

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б-241

10-94-142

На правах рукописи

УДК 539.1.074.3+
539.126.34

БАРАНОВ

Владимир Анатольевич

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ
СПЕКТРОМЕТРА АРЕС.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПАДА $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$
И ПОИСК РАСПАДА $\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$.

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных
частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1994

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор

С.М. Коренченко

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук, профессор

В.Н. Болотов
В.Н. Первушин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий (г. Серпухов)

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1994 года в
_____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных ис-
следований, г. Дубна Московской области. С диссертацией можно озна-
комиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1994 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.А. Батусов

1 Общая характеристика работы

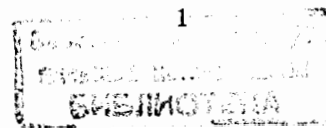
Актуальность проблемы. Поиск и изучение редких распадов мюонов и пионов, а также других процессов с их участием является одним из важнейших направлений исследований физики электрослабых взаимодействий. Особое место среди них занимают поиски запрещенных в стандартной модели электрослабых взаимодействий законом сохранения мюонного числа процессов, таких как: $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, $\mu^- A \rightarrow e^+ A^*$, $\mu^+ e^- \rightarrow \mu^- e^+$, $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma \gamma$, $\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$, а также полулептонные распады $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$, $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$.

Развитие физики элементарных частиц во многом определяется существующими экспериментальными возможностями. Для проведения широкой программы исследований в области физики элементарных частиц и ядерной физики на интенсивных мюонных и π -мезонных пучках была предложена, спроектирована и создана спектрометрическая установка АРЕС (Анализатор РЕдких Событий). Спектрометр состоит из набора коаксиально расположенных Цилиндрических Многопроволочных Пропорциональных Камер (ЦМПК) и сцинтилляционного годоскопа, помещенных в магнитное поле, и комплекса электронной аппаратуры работающей на линии с ЭВМ. Спектрометр АРЕС позволяет изучать многочастичные процессы при большом телесном угле в условиях высоких нагрузок (до 10^7сек^{-1} остановок частиц в мишени).

Цель работы. Измерение топографии магнитного поля магнита СП-173 спектрометра АРЕС и изучение возможности повышения его однородности. Разработка методики изготовления сцинтилляционных счетчиков цилиндрического годоскопа спектрометра и исследование их характеристик. Создание комплекса программ для наладки, диагностики, управления и контроля различными системами спектрометра: специализированного процессора РАСТР, электроники, пропорциональными камерами и др. Создание системы управляемого от ЭВМ быстрого многофункционального триггера спектрометра АРЕС. Проведение на спектрометре АРЕС эксперимента по поиску запрещенных распадов $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, $\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$ и изучению редкого процесса $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$, моделирование и обработка экспериментальных данных.

Научная новизна. Предложена оригинальная методика изготовления сцинтилляционных счетчиков, имеющих форму части цилиндра для годоскопа спектрометра АРЕС, изучены их характеристики и написана универсальная программа моделирования методом Монте-Карло светосбора в оптических системах широкого класса.

Создана система управляемого от ЭВМ быстрого многофункционального триггера спектрометра АРЕС на основе информации со сцин-



тилляционного годоскопа и пропорциональных камер, позволяющая осуществлять регистрацию событий различного класса в одной экспозиции с учетом конфигурации событий. Время разрешения составляет при этом ~ 10 нс.

На созданном спектрометре АРЕС при обработке информации об остановившихся в мишени $1,1 \cdot 10^{12}$ π^+ -мезонов обнаружено 8 распадов $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$, и вычислена парциальная вероятность этого распада за счет наличия структуры пиона $R_{SD} = (4.6 \pm 1.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-10}$.

На основании набранной статистики получена верхняя граница относительной вероятности распада $\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu$ на уровне достоверности 90%

$$Br = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)} < 1.6 \cdot 10^{-6}.$$

Полученное значение Br в 5 раз улучшает единственную в мире оценку, сделанную ранее в Дубне.

Промоделирован вариант постановки эксперимента по изучению распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$ на лету на спектрометре АРЕС.

Практическая ценность. Предложен и реализован способ повышения однородности магнитного поля в 4 раза в спектрометре АРЕС путем нестандартного включения его обмоток, что позволило существенно упростить обработку и работу системы фильтрации информации.

Методика изготовления сцинтилляционных счетчиков, имеющих форму части цилиндра для годоскопа спектрометра АРЕС, может использоваться на других установках с цилиндрической геометрией детектора. Универсальная программа моделирования методом Монте-Карло светосбора в оптических системах широкого класса применялась в нескольких группах ОИЯИ и в PSI (Швейцария).

Разработанный комплекс программ позволил провести наладку регистрирующей электроники пропорциональных камер (~ 16000 каналов) и испытание самих камер, а также обеспечил создание специализированного процессора РАСТР (быстродействие ~ 15 мкс) для быстрой фильтрации событий при исследовании редких процессов на спектрометре АРЕС.

Автор защищает:

1. Разработку и создание методики изготовления сцинтилляционных счетчиков, имеющих форму части цилиндра.
2. Разработку и создание аппаратного и программного комплексов для наладки, диагностики, управления и контроля различными системами спектрометра АРЕС.

3. Разработку и создание системы управляемого от ЭВМ быстрого многофункционального триггера спектрометра АРЕС.
4. Результат экспериментального изучения распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$.
5. Результат экспериментального поиска распада $\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$.

Апробация работы и публикации. Диссертация написана на основе научных работ, выполненных с участием автора в ЛЯП ОИЯИ в период с 1976 по 1992 гг. Основные результаты, представленные в диссертации докладывались на XII международном симпозиуме по ядерной электронике, Совещаниях по программе исследований на ММФ (Звенигород, 1985 и Москва, 1989), III Международной конференции по низким активностям (Братислава, 1985), Low Energy Muon Science in 90's [LEMS-90] (Villigen, 1990), на рабочих совещаниях и семинарах и опубликованы в 12 работах: сборнике трудов международного симпозиума по ядерной электронике, в журналах ПТЭ, НИМ, ЯФ и сообщениях ОИЯИ[1-12].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 121 страницу текста, включая 9 таблиц, 32 рисунка и список цитируемой литературы из 136 наименований.

2 Содержание работы

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

В первой главе приведено общее описание спектрометра АРЕС, представлена программа экспериментов на этой установке, в частности поиска редких распадов мюонов и π -мезонов: $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$, $\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$. Основные особенности перечисленных процессов: крайне низкие вероятности $\sim 10^{-12} \div 10^{-13}$ при большом фоне и многочастичность предъявляют серьезные требования к экспериментальной аппаратуре. Такая аппаратура должна обладать высоким пространственным и временным разрешением, иметь хорошую эффективность регистрации.

Для эффективной регистрации многочастичных процессов необходимо иметь установку с большим телесным углом. В спектрометре АРЕС это достигнуто цилиндрической геометрией детектирующей части. Использование цилиндрической геометрии обеспечивает:

- телесный угол спектрометра $\sim 2 \cdot \pi$, эффективное использование рабочего объема магнитного поля;

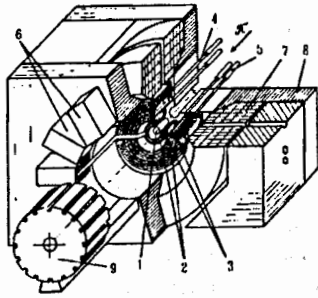


Рис. 1: Общий вид спектрометра АРЕС.

1 - мишень; 2 - детектирующая часть (ЦМПК); 3 - сцинтилляционные счетчики; 4 - световоды; 5 - ФЭУ; 6 - электроника ЦМПК; 7 - обмотки магнита; 8 - ярмо магнита; 9 - полюса магнита.

- изотропию свойств спектрометра в плоскости, перпендикулярной оси соленоида и связанную с этим унификацию логики запуска установки, упрощение систем фильтрации и программной обработки данных;

- пороговые свойства при использовании мишени малого диаметра, так как определенному радиусу траектории частицы соответствует определенный импульс.

Общий вид спектрометра представлен на рис. 1. В таблице 1 приведены основные характеристики спектрометра.

Детектирующий блок из цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер и сцинтилляционной годоскопической системы расположен между полюсами магнита СП-173. Пучок от ускорителя вводится в мишень вдоль оси магнита, совпадающей с осью симметрии детектирующего блока. Основными координатными детекторами спектрометра АРЕС являются 18 коаксиально расположенных ЦМПК. Спектрометр АРЕС позволяет детектировать и измерять импульсы одновременно нескольких частиц (в том числе и γ -квантов), определять знак электрического заряда частиц. При наличии амплитудного анализа сигналов с пропорциональных камер возможна и идентификация типа частиц. Пропорциональные камеры и счетчики годоскопа имеют малое количество вещества для уменьшения многократного рассеивания частиц, так как измерение импульса заряженной частицы производится по искривлению ее траектории магнитным полем. Гамма-кванты регистрируются по конверсионной e^+e^- - паре, образующейся в специальном цилиндрическом конверторе.

Таблица 1: Основные характеристики спектрометра АРЕС.

1. Детектирующий объем:	диаметр - 1060 мм, длина - 600 мм;
2. Количество информационных каналов камер	≈ 15 тыс;
3. Количество сцинтилляторов в годоскопе	36 шт.
4. Напряженность магнитного поля	до 1.8 Тл;
5. Телесный угол	$\approx 0,7 \cdot 4\pi$ стеррад;
6. Пространственное разрешение	$1 \div 2$ мм;
7. Временное разрешение	1 нс;
8. Точность определения энергии γ -квантов	$1 \div 5\%$;
9. Точность определения энергии e^\pm (70 МэВ)	2%;
10. Скорость набора статистики	до 100 соб/сек.

Детектирующая часть установки размещается в рабочей области магнита Ш-образного типа СП-173, спроектированного в НИИЭФА им. Ефремова Д.В. Параметры магнита приведены в табл. 2. Топография

Таблица 2: Параметры магнита спектрометра АРЕС.

Напряженность магнитного поля	до 1,8 Тл.
Ток возбуждения	2000 А.
Падение напряжения	440 в.
Число витков в обмотке	868
Количество параллельных ветвей в обмотке	24
Рабочая область: диаметр — 1090 мм, длина	(880 \div 1040) мм.
Размеры магнита	3,6 * 2,8 * 3,0 м ³ .
Масса магнита	153 т.

магнитного поля магнита СП - 173 измерялась при нескольких значениях питающего тока и при различных вариантах подключения обмоток магнита.

При измерениях магнитного поля в стандартном варианте включения обмотки получена неоднородность $\Delta_H = \pm \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} = 7.3\%$ в расположении пропорциональных камер $I \div XII$. С целью улучшения однородности магнитного поля в районе расположения ЦМПК спектрометра

было просчитано несколько вариантов включения секций катушек магнита. Максимально однородное поле получено при отключении восьми крайних секций и использовании только оставшихся четырех центральных секций с обеих сторон от центра магнита. В этом варианте измерения дали неоднородность $\Delta_H = 1.8\%$. При проведении эксперимента использовался найденный вариант включения обмоток СП-173.

Во второй главе описывается конструкция, технология изготовления и исследование сцинтилляционных счетчиков годоскопа спектрометра. Го-

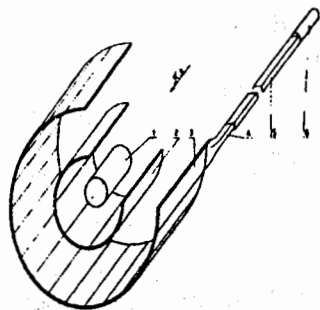


Рис. 2: Конструкция сцинтилляционного годоскопа: 1 - мишень, 2 - сцинтилляторы второго ряда, 3 - сцинтилляторы третьего ряда, 4 - переходный световод, 5 - основной световод, 6 - ФЭУ.

доскоп (рис. 2) состоит из трех цилиндрических рядов состоящих из 4, 8 и 24 счетчиков, имеющих диаметры 110, 245 и 670 мм, длиной 350, 500 и 600 мм. К сцинтилляционным счетчикам годоскопа предъявляются следующие требования:

1. минимальная толщина сцинтиллятора, т.к. точность определения энергии электронов зависит в основном от энергетических потерь и многократного рассеяния в веществе сцинтиллятора;
2. достаточно высокое быстродействие (~ 1 нс);
3. длина световодов не менее 1,3 м, поскольку сцинтилляторы счетчиков расположены в магнитном поле напряженностью до 1,8 Тл, и необходимо обеспечить вынос ФЭУ за пределы магнитного поля;
4. наличие в одном месте контакта двух частей счетчиков без применения каких-либо клеев или замазок для обеспечения разборности спектрометра;

5. сбор света только с одного торца сцинтиллятора, т.к. на втором ярме магнита СП-173 (рис. 1) расположена электроника ЦМПК.

Отдельный счетчик состоит из пластического сцинтиллятора, переходного и основного световодов, ФЭУ ХР2020 ($3 \div 6$ на рис. 2). Основной световод прижимается к переходному без какой-либо смазки. Для улучшения условий светосбора и светоизлучения сцинтиллятор и переходный световод обернуты белой бумагой и потом черной копировальной бумагой. Сцинтилляторы в годоскопе образуют замкнутую цилиндри-

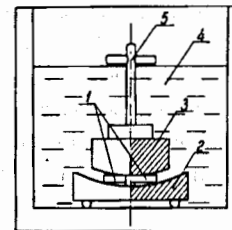


Рис. 3: Схема установки для формовки сцинтиллятора: 1 - сцинтиллятор, 2 - пуансон, 3 - матрица, 4 - полиэтилсилоксановая жидкость, 5 - винтовой домкрат.

ческую поверхность. Каждому сцинтиллятору придавалась форма части цилиндра. Из пластического сцинтиллятора изготавливалась полированная заготовка в форме прямоугольного параллелепипеда соответствующего размера. Заготовка устанавливалась между матрицей и пуансоном и эта сборка помещалась в термостат (Рис. 3). В течение $5 \div 6$ часов температура в термостате линейно поднималась до $87^\circ \div 90^\circ$ С. По достижении этой температуры матрица с помощью винтового домкрата медленно опускалась на пуансон, придавая сборке форму цилиндра нужной кривизны. В таком состоянии сборка выдерживалась при постоянной температуре несколько часов, потом подогрев термостата отключался и температура в нем за $14 \div 15$ час. снижалась до 20° С.

Амплитудные и временные характеристики счетчиков изучались на специальном стенде с помощью β - источника ^{90}Sr . Амплитудный сигнал снимался с последнего динода ФЭУ, а временной — с анода ФЭУ. В результате исследований получена неоднородность амплитуды счетчика $\Delta_A = \pm \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} = \pm 33\%$, где A_{max} и A_{min} - максимальная и минимальная амплитуды сигналов при разных положениях β -источника. Длина поглощения света в сцинтилляторе (66 ± 7) см. При установке β - источника

в центре сцинтиллятора амплитудное разрешение счетчика (полная ширина на полувысоте) составляло 80%, а временное ≈ 1 нс. Полученному амплитудному распределению с учетом статистических флуктуаций на первом диноде фотоумножителя соответствует ~ 12 фотоэлектронов и эффективность светосбора ~ 1 %.

Для проверки правильности оценок по эффективности светосбора была написана программа расчета методом Монте-Карло прохождения света в достаточно сложных оптических системах ограниченных плоскими, цилиндрическими или сферическими поверхностями. Расчеты по этой программе совпали с экспериментально полученной эффективностью светосбора.

В третьей главе описывается основная детектирующая часть спектрометра: цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры. Рассмотрены система регистрирующей электроники пропорциональных камер, вопросы настройки и контроля этой электроники. Дается описание стенда и программы, позволяющей тестировать и настраивать электронику пропорциональных камер.

В экспериментах по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и исследованию распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$ в сборке применялось только 12 ЦМПК с общим числом сигнальных проволочек – 7627 и стрипов – 384. Электроника ПК выполнена на основе больших гибридных интегральных схем К405ХП1. Каждая микросхема К405ХП1 включает в себя всю необходимую электронику для двух нитей ПК. Эти микросхемы распаивались на платах ПСИ–32 по 32 канала. Платы ПСИ–32, в свою очередь, компоновались в блоки до 35 плат в отдельном каркасе электроники ПК, а каркасы крепились на ярме магнита СП-173. Общее число каналов регистрации — ≈ 16000 . Информация о сработавших проволочках записывается в триггеры памяти микросхем К405ХП1 по сигналу "строб записи". Информация из триггеров памяти отдельных каналов считывается последовательно с отдельных плат, включенных в общую магистраль каркаса.

Большое число каналов электроники, необходимость их массовой настройки и контроля привело к созданию автоматизированного стенда и соответствующего программного обеспечения для этих целей. Автоматизированный стенд и программа позволяет:

1. снимать кривую задержанных совпадений регистрирующих каналов пропорциональных камер;
2. определять пороги срабатывания каналов;
3. изучать перекрестные наводки с канала на канал при любых (задаваемых программным образом) комбинациях входных сигналов;

4. проводить все измерения на одной плате в полностью автоматизированном режиме;
5. запоминать получаемые характеристики плат ПСИ–32 в на магнитных носителях.

Стенд создан на базе аппаратуры в стандарте КАМАК и работа его происходит под управлением ЭВМ. В среднем на проверку одной платы на стенде требовалось 3 минуты.

В четвертой главе описывается наносекундная логика и трехуровневая система фильтрации информации, система сбора, контроля и передачи данных со спектрометра в ЭВМ и соответствующих программных продуктов. При поиске запрещенного ($\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$) и изучении редких распадов ($\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$, $\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$) спектрометр в основном регистрирует события, представляющие собой фон, который достигает очень больших величин. Задача предварительной фильтрации событий перед их считыванием для первоначальной обработки в ЭВМ СМ–4 и дальнейшей записью ее на магнитную ленту решена путем отбора искомого события на нескольких уровнях.

В систему выработки быстрого триггера первого уровня отбора спектрометра АРЕС включены сцинтилляционные счетчики годоскопа и пропорциональные камеры, как правило стриповые. За 100 нс принимается решение о записи информации о событии, удовлетворяющему достаточно жестким критериям отбора, в триггеры памяти электроники пропорциональных камер, спецпроцессора РАСТР (РАСПознаватель ТРектов) и другой регистрирующей аппаратуры в стандарте КАМАК.

На втором уровне отбора работает специализированный процессор РАСТР. РАСТР за ≈ 15 мкс проверяет наличие в событии треков с требуемой кривизной и знаком и при принятии положительного решения в ЭВМ СМ–4 выдается сигнал на считывание в ее память полной информации о событии.

На третьем уровне отбора в режиме on-line в ЭВМ СМ–4 работает программа быстрой фильтрации, определяющая наличие в событии электронов (≥ 1) и позитронов (≥ 2) за время ≈ 30 мс. При выполнении этих условий информация из памяти ЭВМ СМ–4 передается по каналу прямого доступа в ЭВМ ЕС–1040 и записывается там на магнитную ленту для последующего off-line анализа. На первом уровне отбора использовались программируемые быстрые микросхемы памяти К500РЕ149. Блок-схема быстрой логики приведена на рис. 4. Использование микросхем памяти в качестве элемента отбора определенных комбинаций входных сигналов позволило учитывать многообразие вариантов срабатывания счетчиков и значительно сократить задержку триггера. В

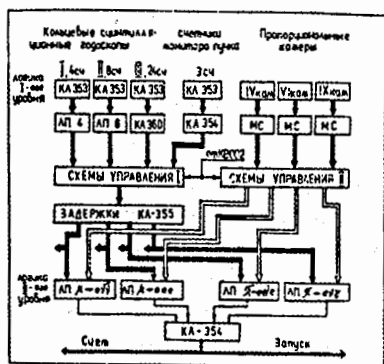


Рис. 4: Принципиальная блок-схема быстрой логики.

КЛ 353 - схема формирователь - задержка; КЛ 354 - схема совпадений; ЛП - схема отбора; МС КЛ 360 - схемы мажоритарных совпадений.

системе быстрой логики используется информация с пропорциональных камер. Для этого сигналы БЫСТРОЕ ИЛИ из заранее выбранных камер объединяются в группы и подаются на входы схем мажоритарных совпадений. В нашем случае требовалось, чтобы в выбранных камерах сработало ≥ 3 групп. Применение мажоритарных схем совпадений уменьшило число запусков в ≈ 300 раз.

В системе быстрой логики (БЛ) можно условно выделить схемы 1-го уровня, работающие с сигналами от детекторов, и схемы 2-го уровня, производящие логическую обработку сигналов со схем 1-го уровня. Связь между этими уровнями производится через элементы управления, установленные в каждом канале. В каждом канале независимо могут осуществляться следующие операции:

- передача сигнала от схемы 1-го уровня;
- отключение передачи сигнала (при этом возможна подача контрольного сигнала);
- установка постоянного сигнала (потенциала) на входе схемы 2-го уровня.

Наличие элементов контроля и управления, а также стандартных блоков КАМАК быстрой логики управляемых от ЭВМ, позволяет оперативно менять логику запуска, производить подбор задержек, контролировать работу ФЭУ, пропорциональных камер, самого блока БЛ.

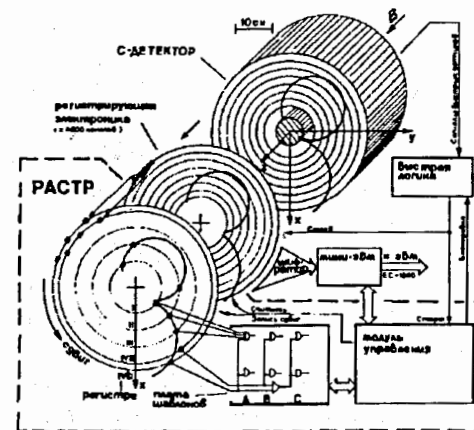


Рис. 5: Включение РАСТРа в С-детектор.

На втором уровне отбора работает специализированный процессор РАСТР. Процессор выполняет следующие функции:

1. По сигналу "Старт" от мастер-триггера первого уровня отбора считывает информацию о событии с заранее выбранных цилиндрических камер спектрометра.
2. Организует пошаговый сдвиг информации.
3. Проверяет информацию о событии на наличие треков заранее выбранных конфигураций на каждом шаге сдвига.
4. Определяет количество обнаруженных треков заданных конфигураций за полный просмотр.
5. В зависимости от количества найденных треков сообщает ЭВМ об окончании просмотра и наличии полезного события.
6. Организует блокировку мастер-триггера первого уровня на время просмотра, а также другие служебные команды.
7. По команде от ЭВМ РАСТР может быть выключен из системы фильтрации информации и подвергнут тестированию с помощью ЭВМ.

По окончании просмотра процессор вновь готов к обработке следующего события. Способ съема информации и поиска трека поясняется рис. 5. Логические сигналы переписываются с триггеров памяти регистрирующей электроники камер в замкнутые в кольцо сдвиговые (кольцевые) регистры, после чего в регистрах осуществляется пошаговый сдвиг. При синхронном сдвиге в регистрах происходит вращение всей плоской "фотографии" события. Обычная многоходовая схема совпадений работает на некотором шаге сдвига, если в событии присутствует трек, совпадающий с конфигурацией соединения ее входов с выходами сдвиговых регистров. Номер шага сдвига при этом определяет азимутальную координату центра кривизны трека — угол φ , а конфигурация соединения шаблона — радиус кривизны и расстояние центра кривизны от центра мишени. С помощью набора таких схем совпадений можно реализовать требуемый массив шаблонов.

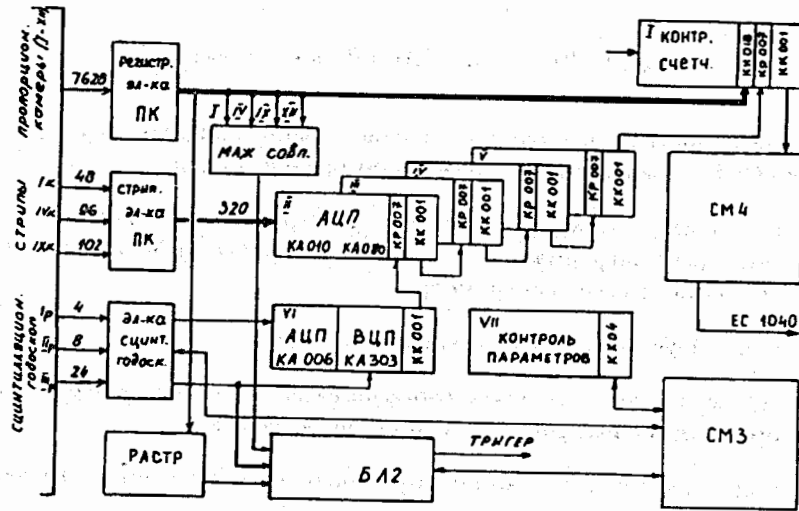


Рис. 6: Общая блок-схема прохождения информации в спектрометре АРЕС.

Создана программа для расчета шаблонов, покрывающих все возможные конфигурации треков. Разработана программа для имитации треков электронов в РАСТРе. Разработана система тестирования и контроля работы специализированного процессора РАСТР от ЭВМ. Тест РАСТРа такой программой занимал около 10 минут. Коэффициент подавления фоновых событий составил ≈ 9 . Эффективность распознавания

электронных треков $\approx 96\%$.

Более точный поиск и идентификацию треков заряженных частиц, имеющих в событии, осуществляет on-line программа быстрой фильтрации информации работающая с данными, считанными с триггеров памяти электроники пропорциональных камер в память ЭВМ СМ-4. Алгоритм поиска аналогичен принципу работы спецпроцессора РАСТР. Общая схема прохождения информации представлена на рис. 6. Регистрирующая аппаратура, на которую поступает информация со спектрометра, выполнена в стандартах КАМАК (9 крейтов) и ВИШНЯ.

В пятой главе приведены результаты экспериментов по поиску распадов $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ и $\pi^+ \rightarrow \mu^-e^+e^+\nu$ и исследованию распада $\pi^+ \rightarrow e^+\nu_e e^+e^-$. Вычислена полная вероятность распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+e^+e^-\nu_\mu$ и показана возможность изучения этого распада на лету спектрометром АРЕС. Диаграммы процесса $\pi^+ \rightarrow l^+\nu_l e^+e^-$ представлены на рис. 7. Наибольший

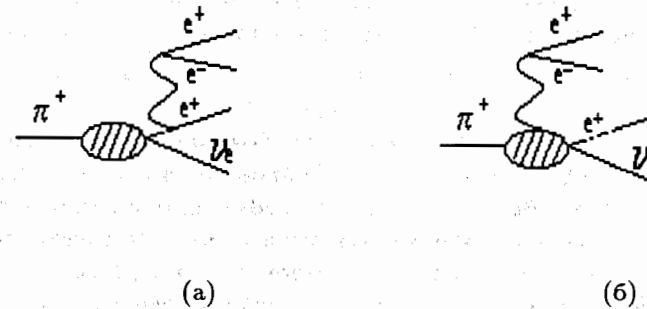


Рис. 7: Диаграммы распада $\pi^+ \rightarrow e^+\nu_e e^+e^-$: а - часть, связанная с тормозным излучением; б - структурно-зависимая часть.

интерес для исследования представляет та часть распада, которая определяется внутренней структурой пиона (рис. 7б). Экспериментальный материал по распадам $\pi^+ \rightarrow e^+\nu_e e^+e^-$ и $\pi^+ \rightarrow \mu^-e^+e^+\nu$ получен в экспозициях по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ на спектрометре АРЕС. Схема эксперимента показана на рис. 8. Выведенный и растянутый по времени пучок протонов с энергией 659 ± 6 МэВ и интенсивностью $0,7 \div 1,5$ мкА поворотным магнитом направлялся на мезонообразующую мишень (М). Пионы, рожденные в мишени и вылетающие под углом 47° к оси пучка протонов, захватываются в мезонный канал П. Используемый в эксперименте пучок π -мезонов с импульсом 170 МэВ/с содержал $\sim 20\%$ позитронов.

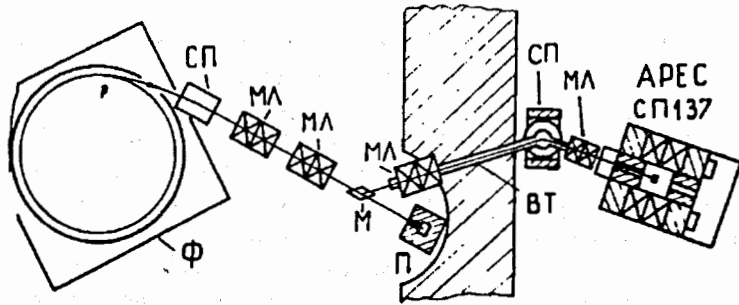


Рис. 8: Схема постановки эксперимента.

Ф - фазотрон; СП - поворотный магнит; МЛ - магнитная линза; М - мезонообразующая мишень; П - поглотитель-ловушка; ВТ - вакуумный тракт.

Распады $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$ имеют по одному электрону и по два позитрона, что дало возможность организовать общую логику запуска установки. Всего было проведено 9 сеансов общей длительностью 800 часов, из них ~ 500 часов набора статистики. Средняя интенсивность остановок π^+ -мезонов с последующим распадом $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ и остановкой мюона в мишени составили $\sim 5,8 \cdot 10^5 c^{-1}$. Таким образом, в мишени распалось $N_\mu = 1,1 \cdot 10^{12}$ мюонов. Число запусков установки во время эксперимента со считыванием в ЭВМ СМ-4 колебалось в пределах $15-30 c^{-1}$, поэтому специализированный процессор РАСТР не использовался. Скорость поступления данных в ЕС-1040 составила 1-2 события в секунду. Всего на 184 магнитных лентах было записано 2,5 млн. событий. Обработка этих данных была проведена в несколько этапов на ЭВМ ЕС-1040, ЕС-1060, ЕС-1061, VAX-8350 и персональных ЭВМ.

Выделение распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$ происходило по следующим критериям для отбора кандидатов для этого события: наличие предшествовавшей распаду остановки пиона в мишени, масса распавшейся частицы, одновременность прохождения всех трех заряженных частиц. В соответствии с временным разрешением, даваемым установкой, считалось, что треки в событии возникли одновременно, если по крайней мере в 3 сцинтилляторах, через которые прошли разные треки, время появления сигналов отличалось не более чем на 3 нс. Таких одновременных событий с задержкой между счетчиками от 0 до 3 нс оказалось 27. Число

случайных событий в интервале времени 3 - 6 нс составило 9. Из 27 одновременных событий 12 по массе распавшейся частицы 140 ± 16 МэВ удовлетворяют гипотезе о том, что это был пион. Распределение этих 12 событий по времени показано на рис. 9. Девять событий из этого

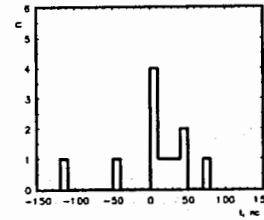


Рис. 9: Распределение одновременных событий с массой 140 ± 16 МэВ относительно времени прихода пиона.

числа попадают во временной интервал 45 нс после распада пиона. Из распределения событий по времени можно также сделать заключение о том, что ожидаемый фон случайных совпадений в принятом интервале 45 нс составляет ~ 1 событие. Из 9 случайных событий в тот же интервал 45 нс попадает 1 событие. Это также позволяет сделать заключение, что ожидаемое число случайных событий в найденных 9 случаях распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$ также составляет ~ 1 событие.

Ожидаемое число распадов за счет внутреннего тормозного излучения, составляет в нашей статистике ~ 1 . Полученная нами статистика практически не несет информации о вкладе тормозного излучения, хотя оно определяет, в основном, полную вероятность распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$. Среди наблюдаемых распадов основную часть, примерно 7 событий, составляют распады, обусловленные наличием структуры пиона.

Получена оценка парциальной вероятности распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$ за счет наличия структуры пиона

$$R_{SD} = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-)_{SD}}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)} = \frac{N_{SD}}{N_{ост} \cdot \epsilon_{SD}} \approx (4,6 \pm 1,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-10},$$

где $N_{SD} = 7$ - число распадов, обусловленных наличием структуры пиона. Вторая ошибка - это ошибка за счет неопределенности эффективности регистрации.

При расчете эффективности регистрации распада $\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu$ предполагалось, что матричный элемент - константа, а электрон от последующего распада $\mu \rightarrow e \nu \nu$ регистрируется во временном интервале

~ 10 ns, требовавшимся быстрой логикой отбора. Программы моделирования для различных процессов на спектрометре АРЕС созданы с использованием системы GEANT. Эффективность регистрации $\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu$ с учетом необходимых поправок (на временные ворота, энергетические ворота и т.д.) оказалась равной $\epsilon = 1.2 \cdot 10^{-6}$ при поле 0.315 Тл. Не обнаружено ни одного события распада $\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu$. Получена оценка верхней границы относительной вероятности распада $\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu$ на уровне достоверности 90%

$$Br = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)} < 1.6 \cdot 10^{-6}.$$

Это значение Br в 5 раз улучшает оценку, сделанную ранее в Дубне и является лучшим в мире.

Распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$, как отмечалось ранее, обусловлен слабым и электромагнитным взаимодействием. Этот распад не наблюдался экспериментально, за исключением одного события, случайно зарегистрированного в 1955 г. в фотоэмульсиях. Имеющиеся теоретические оценки отличаются в ≈ 8 раз, и поэтому мы повторили расчеты и изучили возможность поиска распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$ на спектрометре АРЕС.

На первом этапе методом Монте-Карло были сгенерированы события с использованием матричного элемента. Полная вероятность процесса $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$ определяется практически полностью вкладом внутреннего тормозного излучения, и ее можно представить в виде: $R(\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu) = W(\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu) / W(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) \approx R_{IB} = 0.33 \cdot 10^{-6}$. На втором этапе моделирования была рассчитана вероятность регистрации распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$ спектрометром АРЕС. События с весом, полученные на первом этапе моделирования были пропущены через установку. В нашем случае (Рис. 10) в спектрометре отсутствовал первый ряд сцинтилляционных счетчиков. Для уменьшения фоновых условий предполагалось использование мишени в виде вакууммированного объема. Пионы с импульсом 170 МэВ/с распались в вакууме в цилиндре, расположенном в центре установки и имеющем длину 70 см и диаметр 10 см. Распадная зона – 40 см ограничивается условиями триггера. Траектория пучковых π^+ -мезонов регистрируется двумя парами разнесенных двухкоординатных пропорциональных камер. Спектрометр АРЕС использовался для регистрации позитрона и электрона от распада π^+ на лету. Предполагалось, что в выработке триггера будут использоваться, как и ранее, стриповые камеры (IV и IX) и второй ряд годоскопа. Моделирование проводилось при магнитном поле 500 Гс.

При интенсивности пучка пионов $I = 5 \cdot 10^5$ /с и времени экспозиции $5 \cdot 10^5$ с при требовании прохождения e^+ и e^- через разные группы в

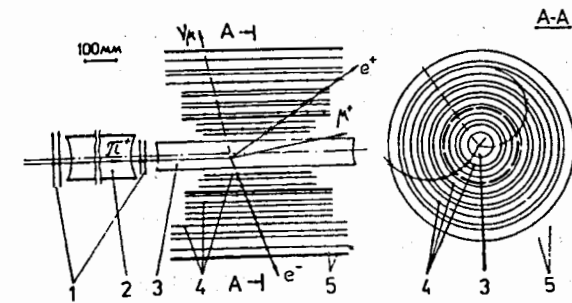


Рис. 10: Схема эксперимента по изучению распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$. Крестами на треках частиц отмечено срабатывание детекторов: 1 – двухкоординатные пучковые пропорциональные камеры, 2 – вакууммированный пропорциональный объем, 3 – вакууммированный распадный объем, 4 – цилиндрические пропорциональные камеры (точками отмечены двухкоординатные камеры), 5 – сцинтилляторы.

камерах (IV, IX) и разные счетчики второго ряда годоскопа, ожидаемое число случаев детектирования $N_{\pi \rightarrow \mu e e \nu} \approx 180 \div 200$. При отсутствии второго ряда можно иметь $N_{\pi \rightarrow \mu e e \nu} \approx 430 \div 450$. Из этих оценок следует, что есть реальная возможность изучить распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu$ на установке АРЕС.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Предложен и реализован вариант нестандартного включения магнита СП-173 для получения однородного магнитного поля в магнитном спектрометре АРЕС, созданного впервые в мире для исследования редких распадов мюонов и π -мезонов на мезонных фабриках.
2. Разработана и создана методика изготовления 36 сцинтилляционных счетчиков цилиндрического годоскопа спектрометра АРЕС, изучены их характеристики и написана универсальная программа моделирования методом Монте-Карло светосбора в оптических системах широкого класса.
3. Разработан и создан комплекс программ для наладки и диагностики регистрирующей электроники пропорциональных камер (~ 16000 каналов) и испытания камер.

4. Разработана и создана система управляемого от ЭВМ быстрого многофункционального триггера спектрометра АРЕС на основе информации со сцинтилляционного годоскопа и пропорциональных камер, позволяющая осуществлять регистрацию событий различного класса в одной экспозиции с учетом конфигурации событий.
5. Разработан и создан комплекс программ для специализированного процессора РАСТР для быстрой фильтрации событий при исследовании редких процессов на спектрометре АРЕС.
6. При обработке информации об остановившихся в мишени $1,1 \cdot 10^{12}$ π^+ -мезонов обнаружено 8 распадов $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$, и вычислена парциальная вероятность этого распада за счет наличия структуры пиона $R_{SD} = (4.6 \pm 1.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-10}$.
7. На основании набранной статистики получена верхняя граница относительной вероятности распада $\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu$ на уровне достоверности 90%

$$Br = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)} < 1.6 \cdot 10^{-6}.$$

Полученное значение Br в 5 раз улучшает единственную в мире оценку, сделанную ранее в Дубне.

8. Расчитана полная вероятность распада $R(\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu) = W(\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- \nu_\mu) / W(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) \approx R_{IB} = 0.33 \cdot 10^{-6}$ и моделирован вариант постановки эксперимента по изучению этого распада на лету на спектрометре АРЕС.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Баранов В.А. Программы контроля пропорциональных камер и электроники на линии с ЭВМ М-6000. – Сообщение ОИЯИ, 13-11373, Дубна, 1976.
2. Баранов В.А., Журавлев Н.И., Коренченко А.С., Коренченко С.М., Корнев В.И., Кравчук Н.П., Косарев Г.Е., Кучинский Н.А., Мжавия Д.А., Моисеенко А.С., Некрасов К.Г., Смирнов В.С., Филиппов А.И. Автоматизированный стенд для испытания цилиндрических пропорциональных камер. – Сообщение ОИЯИ, 13-12631, Дубна, 1979.

3. Баранов В.А., Коренченко С.М., Смирнов В.С., Хомутов Н.В. Система автоматического контроля параметров детектора заряженных частиц спектрометра АРЕС. – Сообщение ОИЯИ, 13-80-226, Дубна, 1980.
4. Баранов В.А., Журавлев Н.И., Иленбург Р., Коренченко С.М., Корнев В.И., Кучинский Н.А., Медведь С.В., Синаев А.Н., Чурин И.Н., Шварценберг Ф. Система сбора и первичной обработки информации, получаемой на С-детекторе спектрометра АРЕС. – Сообщение ОИЯИ, 13-81-162, Дубна, 1981.
5. 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., Хомутов Н.В. Детектор заряженных частиц спектрометра АРЕС. – Сообщение ОИЯИ, 13-81-381, Дубна, 1981.
6. Баранов В.А., Евтухович П.Г., Зязюля Ф.Е., Иленбург Р., Коренченко С.М., Мицельмахер Г.В., Сергеева Н.В. Логика построения и моделирование специализированного процессора РАСТР для С-детектора спектрометра АРЕС. – Сообщение ОИЯИ, 13-82-769, Дубна, 1982.
7. 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., Хомутов Н.В. Системы запуска и съема информации спектрометра АРЕС. – В сб.: XII Международный симпозиум по ядерной электронике. Д13-85-793, Дубна, ОИЯИ, 1985, с.310.
8. 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., Smirnov V.S., Vanko J., Zyazyulya F.E., ARES spectrometer. – NIM, 1986, v.B17, p.438.
9. Баранов В.А., Евтухович П.Г., Коренченко С.М., Мжавия Д.А., Смирнов В.С., Цамалаидзе З.Б., Изготовление и исследование цилиндрических сцинтилляционных счетчиков спектрометра АРЕС. – ПТЭ, 1987, т.6., с.40.

10. Баранов В.А., Кисель И.В., Коренченко С.М., Кучинский Н.А., Мжавия Д.А., Цамалаидзе З.Б., О распаде $\pi^+ \rightarrow \mu^- + 2e^+ + \nu$. - Ядерная физика, 1991, т.54, с.1298.
11. Баранов В.А., Глазов А.А., Кисель И.В., Коренченко А.С., Коренченко С.М., Кравчук Н.П., Кучинский Н.А., Моисеенко А.С., Некрасов К.Г., Смирнов В.С., Филиппов А.И., Фурсов А.П., Хомутов Н.В., Чернявский Н.Н., Яковлев С.И., Евтухович П.Г., Зяблюля Ф.Е., Мжавия Д.А., Цамалаидзе З.Б., Ванко Ю., Повинец П., Сарка Я., Изучение распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$. - Ядерная физика, 1991, т.55, с.2940.
12. Баранов В.А., Коренченко С.М., Костин Б.Ф., Кравчук Н.П., Кучинский Н.А., Мжавия Д.А., Цамалаидзе З.Б., О распаде $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^+ + e^- + \nu_\mu$ - Сообщение ОИЯИ, P1-92-131, Дубна, 1992.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 апреля 1994 года.