

Г-938



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-86-380

УДК. 539.1.075.

**ГУЗИК
Збигнев**

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ
И СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ
В ОПЫТАХ ПО УПРУГОМУ РАССЕЯНИЮ
И КАНАЛИРОВАНИЮ ЧАСТИЦ
НА УСКОРИТЕЛЯХ ОИЯИ, ИФВЭ И ФНАЛ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук**

Дубна 1986

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

АЖИРЕЙ
Леонид Степанович,

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

БОЛОТОВ
Владимир Николаевич,

доктор технических наук,
профессор, старший научный сотрудник

СИНАЕВ
Алексей Николаевич.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1986 года в
"___" часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1986г.

Ученый секретарь
Специализированного совета *М.Ф. Лихачев* М.Ф. Лихачев

Целью настоящей работы является исследование и разработка новых методов, создание аппаратуры, регистрирующих комплексов и систем отбора событий, предназначенных для:

а) измерения электромагнитных формфакторов K^- -мезона и Λ^- -мезона в опытах по упругому K^-e и Λ^-e рассеянию при энергии 250 ГэВ и непосредственного сравнения этих формфакторов по результатам одного и того же эксперимента,

б) изучения эффектов каналирования протонов и пионов с энергиями 35, 100 и 250 ГэВ в монокристаллах,

в) экспериментальной проверки возможности отклонения траекторий заряженных частиц изогнутым монокристаллом,

г) исследования излучения, возникающего при прохождении релятивистских позитронов и электронов через монокристаллы в режиме каналирования.

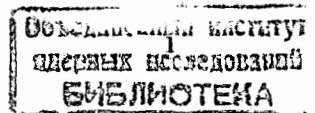
Актуальность проблемы определяется важностью задач, решаемых электронным регистрирующим комплексом физического эксперимента.

Изучение структуры элементарных частиц является одной из основных проблем физики высоких энергий. Измерение формфакторов нестабильных частиц, в отличие от опытов по исследованию электромагнитной структуры ядер и нуклонов, представляет собой более сложную задачу, поскольку нестабильные частицы не могут использоваться непосредственно в качестве частицы-мишени. Так как K^- -мезон и Λ^- -мезон не обладают спином, они характеризуются только одним электромагнитным формфактором. Точное измерение формфакторов этих частиц является чрезвычайно важным при рассмотрении различных теоретических моделей.

При взаимодействии релятивистских заряженных частиц с монокристаллами возникают многочисленные новые физические явления, важные как в научном, так и практическом отношении. Это взаимодействие нельзя рассматривать как многократное независимое рассеяние на отдельных изолированных центрах, так как существует сильная корреляция между последовательными соударениями, которая радикально меняет характер протекания процессов в монокристалле. Наиболее ярко это проявляется в явлении, получившем название эффекта каналирования.

В работе* впервые была высказана гипотеза о возможности удержа-

* Tsyganov E.N.-Fermilab Report TM-682, TM-684, Batavia, 1976.



ния частиц в режиме каналирования при изгибе кристалла до определенного радиуса кривизны. Экспериментальное подтверждение этой гипотезы существенно расширило бы наши знания о динамике движения частиц через упорядоченные системы атомов.

В работе^ж показано, что при движении легких заряженных частиц вдоль кристаллических направлений должно возникать мощное электромагнитное излучение, на несколько порядков более интенсивное, чем тормозное или синхротронное излучение. Возможные прикладные применения, наряду с чисто теоретическим интересом, делают исследования данного эффекта важной и актуальной задачей.

При исследовании перечисленных физических явлений применяемая аппаратура определяет всю специфику проводимого эксперимента, от нее зависит достоверность получаемых результатов. Достижение указанных целей потребовало решения целого комплекса методических проблем. Своевременное и целенаправленное применение новых методов в технике эксперимента позволяет в значительной мере повысить качество физических измерений и ставить опыты, еще недавно практически недоступные.

Быстро развивающаяся методика предварительного отбора событий в реальном масштабе времени, работы автора в которой являются пионерскими, приводит к существенной экономии пучкового времени, дорогостоящего времени ЭВМ, накопителей информации, а также людских ресурсов. Эффективный контроль и управление работой экспериментальной установки, быстрое и производительное представление результатов обработки данных, аккуратное мониторирование всех узлов аппаратуры дают возможность проводить поиск физических явлений гораздо эффективнее и позволяют максимально сократить сроки получения результата.

Научная новизна и значимость работы заключаются в предложении и реализации оригинальных методических решений и создании на их основе уникальной экспериментальной аппаратуры и систем отбора событий.

Впервые предложена и применена в эксперименте методика предварительного отбора событий для выделения актов рассеяния арифметическим методом в реальном масштабе времени, реализованная с помощью цифровых и аналоговых препроцессоров. Проведены обоснование и анализ экспериментальных методов и алгоритмов предварительного отбора событий.

Предложены и разработаны новые методы регистрации информации с детекторов частиц, использование которых позволило достигнуть рекордной координатной точности регистрации данных с дрейфовых камер, впервые создана аппаратура для сбора двухтрековой информации с одного промежутка дрейфовых камер, реализован сбор спектрометрической информа-

ции в широком динамическом диапазоне в условиях больших интенсивностей пучка.

Осуществлены новые методы: автоматизации регистрирующих трактов; коррекции считываемой с их помощью информации; селекции наложенной детектируемых частиц пучка, необходимой для обеспечения достоверной информации с проволочных детекторов; считывания регистрируемых событий в удаленную ЭВМ; эффективного представления результатов обработки данных и мониторирования узлов установки.

Предложен новый принцип многофункционального использования крейта КАМАК, позволяющий помещать в крейте до 4 Мбайт памяти, расширять доступ к другим крейтам и производить эффективные и быстрые режимы блочной передачи данных.

С помощью предложенных и реализованных методов:

а) впервые прямым методом измерен зарядовый радиус K^- и \bar{L}^- -мезонов при энергии 250 ГэВ и проведено прямое сравнение электромагнитных размеров этих формфакторов,

б) впервые удалось отклонить пучок протонов с энергией 8,4 ГэВ при помощи изогнутого монокристалла. Экспериментально измерена интенсивность выбывания частиц из осевого и плоскостного каналирования в прямых и изогнутых на разные углы кристаллах,

в) впервые осуществлен вывод ускоренного пучка из камеры ускорителя с помощью кристаллического дефлектора,

г) впервые применена современная электронная методика физики высоких энергий к исследованию эффектов, возникающих при прохождении легких заряженных частиц вдоль оси или плоскости кристалла. Тем самым были исследованы характеристики электромагнитного излучения в широком диапазоне углов падения частиц на кристалл.

Практическая ценность полученных результатов состоит в решении проблем методики постановки эксперимента на новом поколении аппаратуры, создании крупнейших электронных регистрирующих комплексов, позволяющих получить новые физические данные о фундаментальных свойствах материи.

Помимо несомненного научного интереса исследуемые явления могут найти применение в различных областях как ускорительной техники, так и физического эксперимента. Наиболее интересные из них:

- использование изогнутого кристалла для вывода ускоренного пучка из кольцевых ускорителей^ж,

- возможность создания для частиц сверхвысоких энергий детектора нового типа, чувствительного к массе частиц,

^ж Kumakhov M.A.-Phys.Lett., Ser.A, 1976, v.57, p.17.

^ж Кошкарев Г.Д. Препринт ИГЭФ, №30, 1977

- вывод релятивистских пучков вторичных частиц*,
- фокусировка пучков частиц*,
- поворот спина частиц при прохождении через изогнутые кристаллы в режиме каналирования**,
- создание пучков гамма-квантов для экспериментальной физики.

Полученные с помощью разработанной методики и созданной аппаратуры физические результаты способствовали становлению нового научного направления - исследования взаимодействий релятивистских заряженных частиц с монокристаллами.

Предложенная впервые методика предварительного отбора событий инициировала интенсивное развитие этого направления во всех областях экспериментальной техники. Применение предварительного отбора событий позволяет во много раз сократить затраты, необходимые для успешного выполнения поставленной физической задачи.

Предложенные схемные решения и полученные в данной работе результаты могут быть использованы при планировании и организации экспериментальных установок, а также в различных других областях науки и техники.

Структура диссертации отвечает избранной теме и отражает, с одной стороны, последовательное развитие экспериментальной методики, где все последующие этапы исследований содержали найденные ранее методические разработки, с другой стороны, представляет ясно сформулированные экспериментальные цели, выбор оптимальной постановки опытов и их успешную реализацию. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 261 страницу текста, 84 рисунка, 5 таблиц, библиографический список из 226 наименований и два приложения.

Апробация и публикация. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, и физические результаты, полученные с помощью созданной автором аппаратуры, докладывались на международных симпозиумах по ядерной электронике в Майами-Бич (1973) и Братиславе (1983), на международных конференциях по физике высоких энергий в Тбилиси (1976), в Токио (1978), в Мичигане (1980), на IX Международной конференции по физике твердого тела в Лионе (1981), представлялись на рабочих совещаниях ОИЯИ по методике пропорциональных камер (1973) и по методике экспериментов на встречных пучках (1983). Материалы диссертации отражены в 56 научных работах, из которых основу диссертации составляет 30 публикаций^{1-30/}.

* Carrigan R.A., Tsyanov E.N. et al.-Nucl.Instr.Meth., 1982, 194, p.205.

** Барцевский В.Г. Письма в ЖТФ, т.5, 1979, 182; Любошиц В.Л., ЯФ, т.31, 1980, 986; Михалев В.Л., Препринт ИВВЭ, 82-29, 1983.

Автор защищает:

1. Методику регистрации и отбора данных в экспериментах по упругому рассеянию и каналированию частиц в монокристаллах.
 2. Арифметические методы предварительного отбора физических событий в реальном масштабе времени для выделения актов рассеяния.
 3. Обоснование, анализ и оптимизацию метода предварительного отбора событий рассеяния в физике высоких энергий.
 4. Создание регистрирующих комплексов и систем отбора событий для экспериментов по определению электромагнитных размеров K^- и J/ψ -мезонов в опытах по упругому K^-e и $J/\psi-e$ рассеянию при энергии 250 ГэВ (ФНАЛ, Батавия), исследованию эффектов каналирования заряженных частиц при энергиях 35, 100 и 250 ГэВ (ФНАЛ, Батавия), управлению траекториями заряженных частиц с помощью изогнутого монокристалла (ЛВЭ ОИЯИ) и исследованию излучения релятивистских позитронов и электронов в монокристаллах (ИВВЭ, Серпухов).
 5. Создание цифровых и аналоговых препроцессоров для аппаратурной реализации критериев отбора событий.
 6. Предложение и практическую реализацию электроники регистрации данных с дрейфовых камер.
 7. Методику коррекции амплитудных измерений, калибровки и контроля трактов регистрации данных, а также контроля трактов выработки запуска установок.
 8. Предложение и разработку уникальной аппаратуры для организации и управления процессом сбора данных, сопряжения аппаратуры установок с удаленной ЭВМ, графического представления результатов обработки данных и диалоговой связи экспериментатора с ЭВМ.
 9. Новый принцип многофункционального использования крейта КАМАК, позволяющий иметь доступ к большому объему электронной памяти, взаимодействовать с другими крейтами КАМАК и организовать эффективные и быстрые режимы блочной передачи данных, а также создание микропрограммируемых сегментных "интеллектуальных" средств для применения в экспериментах высоких энергий и других областях науки.
- Первая глава посвящена рассмотрению и анализу основных методических проблем создания аппаратуры физических установок^{1,2/}.
- В начале главы излагается новый подход к общей структуре систем сбора данных. В отличие от конвенциональных методов построения этой структуры, описываемый подход можно представить в виде многоуровневого процесса, в котором каждому уровню, характеризующему разными временами исполнения, свойственны отдельные аппаратные средства. Экспериментальные данные регистрируются на первом, самом нижнем уровне, и затем, после удовлетворения наложенным критериям отбора, переписываются на соседний, высший уровень. После прохождения через все уровни

данные записываются на магнитную ленту или другой накопитель информации. На каждом уровне событие подлежит анализу, после которого принимается решение о полезности данного события или его исключении, если оно оказалось неинтересным (фоновым). Дан также анализ дополнительных возможностей, которые должна обеспечивать хорошо спроектированная система сбора данных: организацию базы вспомогательных данных, калибровку детекторов и электроники, расчленение системы на автономные узлы, общее управление установкой, контроль за правильностью работы всех основных узлов системы, гибкость конфигурации системы, гистограммирование и др.

Далее часть главы посвящена вопросам предварительного отбора полезных событий. Значительное количество происходящих в мишени актов взаимодействия не представляет физической ценности, и экспериментаторы принимают ряд мер для распознавания потенциально интересных событий^{/3/}. Функции отделения "хороших" событий от "плохих" выполняет система отбора событий, применение которых дает ряд неоспоримых преимуществ, а именно: обогащение записываемой информации, сокращение регламентированного пучкового времени, необходимого для выполнения поставленной задачи, уменьшение дорогостоящего времени ЭВМ для последующего анализа данных, сокращение количества магнитных лент для записи экспериментальной информации, осуществление частичного анализа событий в реальном масштабе времени, что позволяет контролировать работу экспериментальной установки и распознавать возможные неисправности.

Далее классифицированы алгоритмы отбора по разным критериям, а также проанализированы два типа эффективности алгоритма: эффективность подавления фоновых событий, определяющая качество системы отбора, и эффективность отбора "хороших" событий, влияющая на качество проводимых измерений.

Выполнен анализ, позволяющий дать рекомендации при проектировании систем отбора событий. Если в систему сбора данных между любыми соседними уровнями ввести дополнительный элемент отбора, он, согласно наложенным критериям, запрещает передачу на высший уровень фоновых событий. Каждый выбранный алгоритм отбора характеризуется коэффициентом полезной информации ϱ (в общем потоке N запусков имеется $\varrho \cdot N$ интересных с физической точки зрения событий). Для оценки влияния элемента отбора на процесс сбора данных введены две величины^{*}: коэффициент увеличения полезной информации k_y , непосредственно влияющий на продолжительность времени работы на пучке, необходимого для выпол-

нения поставленного эксперимента, и коэффициент подавления количества регистрируемой информации k_n , влияющий на сокращение потока передаваемых данных^{/3/}:

$$k_y = \frac{1 + N}{1 + N(\alpha + \varrho)} \quad \text{и} \quad k_n = \frac{\varrho(1 + N)}{1 + N(\alpha + \varrho)} \quad (I)$$

где $N = T_c \cdot N$, $\alpha = T_p / T_c$ (T_c - время считывания события, T_p - время решения устройства отбора). На рис. 1 и 2 соответственно представлено поведение коэффициентов k_y и k_n в функции загрузки N .

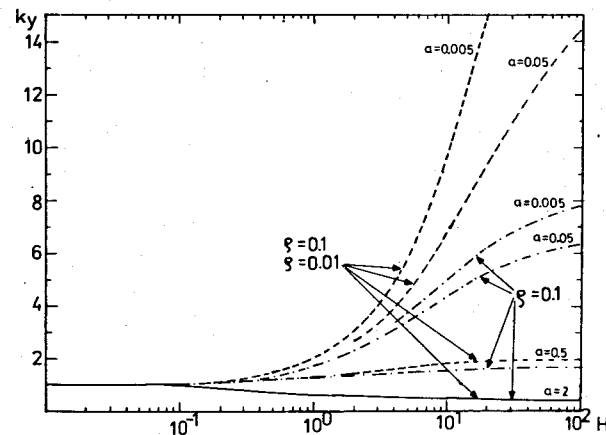


Рис.1. Поведение коэффициента увеличения полезной информации в функции загрузки.

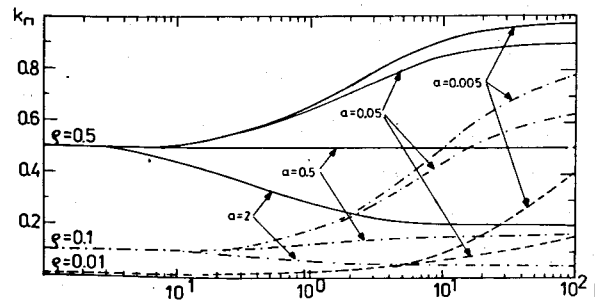


Рис.2. Поведение коэффициента подавления записываемой информации в функции загрузки.

* Turala M.—Nucl.Instr.Meth., 1980, 176, p.51.

Далее сформулировано общее условие на целесообразность введения нового элемента – устройства отбора событий – в общий процесс сбора данных. Так как это условие не всегда является достаточным (небольшой выигрыш в скорости набора полезных данных не всегда окупает затраты, связанные с разработкой устройств отбора, и не оправдывает введение в систему нового источника возможных погрешностей), предложен параметр полезности устройства отбора b . Рассмотрены также и другие факторы, лимитирующие скорость сбора данных, т.е. скорость записи информации на магнитную ленту и величина отведенного буфера памяти ЭВМ.

Следующая часть главы посвящена представлению впервые предложенной и реализованной методики отбора физических событий с использованием арифметических алгоритмов в реальном масштабе времени. Описываемая методика была применена в эксперименте по упругому π -р-рассеянию, поставленному на ускорителе ИФЭ^{*}.

На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки, с помощью которой был реализован отбор событий по углу рассеяния частиц в мишени. Выведены аналитические выражения и сформулированы параметры, описывающие работу алгоритма отбора для выделения актов рассеяния. Общий вид алгоритма для этого случая имеет форму^{4/}:

$$|Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 + D| > Z_x, \quad (2)$$

где $x_{1,2,3}$ – координатная информация с трековых детекторов, предназначенных для вычисления угла рассеяния, A, B, C, D – коэффициенты, зависящие от геометрии установки и параметров координатных детекторов, Z – величина, определяющая заданный угол обрезания.

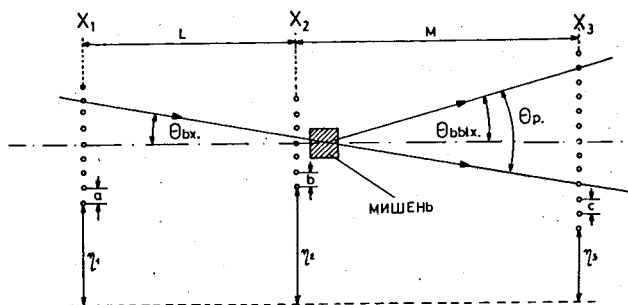


Рис.3. Схема экспериментальной установки для отбора событий рассеяния.

* Nurushev S.B.-Proc. of the. XVII Int. Conf. on High-Energy Physics, London, 1974, p.25.

Первым в мире процессором, работающим в реальном масштабе времени по алгоритму (2), было предложенное и разработанное автором в 1971 году цифровое устройство^{4,5/}, характеризующее коэффициентом полезной информации $\rho = 0,005$. В качестве координатных детекторов были применены сцинтилляционные годоскопы. Благодаря примененной методике в эксперименте удалось повысить скорость набора данных в 16 раз. На рис.4 представлено пространственное распределение частиц без применения устройства отбора (а), с отбором (в масштабе 10:1, б) и отношение этих распределений (в). Параллельно с цифровым был разработан аналоговый препроцессор^{6/}, характеризующийся большим быстродействием. Устройство работало совместно с пропорциональными камерами (первое в СССР применение пропорциональных камер в физическом эксперименте^{*}) и предназначалось для запуска искровых камер. При этом скорость набора статистики удалось увеличить в 12 раз.

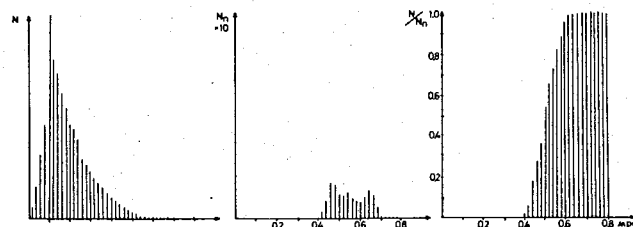


Рис.4. Пространственное распределение регистрируемых частиц без применения устройства отбора (а), с отбором (в масштабе 10:1, б) и отношение этих распределений (в).

Далее описывается предложенная автором универсализация цифрового устройства отбора^{7/} и представлен созданный на этой основе цифровой процессор. Благодаря применению микроэлектроники с эмиттерными связями устройство обеспечивает очень высокую скорость выработки решения (> 100 нс), независимо от конкретной геометрии установки. Процессор

* Zanevsky Yu.V. et al.-Nucl.Instr.Meth., 1971, 94, p.233.

был успешно применен в серии опытов на пучках релятивистских дейтронов и α -частиц⁸.

В очередной части главы представлены основные магистрально-модульные системы, применяемые в технике физического эксперимента, и дано их сравнение. Сделан вывод о несоответствии системы КАМАК будущим экспериментам физики высоких энергий. Место системы КАМАК в приложениях, где необходима высокая скорость обмена данными, займет ФАСТБАС. В целях усовершенствования системы КАМАК автором был предложен новый принцип многофункционального использования крейта КАМАК, позволяющий размещать в крейте до 4 Мбайт электронной памяти, иметь доступ к 49 внешним крейтам и выполнять эффективные и быстрые циклы блочной передачи данных^{8,9}.

Описана организация взаимодействия экспериментальной аппаратуры с ЭВМ и проанализированы вопросы повышения пропускной способности средств сопряжения. В качестве примера представлены разработанные автором аппаратные средства, предназначенные для промежуточного хранения физической информации с экспериментальной аппаратуры с последующей ее передачей в ЭВМ вне цикла ускорителя¹⁰.

Последняя часть главы посвящена проблематике применения микропроцессорной техники в физическом эксперименте. Указаны те области эксперимента, где микропроцессоры могут оказать неоценимую помощь. Сформулированы типы задач, наиболее эффективно решаемых микропроцессорами. Особое внимание уделено элементам, характеризующимся наивысшей скоростью работы, т.е. сегментным микропроцессорным наборам. Описан созданный автором микропрограммируемый процессор¹¹, разработанный на основе сегментного семейства Am 2900, соответствующий предложенному принципу использования крейта КАМАК. Архитектура устройства позволяет использовать его как процессор, эмулирующий мини-или микро-ЭВМ; как специализированный процессор для выполнения арифметических вычислений над данными с плавающей запятой, вычисления заданных функций и др.

Во второй главе описана экспериментальная методика и аппаратура, предназначенная для прямого измерения электромагнитного фактора K^- и J^- -мезонов в опытах по упругому рассеянию каонов и пионов на электронах при энергии 250 ГэВ, поставленных на канале М1 Мезонной лаборатории ФНАЛ (Батавия)^{12,13}. Представлены физические цели и дана постановка эксперимента с точки зрения требований к системам регистрации и отбора событий. Приведена общая схема экспериментальной установки, рассмотрены ускоритель и характеристики пучка.

⁸Аблеев В.Г. и др. ПТЭ, 1978, №2, с.63

Измерение траекторий и импульсов частиц, участвующих в процессе упругого K^-e и J^-e рассеяния, проводилось с помощью магнитного одноплечевого спектрометра, длина которого составляла около 70 м (рис. 5). Функционально спектрометр разделялся на три блока. Задачей первого блока, состоящего из двух станций пропорциональных камер и двух модулей дрейфовых камер (ДК), было измерение траектории первичных каонов (пионов). Траектории рассеявшихся в жидководородной мишени частиц измерялись с помощью второго блока, в состав которого входили три станции пропорциональных камер и два модуля ДК. Для пространственного сопоставления треков в X - и Y -проекциях средняя пропорциональная камера второго блока была повернута на 45° . Третий блок спектрометра служил для измерения траекторий и импульсов вторичных частиц после выхода их из анализирующих магнитов. Частицы с импульсами 250 ГэВ/с после прохождения магнитов отклонялись на угол 18,4 мрад, а их траектории измерялись тремя станциями пропорциональных камер. Идентификация вторичных электронов и измерение их энергии осуществлялись годоскопическим черенковским ливневым счетчиком.

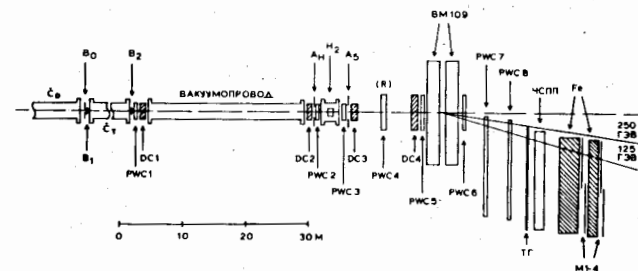


Рис. 5. Блок-схема магнитного спектрометра для экспериментов по K^-e и J^-e рассеянию.

При рассмотрении элементов установки особое внимание было уделено разработанной в ЛВЭ ОИЯИ системе ДК, характеризующейся лучшими мировыми показателями¹⁴. Введение в эксперимент ДК позволило значительно улучшить разрешение спектрометра по поперечному импульсу. Использование ДК позволило также подавить вклад фоновых процессов от сильных

¹⁴Filatova N.A. et al.-Nucl.Instr.Meth., 1977, 143, p.17.

взаимодействий примерно в 10 раз. Благодаря геометрии камер со сдвинутыми проволоками разделение двух треков начиналось с расстояния 0,3 мм. Эта величина в несколько раз превосходит способность разделения двух треков с использованием пропорциональных камер.

Далее рассматривается система регистрации экспериментальных данных, работающая на линии с ЭВМ HP-2100 (рис. 6).

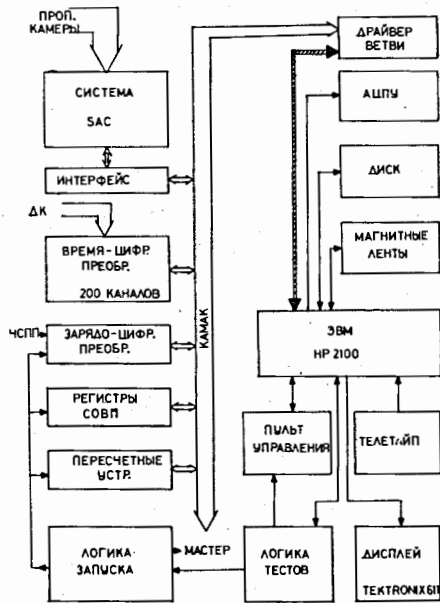


Рис. 6. Блок-схема системы сбора данных в эксперименте по К-е и Л-е рассеянию.

Электроника регистрации данных была полностью выполнена в стандарте КАМАК и помещалась в крейтах, организованных в ветвь КАМАК драйвером ветви, соединенным с универсальным каналом ввода-вывода ЭВМ. При организации массива данных был учтен тот факт, что преобразователи характеризуются разными временами конверсии, и последовательность считывания должна начинаться с модулей с самым минимальным временем конверсии. Это позволяет начинать процесс передачи данных, не дожидаясь завершения конверсии в преобразователях, уменьшая тем самым мертвое время установки. Для фиксирования возможных ошибок передачи данных и сбоя формата массив события заканчивался двумя "шахматными" комплементарными словами.

Во время сброса ускорителя (~ 1 с) считываемые в ЭВМ данные хранились промежуточно на диске. В конце сброса ускорителя ЭВМ вырабатывала тестовые импульсы, предназначенные для калибровки пропорциональных и дрейфовых камер, черенковских счетчиков полного поглощения и других узлов установки. Затем данные переписывались с диска на магнитные ленты, и инициировался процесс частичного анализа информации. Всего накапливалось около 450 гистограмм и таблиц. В целом работу установки можно было представить по топологии события на дисплее.

Особенности работы ДК требуют внимательного подхода к проблеме сбора данных. Это относится, главным образом, к первому звену в процессе регистрации, т.е. усилителю. Специально для эксперимента был разработан усилитель-дискриминатор для ДК, при проектировании которого были учтены следующие требования: максимальная временная точность регистрации срабатываний ДК, определяющая пространственное разрешение прибора, минимальное мертвое время усилителя, обеспечивающее высокое двухтрековое разрешение, минимальные перекрестные наводки и обеспечение эффективного способа проверки работоспособности усилителя, необходимое вследствие большого количества регистрирующих каналов^{14/}. Рис. 7 показывает характеристику "собственного гуления" усилителя в зависимости от амплитуды входного импульса. Была достигнута рекордная величина временной привязки к входному сигналу, равная 3,2 нс. Были также разработаны аппаратные средства, позволяющие впервые осуществить регистрацию двух треков с одного дрейфового промежутка камер.

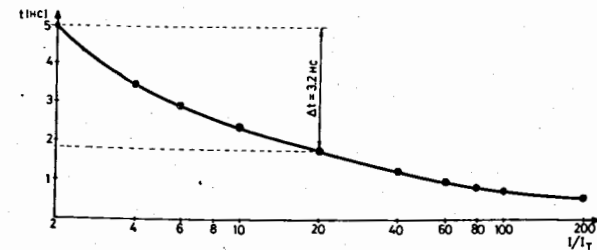


Рис. 7. Зависимость "собственного гуления" усилителя в функции амплитуды входного импульса.

На рис. 9а представлены распределения реальных углов рассеяния в Y -проекции при угле обрезания 210 мкрад. Разрешающая способность системы отбора составляла около ± 10 мкрад. Рис. 9б показывает двухмерный график отобранных событий для энергии пучка 35 ГэВ. Коэффициент полезной информации ϕ зависит от установленного угла обрезания и угловой расходимости пучка. В нашем случае он составлял 10 - 20.

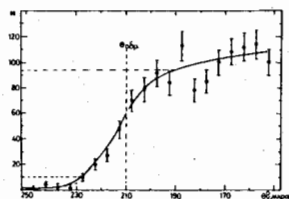


Рис. 9а



Рис. 9б

Рис. 9. Распределение углов рассеяния в Y -проекции при угле обрезания 210 мкрад (а) и двухмерная таблица отобранных углов (б).

В конце главы продемонстрировано, что эксперименты по каналированию можно успешно проводить и при высоких, максимально доступных энергиях. Представлены некоторые физические результаты исследований.

В четвертой главе представлена экспериментальная методика и дано описание аппаратуры, которая была использована в ЛВЭ ОИЯИ для проведения эксперимента по управлению траекториями заряженных частиц с помощью изогнутого монокристалла^{/20/}. Приведено обоснование главных требований, относящихся к режиму работы установки с удаленной ЭВМ. Выделены основные принципиальные особенности экспериментальной установки для изучения явлений, возникающих при каналировании заряженных частиц*, содержится описание основных элементов спектрометра (рис. 10).

Исследования проводились на выведенном из синхрофазотрона пучке протонов с энергией 8,4 ГэВ. Регистрация координат частиц производи-

* Водопьянов А.С.,..., Гузик З. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.30, вып. 7, с.474.

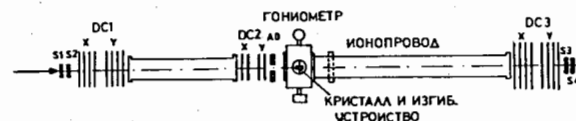


Рис. 10. Схема установки эксперимента по управлению траекториями заряженных частиц изогнутым монокристаллом.

лась при помощи 20 прецизионных дрейфовых камер, объединенных в три блока. Для ориентации кристалла относительно оси пучка использовался прецизионный гониометр. Пучок протонов проходил через монокристалл кремния длиной 2 см, часть которого подвергалась контролируемому изгибу.

Системы сбора данных установки значительно отличались от ранее описанных. Регистрирующая электроника эксперимента работала на линии с удаленной ЭВМ ЕС-1040, что для обеспечения эффективной работы установки потребовало новых аппаратных средств. Дано обоснование главных требований к системе сбора данных. Описана электроника синхронизации и управления процессом сбора данных^{/21/}.

Далее описана аппаратура, созданная для сопряжения и диалоговой связи с ЭВМ, а также ее программное обеспечение^{/22,23/}.

Следующая часть главы посвящена вопросам тестирования и калибровки детекторов и их электроники^{/24/}. Отмечена важность этой проблемы для обеспечения достоверности регистрируемой информации.

Система запуска установки имела два уровня отбора событий и выполняла следующие функции:

- выделяла события, в которых частицы проходили через монокристалл и рассеивались в заданном телесном угле,
- отбрасывала события с несколькими одновременными треками,
- отбирала события, за 5 мс до и после которых не было других частиц (время сбора заряда в кристалле),
- для увеличения скорости набора полезной информации в некоторых сеансах производился дополнительный отбор событий (запуск второго уровня) по признаку каналирования частицы.

Для каналированных частиц характерно уменьшение ионизационных потерь по отношению к неканалированным частицам (приблизительно в два раза). Входная часть кристалла представляла собой полупроводниковый детектор, позволяющий измерять ионизационные потери частиц. На рис.11

приведен амплитудный спектр сигналов от частиц, прошедших через детектирующую часть кристалла, ориентированного плоскостью (III) вдоль пучка. Пунктиром показан тот же спектр в случае разориентированного кристалла. На рисунке виден пик, соответствующий каналированным частицам.

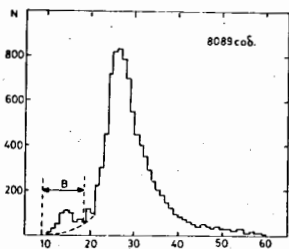


Рис. 11. Амплитудное распределение ионизационных потерь в ориентированном полупроводниковом детекторе.

Это явление было использовано для двух целей. Во-первых, для точной ориентации кристаллов. Во-вторых, для реализации второго уровня отбора. Отбор событий осуществлялся таким образом, что из спектра ионизационных потерь аппаратным способом выделялась часть, ответственная за каналирование (0,2 ÷ 0,7 максимума распределения)^{/3/}.

В последней части главы представлено первое практическое применение явления управления траекториями частиц монокристаллом. В этой части описывается эксперимент по выводу ускоренного пучка из синхрофазотрона ОИИИ с помощью кристаллического дефлектора^{/25/}. Вывод пучка был реализован в существующий канал, расположенный с внешней стороны кольца ускорителя в районе второго прямолинейного промежутка. Для обеспечения заброса частиц в канал было необходимо отклонить ускоренные протоны на угол около 35 мрад. Поворот на этот угол был осуществлен кристаллическим дефлектором, в качестве которого использовалась пластина монокристалла кремния размером 11x10x0,4 мм². При выводе пучка из кольца синхрофазотрона появилась необходимость прецизионного измерения токов ФЭУ сцинтилляционных счетчиков, предназначенных для контроля интенсивности выводимого пучка. С этой целью был разработан специальный интегратор тока, обеспечивающий широкий динамический диапазон измерений и обладающий высокой точностью^{/26/}. На рис. 12 представлена зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла для энергии 4,2 ГэВ. Эффективность вывода в нашем случае составляла 10⁻⁴ и определялась, в основном, геометрическими размерами кристалла и пучка.

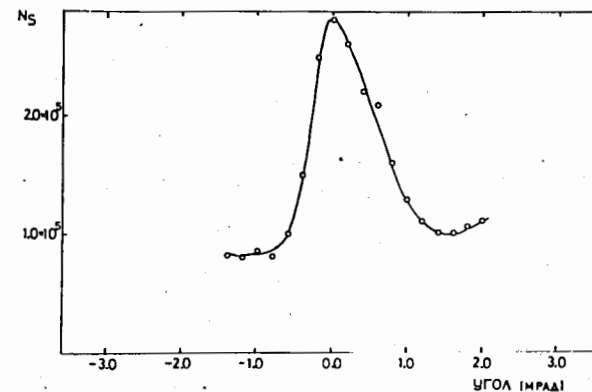


Рис. 12. Зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла для энергии 4,2 ГэВ.

Пятая глава посвящена решению методических проблем эксперимента по исследованию эффектов излучения, возникающего при прохождении заряженных частиц через монокристаллы, и разработке аппаратного обеспечения исследований^{/27/}. Рассмотрены вопросы постановки эксперимента, в которых особое внимание уделено проблеме выбора соответствующей системы сбора данных, оценивается необходимая точность регистрации углов частиц и энергетическое разрешение гамма-спектрометра, анализируются требования к пучку.

Эксперимент был поставлен на ускорителе ИФВЭ (г.Серпухов) в 1980-1981 годах. Специально для этого опыта был создан позитрон-электронный пучок*. При сбросе на мишень 7 x 10¹¹ протонов за цикл интенсивность позитронного пучка на экспериментальной установке составила 6 x 10⁴ частиц с энергией 10 ГэВ, что соответствовало проведенным расчетам.

Схема установки приведена на рис.13. Пучок позитронов (электронов) падал на монокристаллическую мишень, расположенную в дистанционно управляемом гониометре. Для определения траекторий частиц до и после прохождения ими мишени использовалась система ДК, сгруппированных в трех блоках. Дрейфовая камера низкого давления ДК2, состоящая из 2X- и 2Y-плоскостей, была разработана специально для настоящего эксперимента**.

* Бавижев М.Д.,....Гузик З. и др. ИФВЭ, 82-74, Серпухов, 1982.

** Filatova N.A.,....Guzik Z. et al.-Nucl.Instr.Meth.,1983,215,p.135.

Использование стандартного блока ДК было нежелательно из-за большого многократного рассеяния – порядка 100 мкрад. Кроме этого, было необходимо минимизировать фон на всей трассе прохождения пучка. Координатная точность обычных ДК равна около 50 мкм, а камеры низкого давления – около 90 мкм. Такие величины координатной точности обеспечивали разрешение по углу входа около 6 мкрад (на базе I7 м), а по углу выхода, с учетом рассеяния в ДК2 – около 30 мкрад (база 10 м).

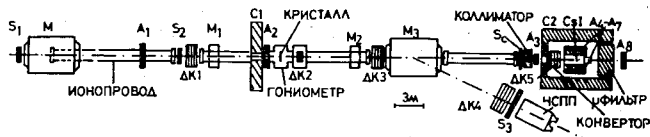


Рис. 13. Схема установки, созданной на пучке ускорителя ИФВЭ. S, A – сцинтилляционные счетчики, ДК – дрейфовые камеры, CsI – гамма-спектрометр, ЧСП – черенковские счетчики полного поглощения, M – магниты и корректоры, C – коллиматоры.

На рис. 14 приведено распределение измеренных углов рассеяния в Y-проекции для электронов с энергией 10 ГэВ в сеансе без мишени. Среднеквадратичное отклонение для этого распределения составляет 33 мкрад, что соответствует проведенным в диссертации оценкам. Четвертый блок дрейфовых камер использовался для определения траекторий частиц после прохождения ими анализирующего магнита.

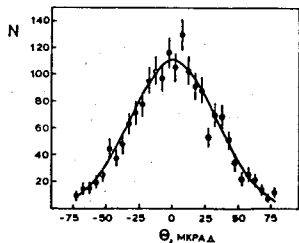


Рис. 14. Распределение событий по углу рассеяния в Y-плоскости в сеансе без мишени.

Энергия γ -квантов, испущенных из мишени, определялась с помощью детектора на основе кристалла CsJ(Tl), окруженного свинцовой защитой с системой счетчиков антисовпадений[‡]. В рабочих условиях для γ -квантов с энергией 100 МэВ детектор имел разрешение 3% (ширина на половине высоты распределения). Гамма-спектрометр предназначался для работы в широком динамическом диапазоне. Для получения хорошего разрешения в области низких энергий необходим полный сбор фотоэлектронов в фотоумножителе. Однако в реальных условиях эксперимента ток через фотоумножитель в обычном режиме ФЭУ был настолько велик, что возникала существенная нестабильность усиления ФЭУ, зависящая от загрузки детектора. Проблема была решена путем уменьшения коэффициента усиления ФЭУ с одновременным увеличением усиления спектрометрической электроники. Для сохранения эффективности сбора фотоэлектронов на первые диоды ФЭУ подавались рекомендованные напряжения. Общее напряжение на делителе ФЭУ не превышало при этом 660 В. Таким образом, была достигнута хорошая стабильность коэффициента усиления ФЭУ в условиях больших нагрузок.

Пятый блок дрейфовых камер (ДК5) со встроенным конвертором^{‡‡} служил для измерения углов вылета γ -квантов из кристалла по восстановленной координате вершины электрон-позитронной пары. Совместно с первым и вторым блоком ДК прибор обеспечивал измерение углов вылета γ -квантов с точностью ~ 4 мкрад.

В качестве мишеней в эксперименте использовались бездислокационные монокристаллы кремния (число дислокаций не превышало 10 см^{-2}). Кристаллы были разрезаны перпендикулярно исследуемым кристаллографическим осям с точностью $\sim 0,2^\circ$ и выполнены в виде дисков толщиной 0,5 мм и более. Для получения тонких мишеней центральная часть образца вытравливалась до нужных размеров.

Далее приводится структура системы сбора данных эксперимента^{/28/}, блок-схема окончательного варианта которой показана на рис.15. Система сбора данных была создана на основе стандартов KAMAK и NIM, помещалась в 8 крейтах и работала в линию с ЭВМ ЕС-1040. Она разделялась на подсистемы: синхронизации и управления запуском; регистрации данных, калибровки и контроля; второго уровня отбора событий; сопряжения с ЭВМ и представления данных. Подсистема управления и синхронизации была организована с использованием специально разработанных для эксперимента электронных модулей. Ее задачей было выделять время экспозиции пучка на установке, синхронизировать взаимодействие основных узлов установки и ЭВМ, управлять формированием разных типов запусков,

[‡] Булгаков Н.К.,...,Гузик З. и др. ОИЯИ, I3-84-676, Дубна, 1984.

^{‡‡} Pilatova N.A.,...,Guzik Z. et al.-Nucl.Instr.Meth.1983,206;p.379.

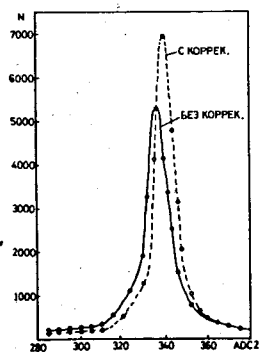


Рис. 17. Временное распределение γ -квантов, регистрируемых гамма-спектрометром: а) без отбора, б) с применением системы отбора второго уровня.

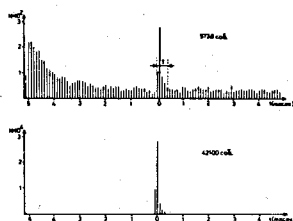


Рис. 16. Скорректированный и нескорректированный спектры в запуске от светодиода.

Вследствие наличия в запуске первого уровня только двух счетчиков совпадений (необходимость минимизации вещества на трассе пучка), в качестве критерия отбора вводилось также требование срабатывания всех плоскостей ДК2.

В диссертации описывается методика работы второго уровня отбора событий и даны практические результаты его применения. На рис. 18 а и б показано графическое представление коэффициентов подавления записываемой информации (k_n) и увеличения полезной информации (k_y) в зависимости от среднего количества запусков установки в секунду. Кривые представлены для трех основных критериев отбора (энергетического, временного и по эффективности ДК2) и для суммарного коэффициента полезной информации $\varrho = 0,02$. Согласно величине этого коэффициента количество записанных магнитных лент уменьшилось примерно в 50 раз. В рассматриваемом эксперименте средняя загрузка составляла $2 \cdot 10^3$ частиц/с, и для этой величины $k_n \approx 0,05$ и $k_y = 2,4$. Для этого, чтобы выявить реальный выигрыш от введения описанной методики отбора, необходимо учесть и второй фактор, лимитирующий скорость накопления данных во время одного цикла ускорителя, т.е. объем памяти ЭВМ, доступный для буферизации данных во время одного цикла ускорителя. Рис. 19 представляет зависимость среднего количества событий, регистрируемых в одном цикле ускорителя, от количества запусков с применением (N_G) и без применения (N_C) второго уровня отбора, при растяжке сброса ускорителя, равной 1,6 с. Из рисунка видно, что введение второго уровня отбора позволяет примерно в 6 раз сократить время работы на пучке, необходимое для выполнения поставленной задачи.

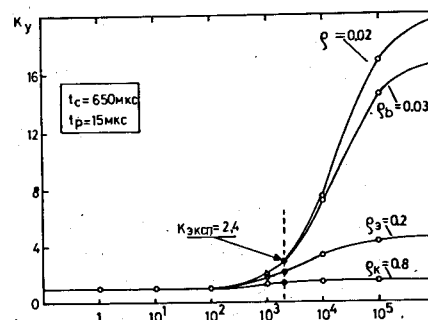
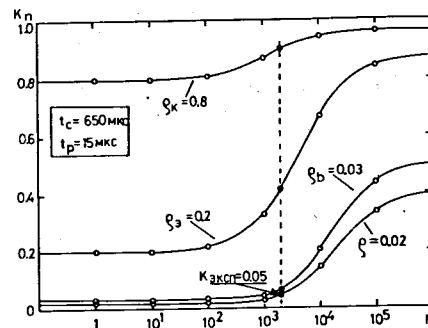


Рис. 18. Зависимости коэффициентов подавления записываемой информации (а) и увеличения полезной информации (б) от среднего количества запусков в секунду.

Рис. 18. Зависимости коэффициентов подавления записываемой информации (а) и увеличения полезной информации (б) от среднего количества запусков в секунду.

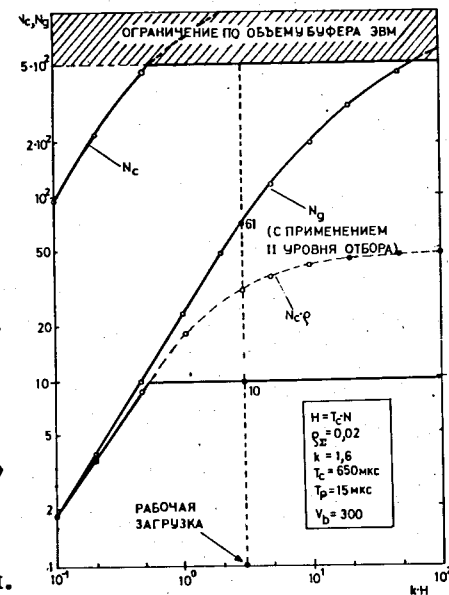


Рис. 19. Зависимость среднего количества событий, регистрируемых системой сбора установки с применением (N_G) и без применения (N_C) отбора второго уровня.

Последняя часть главы посвящена представлению проблем взаимодействия экспериментальной аппаратуры с ЭВМ. Описаны методы сопряжения установки с удаленной ЭВМ ЕС-1040/29/ и рассмотрены способы графического представления результатов обработки данных, реализованные с помощью созданных аппаратных средств^{30/}.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

1. Предложена и разработана экспериментальная методика регистрации и отбора физических событий для опытов по упругому рассеянию и каналированию релятивистских частиц на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ и ФНАЛ.
2. Впервые предложена и применена в реальных экспериментальных условиях методика предварительного отбора физических событий с ис-

пользованием арифметических алгоритмов, предназначенная для выделения актов рассеяния. Осуществлено обоснование и детальный анализ методов и алгоритмов селекции событий по различным критериям отбора. Введены показатели, позволяющие количественно оценивать влияние системы отбора на процесс регистрации данных, т.е. коэффициент увеличения полезной информации (k_y) и коэффициент подавления регистрируемой информации (k_n). Сформулировано общее условие на целесообразность введения элемента отбора в систему сбора данных и предложен параметр полезности устройства отбора.

3. Предложены и созданы регистрирующие комплексы и системы отбора событий для опытов по К-е и Л-е рассеянию при энергии 250 ГэВ (ФНАЛ, Батавия), исследованию эффектов каналирования заряженных частиц при энергиях 35, 100 и 250 ГэВ (ФНАЛ, Батавия), управлению траекториями заряженных частиц с помощью изогнутого монокристалла (ЛВЭ ОИЯИ) и исследованию электромагнитного излучения релятивистских позитронов и электронов при каналировании в монокристаллах (ИФВЭ, Серпухов).

С помощью этой аппаратуры впервые измерен прямым методом электромагнитный радиус К-мезона и существенно уточнен электромагнитный радиус Л-мезона, впервые экспериментально показано, что с помощью изогнутого монокристалла можно управлять траекториями заряженных частиц, впервые осуществлен вывод ускоренного пучка из камеры синхротрона с помощью кристаллического дефлектора, изучены эффекты каналирования релятивистских частиц в монокристаллах германия и кремния и детально исследовано явление спонтанного излучения позитронов и электронов высоких энергий при каналировании.

4. Впервые реализованы арифметические цифровые и аналоговые препроцессоры для отбора событий рассеяния в реальном масштабе времени. Созданы препроцессоры, работающие по энергетическим и временным критериям отбора, а также по эффективности работы детекторов. Внедрение предложенных устройств отбора позволило в эксперименте по измерению упругого рассеяния Л-мезонов на протонах в интервале энергий 30-60 ГэВ ускорить набор статистики в 16 раз, а для успешного проведения эксперимента по исследованию электромагнитного излучения, возникающего при каналировании релятивистских заряженных частиц в монокристаллах, потребовалось в шесть раз меньше времени работы на пучке. При этом количество записанных магнитных лент сократилось в 50 раз.

5. Предложена и реализована электроника регистрации данных с детекторов частиц (дрейфовые и пропорциональные камеры, гамма-спектрометр). Разработан не имеющий аналогов усилитель для дрейфовых камер с порогом дискриминации 500 нА и осуществлена регистрация временной информации с дрейфовой камеры, позволяющая получить координатную точ-

ность 50 мкм. Впервые создана аппаратура регистрации двухтрековой информации с одного промежутка дрейфовой камеры. Реализована регистрация спектрометрической информации в широком динамическом диапазоне (10 МэВ - 10 ГэВ).

6. Предложена и разработана аппаратура для организации и управления процессом сбора данных, обеспечивающая: определение режимов и управление работой общей системы запусков высших уровней, задание режимов работы установки, выработку последовательности запусков и калибровочно-тестовых процедур и др.

7. Предложены и реализованы эффективные методы калибровки и тестирования детекторов и соответствующих им электронных трактов регистрации, а также контроль управляющих узлов установки.

8. Созданы устройства сопряжения экспериментальной аппаратуры с ЭВМ ЕС-1040, позволяющие значительно сократить мертвое время установки и обеспечивающие эффективные блочные режимы передачи данных.

9. Созданы оригинальные аппаратные средства графического представления результатов обработки данных.

10. Предложены и реализованы методы диалоговой связи экспериментатора с удаленной ЭВМ, позволяющие воздействовать на ход "on-line" программ, вести от ЭВМ управление установкой, выводить результаты обработки, а также информировать экспериментатора о состоянии процесса сбора данных и возможных неисправностях аппаратуры.

II. Предложен новый принцип многофункционального использования крейта КАМАК, позволяющий размещать в крейте до 4 Мбайт памяти, иметь доступ к 49 внешним крейтам и выполнять стандартные циклы магистралей одновременно с циклом доступа к памяти, что заметно увеличивает скорость обмена данными по каналам прямого доступа. Создана аппаратура, дающая возможность формирования системного крейта на основе предложенного принципа.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гузик З. Труды XI Международного симп. по ядерной электронике, 1983. ОИЯИ, Д13-84-53, Дубна, 1984, с.42.
2. Гузик З. Доклад на Рабочем совещании по программе экспериментов на встречных пучках, Дубна, 1983. ОИЯИ, Д1-83-54I, Дубна, 1983, с.100.
3. Гузик З., Филатова Н.А. и др., ОИЯИ, I-82-865, Дубна, 1982.
4. Алиев Ф.К., Гузик З. и др., ОИЯИ, I3-6065, Дубна, 1971.
5. Гузик З. Доклад на Межд. совещании по методике пропорциональных камер, Дубна, 1973. ОИЯИ, I3-7154, Дубна, 1973, с.25.
6. Guzik Z., Hajduk Z. et al., Nucl.Instr.Meth., 1972, 104, p.337.
7. Гузик З., Басиладзе С.Г., ОИЯИ, P13-6917, Дубна, 1974; Nucl.Instr.Meth., 1974, 114, p.83.

8. Гузик З., Форыцки А., ОИЯИ, I3-8I-587, Дубна, 198I.
9. Горбунов Н.В., Гузик З. и др., ОИЯИ, I3-83-2I9, Дубна, 1983.
10. Гузик З., Рыжов В.Н., Цыганов Э.Н. ОИЯИ, PI3-85-530, Дубна, 1985.
11. Горбунов Н.В., Гузик З. и др., ОИЯИ, I3-83-I62, Дубна, 1983; Nucl.Instr.Meth., 1984, 225, p.83.
12. Beretvas A., Dally E., Guzik Z. et al., JINR, E1-12357, Dubna, 1979; Phys.Rev.Lett., 1980, v.45, No.4, p.232.
13. Dally E., Hauptman J.M.,...,Guzik Z. et al., Phys.Rev.Lett., 1982, v.48, No.6, p.372.
14. Guzik Z., FNAL Rep. FN-301, Batavia (USA), 1976.
15. Filatova N.A., Guzik Z. et al., FNAL Rep., FN-303, Batavia (USA), 1976.
16. Carrigan R.A., Chrisman B.L.,...,Guzik Z. et al., Nucl.Phys., 1980, B163, p.1.
17. Sun C.R., Gibson W.M.,...,Guzik Z. et al., Nucl.Instr.Meth., 1982, 194, p.125.
18. Sun C.R., Gibson W.M.,...,Guzik Z. et al., Nucl.Phys., 1982, B203, p.40.
19. Guzik Z., Tsyganov E.N. et al., Nucl.Instr.Meth., 1979, 166, p.351.
20. Водопьянов А.С., Говорун Н.Н.,...,Гузик З. и др., ПТЭ, 198I, № 2, с.36.
21. Гузик З., Сутулин В.А., Форыцки А., ОИЯИ, I3-I2952, Дубна, 1980.
22. Гузик З., Форыцки А., ОИЯИ, I3-I30I0, Дубна, 1980.
23. Гузик З., Фельпс Дж., Форыцки А., ОИЯИ, I3-80-I95, Дубна, 1980.
24. Гузик З., Старченко Б.М. и др., ОИЯИ, I3-I295I, Дубна, 1980.
25. Авдейчиков В.В., Булдаковский В.Н.,...,Гузик З. и др., Краткие сообщения ОИЯИ, № I-84, Дубна, 1984, с.3.
26. Гузик З., Рыжов В.Н., ОИЯИ, I8-85-63, Дубна, 1985.
27. Водопьянов А.С., Войтковска Й.,...,Гузик З. и др., ОИЯИ, PI3-82-547, Дубна, 1982; Nucl.Instr.Meth., 1983, 211, p.359.
28. Булгаков Н.К., Войтковска Й.,...,Гузик З. и др., ОИЯИ, I3-83-757, Дубна, 1983.
29. Гузик З., Форыцки А., ОИЯИ, I3-8I-45I, Дубна, 198I.
30. Гузик З., Форыцки А., ОИЯИ, I-8I-29, Дубна, 198I.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 июня 1986 года.