

61290

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К-772

1-90-575

КРАВЧУК
Николай Петрович

УДК 539.1.074.23+
+539.126.33

**ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ СИСТЕМА
ШИРОКОАПЕРТУРНОГО МАГНИТНОГО
СПЕКТРОМЕТРА "АРЕС"
И ПОИСК РАСПАДА $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$**

**Специальность: 01.04.16 - физика ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1990

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор технических наук А.И. Филиппов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор В.К. Ляпидевский
доктор физико-математических наук В.Д. Пешехонов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Ленинградский институт ядерной физики АН СССР (г. Гатчина, Ленинградской области).

Защита диссертации состоится " " 1991 г.
в " " часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1991 г.

Ученый секретарь Специализированного совета,
доктор физико-математических наук Ю.А. Батусов

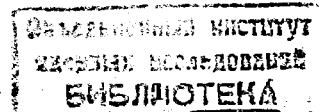
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из важных направлений исследований физики слабых взаимодействий является поиск и изучение редких распадов мюонов и пионов, а также других процессов с их участием. Особое место среди них занимают поиски процессов, типа: $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^-$, $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, $\mu^+ A \rightarrow e^+ A^*$, запрещенных в стандартной модели электрослабого взаимодействия законом сохранения мюонного числа. В ряде предложенных теорий, допускающих существование массивных нейтрино, горизонтальных калибровочных бозонов, преонов или суперсимметричных частиц, возможны подобные процессы, происходящие с несохранением мюонного числа. Такие исследования проводятся или планируются во всех лабораториях, имеющих интенсивные мезонные пучки.

Поиски распадов мюонов, запрещенных в стандартной модели, и оценка верхней границы относительной вероятности (R) этих процессов дает возможность оценить реальность отдельных теоретических подходов и внести вклад в решение таких фундаментальных вопросов современной физики как: вопросы симметрии в процессах слабого взаимодействия; возможность переходов типа: $\nu_e \neq \bar{\nu}_e$, $\nu_\mu \neq \bar{\nu}_\mu$ и $\nu_e \neq \nu_\mu$, $\nu_e \neq \bar{\nu}_\mu$; различие физических свойств электрона и мюона; наличие массы у нейтрино и др.

Достижения современной физики элементарных частиц во многом связаны с прогрессом в методике эксперимента, особенно это относится к изучению редких процессов, проводимых на пучках высокой интенсивности. Последние достижения в этой области стали возможны с появлением нового поколения детекторов - многопроволочных пропорциональных и дрейфовых камер, имеющих хорошие координатные и временные характеристики и позволяющие автоматизировать процесс получения информации.

Для поиска и исследования редких процессов в ЛЯП ОИЯИ создан магнитный спектрометр АРЕС (Анализатор Редких Событий) - универсальная установка с широкими возможностями. Его трековая детектирующая система позволяет изучать кинематику процессов в большом телесном угле и при высокой загрузке, благодаря применению



разработанных нами цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер.

Цель работы. Создание универсальной установки, предназначенной для поиска и изучения редких процессов распада мюонов и пионов, а также взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Проведение экспериментального поиска распада $\mu^+e^+e^-$ на созданной аппаратуре, набор статистического материала, позволяющего сделать оценку верхней границы относительной вероятности ($R_{\mu \rightarrow 3e}$) распада на уровне $R_{\mu \rightarrow 3e} \sim 10^{-11}$.

Научная новизна. Создана уникальная установка - широкоапертурный магнитный спектрометр АРЕС, на котором можно проводить широкую программу исследований, в том числе изучение редких распадов пионов и мюонов на уровне 10^{-11} - 10^{-12} от вероятности обычного распада. Детектирующая часть спектрометра включает систему из 18-ти цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер и сцинтиляционный годоскоп, работающие на линии с ЭВМ. Исследованы особенности работы камер, имеющих цилиндрическую геометрию. Предложена и реализована оригинальная конструкция цилиндрических многопроволочных камер, позволяющая создавать камеры с минимально возможным количеством вещества в рабочем объеме (3 ± 20 мг/см²).

Созданный комплекс аппаратуры использовался для поиска распада $\mu^+e^+e^-$. По результатам обработки полученного материала была сделана оценка верхней границы относительной вероятности распада на уровне $R_{\mu \rightarrow 3e} \leq 3,6 \cdot 10^{-11}$.

Практическая ценность. Создана установка универсального типа АРЕС, имеющая большой телесный угол ($\sim 2\pi$ стерад), детектирующий объем, диаметром 1040 мм и длиной 600 мм, высокое временное (1 нсек), пространственное (1±2 мм) и энергетическое (1±5%) разрешение, и способная перерабатывать информацию о кинематике многочастичных событий при загрузках до 10^6 событий/сек.

Разработана и реализована технология изготовления цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер впервые в практике физического эксперимента в СССР и странах участниках ОИЯИ. Эксплуатация ряда камер более 10-ти лет продемонстрировала их высокую надежность.

Работоспособность и надежность созданной установки в комплексе была подтверждена в реальном эксперименте по поиску распада $\mu^+e^+e^-$, во время которого аппаратура надежно и эффективно проработала более 800 часов.

Опыт создания и эксплуатации спектрометра АРЕС может быть использован в исследованиях по физике частиц, проводимых на ускорителях.

Автор защищает:

1. Разработку и создание детектирующей части широкоапертурного магнитного спектрометра АРЕС, включающую 18-ть коаксиально расположенных цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер.

2. Исследование специфических особенностей работы многопроволочных пропорциональных камер имеющих цилиндрическую и гиперболическую геометрию.

3. Конструкцию, методику изготовления и испытания цилиндрических (гиперболических) многопроволочных пропорциональных камер с малым количеством вещества в рабочем объеме.

4. Результат экспериментального исследования распада $\mu^+e^+e^-$.

Апробация работы и публикации. Диссертация написана на основе научных работ, выполненных с участием автора в ЛЯП ОИЯИ в период с 1974 по 1990 г. Основные результаты диссертации докладывались на II и III Международных Совещаниях по пропорциональным и дрейфовым камерам (Дубна 1975 и 1978 г), Международной конференции по проволочным камерам (Вена 1980 г), XII Международном симпозиуме по ядерной электронике (Дубна 1985 г), III Международной конференции по низким активностям (Братислава 1985 г), XIV Международной конференции по ядерной физике (Братислава 1990 г), на рабочих совещаниях и семинарах и опубликованы в 12-ти работах: сборники трудов международных совещаний и конференций, журналы Nucl. Instr. and Meth. и сообщения ОИЯИ [1÷12].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения и содержит 120 страниц текста, включая 14 таблиц, 56 рисунков и список цитируемой литературы из 134 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы и описывается структура диссертации.

В первой главе обсуждаются вопросы актуальности поиска и изучения редких распадов мюонов и пионов, а также других процессов с их участием. В этом важном направлении исследований по физике слабых взаимодействий особый интерес вызывает поиск процессов типа: $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, $\mu^- A \rightarrow e^+ A^*$, запрещенных в стандартной модели электро-слабого взаимодействия законом сохранения мюонного числа, но допускаемых в ряде других моделей.

Рассматриваются теоретические модели, в которых разрешен распад $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, приводятся возможные диаграммы распада, расчетные оценки верхней границы его относительной вероятности, а также экспериментальные результаты.

Учитывая крайне низкие возможные вероятности подобных процессов, эксперименты по их обнаружению выполняются на высокоинтенсивных пучках частиц (до 10^7сек^{-1}), и поэтому экспериментальная аппаратура должна обеспечивать высокое временное и пространственное разрешение при максимально возможном телесном угле регистрации. Сделан обзор по широкоапертурным детектирующим системам наиболее полно удовлетворяющим этим требованиям. Как правило это установки имеющие цилиндрическую геометрию и проволочные координатные детекторы. Подробнее рассмотрены установки, на которых получены последние рекордные результаты: "SINDRUM", PSI, ($\mu \rightarrow 3e, - R < 1,0 \cdot 10^{-12}$); "Crystal Box", LAMPF ($\mu \rightarrow e\gamma, - R < 4,9 \cdot 10^{-11}$) и "TRC", TRIUMF ($\mu \rightarrow e$ конверсия, $- R < 4,6 \cdot 10^{-12}$).

Приводятся сравнительные характеристики цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер, используемых в качестве центральных координатных детекторов в ряде установок.

Во второй главе дается общее описание созданного спектрометра АРЕС [1], представляющего собой систему коаксиально расположенных Цилиндрических Многопроволочных Пропорциональных Камер (ЦМПК) и сцинтилляционного годоскопа, помещенных в магнитное поле, и комплекса электроники работающей на линии с ЭВМ.

Цилиндрическая геометрия спектрометра обеспечивает:

- эффективное использование рабочего объема магнитного поля;
- изотропию свойств спектрометра в плоскости, перпендикулярной оси соленоида и связанную с этим унификацию логики запуска установки, упрощение систем фильтрации и программ обработки данных;
- пороговые свойства, так как определенному радиусу траектории частицы соответствует определенный диапазон импульсов.

Основные характеристики спектрометра АРЕС.

- | | |
|--|-----------------|
| 1. Детектирующий объем: диаметр - 1060 мм, длина - 600 мм; | |
| 2. Количество информационных каналов камер (анодные проволочки и катодные полоски) | ~15 тыс; |
| 3. Количество сцинтилляторов в годоскопе | 36 шт; |
| 4. Напряженность магнитного поля | до 1,8 Тл; |
| 5. Телесный угол | ~0,74 π стерад; |
| 6. Пространственное разрешение | 1±2 мм; |
| 7. Временное разрешение | 1 нс; |
| 8. Точность определения энергии γ -квантов | 1±5%; |
| 9. Точность определения энергии e^\pm (70 МэВ) | 2,0%; |
| 10. Скорость набора статистики | до 100 соб/сек. |

Общее устройство магнитного спектрометра АРЕС показано на рис.1. Спектрометр состоит из: детектирующей части, включающей в себя ЦМПК, сцинтилляционные счетчики, конвертор и мишень; магнита, создающего равномерное магнитное поле в детектирующей части; системы запуска установки; систем съема и обработки информации.

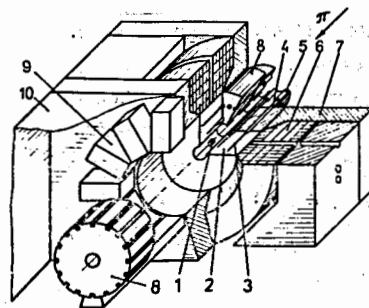


Рис.1. Общий вид спектрометра АРЕС.
1 - мишень; 2 - детектирующая часть спектрометра (ЦМПК); 3 - сцинтилляционные счетчики; 4 - световоды; 5 - ФЭУ; 6 - обмотки магнита; 7 - ярмо магнита; 8 - полюса магнита; 9 - электроника ЦМПК; 10 - помещение с микроклиматом.

Схематическое изображение детектирующей части спектрометра показано на рис. 2.

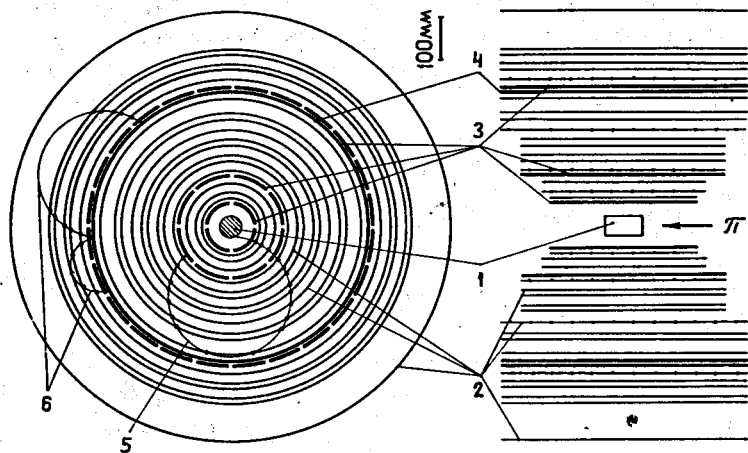


Рис. 2. Схема детектирующей части спектрометра.

1 - мишень; 2 - слои анодных проволочек ЦМПК (точками, на нижней проекции, отмечены двухкоординатные камеры); 3 - сцинтилляторы; 4 - конвертор гамма-квантов; 5 - трек позитрона; 6 - треки электрон-позитронной пары.

Основными координатными детекторами спектрометра АРЕС являются 18 коаксиально расположенных ЦМПК с малым количеством вещества в рабочем объеме ^{1/2} (табл. 1). Камеры делятся на два типа: регистрирующие только азимутальную координату и двухкоординатные - регистрирующие азимутальную и осевую (Z) координаты (ЦМПК 1, 4, 9 и 13).

Сигналы с камер поступают на электронные схемы, включающие в себя усилитель-формирователь, задержку и память.

Кроме пропорциональных камер в детектирующей области спектрометра размещается годоскоп из сцинтилляционных счетчиков. Сигналы со счетчиков поступают на быстрые логические схемы, вырабатывающие импульс запуска всей установки и на систему временного анализа.

Камера	Диаметр анодного слоя (мм)	Число анодных проволочек	Шаг анодных проволочек (мм)	Расстояние анод-катод (мм)	Длина камеры (мм)	Кол-во вещества	
						$\times 10^{-3}$ (г/см ²)	$\times 10^{-4}$ (град. глин)
1	128	192	2,09	25	360	7,1	18,5
2	164	256	2,01	6	400	6	400
3	212	320	2,08	6	400	13,8	42,3
4	274	384	2,24	4	500	11,2	28,5
5	319,6	480	2,09	6	500	3,8	15,6
6	343,6	512	2,11	6	500	6	600
7	405,5	640	1,99	6	500	3,8	15,6
8	429,5	672	2,01	6	500	6	600
9	478,8	768	1,96	4	600	13,6	34,7
10	539,3	768	2,21	6	600	3,8	15,6
11	563,3	768	2,30	6	600	6	600
12	629,2	960	2,06	6	600	35	12,5
13	702,2	1152	1,92	6	600	18,2	46,3
14	758	1152	2,07	6	600	3,8	15,6
15	782	1152	2,13	6	600	6	600
16	841,9	1152	2,30	6	600	3,8	15,6
17	865,9	1152	2,36	6	600	6	600
18	1038,7	1536	2,12	6	600	3,5	12,5
Σ	—	14016	—	—	—	89,9	273,3

затем записывается на магнитную ленту для окончательной обработки.

В третьей главе рассматриваются общие вопросы работы пропорциональных камер и особенности обусловленные цилиндрической геометрией камер.

Схема ЦМПК показана на рис. 3. Анодные проволочки расположены по образующей цилиндра, между двумя коаксиальными цилиндрическими катодами. Катоды выполняются из проволоки (а) или в виде сплошных лавсановых цилиндров (б), на которых имеются геликоидальные проводящие полоски для определения координаты вдоль оси камеры.

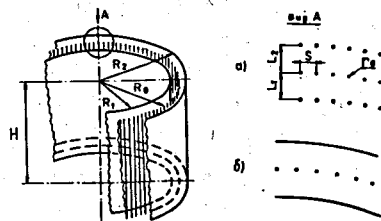


Рис. 3. Схематическое изображение цилиндрической многопроволочной пропорциональной камеры

R_0 - радиус анодного слоя проволочек; R_1 и R_2 - радиус внутреннего и внешнего катодов; H - длина камеры;

Разработка цилиндрических камер потребовала проведения анализа факторов, влияющих на эффективную и стабильную работу камер: устойчивость проволочек при воздействии на них электростатических и гравитационных сил, точность пространственного расположения электродов камеры и пр.

Рассматриваются предложенные способы компенсации влияния особенностей цилиндрической геометрии на работу камер. Рассчитанные необходимые поправки для геометрических параметров камер показаны на рис.4, а возможные корректировки за счет высоковольтного питания камер на рис.5.

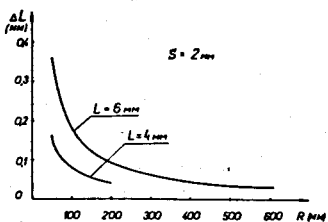


Рис.4. Необходимая асимметричность положение анодных проволочек, обеспечивающая их устойчивость, в зависимости от радиуса камеры (R) и расстояния анод-катод (L), при $V_1 = V_2$.

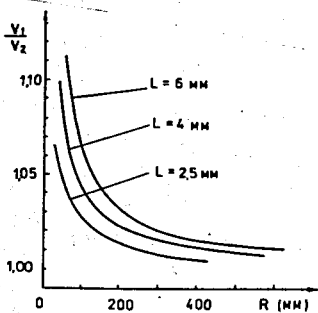


Рис.5. Соотношение напряжений на внутреннем (V_1) и наружном (V_2) катодах, необходимое для обеспечения устойчивости анодных проволочек, в зависимости от радиуса камеры (R) и расстояния анод-катод (L), при $L_1 = L_2 = L$.

Для выбора оптимальной конструкции и проверки ряда технических решений было изготовлено несколько вариантов камер. Приводятся их параметры и результаты, полученные в процессе испытания^{/4/}. Описывается впервые созданная гиперболическая многопроволочная пропорциональная камера^{/5/}, в которой проволочки электродов расположены под углом к образующей цилиндра и это позволяет измерять координату вдоль оси камеры. Рассмотрены вопросы проектирования и перспективы использования гиперболических камер.

Четвертая глава содержит подробное описание конструкции, технологии изготовления и испытания разработанных для спектрометра АРЕС камер.

Важно отметить, что кроме обычных требований предъявляемым к координатным детекторам (высокая эффективность, координатная точность и надежность), для камер спектрометра АРЕС принципиальное значение имеет уменьшение количества вещества в рабочем объеме, а следовательно уменьшение потери энергии и многократное рассеяние частицы. Данное условие определяет точность измерения импульса заряженной частицы по траектории ее движения в магнитном поле и минимальную его измеряемую величину. В диссертации рассмотрены эти вопросы.

Максимальной прозрачности детектирующей области спектрометра удалось достигнуть, используя большинство камер (12-ть из 18-ти) растягиваемого типа. Схематически конструкция блока двояных растягиваемых камер (ЦМПК 6-7) показана на рис.6. Первоначально кольцевые фланцы (1) закрепляются на технологическом внутреннем опорном элементе (2), имеющем форму цилиндра. Между фланцами по образующим цилиндра натягиваются проволочки. Проволочки, расположенные на одном диаметре, образуют электроды камеры (3,4). Во время установки камеры на рабочее место фланцы закрепляются на конструктивных элементах общего бокса детектирующей части, а внутренний опорный элемент удаляется, при этом заданное натяжение проволочек поддерживается наружной оболочкой бокса. В детектирующем объеме остаются только проволочки электродов, рабочий газ и ограничивающие газовый объем лавсановые пленки (5).

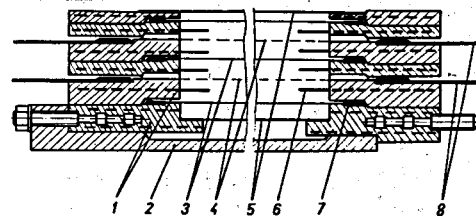


Рис.6. Сечение растягиваемой ЦМПК (камера показана на технологической оснастке, ось вращения проходит внизу).

1 - кольца, образующие фланцы камеры; 2 - распорный элемент; 3 - катодные проволочки; 4 - анодные проволочки; 5 - ограничительные оболочки; 6 - охрannое кольцо; 7 - место запаивания катодных проволочек; 8 - платы для распайки анодных проволочек.

Другой тип камер, используемый в установке, - самоподдерживающиеся камеры. Фланцы этих камер приклеены к тонкостенному опорному цилиндру, который поддерживает проволочки в рабочем натянутом состоянии (ЦМПК 1, 2-3, 4, 9 и 13, табл. 1).

Вторая особенность камер спектрометра АРЕС в том, что они размещаются в ограниченном рабочем объеме магнита и необходимо оптимально его использовать. Конструктивные элементы камер должны обеспечивать необходимое натяжение проволочек имея минимальные размеры.

На основании результатов расчетов и проведенного изучения прочностных, температурных и усталостных характеристик ряда образцов обосновывается выбор материалов и оптимизируются геометрические параметры основных элементов камер (анодов, катодов, фланцев и опорных элементов) /6/.

При выборе необходимого натяжения проволочек учитывались: расталкивающие электростатические силы со стороны соседних проволочек данного электрода и со стороны другого электрода; гравитационные силы (для горизонтально расположенной камеры); неточности пространственного расположения проволочек; возможное изменение натяжения проволочек при изменении температуры окружающей среды; ослабление натяжения проволочек из-за деформации конструктивных элементов.

Рассмотрены и учтены факторы влияющие на изменение натяжения проволочек. Расчитаны деформации фланцев камер и общего бокса, влияния изменения температуры, а также изменение натяжения проволочек при перераспределении нагрузки.

Описываются разработанные технологии изготовления ЦМПК диаметром до 0,5 м, методом непрерывной намотки /7/ и камер большего диаметра (до 1,0 м) /8/. Большое внимание уделено вопросам надежности камер, как наиболее труднозаменяемым элементам спектрометра. Используемая технология и жесткий контроль качества на всех операциях позволяют изготавливать камеры надежно работающие длительное время без какой-либо профилактики.

Описываются созданные системы, обеспечивающие работоспособность камер: высоковольтное питание, газообеспечение и система контроля за утечкой рабочей смеси /9/.

Приводится методика испытания и полученные характеристики камер на автоматизированном стенде /10/ и во время

полномасштабного испытания на пучке пионов μ -тракта синхротрона ЛЯП в составе детектора заряженных частиц спектрометра АРЕС /11/, рис. 7.

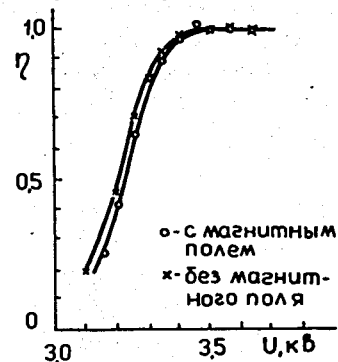


Рис. 7. Эффективность камеры (ЦМПК 6) без магнитного поля и в поле 0,5 Тл.

Глава заканчивается описанием общей компоновки детектирующей части спектрометра и технологии её монтажа и демонтажа, допускающей замену отдельных камер.

Пятая глава посвящена описанию эксперимента по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$, выполненному в ЛЯП ОИЯИ на спектрометре АРЕС. Описывается схема получения и транспортировки пучка пионов (рис. 8).

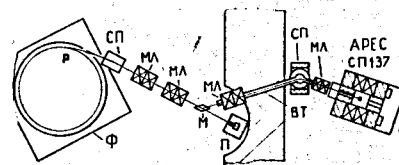


Рис. 8. Схема постановки эксперимента по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$
 Ф - фазотрон; СП - поворотный магнит; МЛ - магнитные линзы; М - мезообразующая мишень; П - поглотитель-ловушка; ВТ - вакуумный тракт.

Для проводимого эксперимента используется только детектор заряженных частиц включающий в себя ЦМПК 1+12, * (табл. 1) и три ряда сцинтилляционных счетчиков. Детектор γ -квантов (конвертор и камеры 13+18, рис. 3) заменены поглотителем для уменьшения нежелательного фона. Компоновка детектирующей части спектрометра показана на рис. 9.

На поиск распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$ было затрачено более 800 часов работы ускорителя. Интенсивность пучка протонов составляла $0,7+1,5$ мкА. Средняя интенсивность остановок пионов с последующим распадом $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ и остановкой мюона в мишени составила $5,8 \cdot 10^5$ сек⁻¹. За чистое время набора статистики в мишени распалось $1,15 \cdot 10^{12}$ мюонов.

Первоначальная фильтрация потока информации производилась

* ЦМПК 7-8 в эксперименте не использовались.

наносекундными электронными схемами запуска, в логике которых учитывался характер искомого распада и параметры аппаратуры (фактор подавления $2 \cdot 10^4$). Затем отобранные события фильтровались с помощью быстрого алгоритма, определяющего наличие треков с кривизной, соответствующей электрону и двум позитронам. Прошедшие алгоритм события записывались на магнитную ленту со скоростью $1+2$ соб/сек. Всего была записана информация о $2,5 \cdot 10^6$ многотрековых событиях.

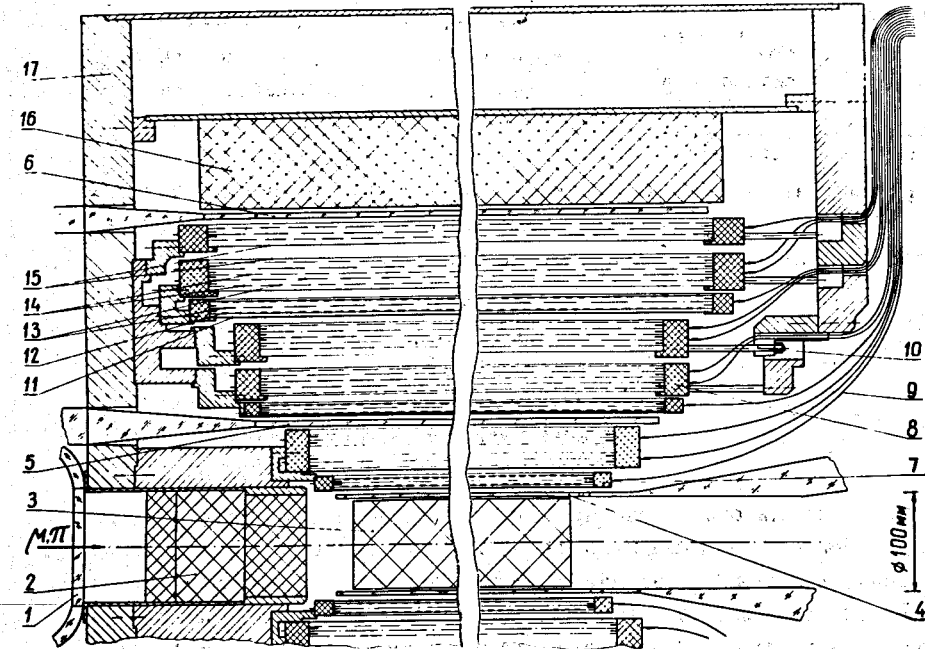


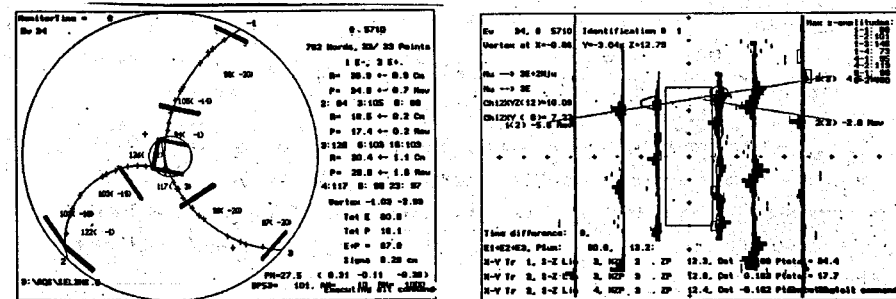
Рис.9 Сечение детектирующей части спектрометра АРЕС, вариант используемый в эксперименте по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^-$.

1 - входной сцинтилляционный счетчик; 2 - замедлитель; 3 - мишень; 4,5 и 6 - первый, второй и третий ряды сцинтилляционных счетчиков годоскопа; 7 - самоподдерживающаяся камера; 8 - растягиваемая сдвоенная камера; 9 - информационные кабели; 10 - юстировочный узел растягиваемой камеры; 11 - опорный цилиндр самоподдерживаемой камеры; 12 - катоды с полосками для измерения координаты вдоль оси камеры; 13 - анодные проволоочки; 14 - проволоочные катоды; 15 - защитные ограничительные оболочки; 16 - поглотитель; 17 - общий бокс детектирующей части.

обработка магнитных лент выполнялась на ЭВМ в несколько этапов. Первый этап - проверка срабатывания необходимого числа детекторов. Второй этап - определение параметров треков. Третий этап - проверка пересечения в X-φ плоскости (перпендикулярной оси пучка и камер) трех и более треков с учетом логических критериев. После четвертого этапа - восстановления события в пространстве (X-φ-Z) и отбора событий по кинематике, осталось $\sim 10^4$ событий.

Дальнейшая обработка данных потребовала анализа и отделения основных источников фона: распады $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$; различные комбинации случайных совпадений распада мюона и имитации позитроном электрона или рассеянием позитрона на электроне.

На рис.10 приведено одно из записанных фоновых событий, где входящий из вне позитрон (трек 1) имитирует электрон, теряет энергию в мишени и выходит как позитрон с меньшей энергией (трек 3). Это событие случайно совпадает по времени и месту с вылетом из мишени позитрона от распада мюона (трек 2).



а

б

Рис.10. Пример распечатки восстановленного события. (На рисунке приведена вспомогательная информация - результат обработки события на разных этапах фильтрации).

а) Событие в плоскости R-φ, б) Событие в плоскости R-Z.

Фильтрация оставшихся событий по всё более жестким логическим, энергетическим и временным критериям на соответствие гипотезам распадов $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^-$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+$ сократила число кандидатов до 65. Распределение этих событий по энергии и импульсу показано на рис.11. Контуром обозначена область, в которую попадет

90% моделированных событий $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$ и которая принята как область детектирования этого распада. Из рис.11 следует, что представленные события - это распады $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu e^-$ и фон случайных совпадений, и ни одно зарегистрированное событие не может быть интерпретировано как распад $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$.

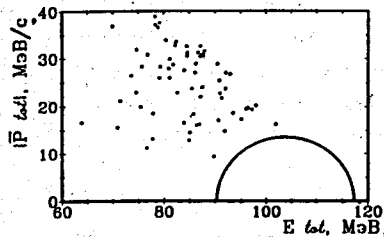


Рис.11. Распределение событий, удовлетворяющих кинематике распада $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu e^-$ и $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$, по суммарной энергии, E_{tot} , и импульсу, $|\bar{P}_{tot}|$.

Оценка верхней границы относительной вероятности распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$ на уровне 90%-ной достоверности сделанная согласно распределению Пуассона для случая когда искомое событие не наблюдается:

$$R_{\mu \rightarrow 3e} = \frac{W(\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-)}{W(\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu)} \leq \frac{\ln 10}{\epsilon_{\mu \rightarrow 3e} \cdot N_\mu} = 3,6 \cdot 10^{-11}$$

где: $\epsilon_{\mu \rightarrow 3e}$ - эффективность регистрации распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ (5,6%);
 N_μ - число распадов мюонов в мишени ($1,15 \cdot 10^{12}$).

Полученный результат в 50 раз улучшает оценку, сделанную ранее в Дубне, и находится на уровне современных мировых достижений.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана и создана система из 18-ти коаксиально расположенных цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер с общим количеством информационных каналов ~15 тыс. для широкоапертурного магнитного спектрометра АРЕС. Спектрометр предназначается для проведения широкой программы исследований по физике элементарных частиц и ядерной физике.

2. Создана аппаратура, обеспечивающая работоспособность пропорциональных камер: системы высоковольтного питания и газобеспечения камер и система контроля за утечкой рабочей смеси. На основании анализа характеристик созданной аппаратуры оптимизированы режимы работы всех систем.

3. Разработана и оптимизирована конструкция и технология изготовления цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер. Создана и внедрена методика контроля качества изготовления и испытания готовых камер. Всё это позволило изготовить более 40 надежно работающих камер разной модификации с общим числом анодных проволочек ~35 тыс.

4. Предложен и реализован оригинальный метод создания цилиндрических многопроволочных камер. Созданные камеры отличаются рекордной прозрачностью ($3+20$ мг/см² на один информационный слой). Впервые разработана методика и осуществлен монтаж набора таких камер в ограниченном замкнутом объеме.

5. Исследованы особенности работы цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер. Определены критерии выбора основных параметров камер, проанализировано влияние факторов, определяющих работоспособность камер.

6. Впервые разработана и создана гиперболическая многопроволочная пропорциональная камера, позволяющая регистрировать две координаты: (азимутальную и вдоль оси камеры) и имеющая малое количество вещества в рабочем объеме. Исследованы характеристики этой камеры.

7. Созданный комплекс аппаратуры использовался в эксперименте по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$. За время эксперимента аппаратура надежно и эффективно проработала более 800 часов на пучке ускорителя.

8. На основании обработки и анализа информации о распавшихся в мишени $1,15 \cdot 10^{12}$ мюонов, сделана оценка верхней границы относительной вероятности (R) распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^-$ на уровне $R < 3,6 \cdot 10^{-11}$. Этот результат соответствует уровню мировых достижений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Baranov V.A., Evtukhovich P.G., Filippov A.I., Fursov A.P., Korenchenko A.S., Korenchenko S.M., Kostin B.F., Kravchuk N.P., Khomutov N.V., Kuchinsky N.A., Moiseenko A.S., Mzhavia D.A., Nekrasov K.G., Povinec P., Szarka J., Smirnov V.S., Vanko J., and Zyazyulya F.E. ARES spectrometer. - NIM, 1986, v.B17, p.438.

2. Filippov A.I., Fursov A.P., Korenchenko A.S.,
Korenchenko S.M., Kravchuk N.P., Nekrasov K.G. and Vanko J. Low
matter density cylindrical proportional chambers. - NIM, 1986,
v.B17, p.441.

3. Баранов В.А., Ванко Ю., Евтухович П.Г., Зязюля Ф.Е.,
Коренченко А.С., Коренченко С.М., Костин Б.Ф., Кравчук Н.П.,
Кучинский Н.А., Мжавия Д.А., Моисеенко А.С., Некрасов К.Г.,
Смирнов В.С., Филиппов А.И. и Хомутов Н.В. Система запуска и съема
информации спектрометра АРЕС. - В сб.: XII международный симпозиум
по ядерной электронике. Д13-85-793, Дубна, ОИЯИ, 1985, с.310.

4. Кравчук Н.П., Моисеенко А.С., Полах Й. и Филиппов А.И.
Разработка цилиндрических и гиперболических пропорциональных
камер. - В сб.: Материалы 2-го международного совещания по
пропорциональным и дрейфовым камерам, ОИЯИ, Д13-9164, Дубна, 1975,
стр.71.

5. Калинин А.А., Кравчук Н.П., Моисеенко А.С. и
Филиппов А.И. Гиперболическая пропорциональная камера. - В сб.:
Материалы 3-го международного совещания по пропорциональным и
дрейфовым камерам. P13-11561, Дубна, ОИЯИ, 1978, с.75.

6. Ванко Ю., Кравчук Н.П., Некрасов К.Г., Филиппов А.И. и
Фурсов А.П. Технология изготовления фланцев и опорных элементов
цилиндрических многопроволочных камер. - Сообщение ОИЯИ,
13-88-468, Дубна, 1988.

7. Кравчук Н.П., Полах Й. и Филиппов А.И. Конструкция и
технология изготовления цилиндрических и гиперболических
пропорциональных камер с малой плотностью вещества. - Сообщение
ОИЯИ, P13-11862, Дубна, 1978.

8. Коренченко А.С., Коренченко С.М., Кравчук Н.П.,
Некрасов К.Г., и Филиппов А.И. Большие цилиндрические многопро-
волочные пропорциональные камеры с малой плотностью вещества. -
Сообщение ОИЯИ, 13-83-479, Дубна, 1983.

9. Ванко Ю., Кравчук Н.П., Моисеенко А.С. и Филиппов А.И.
Сигнализатор утечки рабочего газа из пропорциональных камер
установки АРЕС. - Сообщение ОИЯИ, 13-87-764, Дубна, 1987.

10. Баранов В.А., Журавлев Н.И., Коренченко А.С.,
Коренченко С.М., Корнеев В.И., Кравчук Н.П., Косарев Г.Е.,
Кучинский Н.А., Мжавия Д.А., Моисеенко А.С., Некрасов К.Г.,
Смирнов В.С. и Филиппов А.И. Автоматизированный стенд для

испытания цилиндрических пропорциональных камер. - Сообщение ОИЯИ,
13-12631, Дубна, 1979.

11. Баранов В.А., Евтухович П.Г., Зязюля Ф.Е., Иленбург Р.,
Комаров В.И., Коренченко А.С., Коренченко С.М., Косарев Г.Е.,
Костин Б.Ф., Кравчук Н.П., Кучинский Н.А., Мжавия Д.А.,
Мицельмахер Г.В., Моисеенко А.С., Некрасов К.Г., Смирнов В.С.,
Филиппов А.И., Фурсов А.П., Русакович Н.Л. и Хомутов Н.В. Детектор
заряженных частиц спектрометра АРЕС. - Сообщение ОИЯИ, 13-81-381,
Дубна, 1981.

12. Баранов В.А., Ванко Ю., Глазов А.А., Евтухович П.Г.,
Зязюля Ф.Е., Кисель И.В., Коренченко А.С., Коренченко С.М.,
Костин Б.Ф., Кравчук Н.П., Кучинский Н.А., Моисеенко А.С.,
Мжавия Д.А., Некрасов К.Г., Повинец П., Сарка Я., Смирнов В.С.,
Филиппов А.И., Фурсов А.П., Хомутов Н.В., Цамалаидзе З.Б.,
Чернявский Н.Н., Яковлев С.И. Поиски распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^-$. -
Сообщение ОИЯИ, P1-90-464, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 декабря 1990 года.