В. Хомутов<sup>3</sup>,  
А. С. Коренченко<sup>3</sup>, С. М. Коренченко<sup>3</sup>, Н. П. Кравчук<sup>3</sup>, Н. А. Кучинский<sup>3</sup>,  
Д. А. Мжавия<sup>3</sup>, А. М. Рождественский<sup>3</sup>, В. В. Сидоркин<sup>3</sup>, З. Б. Цамалаидзе<sup>3</sup>,  
Т. Сакелашвили<sup>4</sup>, Б. Г. Ритчи<sup>5</sup>, И. Супек<sup>6</sup>, Т. Козловский<sup>7</sup>

---

<sup>1</sup>Department of Physics, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904-4714, USA

<sup>2</sup>Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>4</sup>Институт физики высоких энергий, Тбилисский государственный университет,  
ГУС-380086 Тбилиси

<sup>5</sup>Department of Physics and Astronomy, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

<sup>6</sup>Rudjer Bošković Institute, HR-10000 Zagreb, Croatia

<sup>7</sup>Institute for Nuclear Studies, PL-05-400 Swierk, Poland

# Введение

Одной из важнейших целей исследований в физике элементарных частиц является определение пределов применимости Стандартной модели и поиск явлений, выходящих за ее рамки и свидетельствующих тем самым о наличии “новой физики”. Создание ускорителей на все более высокие энергии всегда преследовало и эту цель. Другой путь для достижения тех же целей заключается во все более точном изучении известных, в том числе очень редких, процессов. Таким исследованием является, в частности, максимально точное измерение вероятности очень редкого фундаментального полулептонного процесса — бета-распада заряженного пиона на нейтральный пион, позитрон и нейтрино ( $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$ ).

Редкий распад  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$  (бета-распад пиона,  $\pi\beta$ ) является процессом, в котором можно пытаться наблюдать отклонение от Стандартной модели. Относительная вероятность этого распада составляет  $\sim 10^{-8}$  и, в пределах точности измерений до данного эксперимента ( $\sim 4\%$ ) [1], находится в согласии с расчетами на основе современной Стандартной модели электромагнитных взаимодействий. Бета-распад пиона аналогичен сверхразрешенному чистому ферми-переходу в ядерных бета-распадах ( $0^+ - 0^+$ ), однако является уникальным, потому что в нем участвуют только легкие адроны.

Последнее и наиболее точное определение скорости бета-распада  $1/\tau_{\pi\beta}$  было сделано в эксперименте [1] на мезонной фабрике LAMPF (Лос-Аламос, США) с помощью времяпролетной методики. Результат этого эксперимента,  $(0,394 \pm 0,015) \text{ с}^{-1}$ , находится в хорошем соответствии с предсказаниями Стандартной модели  $(0,4027 \pm 0,0018) \text{ с}^{-1}$ , но с  $\sim 3,8\%$  неопределенностью, что выше радиационных поправок, которые оцениваются на уровне  $\sim 3\%$  [3, 4]. С учетом времени жизни  $\pi^+$  результат [1] дает относительную вероятность бета-распада пиона относительно всех остальных распадов  $\Gamma_{\pi\beta}/\Gamma_{total} = (1,026 \pm 0,039) \cdot 10^{-8}$ .

На первом этапе эксперимента RIBETA [2] планируется зарегистрировать  $\sim 50000$  событий  $\pi\beta$  и определить относительную вероятность распада со статистической точностью  $\sim 0,5\%$ . Предложения по второй фазе эксперимента по достижению статистической точности  $\sim 0,2\%$  будут рассмотрены по завершении первого этапа.

## 1 Детектор

С целью выполнения этой программы создан широкоапертурный немагнитный детектор RIBETA, оптимизированный для измерения фотонов и электронов в энергетическом диапазоне 5–150 МэВ. В состав спектрометра входят:

1. Пассивный свинцовый коллиматор РС.
2. Пучковый счетчик ВС, два цилиндрических активных коллиматора АС1

и AC2, активный замедлитель AD. Все эти счетчики, как и годоскоп, сделаны из пластического сцинтиллятора Bicron BC-400.

3. Сегментированная пластиковая сцинтилляционная мишень AT.
4. Две цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры MWPC1 и MWPC2, окружающие активную мишень.
5. Сегментированный быстрый пластиковый годоскоп PV для идентификации частиц.
6. Быстрый сферический электромагнитный калориметр.
7. Пластиковые вето-счетчики космических мюонов.

Основные элементы спектрометра показаны на рис.1,2. Детектор с высоковольтной и газовой системами, триггерной, цифровой электроникой, системой стабилизации температуры и влажности, компьютерами и другим служебным оборудованием смонтирован на единой платформе.

Спектрометр РИВЕТА установлен в PSI на 17-метровом пионном пучке  $\pi E1$  [5]. В эксперименте используется пучок  $\pi^+$ -пионов с импульсом 113,4 МэВ,  $\Delta P/P = 1,3\%$  (FWHM) и номинальной интенсивностью  $1,4 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ , при токе ускорителя 1,7 мА. Достигнув центра детектора с относительно высоким моментом, пионы попадают в активный замедлитель, который уменьшает среднюю кинетическую энергию пионов в мишени с 40,3 МэВ до 27,6 МэВ.

Выбор импульса пучка определяется необходимостью хорошего разделения пионов, позитронов и мюонов на базе мезообразующая мишень — пучковый счетчик (BC), а также пучковый счетчик (BC) — активная мишень (AT).

## 1.1 Пучковые детекторы и активная мишень

Сформированный системой квадрупольных магнитов пучок положительных пионов попадает в активную мишень спектрометра (AT), пройдя через свинцовый коллиматор, пучковый счетчик (BC) и активный замедлитель (AD) (рис.2), сигналы с которых, вместе с высокочастотным сигналом от ускорителя (RF), используются в организации триггера.

Пучковый счетчик BC — первый по пучку детектор спектрометра. Его энергетическое разрешение равно 12,7% (RMS) при размерах  $25 \times 25 \times 2 \text{ мм}^3$ .

Для того чтобы уменьшить число запусков, не связанных с остановками пионов в мишени, используются два активных коллиматора AC1 и AC2. Они имеют форму цилиндрических колец толщиной 25,4 мм. Внешний и внутренний диаметры первого по пучку счетчика соответственно 120 мм и 50 мм, второго — 172 мм и 90 мм.

При интенсивности остановок пионов в мишени  $10^6 \text{ с}^{-1}$  скорость счета в AC1 и AC2 была равна  $10^4 \text{ с}^{-1}$  и  $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  соответственно.

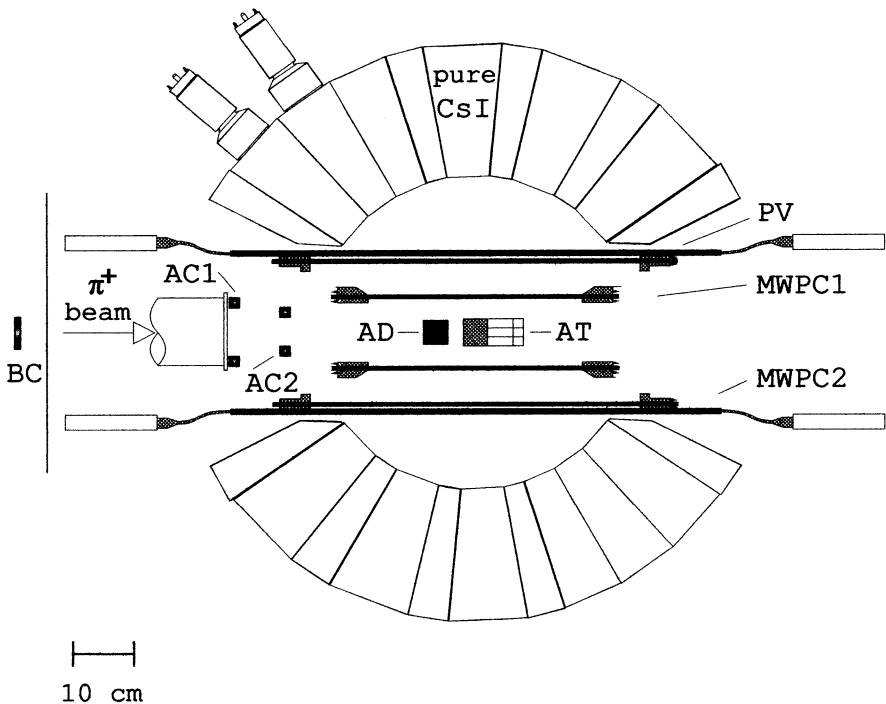


Рис. 1: Схематическое изображение спектрометра PIBETA. В масштабе показаны основные элементы: активный замедлитель AD, активная мишень AT, коллиматоры AC1 и AC2, цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры MWPC, годоскоп PV, калориметр. Пассивный свинцовый коллиматор PC и veto-счетчики космических частиц не показаны

Активная мишень диаметром 40 мм и длиной 50 мм сегментирована на 9 элементов. Центральная часть радиусом 3,5 мм окружена двумя кольцевыми счетчиками толщиной 11,5 мм и 5 мм. Каждый такой кольцевой счетчик, в свою очередь, разделен на четыре сегмента (рис.3). Такое разбиение позволяет выравнивать загрузки по остановкам пионов в каждом из сегментов, работающих как независимые счетчики.

Форма и диаметр активного замедлителя соответствуют мишени. Его хорошее энергетическое разрешение 7,8% (RMS) для остановившихся пионов позволяет легко идентифицировать одно-, двух- и трехчастичные события.

Измеряя время между сигналами от пучкового счетчика, активной мишени и высокочастотной синхронизации от ускорителя (RF), можно идентифицировать частицы. Так на базе 3,87 м (BC — AT), для нашего импульса, время пролета  $e^+$  и  $\mu^+$  относительно  $\pi^+$  составляет -7,3 нс и -2,8 нс соответственно. Пролет-

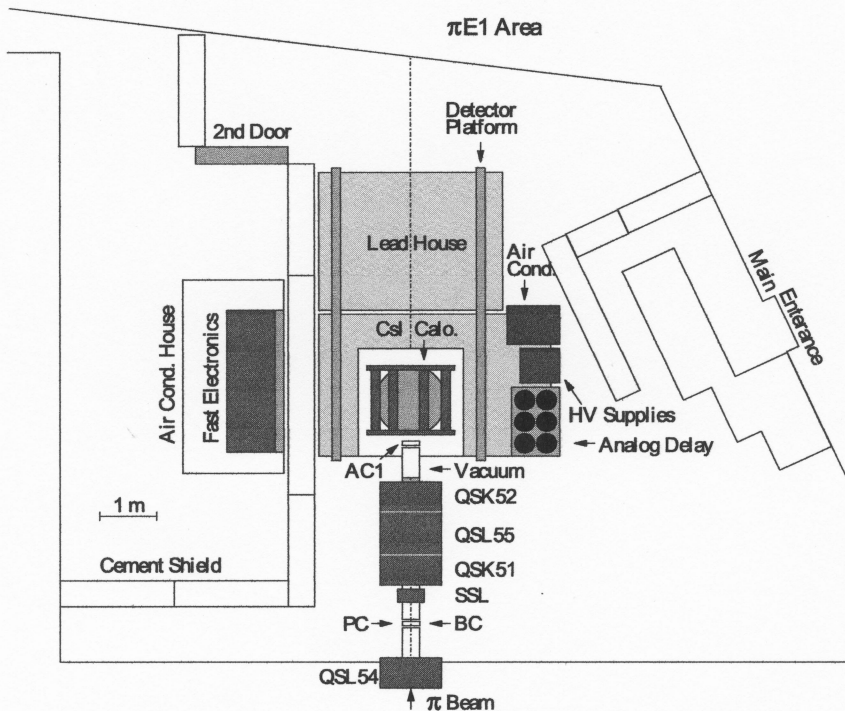


Рис. 2: Размещение спектрометра PIBETA в экспериментальной зоне  $\pi E1$ . Детектор размещен на одной платформе вместе с быстрой электроникой, системой кондиционирования, высоковольтной системой и кабелями аналоговой задержки. Q — квадрупольные фокусирующие магниты пионного канала. BC — пучковый счетчик. PC — пассивный свинцовый коллиматор

ная база (мезонообразующая мишень (RF) — пучковый счетчик) равна 15,61 м. Измеренная таким образом примесь  $e^+$  и  $\mu^+$  в пучке в области мишени не превышает 0,4% и 0,2% соответственно, что показывает высокую чистоту пучка  $\pi^+$  мезонов (рис.4).

Свет с каждого из детекторов BC, AC1, AC2, AD и AT снимается с помощью четырех мини-ФЭУ диаметром 8 мм Hamamatsu R7400U. Аналоговые сигналы каждого детектора суммируются. Эти же ФЭУ используются для сбора света с сегментов активной мишени.

На рис.4 показано распределение остановившихся в мишени  $\pi^+$  по  $z$ - и  $r$ - $\varphi$ -координатам.

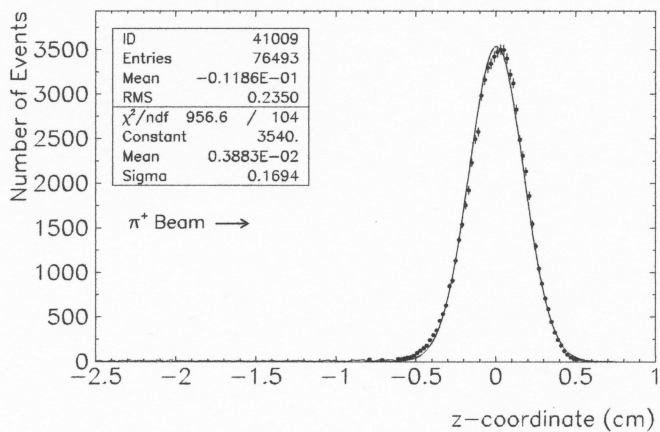
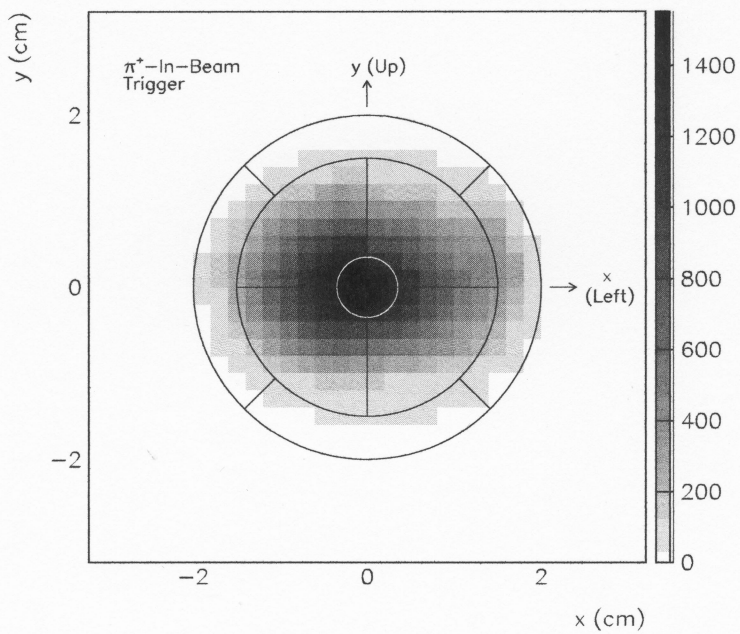


Рис. 3: Распределение остановившихся пионов в активной мишени. Показано сегментирование активной мишени

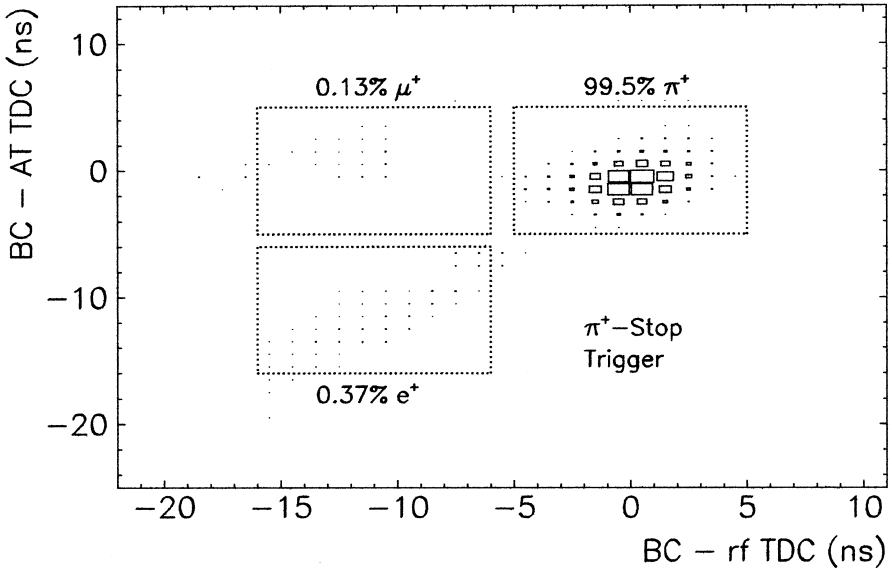


Рис. 4: Идентификация частиц в пучке по времяпролетной методике. Пролетные базы: BC—AT 3,87 м, мезонообразующая мишень (RF)—BC 15,61 м

## 1.2 ЦМПК

Для подавления случайных совпадений, связанных с высокой интенсивностью остановок пионов в мишени (до  $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ), требуется высокое двухтрековое разрешение для заряженных частиц. Для электромагнитного калориметра с его размерами, геометрией и сегментацией, возможности многоливневого разрешения ограничены примерно  $0,004 \cdot 4\pi$  по телесному углу. Поэтому необходим дополнительный детектор, обеспечивающий высокое двухтрековое разрешение для заряженных частиц. Этот детектор должен обладать следующими свойствами:

- малым количеством вещества для уменьшения вероятности регистрации  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ ;
- высокой эффективностью регистрации заряженных частиц ( $>99,9\%$ );
- возможностью работать при больших нагрузках (до  $10^7 \text{ с}^{-1}$ );
- стабильностью в работе и радиационной стойкостью;
- цилиндрической геометрией.



Наилучшим сочетанием этих свойств обладают цилиндрические многопро-  
волочные “безмассовые” пропорциональные камеры, технология которых раз-  
работана в ЛЯП ОИЯИ [6, 7]. Для спектрометра РИВЕТА была выбрана схема  
с двумя независимыми самоподдерживающимися камерами, обеспечивающими  
измерение координат  $r - \varphi$  и  $z$  (вдоль проволочки) . Поперечное сечение сборки  
пропорциональных камер показано на рис.5. Азимутальная координата трека  
задается срабатыванием анодной проволочки. Координата вдоль оси камеры  
определяется из амплитудного анализа индуцированных сигналов на отдель-  
ных стрипах, образующих катодные поверхности. Стрипы имеют спиральную  
форму с противоположным углом закручивания на внутреннем и наружном катод-  
ных цилиндрах. В MWPC1 стрипы делают более одного витка на катодном  
цилиндре, поэтому для устранения неоднозначности в определении координаты  
и увеличения нагрузочной способности они разделены пополам, а информация  
снимается с двух сторон камеры.

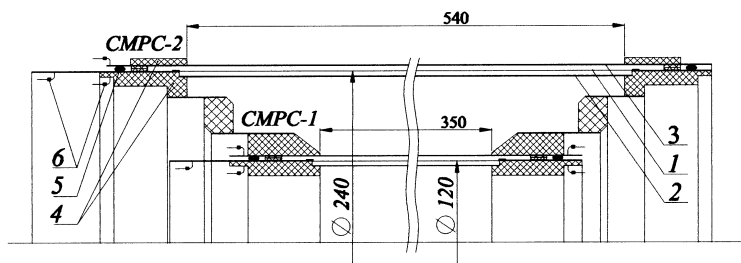


Рис. 5: Сечение сборки ЦМПК. 1 — анодные проволочки, 2 — опорный цилиндр и внутренний катод, 3 — защитный цилиндр и внешний катод, 4 — фланцы камер, 5 — газовое уплотнение, 6 — разъемы для анодных и катодных сигналов

С целью уменьшения вещества в рабочей зоне, элементы камер имеют ми-  
нимально допустимую толщину и выполнены из материалов с малым атомным  
номером  $Z$  — лавсан, алюминий. Анод выполнен из позолоченного вольфрам-  
рениевого провода диаметром 20 мкм.

Основные параметры цилиндрических пропорциональных камер спектро-  
метра РИВЕТА приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер

Камера	MWPC1	MWPC2
Общая длина, мм	580	730
Активная длина, мм	350	540
Диаметр анодного слоя, мм	120	240
Число анодных проволочек, мм	192	384
Шаг анодных проволочек, мм	1,96	1,96
Число стрипов на внутренней поверхности	2 × 64	192
Число стрипов на внешней поверхности	2 × 64	192
Угол наклона внутренних стрипов, град	36,9	44,6
Угол наклона внешних стрипов, град	-33,6	-42,3
Ширина стрипов, мм	3	2,4
Расстояние между стрипами, мм	0,4	0,3
Количество вещества, мг/см <sup>2</sup>	53,90	74,76
Количество вещества, 10 <sup>-3</sup> радиационных длин	1,442	1,959

На рис.6 приведено распределение зарядов, индуцированных на внутренней и внешней катодных поверхностях, в одном событии. Как можно видеть, наблюдается корреляция между наведенными зарядами, что дополнительно помогает однозначно идентифицировать треки.

Экспериментальная точность измерения координаты трека вдоль анодной проволочки была измерена на стенде непрямым методом по определению места развития лавины. Из анализа катодных сигналов [8] она меньше 0,2 мм и 0,5 мм для срабатывания одной или двух соседних проволочек соответственно (рис.7). Реальная пространственная точность вдоль проволочки, полученная на установке из анализа треков космических мюонов, дает величину менее 1 мм (рис.8). Ухудшение пространственного разрешения относительно стендовых измерений [8] связано с большим разбросом углов наклона треков относительно проволочки в реальных условиях эксперимента.

Точность измерения азимутальной координаты определяется расстоянием между анодными проволочками и дает угловое разрешение для камер  $\sim 0,25^\circ$ .

При интенсивности остановок  $\pi^+$  в мишени  $10^6 \text{ с}^{-1}$  эффективность регистрации заряженных частиц для внутренней и внешней камеры соответственно  $>94\%$  и  $>97\%$  (рис.9). Это обеспечивает общую комбинированную эффективность камер  $>99,8\%$ . Для рабочей газовой смеси  $\text{Ar}(49,9\%)\text{-C}_2\text{H}_4(49,9\%)\text{-CBrF}_3(0,2\%)$  длина плато в камерах при этом превышает 300 вольт.

Временное разрешение многопроволочных пропорциональных камер, полученное из анализа кривых задержанных совпадений, меньше 25 нс [8].

В ЛЯП ОИЯИ также была разработана и изготовлена анодная и катодная электроника пропорциональных камер [9]. Основной ее особенностью является передача сигналов от детектора к усилителю с помощью коаксиального кабеля

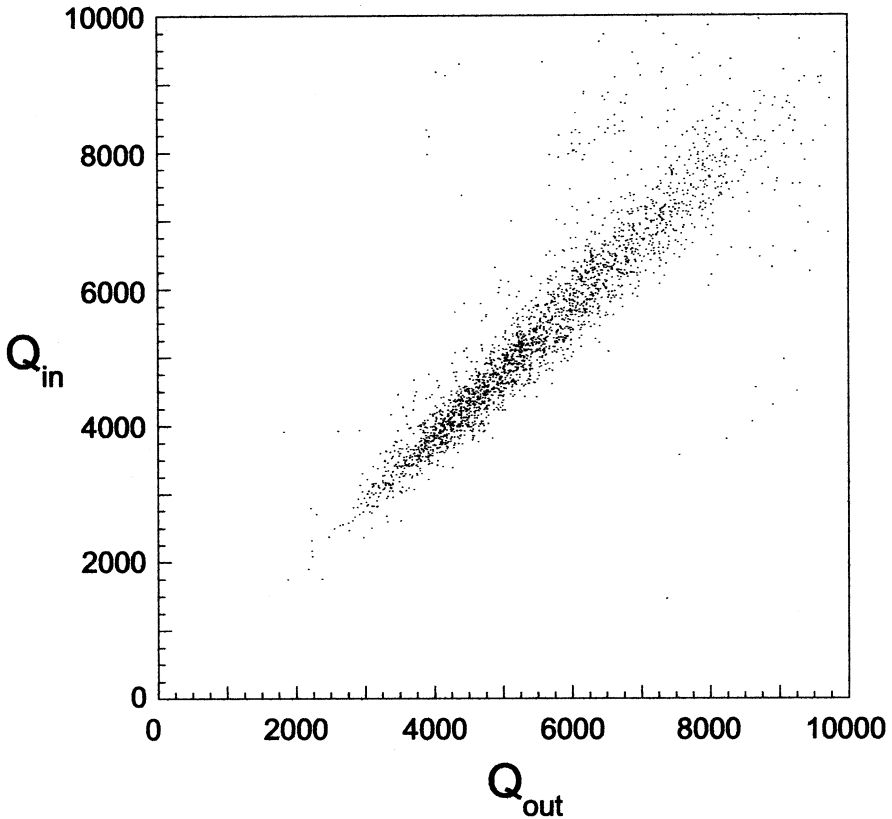


Рис. 6: Распределение зарядов (в условных единицах), индуцированных на внутренней ( $Q_{in}$ ) и внешней ( $Q_{out}$ ) катодных поверхностях цилиндрических пропорциональных камер

длиной 1,5 м и диаметром 0,5 мм. Такое решение связано с конструктивной невозможностью размещения электроники непосредственно на камерах.

Анодная электроника выполнена в стандарте КАМАК [9]. В одном одноширинном модуле содержится 32 полных канала регистрации, состоящих из усилителя на 8-канальной микросхеме Ampl18.3 [10, 11], блока задержки сигнала с использованием FIFO IDT72421 и цифровой части для вывода информации в ЭВМ на программируемых логических матрицах типа ALTERA. Общее количество каналов анодной электроники 576.

Катодная электроника имеет 640 каналов, выполненных по SMD-технологии по 32 канала в одном блоке. Усиление по току  $500 \pm 10$ . Шум усилителя составляет  $3300 e^-$ . Для амплитудных измерений используются стандартные АЦП

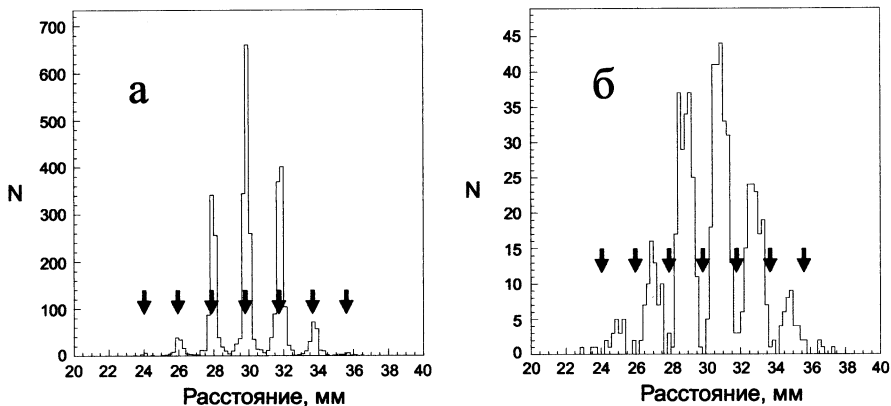


Рис. 7: Центры наведенных зарядов в  $r - \varphi$ -проекции для а) одиночных и б) двойных анодных кластеров

LeCroy 1882F. Сигналы на АЦП поступают через 200 нс задержки на основе коаксиального кабеля РК-50-3-13.

### 1.3 Годоскоп

Годоскоп, входящий в состав спектрометра, размещен между цилиндрическими пропорциональными камерами и калориметром. Он имеет 20 независимых счетчиков. Каждый счетчик состоит из сцинтиллятора размером  $3,2 \times 41,9 \times 598 \text{ мм}^3$ , двух световодов и двух фотоумножителей Burle Industries S83062E. Свет снимается с двух противоположных торцевых поверхностей сцинтилляторов. Годоскоп смонтирован на цилиндре из углепластика толщиной 1 мм и покрывает тот же телесный угол, что и калориметр из кристаллов CsI и цилиндрические пропорциональные камеры.

Измеренное энергетическое разрешение отдельного счетчика годоскопа для минимально ионизирующих частиц 33,2%. Как иллюстрация работы годоскопа на рис.10 показан энергетический спектр зарегистрированных позитронов и протонов, скорректированный на угол падения частиц.

Средняя эффективность регистрации за все время набора статистики 99,2%. При интенсивности остановок пионов в мишени  $10^6 \text{ с}^{-1}$  загрузка на один счетчик годоскопа  $\sim 130 \text{ кГц}$ .

При выделении заряженных частиц общая неэффективность регистрации PV и ЦМПК равна  $(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$ .

Годоскоп является частью трековой системы заряженных частиц и обеспечивает:

- вместе с ЦМПК эффективную регистрацию заряженных частиц;

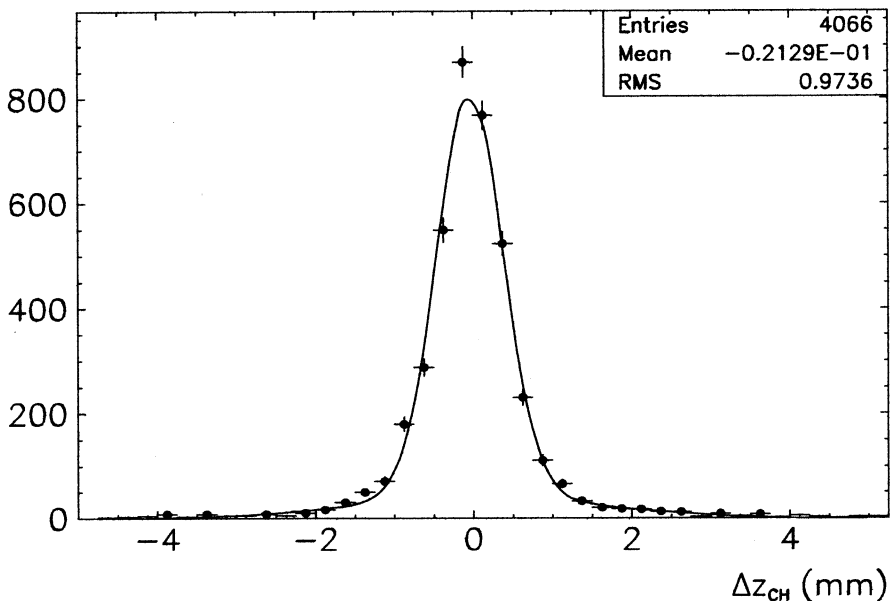


Рис. 8: Пространственное разрешение по Z-координате для ЦМПК1

- вместе с ЦМПК надежную дискриминацию для минимально ионизирующих частиц — космических мюонов, позитронов/электронов и протонов;
- измерение азимутального угла ( $\pm 9^\circ$ );
- прецизионную временную информацию для заряженных частиц ( $\pm 0,8$  нс).

## 1.4 Калориметр из кристаллов CsI

Ливневый калориметр является основным детектором спектрометра. Поскольку в распаде  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e(\pi\beta)$  регистрация  $\pi^0$  идет через регистрацию распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ , калориметр должен удовлетворять следующим требованиям:

- возможностью работать при высоких нагрузках;
- большим телесным углом для эффективной регистрации  $\pi^0$ ;
- хорошим временным и энергетическим разрешением для эффективного подавления фоновых событий.

Таковыми характеристиками обладает сферический калориметр из кристаллов чистого CsI. Данные кристаллы являются наиболее предпочтительными из-за

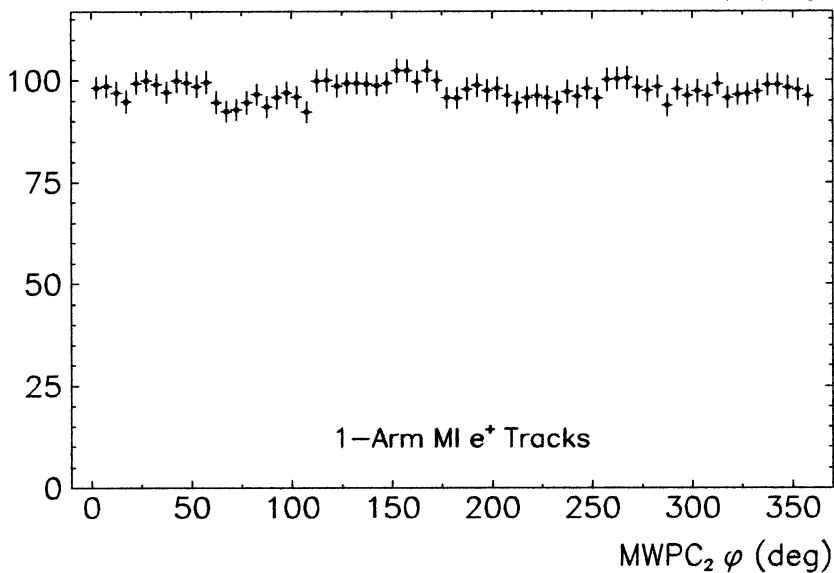
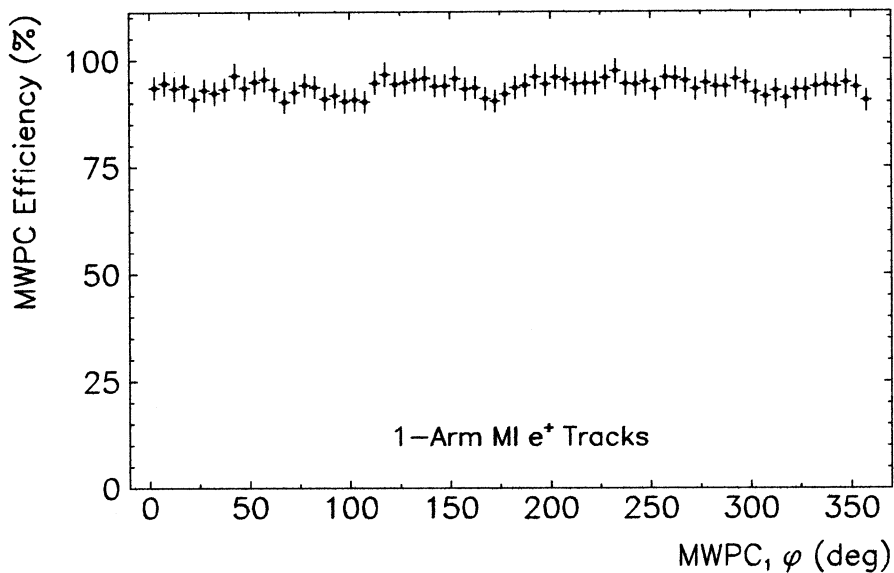


Рис. 9: Эффективность цилиндрических пропорциональных камер как функция азимутального угла для минимально ионизирующих частиц

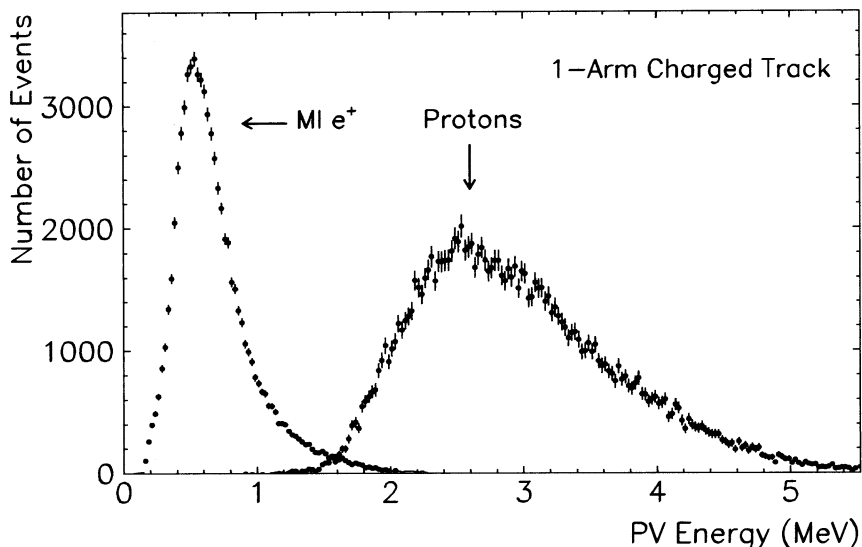


Рис. 10: Спектр потерь энергии в годоскопе для минимально ионизирующих позитронов (слева) и протонов с энергией 5–150 МэВ (справа)

ряда характеристик, таких, как высокая плотность —  $4,53 \text{ г/см}^3$ , малая радиационная длина  $X_0$  —  $1,85 \text{ см}$  и время высвечивания быстрой компоненты —  $7 \text{ нс}$ . Основные характеристики кристаллов CsI приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Основные свойства сцинтилляторов из чистого CsI спектрометра РИВЕТА**

Плотность, $\text{г/см}^3$	4,53
Радиационная длина, см	1,85
Показатель преломления	1,80
Длина волны быстрой компоненты, нм	305
Время высвечивания быстрой компоненты, нс	7
Длина волны медленной компоненты, нм	450
Время высвечивания медленной компоненты, нс	35
Отношение световыхода быстрой компоненты к общему световыходу, F/T	$>0,76$
Неоднородность световыхода, %/см	0,28
Температурный коэффициент световыхода, %/°C	-1,56
Временное разрешение, нс	0,68
Стабильность	слегка гигроскопичен
Длина кристаллов, мм	220
Объем кристаллов, $\text{мм}^3$	797-1718

Основная часть калориметра спектрометра РИВЕТА состоит из 220 кристаллов, покрывающих  $0,77 \cdot 4\pi$  телесного угла.

Еще 20 кристаллов CsI используются как veto-счетчики в местах входа и выхода пучка. Длина каждого кристалла равна 22 см или 12 радиационных длин. Для оптимизации светосбора сфера построена из 7 различных типов кристаллов (гексагональные, пентагональные и трапециевидные пирамиды), объемом от 793 до 1718 см<sup>3</sup>. Внутренний радиус образуемой при сборке калориметра сферы равен 26 см, внешний — 48 см.

Первые 25 кристаллов были изготовлены фирмой “Viscon”. Остальные 215 кристаллов были выращены в Харькове (“Монокристалл”, Украина). Неточность формы изготовления кристаллов +150 мкм/-50 мкм, что специально контролировалось. Это необходимо для максимального уменьшения неэффективных зон между кристаллами и, соответственно, улучшения рабочих характеристик калориметра.

Все кристаллы покрыты специально разработанным органосиликоновым спектросмещающим покрытием на основе PPO+POPOP+COUM.1 [12, 13]. Такое покрытие обеспечивает:

- частичную защиту поверхности кристаллов от атмосферных эффектов;
- смещение спектра излучения в область чувствительности ФЭУ и большей прозрачности кристаллов к собственному излучению, что обеспечивает улучшение энергетического разрешения;
- уменьшает неоднородность светосбора вдоль оси кристаллов.

При этом временное разрешение покрашенных кристаллов не изменяется.

Кристаллы просматриваются ФЭУ ЕМІ 9821QKB с фотокатодом диаметром 75 мм и ЕМІ 9211QKA с фотокатодом диаметром 46мм [14]. Спектральная чувствительность этих ФЭУ начинается от 175 нм с максимумом при  $\sim 380$  нм, что близко к максимуму излучения чистого CsI, равного 310 нм [15].

Для установки РИВЕТА отбирались кристаллы, в которых вклад быстрой компоненты в спектре излучения был не менее 76% от общего световыхода [14, 16]. Распределение кристаллов по вкладу быстрой компоненты приведено на рис.11.

При пороге регистрации 50 МэВ такое разбиение обеспечивает эффективность регистрации фотонов и позитронов с энергией 70 МэВ соответственно 99,3% и 98,6%.

Полученное из экспериментальных данных энергетическое разрешение (RMS) калориметра составило  $\sim 5,0\%$  для позитронов с энергией 70 МэВ, для распадающихся в покое  $\pi^0$  энергетическое разрешение (RMS)  $\sim 4,0\%$ . Двухчастичное временное разрешение калориметра  $\sim 1,3$  нс в режиме реального времени и  $\sim 0,8$  нс по результатам обработки записанных данных. Угловое разрешение для позитронного трека с энергией 70 МэВ  $\sim 2^\circ$ .



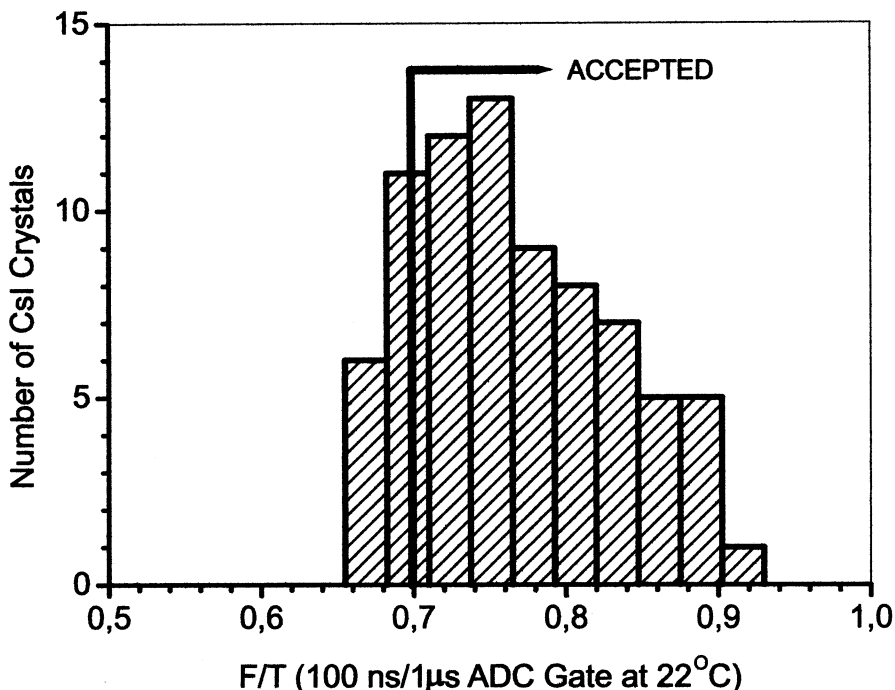


Рис. 11: Распределение кристаллов чистого CsI по отношению быстрой компоненты к общему световыходу

### 1.5 Вето-счетчики космических мюонов

Прецизионное измерение распада  $\pi\beta$  делает необходимым защиту от всех внешних источников излучения в зале, в том числе и от космических частиц. По этой причине активная часть спектрометра имеет двойную защиту. Это пассивная защита в виде домика из свинцовых блоков толщиной 10 см и активная, обеспечиваемая сцинтилляционными счетчиками - вето-счетчиками космических мюонов.

Активная космическая защита состоит из 5 сцинтилляционных плоскостей, покрывающих четыре боковые стороны и крышу свинцового домика. Пластиковые сцинтилляторы изготовлены в России и их оптические свойства близки к характеристикам BICRON BC-400. Размеры отдельного счетчика  $300 \times 25 \times 2290 \text{ мм}^3$ . Из-за больших размеров их временное разрешение ограничено 15 нс (FWHM). Энергетическое разрешение соответствует статистике  $\sim 5 \text{ ф.э./МэВ}$ .

Эффективность регистрации, определяемая как часть космических событий, когда треки реконструируются в калориметре, более 95%.

Использование вето-счетчиков космических мюонов уменьшает вклад в интенсивность остановок пионов в мишени от космических частиц до уровня  $5 \cdot 10^{-3}$  Гц.

## 1.6 Температурная стабилизация спектрометра

Кристаллы чистого CsI имеют сильную температурную зависимость световых выходов, равную  $-1,56\%/^{\circ}\text{C}$  [17], и слабую гигроскопичность. По этой причине объем спектрометра PIBETA термостабилизирован. В нем постоянно поддерживается температура  $22^{\circ}\text{C}$  и относительная влажность около 50%.

## 2 Система сбора данных MIDAS

В качестве программного обеспечения для сбора данных с установки PIBETA использована новая система сбора данных общего назначения MIDAS (Maximum Integration Data Acquisition System), разработанная для физических экспериментов малого и среднего масштаба [18]. Эта система впервые была отлажена и успешно применена именно в эксперименте PIBETA. Программы, входящие в состав MIDAS, могут работать под управлением различных операционных систем: Windows NT, UNIX, VMS, VxWorks и MS-DOS. Имеются драйверы для электронной аппаратуры в стандартах CAMAC, VME, Fastbus, GBIB, высоковольтных источников питания и многих других электронных модулей. Для пользователей предоставляются программные шаблоны и библиотеки, которые позволяют легко дополнить систему пользовательским кодом как для считывания аппаратуры, так и для анализа полученных данных.

Специализированный сервер, работающий по протоколу HTTP, через стандартный интернет-браузер (IE, Netscape и т.п.) обеспечивает удаленное управление экспериментом и доступ к базе данных эксперимента. В эксперименте PIBETA система сбора данных включала в себя несколько ПК (на основе процессоров Intel Pentium), соединенных локальной сетью Fast Ethernet: компьютер (frontend), к которому подключены крейты с регистрирующей электроникой; компьютер (slow control frontend) для контроля напряжений питания, температуры и других медленно изменяющихся параметров; компьютер (backend) для первичной обработки данных и их записи на диски и ленты, а также передачи их по локальной сети в централизованный архив; вспомогательный компьютер для управления экспериментом.

## Заключение

Таким образом, создан немагнитный широкоапертурный спектрометр PIBETA, что позволяет провести не только прецизионное измерение бета-распада пиона  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$  (рис.12), но и в той же экспозиции набирать

статистику по радиационным распадам пиона  $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \gamma$  и мюона  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \gamma$ , а также распаду  $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ .

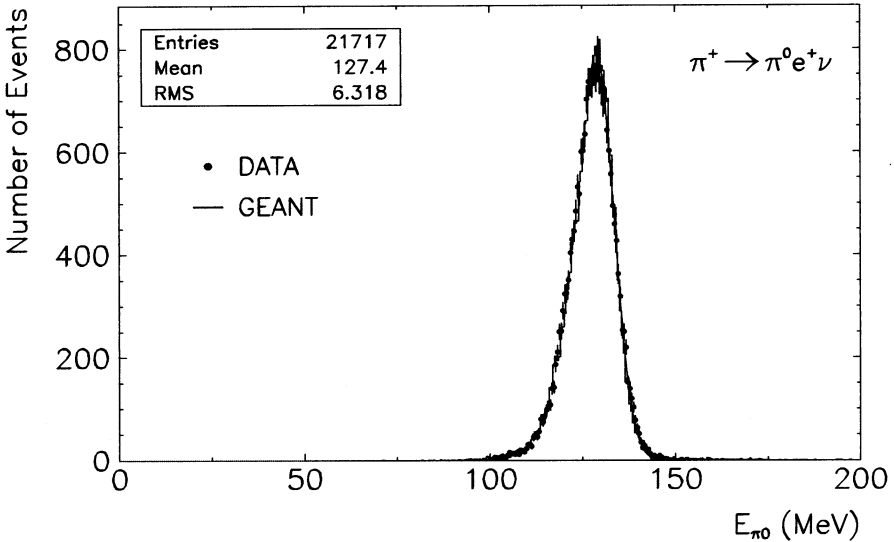


Рис. 12: Амплитудное распределение зарегистрированных распадов. Сплошная кривая — моделирование с помощью GEANT

Набор данных по этим распадам завершен в декабре 2001 года. Как видно из приводимой таблицы 3, в настоящее время коллаборацией PИВЕТА набрана статистика, более чем на порядок превышающая ранее известную.

Таблица 3. Количество событий редких распадов пионов и мюонов, зарегистрированных на установке PИВЕТА, а также во всех предыдущих экспериментах

Распад	Статистика PИВЕТА	Мировая статистика
$\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$	$> 5 \cdot 10^4$	$1,77 \cdot 10^3$
$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$	$> 5,8 \cdot 10^8$	$0,35 \cdot 10^6$
$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \gamma$	$> 6 \cdot 10^4$	$1,35 \cdot 10^3$
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \gamma$	$> 5 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^3$

В настоящее время в ОИЯИ для спектрометра создается тонкостенная жидководородная мишень, с использованием которой будет проведен поиск запрещенного распада  $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  и исследование распада  $\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ .

## Список литературы

- [1] McFarlane W. K., Auerbach L. B., Gaille F. C. et al. // *Phys. Rev. D.* 1985. V. 32. P. 547-565.
- [2] Počanić D., Day D., Frlež E. et al. PSI R-89.01 Experiment Proposal, Submitted 27 May 1991, Revised 11 Dec. 1991. Paul Scherrer Institute, Villigen, 1991.
- [3] Marsiano W. J., Sirlin A. // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56. P. 22-25.
- [4] Jaus W. // *Phys. Rev. D.* 2001. V. 63. P. 053009.
- [5] PSI Users' Guide: Accelerators Facilities. Paul Scherrer Institute, Villigen PSI, 1994.
- [6] Кравчук Н. П. // *ЭЧАЯ.* 1994. Т. 25, вып. 5. С. 1244-1278.
- [7] Карпухин В. В., Коренченко А. С., Коренченко С. М. и др. // *ПТЭ.* 1996. № 1. С. 30-34.
- [8] Karpukhin V. V., Khomutov N. V., Kisel I. V. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1998. V. 418. P. 306-313.
- [9] Калинин В.А., Коренченко А. С., Коренченко С. М. и др. // *ПТЭ.* 2002. № 6. С. 38-44.
- [10] Baturitsky M. A. Chekhovsky V. A., Emel'yanchik I. F. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1995. V. 352. P. 604-609.
- [11] Baturitsky M. A., Dvornikov O. V., Reutovich S. I. and Solomashenko N. F. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1996. V. 378. P. 570-576.
- [12] Frlež E., Brönnimann Ch., Krause B. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2001. V. 459. P. 426-439.
- [13] Andryustchenko L. A., Kudin A. M., Goriletsky V. I. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 486. P. 40-47.
- [14] THORN-EMI Electron Tubes Catalog: Photomultipliers and Accessories. Rockaway, NJ. 1993.
- [15] Woody C. L., Levy P. W., Kierstead J. A. et al. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1990. V. 37., No. 2. P. 492-499.
- [16] Frlež E., Supek I., Assamagan K. A. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2000. V. 440. P. 57-85.
- [17] Amsler C., Grögler D., Joffrain W. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 480. P. 494-500.

[18] Ritt S., Amaudrus P. A. MIDAS: User' and Programmer's Manual.  
<http://midas.psi.ch>

---

Получено 29 мая 2003 г.

Фрлеж Э. и др.

P13-2003-102

Спектрометр PIBETA для изучения редких  
и запрещенных распадов мюонов и пионов

Описываются конструкция и характеристики спектрометра PIBETA, с помощью которого реализуется программа прецизионного измерения бета-распада пиона  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$  в Институте Пауля Шеррера (PSI, Швейцария). Центральная часть детектора представляет собой сферический калориметр из 240 кристаллов чистого CsI, покрывающий  $\sim 3\pi$  телесного угла. Калориметр дополняется активным коллиматором-замедлителем пучка, сегментированной активной пластиковой мишенью, двумя многопроволочными цилиндрическими пропорциональными камерами, 20-элементным цилиндрическим пластиковым годоскопом и вето-счетчиками космических мюонов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Frlež E. et al.

P13-2003-102

PIBETA Spectrometer for Investigation of Rare  
and Forbidden Decays of Muons and Pions

Design, contribution and performance of the PIBETA spectrometer intended for the precise measurement of the pion beta decay,  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$ , at the Paul Scherrer Institute (PSI, Switzerland) are described. The central part of the detector is a 240-module spherical pure CsI calorimeter covering  $\sim 3\pi$  sr solid angle. The calorimeter is supplemented with active collimator/beam degrader, an active segmented plastic target, a pair of low-mass cylindrical multiwire chambers, a 20-element cylindrical plastic scintillator hodoscope and cosmic muon plastic veto counters.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

**Редактор *М. И. Зарубина***  
**Макет *Н. А. Киселевой***

**Подписано в печать 21.06.2003.**

**Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.**

**Усл. печ. л. 1,18. Уч.-изд. л. 1,55. Тираж 340 экз. Заказ № 53976.**

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**

**E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)**

**[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)**