

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

10-93-422

ЕВТУХОВИЧ
Петр Георгиевич

УДК 539.12...13
+ 539.12.05.072
+ 539.1.074.3

СПЕКТРОМЕТР АРЕС: БЫСТРАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ
ИНФОРМАЦИИ, ПОИСК РАСПАДА $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$
И ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1993

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 В.Б. Флягин
кандидат физико-математических наук В.С. Румянцев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Российский научный центр "Институт И.В. Курчатова" (г. Москва)

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1993 года в
_____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследова-
ний, г. Дубна Московской области. С диссертацией можно ознако-
миться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1993 г.

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

1 Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Поиск распадов пионов и мюонов, запрещенных законом сохранения лептонного числа, а также исследование редких распадов этих частиц приобрело в наши дни повышенный интерес среди экспериментаторов.

С одной стороны он вызван разработкой новых теоретических моделей, выходящих за рамки стандартной теории электрослабого взаимодействия, в которых с разной вероятностью допустимы такие распады, как $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и др., а также необходимостью иметь значительно более полную информацию о свойствах пиона, содержащуюся, скажем, в распаде $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$.

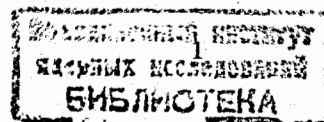
С другой стороны этот интерес обусловлен прогрессом в ускорительной технике и методике эксперимента. Современные ускорители дают пучки мюонов и пионов интенсивностью $\sim 10^8$ частиц/сек, а детектирующие системы нового поколения при большом телесном угле имеют высокое пространственное, временное и энергетическое разрешение.

Понижение верхней границы относительной вероятности распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ позволяет делать более определенные оценки параметров указанных теоретических моделей.

Исследование редкого распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ позволяет измерить формфакторы пиона γ и ξ , определяющие его структуру, оценить парциальную вероятность распада за счет наличия структуры у пиона, проверить такие константы пиона, как его электромагнитный радиус и время жизни.

Для экспериментального изучения этих и других процессов на высоком уровне в ЛЯП ОИЯИ был создан магнитный спектрометр АРЕС (Анализатор Редких Событий), являющийся установкой универсального типа, имеющий большой телесный угол ($\approx 2\pi$ стерад), детектирующий объем диаметром 1040 мм и длиной 600 мм, высокое временное (1 нсек), пространственное (1-2 мм) и энергетическое (1-5%) разрешение, способный перерабатывать информацию о кинематике многочастичных процессов при нагрузках до 10^6 событий/сек. Эти свойства спектрометра достигнуты благодаря применению цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер, детектирующих заряженные частицы, и нескольких рядов цилиндрических сцинтилляционных счетчиков, с помощью которых осуществляется запуск установки по определенным логическим критериям.

Цель работы. Разработка и создание цилиндрической годоскопической системы пластиковых сцинтилляционных счетчиков спектрометра



АРЕС, предназначенной для создания триггера, существенно сокращающего количество запусков спектрометра для считывания информации в условиях чрезвычайно высоких загрузок (до 10^6 соб/сек).

Разработка и создание программных средств, которые учитывали бы особенности геометрии спектрометра и исследуемых процессов, и давали возможность дальнейшего сокращения исходной информации.

Проведение на спектрометре АРЕС поиска редкого распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ с целью установления верхней границы относительной вероятности распада $R_{\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-} \approx 10^{-11}$ а также исследование распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ с целью получения информации о факторах γ и ξ и измерения парциальной вероятности за счет наличия структуры у пиона.

Научная новизна. Созданная годоскопическая система сцинтилляционных счетчиков позволяет в сочетании с информацией с пропорциональных камер осуществлять запуск спектрометра только тогда, когда в событии имеется заданное количество треков заряженных частиц. Время разрешения составляет при этом ≈ 10 нс.

Созданные программные средства, работающие в реальном времени, представляют, по сути, один из первых в мире примеров триггера второго уровня, применяющегося сегодня практически во всех крупных экспериментальных установках. Использование такого триггера сделало возможным набор статистики благодаря отфильтровыванию большого объема информации и пропуску только тех событий, которые содержат определенное количество треков заряженных частиц из заданного диапазона импульсов.

На созданном спектрометре АРЕС проведен поиск распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и достигнута верхняя граница относительной вероятности на уровне $R_{\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-} \leq 3,6 \cdot 10^{-11}$.

Проведено исследование распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$, найдено 8 событий этого распада, сделана оценка парциальной вероятности распада за счет наличия структуры пиона $R_{\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e} \approx 4,6 \cdot 10^{-10}$.

Практическая ценность. Цилиндрическая годоскопическая система сцинтилляционных счетчиков является неотъемлемой частью спектрометра АРЕС, определяющей его работоспособность в условиях высоких загрузок. Подобные системы впоследствии были использованы на других установках с цилиндрической геометрией детектора.

Программный комплекс "Алгоритм быстрой фильтрации", работающий в on-line режиме, позволяет резко сокращать количество записываемых событий (в среднем одно из 20 поступающих), что дает возможность проводить длительные сеансы по набору статистики и получать разумные объемы информации для последующей обработки. На обработку одного события тратится время ≈ 35 мсек. Подобные аналоги также были

использованы в других подобных установках.

Весь комплекс аппаратных и программных средств показал высокую эффективность и надежность при проведении эксперимента по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и исследованию распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$. Функциональная гибкость и универсальность принципов, положенных в основу их работы, может быть использована при проведении широкой программы экспериментов в области физики промежуточных энергий с участием пионов и мюонов.

Автор защищает:

1. Разработку и создание цилиндрической системы сцинтилляционных счетчиков для быстрой логики запуска спектрометра АРЕС.
2. Разработку и создание программного комплекса "Алгоритм быстрой фильтрации", работающего в реальном времени как триггер второго уровня и осуществляющего отбор событий по признаку принадлежности их распадам $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$, на основе смоделированных треков-шаблонов.
3. Результат экспериментального поиска распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$.
4. Результат экспериментального исследования распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$.

Апробация работы и публикации. Диссертация написана на основе научных работ, выполненных с участием автора в ЛЯП ОИЯИ в период с 1978 по 1993 гг. Основные результаты диссертации докладывались на XII Международном симпозиуме по ядерной электронике (Дубна, 1985 г.), III Международной конференции по низким активностям (Братислава, 1990 г.), на рабочих совещаниях и семинарах и опубликованы в 9 работах: сборнику трудов международного симпозиума по ядерной электронике, в журналах ПТЭ, NIM, Journal of Physics, ЯФ и сообщениях ОИЯИ[1-9].

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 108 страниц текста, включая 14 таблиц, 33 рисунков и список цитируемой литературы из 110 наименований.

2 Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы и определена ее практическая значимость, описывается структура диссертации.

В первой главе делается обзор теоретических моделей, допускающих распады мюонов и пионов с нарушением закона сохранения мюонного

(электронного) числа. Приводятся диаграммы Фейнмана для различных механизмов распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, соответствующих трем типам теоретических моделей: расширенной стандартной модели электрослабого взаимодействия вплоть до суперсимметричной, модели, включающей новые взаимодействия, и смешанной модели. Приводится таблица, содержащая теоретические оценки верхней границы относительной вероятности распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$. Основным недостатком приводимых там оценок связи с ненадежностью предположений относительно масс скалярных промежуточных частиц, массы нейтрино, параметров смешивания, постоянной связи лептонов (кварков) с новыми частицами.

Кратко рассмотрен распад $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$. Вначале он был интересен как тест на пределы применимости квантовой электродинамики и возможное существование аномального четырехлептонного и даже шестилептонного взаимодействия.

Однако помимо экзотических взаимодействий распад $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ может идти за счет совместного проявления известных взаимодействий — слабого и электромагнитного, как процесс внутренней конверсии в радиационном распаде пиона $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$. Диаграммы процесса $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ представлены на рис. 1

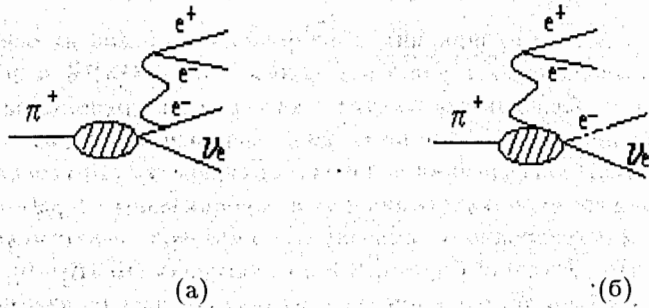


Рис. 1: Диаграммы распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$: а - часть, связанная с тормозным излучением; б - структурно-зависимая часть.

Отношение вероятности распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ к вероятности распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ можно записать в следующем виде:

$$R_{\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e} = \frac{W_{\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e}}{W_{\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu}} = IB + SD + \gamma SD_\gamma + \xi SD_\xi + \gamma \xi SD_{\gamma\xi} + \gamma^2 SD_{\gamma^2} + \xi^2 SD_{\xi^2} + IBSD + \gamma IBSD_\gamma + \xi IBSD_\xi. \quad (1)$$

IB — вклад внутреннего тормозного излучения, SD — вклад векторной части амплитуды; SD_γ — вклад интерференции векторной части с вкладом, пропорциональным γ и т. д.

Т.о. $R_{\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e}$ представляет собой многочлен второй степени по γ и ξ с коэффициентами, представляющими вклады в вероятность тормозного излучения, структурной части и их интерференции. Если эти величины удастся измерить в эксперименте, то можно вычислить формфакторы γ и ξ , определяющие слабоэлектромагнитную структуру пиона.

Приводятся экспериментальные результаты, полученные за последние годы по поиску запрещенных распадов мюонов, а также данные по исследованию распадов $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ и $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$.

Из-за крайне низких вероятностей (возможных и существующих) подобных процессов, эксперименты по их обнаружению выполняются на ускорителях с высокой интенсивностью пучка (до 10^7 с.к.^{-1}), и поэтому экспериментальная аппаратура должна обеспечивать высокое временное разрешение при максимально возможном телесном угле регистрации. Наиболее полно таким требованиям удовлетворяют установки, имеющие цилиндрическую геометрию детектирующей части с проволочными координатными детекторами. Рассмотрены установки, на которых получены последние рекордные результаты: SINDRUM, PSI ($R_{\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e} < 10^{-12}$), Crystal Box, LAMPF ($R_{\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma} < 4,9 \cdot 10^{-11}$) и TPC, TRIUMF ($R_{\mu^+ \text{ конверсия}} < 4,6 \cdot 10^{-12}$).

В конце главы приводится таблица со сравнительными характеристиками многопроволочных пропорциональных камер, используемых в качестве центральных детекторов в ряде установок.

Во второй главе дается общее описание спектрометра АРЕС ^{16/}, представляющего собой систему коаксиально расположенных цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер (ЦМПК), помещенных в магнитное поле. Описывается разработка и создание скintилляционного годоскопа спектрометра ^{14,5/}, рассматривается система запуска и съема информации ^{11/}.

Цилиндрическая геометрия спектрометра обеспечивает:

1. эффективное использование рабочего объема магнитного поля;
2. изотропию свойств спектрометра в плоскости, перпендикулярной оси соленоида, что в свою очередь позволит:
 - (а) унифицировать логику запуска установки,
 - (б) создавать быстрые системы программной фильтрации информации;

3. простоту реализации пороговых условий, так как определенному радиусу траектории соответствует определенный импульс частицы.

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	≈ 0,7 · 4π стеррад;
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%;
10. Скорость набора статистики	до 100 сб/сек.

Общее устройство магнитного спектрометра АРЕС показано на рис. 2, а таблице 1 приведены основные характеристики установки.

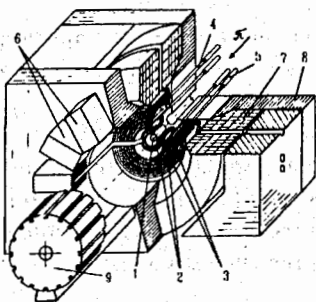


Рис. 2: Общий вид спектрометра АРЕС.

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

Трековыми детекторами спектрометра АРЕС являются 18 коаксиально расположенных ЦМПК с малым количеством вещества в рабочем объеме. Камеры делятся на два типа: регистрирующие только азимутальную координату и двухкоординатные - регистрирующие азимутальную и осевую (Z) координаты (камеры I, IV, IX и XIII).

Кроме пропорциональных камер в детектирующей части 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.

К сцинтилляционным счетчикам годоскопа предъявляются следующие требования:

1. минимальная толщина сцинтиллятора, так как точность определения энергии электронов спектрометром определяется в основном энергетическими потерями и многократным рассеянием в веществе сцинтиллятора;
2. достаточно высокое быстродействие;
3. длина световодов не менее 1,3 м, т. к. сцинтилляторы счетчиков расположены в магнитном поле напряженностью 1,8 Тл и, следовательно необходимо выносить 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 конца сцинтиллятора.

Отдельный счетчик состоит из пластикового сцинтиллятора на основе полистирола с добавками 2% терфенила и 0,02% РОРОР длиной 360, 500 или 600 мм, толщиной 5 мм и шириной 87 мм, имеющего форму части цилиндра, переходного и основного световодов, изготовленных из полиметилметаакрила (ПММА), ФЭУ ХР2020 (рис. 3). Переходной световод изготавливался из ПММА, имеющего форму трапеции толщиной 6 мм и высотой 120 мм. Основанию трапеции придавалась форма части цилиндра, соответствующая торцу сцинтиллятора, а вершина складывалась вдвое до размера торца основного световода. Применение переходного световода такой формы обеспечило в 3 раза большее пропускание света по сравнению с обычно применяемыми гиперболическими ("рыбий хвост") световодами такого же размера. Основной световод имеет размер 1250×40×20 мм³. Между переходным и основным световодами контакт из-за конструктивных особенностей сборки осуществлялся без какой-либо смазки. Для оптического контакта между основным световодом и ФЭУ использовался вазелин КВ-3. Торцы сцинтиллятора и переходный световод соединялись клеем на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Для поддержания контакта на всех участках каждого счетчика осуществляется постоянное поджатие ФЭУ к основному световоду и основного световода к переходному.

Для улучшения условий светосбора и светонезащиты сцинтиллятор и переходный световод обернуты белой бумагой и потом черной копировальной бумагой. Применение копировальной бумаги для светонезащиты позволяет избежать засвечивания сцинтилляторов, т. к. обладая конечным омическим сопротивлением, она предотвращает возникновение электрических разрядов, могущих возникнуть из-за большой разности потенциалов на катодных поверхностях двух соседних камер, между которыми располагаются годоскопы счетчиков.

Сцинтилляторы, соединяясь в годоскоп, образуют замкнутую цилиндрическую поверхность. В связи с этим каждый сцинтиллятор должен иметь форму части цилиндра, что осуществлялось путем термообработки сцинтиллятора под давлением в специальной установке для формовки сцинтиллятора.

Годоскоп состоит из 36 счетчиков, скомпонованных в три кольца (рис.3). Первое кольцо образовано четырьмя счетчиками, расположенными внутри первой камеры ($\varnothing = 90 \div 100$ мм, $h = 350$ мм), второе кольцо - 8 счетчиками, расположенными между III и IV камерами ($\varnothing = 240 \div 250$ мм, $h = 400$ мм), третье кольцо - 24 счетчиками, расположенными между XII и XIII камерами ($\varnothing = 663 \div 673$ мм, $h = 600$ мм). Световые импульсы от них регистрируются ФЭУ ХР2020. ФЭУ помещены в магнитную защиту из пермолоя и стали и монтируются в светозащитном отсеке, закрепленном на полюсе магнита. Величина напряженности магнитного поля в месте размещения ФЭУ до 30 Э, применяемое магнитное экранирование фотомножителей уменьшает ее в 20 раз, до величин, при которых ФЭУ могут работать нормально.

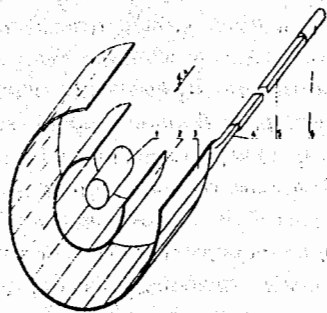


Рис. 3: Конструкция сцинтилляционного годоскопа: 1 - мишень, 2 - сцинтилляторы второго ряда, 3 - сцинтилляторы третьего ряда, 4 - переходный световод, 5 - основной световод, 6 - ФЭУ.

Проведенные исследования свойств счетчиков показали, что длина поглощения света в сцинтилляторе составляет $L = 66 \pm 7$ см. Склеивание сцинтиллятора и переходного световода уменьшает светосбор всего на $\sim 1\%$. Потери в переходном световоде составили $\sim 20\%$, а в основном световоде - 41% света, поступающего на их торцы. Длина поглощения света в световоде $L = 249$ см. В месте сухого воздушного контакта потери света составили $\sim 26\%$. Светосбор составляет 30% . Скорость распространения света в сцинтилляторе $12,1$ см/нсек. Временное разрешение счетчиков (ширина на уровне 80% случаев) при этом ~ 2 нс.

Система запуска установки включает быстрые логические схемы, использующие сигналы от сцинтилляционных счетчиков и информацию с пропорциональных камер. При этом для отбора комбинаций сработавших счетчиков второго ряда использовались схемы быстрой программируемой памяти К500РЕ149, позволившие учитывать многообразие вариантов срабатывания счетчиков и значительно сократить задержку триггера. Проволочки пропорциональных камер объединялись по схеме ИЛИ в группы и информация с них подавалась на мажоритарные схемы совпадений.

В третьей главе описывается разработка и создание комплекса программ, предназначенного для проведения быстрой фильтрации событий в спектрометре АРЕС ^[2,3] по признаку их принадлежности к распадам $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$.

Быстрая фильтрация производится на основе треков-шаблонов, смоделированных с использованием информации только о номерах проволочек цилиндрических пропорциональных камер, т.е. рассматривается проекция события на плоскость, перпендикулярную оси цилиндров и направлению магнитного поля.

Трек заряженной частицы в этой плоскости без учета ионизационных потерь, многократного рассеяния, неоднородности магнитного поля и т.д., представляет собой окружность (или дугу окружности), которая определяется сработавшими проволочками в трех "опорных" камерах (по 3 точкам задается окружность) и подтверждается не является ли данная тройка проволочек шумовым срабатыванием проволочками в оставшихся "неопорных" камерах. Дискретность спектрометра приводит к тому, что параметры окружности восстанавливаются с точностью, определяемой расстоянием между соседними проволочками в "опорных" камерах, и мы уже имеем не одну дугу, а целый "коридор", состоящий из непрерывного континуума дуг, близких по своим параметрам. Такой континуум мы называем шаблоном. Ширина шаблона определяется ограничивающими дугами, проведенными через граничные точки области чувствительности каждой из трех "опорных" камер. Шаблону можно сопоставить только одну дугу окружности, проведенную через опорные проволочки, а проекции

трека заряженной частицы, "попадающей" в шаблон приписать значения параметров этой дуги.

Использование шаблона дает возможность находить реальные треки частиц, траектории которых уже не дуги окружности из-за потерь энергии и рассеяния, но все-же "укладываются" в шаблон. Именно такая ситуация имеет место в спектрометре АРЕС, где в детектирующем объеме мало вещества. Целесообразно использовать шаблоны для быстрого поиска треков заряженных частиц и предварительной оценки их параметров. Если построить полный набор шаблонов (конечный из-за конечности комбинаций трех "опорных" проволочек) с учетом кинематики конкретного процесса и условий его регистрации для частиц одного знака (и, вообще говоря, подобный набор для частиц противоположного знака, если они должны быть в событии), то можно быстро определить есть ли в событии треки. Это делается "наложением" предполагаемого трека на область, содержащую полный набор шаблонов. Чтобы осуществить такое "наложение", его нужно сначала "завести" в эту область, т.е. повернуть на определенный угол.

Область шаблонов должна обладать определенными свойствами, чтобы каждый шаблон в ней имел свои отличительные признаки, и признаки эти были легко и быстро определяемы. Такими свойствами обладает область, ограниченная двумя дугами, охватывающими мишень, образующими веер, сходящийся в определенной точке регистрирующего объема и расходящийся дальше до грании этого объема. Все шаблоны определяются внутри этой области и все они имеют одну общую точку: окружность (или дуга окружности) задается по трем точкам. Поскольку камеры I, IV и IX в спектрометре АРЕС стриповые (т.е. с их помощью определяется Z-координата) и их срабатывание – обязательное условие, проволочки этих камер внутри области можно выбрать в качестве "опорных" точек для определения шаблонов. Проволочка IX камеры (нулевая по номеру) – общая для всех шаблонов. Тогда отличительными признаками каждого шаблона будут проволочки I и IV камер, по которым шаблон построен (рис. 4), а количество шаблонов определяется количеством таких комбинаций из двух проволочек в этих камерах.

Благодаря изотропности свойств спектрометра в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля, любой трек, вылетевший из мишени и пересекший IX камеру, или дошедший до нее, при повороте на угол, определяемый номером сработавшей проволочки IX камеры совпадет с одним из шаблонов.

Таким образом, после поворота по номерам проволочек I и IV камер определяется шаблон, а после проверяется совместятся ли сработавшие в "неопорных" камерах проволочки предполагаемого трека и шаблона. Диа-

пазон, в пределах которого фиксируется совпадение, определяется двумя параметрами, учитывающими тот факт, что в "коридор" шаблона могут попасть области чувствительности сразу двух проволочек из "неопорных" камер, а также потери энергии и рассеяние.

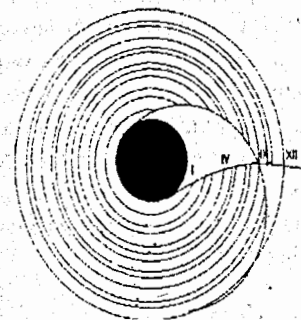


Рис. 4: Область шаблонов, построенная для нулевой нити IX камеры

С учетом требований регистрировать только треки, доходящие до поглотителя, расположенного за XII камерой, были получены все шаблоны. Программа, образующая набор шаблонов, написана на языке Фортран.

Результатом работы программы является создание на диске двух файлов в формате, пригодном для трансляции компилятором языка Макроассемблер для ЭВМ СМ-4. Один файл содержит расположенную в упорядоченном виде информацию о месте расположения шаблона в памяти ЭВМ, второй – все параметры, характеризующие шаблон (ϕ_0, ρ_0, r), а также номера проволочек в "неопорных" камерах, необходимые при работе программы идентификации треков. Под каждую величину, характеризующую шаблон, в памяти ЭВМ отводится один байт. Общая структура шаблона представлена в таблице 2

Таблица 2: Структура шаблона в памяти ЭВМ

n_2	n_3	n_5	n_6	n_7	n_8	n_{10}	n_{11}	n_{12}	ϕ_0	ρ_0	r
-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------	----------	----------	-----

Общее количество шаблонов при данном рассмотрении составило 523. Это означает, что массив шаблонов в памяти занимает 6286 байт. Размерность массива адресов шаблонов равна $2n_1^{max} \cdot n_4^{max} = 5456$ байт.

Суммарный объем памяти составляет 11742 байта. Эта величина достаточно компактна в сравнении с максимальным объемом памяти, отводимым одной задаче в ЭВМ СМ-4, равным 65536 байтам, что позволяло не создавать задачи со структурой перекрытий, отнимающей очень большое время при загрузке перекрытий с диска в память ЭВМ.

Быстрая фильтрация проводилась в on-line режиме по мере поступления события в оперативную память ЭВМ СМ-4. Проводилось декодирование информации о сработавших проволочках в каждой камере, определялось наличие несработавших камер, находились треки электронов и позитронов сравнением с шаблонами. Для идентификации треков частиц обоих знаков использовался только один набор шаблонов - "электронный", а его применение для поиска позитронных треков достигалось за счет найденного простого и быстрого преобразования номеров сработавших проволочек. Оно выглядит следующим образом:

$$M'(I) = K \cdot N(I) + 2M_0(I) - M(I), \quad (2)$$

где $M(I)$ и $M'(I)$ - номера проволочек в i -той камере соответственно до и после преобразования,

$N(I)$ - число проволочек в i -той камере,

$M_0(I)$ - сдвиг начала отсчета номеров проволочек i -той камеры, определяемый нижней границей области шаблонов,

$K=1$, если $M(I) > M_0(I)$, в противном случае $K=0$.

Далее делалась проверка на соответствие найденных треков распадам $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5

Программа написана на языке Макроассемблер для мини-ЭВМ класса СМ-4 с использованием всех возможностей системы команд для целочисленной арифметики, имеющих максимальную скорость выполнения. Жесткие временные требования, которыми руководствовался автор, позволили создать достаточно быструю программу с необходимыми функциональными характеристиками. Время обработки одного события, усредненное по 1000 отобранных для отладки многотрековых событий, составило ~ 30 мсек. Эффективность алгоритма, т.е. его способность находить все имеющиеся в событии треки, близка к 100%.

В четвертой главе описывается проведение эксперимента и обработка данных по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и исследованию распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ [7,8,9]. Набор статистики для обоих распадов осуществлялся в одной экспозиции. На рис. 6 представлена схема получения и транспортирования пучка пионов, и расположения на нем спектрометра АРЕС.

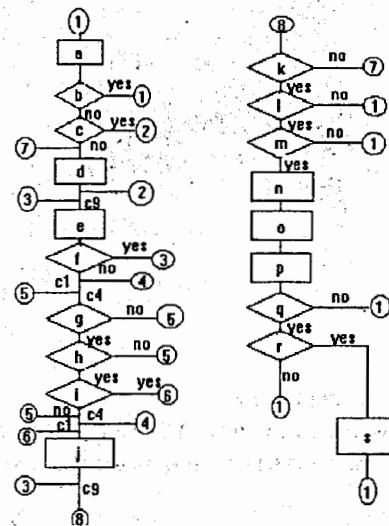


Рис. 5: Блок-схема алгоритма быстрой фильтрации: а - распаковка нового события, образование множеств M_i ; б - множества M_1, M_4, M_9 пусты?; в - ищутся "электронные" треки?; д - преобразование номеров всех проволочек для поиска "позитронных" треков; е - поворот на угол, определяемый номером проволочки из M_9 , образование массивов W_i из проволочек, попавших в область шаблонов; ф - W_1, W_4 пусты?; г - есть шаблон для пары из W_1 и W_4 ?; д - есть как минимум три предсказанные проволочки из массивов $W_2, W_3, W_5 - W_8$?; и - есть хотя бы одна предсказанная проволочка из массивов $W_{10} - W_{12}$?; ж - определение полярных координат трека; к - просмотрены "электронные" и "позитронные" треки?; л - "электронных" треков ≥ 1 ?; м - "позитронных" треков ≥ 2 ?; н - упорядочение массива "электронных" треков по признаку общности φ_0 и ρ_0 ; о - упорядочение массива "позитронных" треков по признаку общности φ_0 и ρ_0 ; п - определение истинных электронных и позитронных треков; q - критерий количества электронных треков удовлетворен?; r - критерий количества позитронных треков удовлетворен?; s - запись события на внешний носитель; c1, c4, c9 - циклы по проволочкам из массивов W_1, W_4, M_9 соответственно.

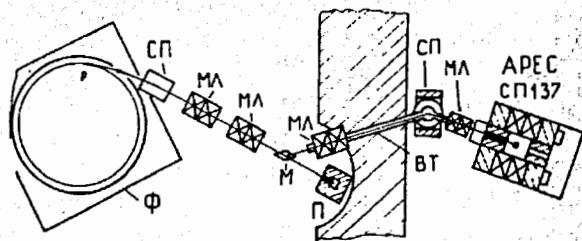


Рис. 6: Схема постановки эксперимента.

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

Для эксперимента собирался вариант спектрометра АРЕС, в котором использовались I - XII пропорциональные камеры с соответствующей электроникой на ~ 8 тыс. каналов, а вместо детектора γ -квантов вставлялся поглотитель для уменьшения нежелательного фона (рис. 7).

Измерения проводились на пучке пионов интенсивностью $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ и величиной импульса 170 МэВ/с. Всего было проведено 9 сеансов общей длительностью более 800 часов. В мишени спектрометра оставалось $\sim 20\%$ пионов пучка, которые с подавляющей вероятностью распадались по моде $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, так что общее количество остановленных и распавшихся пионов составляло величину $1.15 \cdot 10^{12}$.

Запуск установки на считывание производился наносекундными блоками быстрой логики, учитывающей характер распадов, с коэффициентом подавления $2 \cdot 10^4$ (триггер I^э уровня). После этого событие обрабатывались алгоритмом (программой) быстрой фильтрации (триггер P^э уровня) на наличие в нем, как минимум, одного электронного и двух позитронных треков. (фактор подавления 20), после чего производилась запись его на магнитную ленту. Скорость набора статистики составляла 1-2 сб/сек. Всего было записано на 184 магнитные ленты $2,5 \cdot 10^6$ многотрековых событий.

Обработка полученной информации проводилась на ЭВМ в четыре этапа. Первый этап - проверка срабатывания необходимого числа детекторов для записанных событий. На втором этапе определялись параметры треков в плоскости R- φ (перпендикулярной магнитному полю) на основе всей имеющейся информации о координатах. Третий этап - проверка

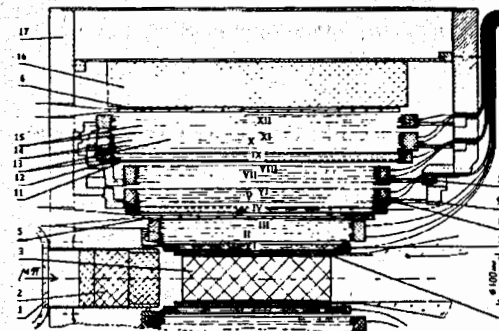


Рис. 7: Сечение детектирующей части спектрометра АРЕС для эксперимента по поиску распадов $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^-$ и $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^- \nu_e$.

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

пересечения в плоскости R- φ трех и более треков с учетом логических требований, положенных в основу триггера. Четвертый этап - восстановление события в пространстве (R- φ -Z), наличие общей вершины в пространстве и отбор событий по кинематике. В результате осталось $\sim 10^4$ событий, среди которых больше половины представляли собой баба-рассеяние позитрона на электроны с совпадением вылета позитрона от обычного распада мюона. Вместе с такого сорта событиями были отброшены и те, в которых было более трех треков, или помимо проволочек, принадлежащих трем трекам, имелось более 12 случайно расположенных сработавших проволочек.

В оставшихся событиях могли содержаться как распады $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, так и распад $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$.

Критериям, определяющим принадлежность события первым двум распадам, соответствовали 65 событий. Их распределение по энергии и

импульсу показано на рис. 8. Контуром обозначена область, принятая

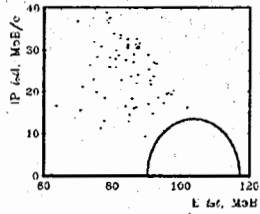


Рис. 8: Распределение событий, удовлетворяющих кинематике распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ по суммарной энергии E_{tot} и суммарному импульсу $|P_{tot}|$.

как область детектирования распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ (уровень достоверности 90%). Как видно из рисунка ни одно из зарегистрированных событий не может быть интерпретировано как распад $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, следовательно среди этих событий могут быть только распады $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$. Расчетное значение фона составляет ~ 21 событие, что означает, что было зарегистрировано 44 случая распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$. Это количество распадов соответствует значению $R_{\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-} = (3,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$, что хорошо согласуется с имеющимися на сегодня теоритической ($3,54 \cdot 10^{-5}$) и экспериментальной ($3,3 \cdot 10^{-5}$) оценками данного распада.

Оценка верхней границы относительной вероятности распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ на уровне 90%-ной достоверности имеет величину:

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

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

Выделение распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ происходило по естественным критериям для отбора кандидатов для этого события: наличие предшествовавшей распаду остановки пмона в мишени, масса распавшейся частицы и 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 числа попадают во

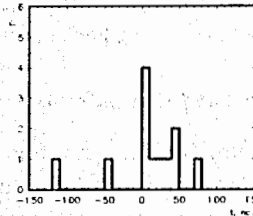


Рис. 9: Распределение одновременных событий с массой 140 ± 16 МэВ относительно времени прихода пиона.

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 $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ также составляет ~ 1 событие.

Число зарегистрированных нами событий не противоречит тем значениям γ и ξ , которые были получены в других экспериментах. Так при $\gamma=0,4$ и $\xi=2,1$ ожидаемое число распадов $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ составляет 8,4, а при $\gamma=0,4$ и $\xi=2,4$ – 10 случаев. Положительное значение γ более вероятно.

Ожидаемое число распадов за счет внутреннего тормозного излучения, рассчитанное на основе матричного элемента составляет в нашей статистике ~ 1 . Как известно, в таком случае вероятности наблюдать 0 или 1 одинаковы и в сумме составляют величину 73,6%. Это значит, что полученная нами статистика практически не несет информации о вкладе тормозного излучения, хотя оно определяет, в основном, полную вероятность распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$. Таким образом, среди наблюдаемых распадов основную часть, примерно 7 событий, составляют распады, обусловленные наличием структуры пиона. Значениями γ и ξ определяется не только вероятность этой структурно-зависимой части распада, но и эффективность ее регистрации. Для значений $\gamma=0,5 \pm 0,15$ и $\xi=2,3 \pm 0,25$ она составила

$$\epsilon_{SD} = (1,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$$

Отсюда получаем оценку парциальной вероятности распада $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ за счет наличия структуры пиона

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

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

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана и создана в соавторстве цилиндрическая годоскопическая система сцинтилляционных счетчиков, обеспечивающая триггер запуска магнитного спектрометра АРЕС, созданного впервые в мире для исследования редких распадов пионов и мюонов на мезонных фабриках.
2. Разработан и создан программный комплекс, являющийся одним из первых в мире разработок триггера 2^{го} уровня, осуществляющий в on-line режиме предварительную идентификацию события в спектрометре АРЕС по наличию в нем треков частиц двух знаков - электронных и позитронных, что увеличивает надежность идентификации события, ужесточает критерии предварительного отбора без потери искомым событий и существенно (~ 20 раз) уменьшает поток информации для записи на магнитные ленты. Поиск треков проводился на основе смоделированных треков-шаблонов.
3. Созданные аппаратные и программные комплексы использованы в эксперименте по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ и $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ и обеспечили возможность набора необходимой статистики, обработка которой позволила:
4. Экспериментально измерить вероятность распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$. Зарегистрированное количество распадов $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$ соответствует относительной вероятности $R = (3.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-5}$, что согласуется с теоретической оценкой $R = 3.54 \cdot 10^{-5}$.
5. Сделать оценку верхней границы относительной вероятности распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ на уровне $R < 3.6 \cdot 10^{-11}$, что соответствует уровню мировых достижений.
6. Обнаружить 8 распадов $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu_e$ и вычислить парциальную вероятность этого распада за счет наличия структуры пиона $R = (4.6 \pm 1.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-10}$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.А. Баранов, Ю. Ванко, П.Г. Евтухович, Ф.Е. Зязюля, А.С. Коренченко, С.М. Коренченко, Б.Н. Костин, Н.П. Кравчук, Н.А. Кучинский, А.С. Моисеенко, Д.А. Мжавия, К.Г. Некрасов, В.С. Смирнов, А.И. Филиппов, П.В. Хомутов. В сб: XII Международный симпозиум по ядерной электронике. Д13-85-793, Дубна, ОИЯИ, 1985, с. 310.
2. Евтухович П.Г., Коренченко С.М., Кучинский Н.А., Мжавия Д.А.. Алгоритм построения шаблонных треков для предварительной обработки информации в спектрометре АРЕС. - Сообщ. ОИЯИ, P10-85-382.
3. Евтухович П.Г., Коренченко С.М., Кучинский Н.А., Мжавия Д.А.. Алгоритм быстрой фильтрации информации в эксперименте по поиску распада $\mu \rightarrow 3e$ на спектрометре АРЕС. - Сообщ. ОИЯИ, P10-85-383.
4. 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. - Препринт ОИЯИ, P1-86-527, 1986.
5. 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. - ИТЭ, 1987, N 6, с.40.
6. 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 spectrometr. NIM, 1986, v.B17, p.438.
7. В.А. Баранов, Ю. Ванко, А.А. Глазов, П.Г. Евтухович, Ф.Е. Зязюля, И.В. Кисель, А.С. Коренченко, С.М. Коренченко, Б.Н. Костин, Н.П. Кравчук, Н.А. Кучинский, А.С. Моисеенко, Д.А. Мжавия, К.Г. Некрасов, П. Повинец, Я. Сарка, В.С. Смирнов, А.И. Филиппов, А.П. Фурсов, Н.В. Хомутов, З.Б. Цамалаидзе, Н.П. Чернявский, С.И. Яковлев, *Поиски распада $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$* . ЯФ, т. 53, вып. 5 (1991) 1302.
8. V.A. Baranov, N.N. Chernyavsky, P.G. Evtukhovich, A.I. Filippov, A.P. Fursov, A.A. Glazov, N.V. Khomutov, I.V. Kisel, A.S. Korenchenko,

S.M. Korenchenko, B.F. Kostin, N.P. Kravchuk, N.A. Kuchinsky, A.S. Moiseenko, D.A. Mzhavia, K.G. Nekrasov, P. Povinec, J. Sarka, V.S. Smirnov, Z.B. Tsamalaidze, J. Vanko, S.I. Yakovlev and F.E. Zyazyulya, *Search for $\mu \rightarrow e^+e^+e^-$ decay*. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 17 (1991) S57-S70.

9. В.А. Баранов, А.А. Глазов, И.В. Кисель, А.С. Коренченко, С.М. Коренченко, Н.П. Кравчук, Н.А. Кучинский, А.С. Моисеенко, К.Г. Некрасов, В.С. Смирнов, А.И. Филиппов, А.П. Фурсов, Н.В. Хомутов, Н.Н. Чернявский, С.И. Яковлев, П.Г. Евтухович, Ф.Е. Зязюля, Д.А. Мжавия, З.Б. Цамалаидзе, Ю. Ванко, П. Повинец, Я. Сарка, *Изучение распада $\pi^+ \rightarrow e^+\nu_e e^+e^-$* . ЯФ, т. 55, вып. 11 (1992) 2940.

**Рукопись поступила в издательский отдел
24 ноября 1993 года.**