

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5167/82

25/10-82

P13-82-547

СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ
ПОЗИТРОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ЧЕРЕЗ МОНОКРИСТАЛЛЫ

Направлено в журнал "Nuclear Instruments
and Methods"

1982

А.С.Водопьянов, И.Войтковска, В.М.Головатюк, Э.Гузик,
И.И.Евсиков, Н.И.Зимин, И.М.Иванченко, Р.Б.Кадыров,
Н.Н.Карпенко, Т.С.Нигманов, В.В.Пальчик, В.Д.Рябцов, А.Е.Сеннер,
В.А.Сутулин, И.А.Тяпкин, Д.В.Уральский, Н.А.Филатова,
А.Форыцки, Э.Н.Цыганов, М.Д.Шафранов,
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, СССР.

Р.Карриган, Т.Туиг
Национальная ускорительная лаборатория имени Э.Ферми,
г. Батавия, США.

У.Гибсон, Ч.Кармак, И.Дж.Ким, Ч.Сан
Университет штата Нью-Йорк, г. Олбани, США.

М.Д.Бавижев, Н.К.Булгаков
Томский политехнический институт, г. Томск, СССР

И.А.Гришаев, Г.Д.Коваленко, Б.И.Шраменко
Харьковский физико-технический институт, г. Харьков, СССР.

Э.И.Денисов, В.И.Туманов
Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, г. Москва, СССР

Ю.В.Нильсен, Б.А.Юрьев
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ,
г. Москва, СССР

В.В.Авдейчиков
Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, г. Ленинград, СССР

А.Н.Искаков
Казахский государственный университет, г. Алма-Ата, СССР

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования характеристик излучения при каналировании электронов и позитронов высоких энергий в 1980 году в ИФВЭ была создана установка "Кристалл". Основой для ее создания послужила аппаратура, с помощью которой был поставлен эксперимент по отклонению частиц изогнутыми монокристаллами ^{1/}. Эта аппаратура была существенно модифицирована и дополнена. Первые результаты исследований на установке "Кристалл" в пучке позитронов опубликованы в работе ^{2/}. В настоящей работе содержится описание основных детекторов, регистрирующей и управляющей электроники, систем связи с ЭВМ, он-лайн-программ, приводятся основные параметры установки.

Схема установки "Кристалл" приведена на рис.1. Пучок электронов /позитронов/ падает на монокристаллическую мишень, размещенную в дистанционном управляемом гониометре. Для определения траектории частицы до и после мишени используется система дрейфовых камер, сгруппированных в трех блоках. Четвертый блок дрейфовых камер служит для определения траектории частицы после анализирующего магнита. Гамма-кванты, испускаемые в мишени, регистрируются детектором на основе сцинтиллирующего кристалла CsJ(Tl), окруженного свинцовой защитой и системой счетчиков антисовпадений. Углы вылета гамма-квантов измеряются с помощью блока дрейфовых камер со встроенным конвертором, расположенного непосредственно перед радиатором гамма-спектрометра.

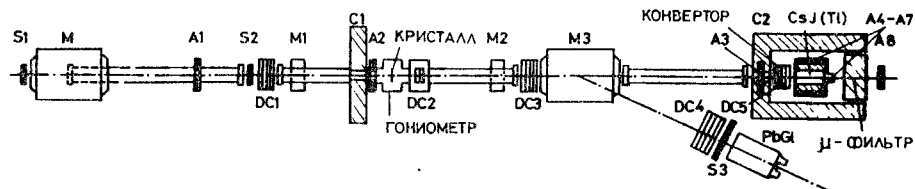
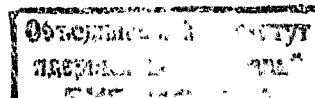


Рис.1. Схема экспериментальной установки. S_1, S_2, S_3 , $A_1 - A_8$ - сцинтилляционные счетчики, DC1-DC5 - блоки дрейфовых камер. PbCl - черенковский счетчик полного поглощения с радиатором из свинцового стекла, CsJ(Tl) - гамма-спектрометр на основе монокристалла цезий-йод, C1, C2 - коллиматоры, M, M1, M2, M3 - отклоняющие магниты.



Для идентификации вторичных электронов /позитронов/ используются ливневые черенковские счетчики из свинцового стекла, перекрывающие диапазон импульсов от 5 до 10 ГэВ/с. Установка запускается системой счетчиков совпадений и антисовпадений и работает на линии с ЭВМ ЕС-1040.

пучок

Исследования проводились на пучке электронов и позитронов. Источником электронов и позитронов является конвертор, расположенный вне магнитного поля ускорителя на направлении с углом около $2,5^\circ$ по отношению к первичному пучку протонов. Электроны /позитроны/, образованные в конверторе, заворачиваются в канал с помощью импульсного магнита. Примесь адронов в пучках электронов и позитронов не превышает 1%. Эти пучки имеют близкие характеристики, и переход с одного вида частиц на другой не требует большого расхода времени. Интенсивность пучков при энергии 10 ГэВ составляет около 10^5 частиц за цикл ускорителя при интенсивности протонов, сбрасываемых на мишень, около 10^{12} . Импульсное распределение пучков имеет среднеквадратичный разброс около 130 МэВ/с. На рис. 2а,б приведены угловые характеристики электронного пучка. В районе кристалла пучок имеет среднеквадратичную угловую расходимость около ± 1 мрад и его размер составляет около 20 мм /полная ширина на половине высоты/. Настройка и контроль за параметрами пучков осуществлялись с помощью описываемой установки. Восстановление траекторий частиц с использованием дрейфовых камер позволяло получать профили пучка и его угловые характеристики.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОНОВЫХ УСЛОВИЙ

Для исследования энергетических характеристик излучения, возникающего в монокристаллах, служил гамма-спектрометр на основе сцинтиллирующего монокристалла CsJ(Tl). Для получения с его помощью истинных энергетических спектров необходимо иметь только однократные акты излучения, то есть вероятность испускания гамма-кванта из мишени должна быть много меньше единицы. Для этого необходимо использовать образцы кремниевых кристаллов толщиной не более 100 мкм.

При прохождении частицы через установку наряду с исследуемым излучением возникает фоновое тормозное излучение в веществе установки /сцинтилляционные счетчики, майларовые окна ионпровода, модули дрейфовых камер и т.д./. Интенсивность тормозного излучения из монокристалла кремния толщиной 100 мкм, ориентированного случайным образом, составляло бы не более 2% от интенсивности фонового излучения в веществе установки. Ясно, что оптимизация фоновых условий в эксперименте является серьезным вопросом, и уменьшение вещества было первым шагом его

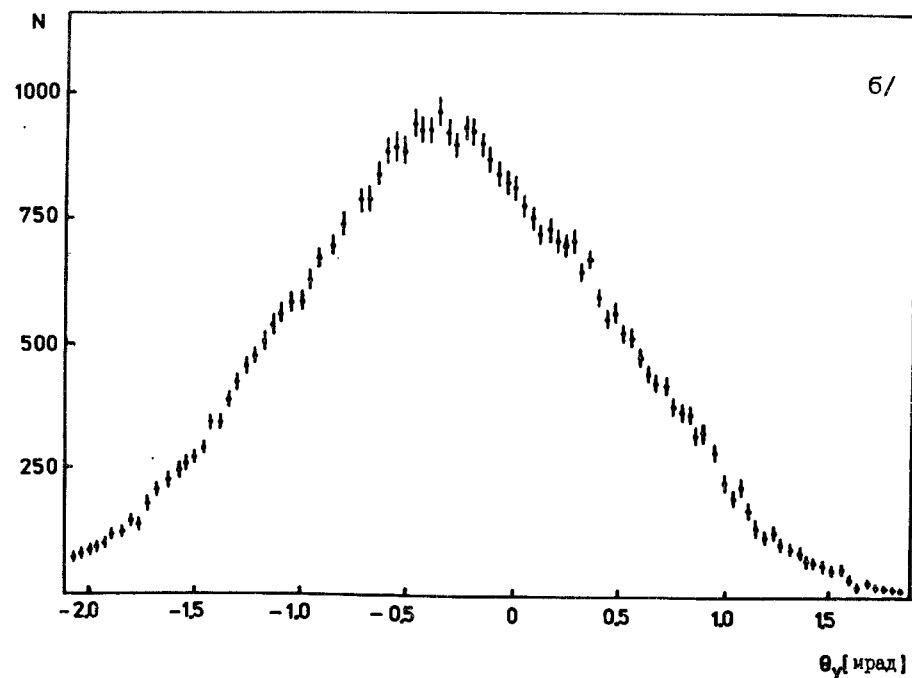
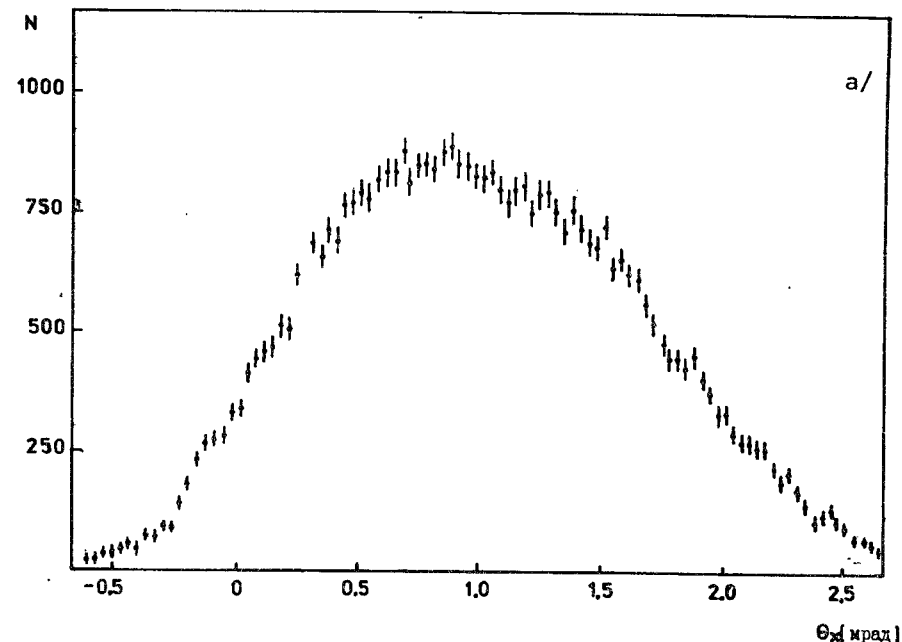


Рис. 2. Угловое распределение падающего пучка: а/ в проекции X и б/ в проекции Y.

решения. Было минимизировано вещество сцинтилляционных счетчиков и майларовых окон ионопровода. Весь тракт пучка в установке, общая длина которого равняется около 70 метров, вакуумировался, исключая сцинтилляционный счетчик S_2 , модули дрейфовых камер и спектрометр вторичных частиц. Дрейфовая камера ДС2 работала при пониженном давлении, и все ее проволочки были вынесены из рабочей области. Суммарное количество вещества в установке после минимизации составляло около 5×10^{-2} радиационных единиц. Для того, чтобы фоновое излучение в счетчике S_1 и входном окне ионопровода не попадало в аперттуру гамма-спектрометра, счетчик размещался перед раздаточным магнитом М, а ионопровод начинался в середине этого магнита. Фоновые измерения показали, что основной вклад в оставшийся фон дает излучение в счетчике S_2 и модулях дрейфовых камер ДС1 и ДС3. Для дальнейшего уменьшения фона использовались очищающие магниты. Поскольку гамма-кванты излучаются в узком угловом диапазоне относительно заряженной частицы, то с помощью магнита можно пространственно разделить излучение, образующееся до магнита и после него. Использование магнита М1 после первого блока камер с углом отклонения 3 миллирадиана и магнита М2 перед третьим блоком камер с углом отклонения 5 миллирадиан позволило резко уменьшить фон. При этом в рабочую аперттуру гамма-спектрометра попадало около 1% фона, обусловленного веществом установки, что оказалось вполне приемлемым.

КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

В качестве координатных детекторов использовались дрейфовые камеры, расположенные в пяти блоках. ДС1, ДС3 и ДС4 содержат по 4X- и 4Y-плоскости ^{1/3}. Дрейфовые плоскости в блоках ДС1 и ДС3 имеют размеры $12,5 \times 12,5$ см², а в блоке ДС4 - 25×25 см². Сигнальные проволочки диаметром 20 мкм из золоченого вольфрама намотаны с шагом 42 мм так, что максимальная длина дрейфового промежутка составляет 21 мм. В качестве рабочего газа использовалась смесь 67,2% аргона + 30,3% изобутана + 2,5% паров метилала. Сигналы с проволочек поступали на усилитель-дискриминатор ^{1/4}, имевший порог срабатывания около 2 микроампер. Камеры вместе с усилителями были помещены в экранирующие термостабилизированные боксы.

Дрейфовая камера низкого давления ДС2, состоящая из 2X- и 2Y-плоскостей, была разработана специально для настоящего эксперимента. Использование стандартного блока дрейфовых камер в месте расположения ДС2 было нежелательно из-за большого многократного рассеяния - порядка 100 мкрад. Для сравнения отметим, что критический угол каналирования частиц при энергии 10 ГэВ для плоскости /110/ составляет около 65 мкрад. Кроме этого, как отмечалось выше, было необходимо минимизировать фон, возникающий в веществе этого детектора.

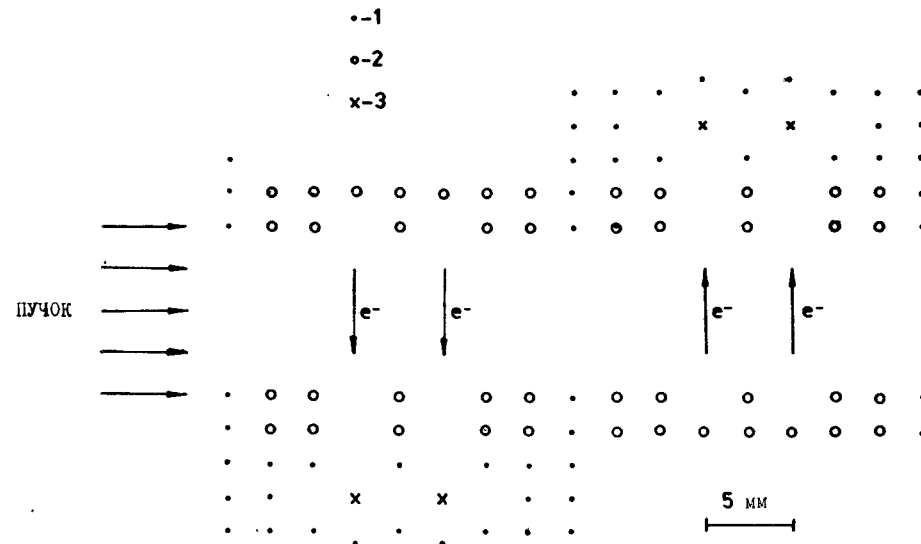


Рис.3. Схема расположения проволочек в двух дрейфовых плоскостях камеры низкого давления в одной из проекций; 1 - проволочки с нулевым потенциалом, 2 - проволочки, формирующие электрическое поле в дрейфовом промежутке, 3 - сигнальные проволочки.

Уменьшение вещества в камере ДС2 произведено за счет минимизации толщины майларовых окон, вынесения всех проволочек из рабочей области и снижения давления газа. Камера расположена непосредственно после гониометра и смонтирована в ионопровод установки. Ее газовый объем ограничивается майларовыми окнами толщиной 12 микрон. Конструкция камеры /см. рис.3/ устраняет лево-правую неоднозначность в определении координат. Имеется возможность по сумме времен дрейфа с двух плоскостей исключить ложные треки. Каждая плоскость камеры разделена на два дрейфовых промежутка протяженностью 5 мм, сигналы с двух проволочек одной плоскости суммируются. Рабочая область камеры имеет размеры 10×10 мм². Камера собрана из стеклотекстолитовых рамок с внутренним окном 80×80 мм². Газовая смесь состояла из 62% аргона, 28% изобутана и 10% паров метилала. Давление рабочего газа в процессе эксперимента было равно 250 Тор, при этом количество вещества в камере вдоль пучка составляло около 5×10^{-4} радиационных единиц. Для регистрации сигналов с камеры использовался усилитель-дискриминатор, имеющий порог около 0,5 мкА, размещенный в экранирующем боксе.

Дрейфовые камеры ДС1, ДС2 и ДС3 служат для определения траекторий электронов /позитронов/ до и после мишени. Суммарная точность блока обычных камер /из четырех плоскостей/ составляет

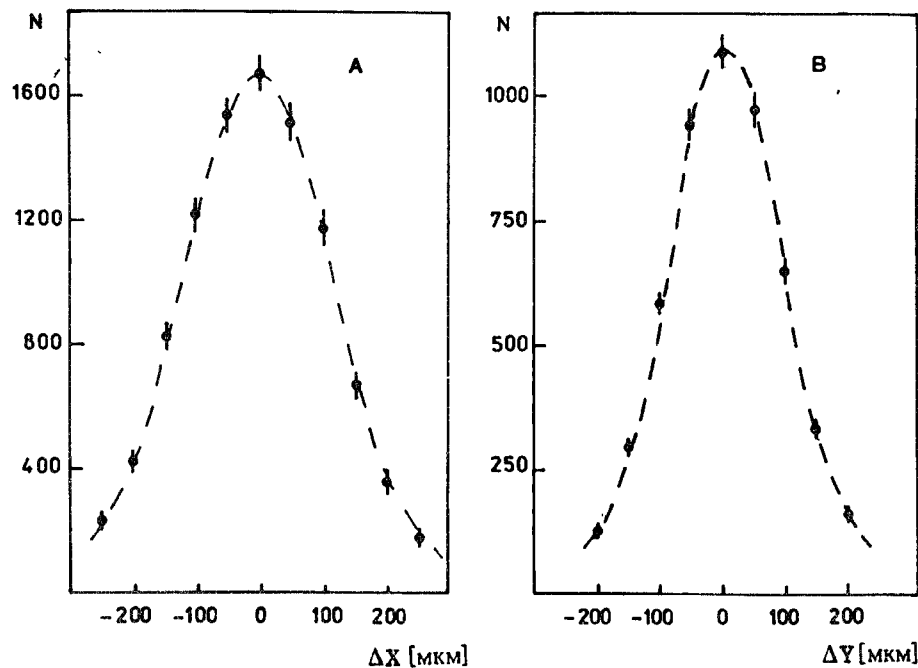


Рис.4. Распределение отклонений координат в ДС2 от прямой, восстановленной с использованием двух плоскостей ДС2. А - давление 150 Тор, среднеквадратичное отклонение составляет 120 мкм; В - давление 250 Тор, среднеквадратичное отклонение составляет 90 мкм. В предположении равноточности измерений можно заключить, что среднеквадратичная ошибка для каждой из плоскостей X и Y составляет 170 мкм и 130 мкм соответственно.

Рис.5. Распределение событий по углу рассеяния в Y-плоскости в сеансе без мишени. Среднеквадратичное отклонение составляет 33 мкрад.

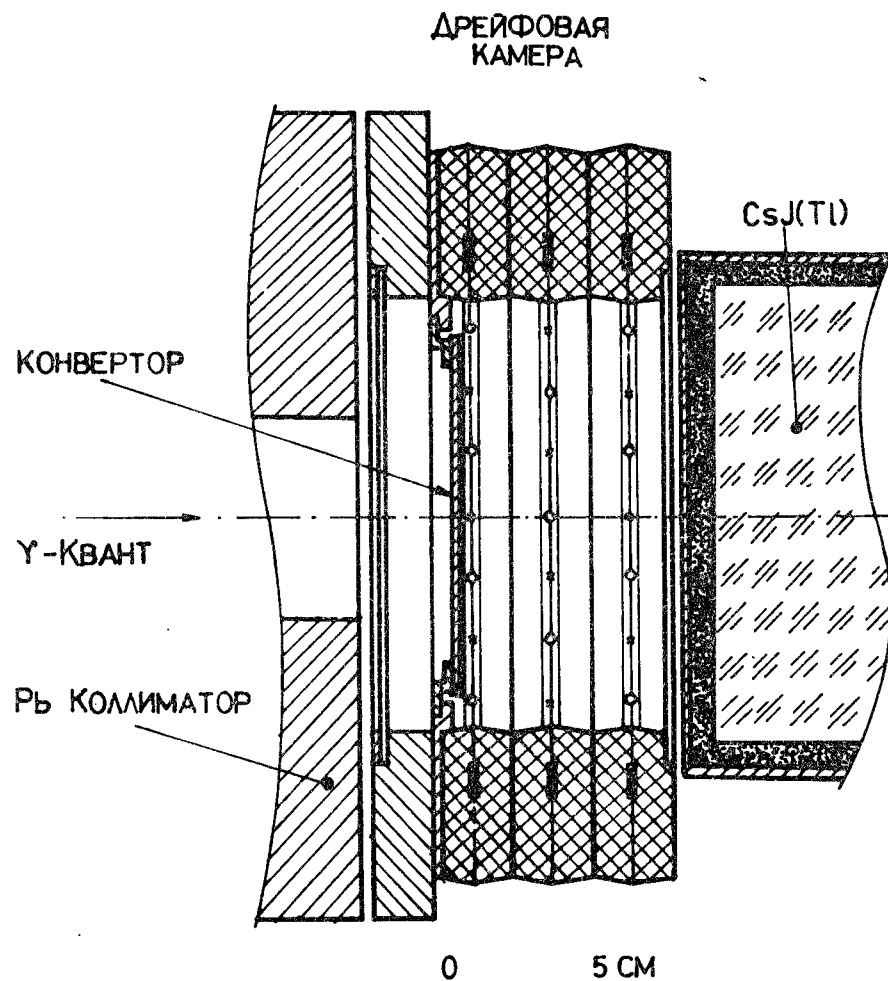
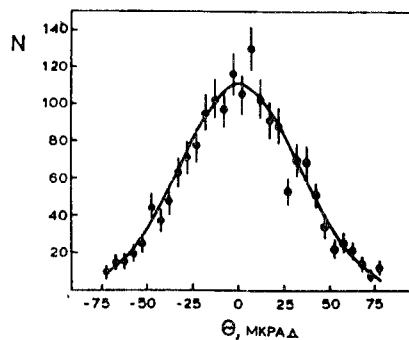


Рис.6. Конструкция ДС5.

около 50 мкм, точность блока дрейфовых камер низкого давления /из двух плоскостей/ - около 90 мкм /см. рис.4/. Это обеспечивает разрешение по углу входа в проекции около 6 мкрад, а по углу выхода, с учетом многократного рассеяния в ДС2, - около 30 мкрад. Оценки показывают, что разрешение установки по углу рассеяния в одной проекции должно составлять около 35 мкрад. На рис.5 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 приведенным оценкам.

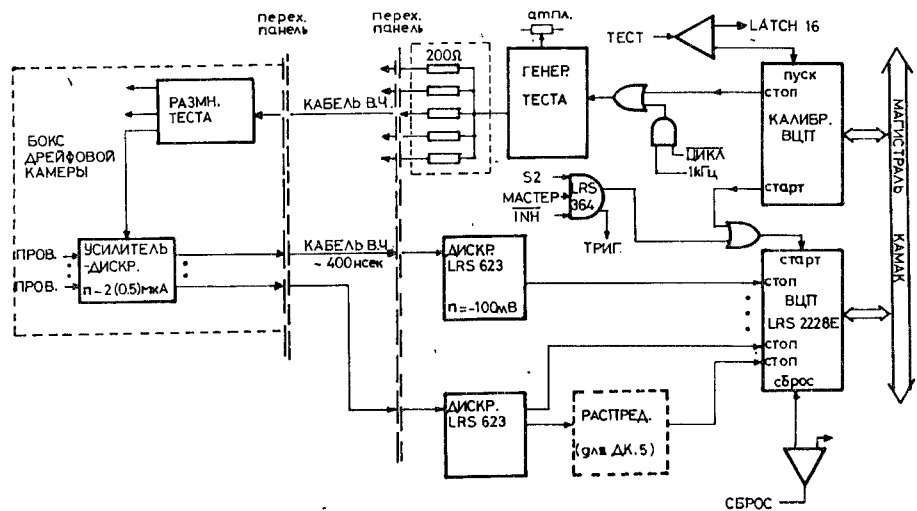


Рис. 7. Канал регистрации и калибровки дрейфовых камер.

Четвертый блок дрейфовых камер ДС4 используется для измерения импульса вторичных частиц, обеспечивая точность лучше чем $\pm 1\%$. Эта точность определяется однородностью поля анализирующего магнита и точностью магнитных измерений.

Пятый блок дрейфовых камер ДС5 со встроенным конвертором служит для измерения углов вылета γ -квантов из кристалла по восстановленной координате вершины электрон-позитронной пары.

Блок ДС5 /см. рис.6/ состоит из трех дрейфовых плоскостей, аналогичных плоскостям в ДС1 и ДС3, в которых задействованы две, три и четыре сигнальные проволоочки соответственно. Для минимизации ошибки восстановления точки конверсии γ -кванта конвертор был максимально приближен к катодной плоскости первого дрейфового промежутка. Конвертор выбирался достаточно тонким, чтобы не ухудшать энергетическое разрешение γ -спектрометра и предотвратить развитие электромагнитного ливня, что увеличивает координатную ошибку прибора. Использовался медный конвертор толщиной 0,064 радиационных единиц.

Совместно с камерами ДС2 и ДС3 прибор обеспечивает измерение углов γ -квантов в Υ -проекции с точностью около 4 мкрад.

Тракт регистрации сигнала с проволоочки для ДС1-ДС5 представлен на рис.7. Сигнал, сформированный услителем-дискриминатором, по высокочастотному кабелю поступал в домик экспериментатора, где еще раз регенерировался. Кабель обеспечивал задержку около 400 нс, необходимую для выработки сигнала "Старт ВЦП". Сигналы поступали на входы "Стоп" время-цифровых преобразователей, имеющих цену отсчета 300 нс. В камерах ДС1-ДС4 каждой сигнальной проволоочке соответствовал свой канал ВЦП. В блоке дрейфовых

камер ДС5, где для регистрации электрон-позитронной пары требовалось обеспечить съем двух сигналов с каждой проволоочки, в тракт был добавлен специальный блок, выделяющий каждый второй импульс. Таким образом, на каждую из проволоочек было задействовано два канала ВЦП. Контроль каналов регистрирующей электроники и калибровка ВЦП осуществлялись с помощью сигналов "Тест", поступающих на входы усилителей сразу же после импульса ускорителя. При калибровке ВЦП сигналы "Тест" задерживались относительно стартового импульса. Различные длительности задержек задавались кварцевым генератором и подбирались таким образом, чтобы перекрыть рабочий диапазон преобразователей.

МИШЕНЬ

В качестве мишеней в эксперименте использовались бездислокационные монокристаллы кремния /число дислокаций не превышает 10 см^{-2} /. Кристаллы были разрезаны перпендикулярно исследуемым кристаллографическим осям с точностью около $0,2^\circ$ и выполнены в виде дисков толщиной 0,5 мм и более. Для получения тонких мишеней центральная часть образца диаметром 18 мм вытравливалась до нужных размеров. Минимальная толщина мишени составляла 20 мкм, а самый толстый из исследуемых образцов имел толщину 10 мм. Монокристаллы крепились в обойму, позволяющую одновременно устанавливать до четырех различных образцов. Обойма устанавливалась в гониометре и имела дистанционное управление. Каждый из образцов был вставлен в реперное кольцо, выполненное в виде полупроводникового детектора, сигналы с которого использовались при запуске установки для центровки кристаллов с помощью траекторий пучковых частиц. При предварительной юстировке плоская поверхность каждого кристалла с помощью отраженного лазерного луча выставлялась перпендикулярно оси пучка. Вращением кристалла в гониометре снималась ориентационная зависимость числа гамма-квантов от угла поворота кристалла. Определение положения кристаллографических осей и плоскостей и их идентификация осуществлялись по пикам в указанной зависимости. В эксперименте была использована гониометрическая система, применявшаяся в исследованиях по каналированию при энергиях $8^{5/7}$, 35, 100 и 250 ГэВ^{8/7}. Эта система позволяла дистанционно поворачивать кристалл вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, цена отсчета составляла $0,001^\circ$.

ГАММА-СПЕКТРОМЕТР

Одной из основных задач эксперимента являлось исследование энергетических спектров γ -квантов, образующихся в кристалле при прохождении электронов и позитронов высоких энергий. Особенности этих спектров при энергии первичных частиц 10 ГэВ для режимов плоскостного каналирования должны лежать в области до 200 МэВ, а для осевого каналирования - до 1 ГэВ^{7/7}. Для спектрометрии γ -квантов в этом энергетическом диапазоне наибо-

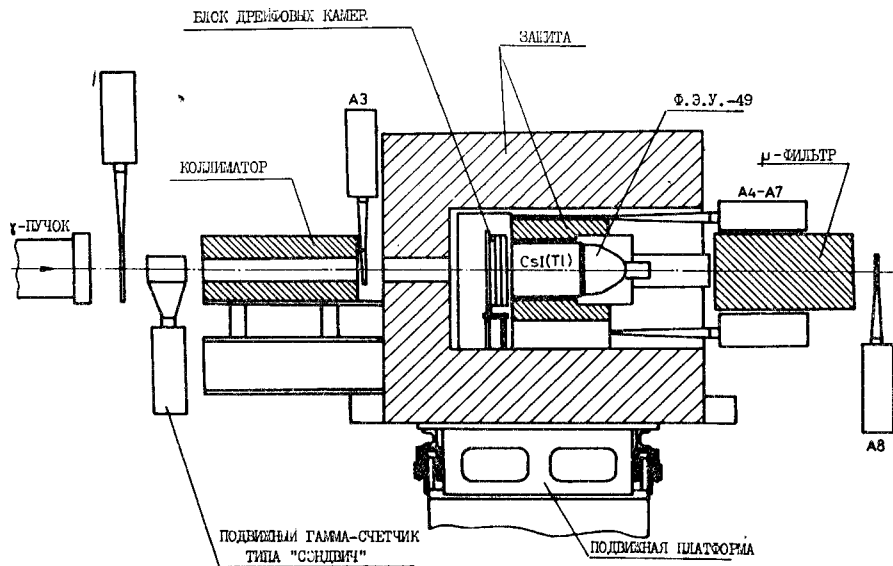


Рис.8. Схема гамма-спектрометра. А₃ - А₈ - сцинтилляционные счетчики.

более рациональным прибором является ливневый детектор на основе сцинтиллирующего радиатора /8/.

Детектор /см. рис.8/ выполнен на основе монокристалла CsI(Tl), имеющего форму цилиндра с диаметром 150 мм и длиной вдоль пучка 230 мм. Плотность вещества монокристалла $\rho = 4,51 \text{ г/см}^3$, радиационная длина $X_0 = 1,8 \text{ см}$, радиатор просматривается одним фотоумножителем типа ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 150 мм.

Спектрометр предназначался для работы в широком динамическом диапазоне. Для получения хорошего разрешения в области низких энергий необходим полный сбор фотоэлектронов в фотоумножителе. При этих условиях в реальном эксперименте ток через фотоумножитель в обычном режиме ФЭУ был настолько велик, что возникала существенная нестабильность усиления ФЭУ, зависящая от загрузки детектора. Проблема была решена уменьшением коэффициента усиления ФЭУ с одновременным увеличением усиления спектротметрической электроники. Для сохранения эффективности сбора фотоэлектронов на первые электроды фотоумножителя 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.

Для достижения разрешения АЦП в области низких энергий γ -квантов (около 0,1 МэВ/отсчет) были использованы два тракта регистрации сигналов с ФЭУ. Схема съема информации с гамма-спектрометра представлена на рис.9. Тракт, в котором сигнал

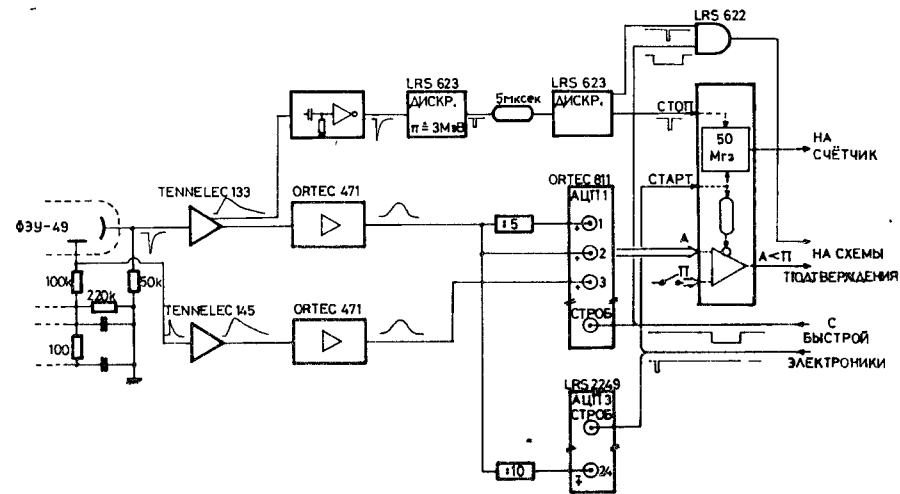


Рис.9. Схема съема информации с гамма-спектрометра.

снимался с анода ФЭУ, обеспечивал измерение энергий примерно до 1 ГэВ, диодный тракт, в котором сигнал снимался с последнего диода ФЭУ, имел рабочий диапазон до 10 ГэВ. Полный диапазон первого амплитудно-цифрового преобразователя анодного тракта соответствовал энергии 200 МэВ, поэтому для регистрации γ -квантов с энергией 1 ГэВ сигнал далее делился в отношении 1:5 и поступал на второй амплитудно-цифровой преобразователь. Таким образом, регистрация γ -кванта производилась одновременно в трех диапазонах: $10 \div 200 \text{ МэВ}$; $10 \div 1000 \text{ МэВ}$; $10 \div 10000 \text{ МэВ}$ - с ценой отсчета около 0,1 МэВ; 0,5 МэВ и 5 МэВ соответственно. Для уменьшения разброса сигналов из-за дрейфа "нуля" производилось измерение "нулевого" потенциала спектротметрического анодного тракта за 4 мкс до рабочего сигнала.

Кроме тракта регистрации спектротметрических сигналов в системе съема информации с γ -спектрометра был организован так называемый временной тракт, в котором сигнал с быстрого выхода анодного предусилителя преобразовывался в логический импульс. Этот импульс определял момент прохождения частицы через γ -спектрометр. Регистрация момента времени осуществлялась с помощью специального ВЦП с ценой отсчета 20 нс в диапазоне $\pm 5 \text{ мкс}$ относительно сигнала запуска установки. На рис.10 приведено распределение отсчетов этого преобразователя для зарегистрированных событий. Из рисунка видно, что временное разрешение тракта не хуже 40 нс. Использование этой информации в последующем анализе данных позволило примерно в 100 раз уменьшить фон случайных событий.

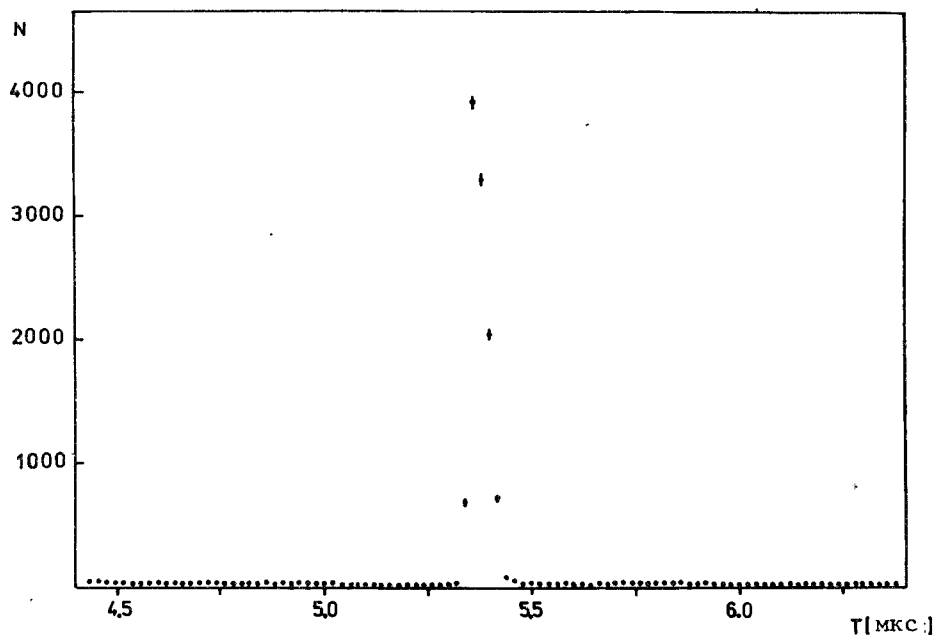
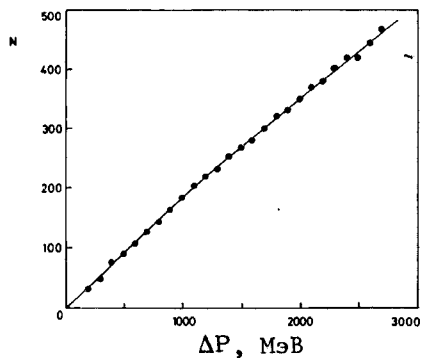


Рис.10. Распределение событий в зависимости от отсчетов ВЦП временного тракта гамма-спектрометра.

Рис.11. Калибровка гамма-спектрометра с помощью "меченных" фотонов. По оси абсцисс отложена разность $\Delta p = (p_0 - p)$, где p_0 - средний импульс пучка, p - импульс вторичного электрона, а по оси ординат - отсчеты гамма-спектрометра. Данные получены во время набора статистики с монокристаллом кремния толщиной 50 мкм. Сплошная кривая - полиномиальный фит.



Гамма-спектрометр, окруженный с четырех сторон сцинтилляционными счетчиками $A_1 - A_4$, размещался непосредственно после блока дрейфовых камер со встроенным конвертором ДС5, перед которым располагался свинцовый коллиматор с апертурой $60 \times 60 \text{ мм}^2$. Счетчики окружения служили для отбраковки событий, в которых через

радиатор спектрометра прошла фоновая заряженная частица. Сигналы с них, записываемые во входной регистр "LATCH", при необходимости могли включаться на антисовпадение с основным сигналом запуска установки. Радиатор спектрометра был помещен в свинцовую "рубашку" с толщиной стенок 60 мм, которая поглощала частицы ливня, вышедшие за пределы радиатора. Гамма-спектрометр и дрейфовая камера с конвертором были окружены свинцовой защитой толщиной около 250 мм. Юстировка гамма-спектрометра в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществлялась по положению пучка тормозного излучения от мишени, определяемому с помощью сканирующего счетчика типа "сэндвич".

Калибровка спектрометра производилась с помощью радиоактивных источников, а также по корреляции импульса вторичных частиц и отсчетов гамма-спектрометра /методом "меченных фотонов"/ - см. рис.11. Совокупность калибровочных данных от радиоактивных источников и "меченных фотонов" хорошо описывается полиномиальной зависимостью, нелинейность которой в области энергий до 3 ГэВ не превышает 10%. Эта характеристика детектора, определяемая, по-видимому, толщиной радиатора и зависимостью коэффициента светосбора от энергии гамма-кванта, использовалась при раскодировке данных. Для коррекции долговременных нестабильностей спектрометрического тракта во время набора статистики непрерывно регистрировалась информация об ионизационных потерях фоновых μ -мезонов в радиаторе спектрометра /около 130 МэВ/, для чего каждый шестнадцатый запуск установки производился от счетчиков A_6 и A_8 , включенных на совпадения. Мягкая компонента μ -мезонов $/E \leq 1 \text{ ГэВ}/$ отсекалась с помощью поглощающего фильтра. Для коррекции нестабильностей тракта во время импульса ускорителя, обычно не превышавших 3%, производились запуски от светодиода.

Разрешение гамма-спектрометра при энергии 1 МэВ определялось по калибровке от радиоактивного источника ^{60}Co при высоком коэффициенте усиления ФЭУ и составляло 8% /полная ширина на половине высоты/. В рабочих условиях при напряжении на ФЭУ 660 В добавлялись шумы тракта величиной около 0,1 МэВ. Оценки показывают, что при энергии 100 МэВ детектор имеет разрешение не хуже 3%.

ЗАПУСК УСТАНОВКИ

Во время набора статистики было использовано шесть типов запусков. Каждый из запусков имел свой идентификатор, регистрируемый в ячейке "LATCH". Очередность запусков определялась специальным блоком.

Основной тип запуска был предназначен для регистрации событий, в которых первичная частица излучила гамма-квант с энергией, превышающей пороговое значение. Регистрация события происходила при наличии сигнала от пучкового телескопа $S_1 \cdot S_2 \cdot A_1 \cdot A_2$,

срабатывания всех проволочек блока дрейфовых камер ДС2 и сигнала с гамма-спектрометра, амплитуда которого превышает некоторый порог. В сеансах с тонкими мишенями дополнительно требовалось срабатывание счетчика S_3 , расположенного после блока дрейфовых камер ДС4 и перекрывающего его апертуру.

Счетчик S_1 имел размеры сцинтиллятора 10×10 см² толщиной 3 мм и, как уже отмечалось, был установлен перед раздаточным магнитом М; счетчик S_2 с такими же размерами и толщиной 2 мм устанавливался перед блоком дрейфовых камер ДС1. Счетчики антисовпадений A_1 с отверстием диаметром 10 см и A_2 с отверстием диаметром 8 мм ограничивали размер регистрируемой части пучка. Оба эти счетчика были размещены в ионопроводе.

Требование срабатывания ДС2 для регистрации первичной частицы вводилось вследствие наличия ложных отсчетов телескопа $S_1 \cdot S_2 \cdot A_1 \cdot A_2$, содержащего всего два счетчика совпадений. Сигнал, свидетельствующий о срабатывании всех проволочек блока ДС2, поступал с задержкой, соответствующей максимальному времени дрейфа. При отсутствии этого сигнала вырабатывался импульс очистки всех информационных модулей /за исключением пересчетных устройств/, запрещалось считывание информации, и система регистрации переводилась в режим ожидания следующего события.

Аналогичным образом использовался сигнал, свидетельствующий о регистрации гамма-кванта. Аппаратурно этот критерий мог накладываться двумя способами. Во-первых, подтверждение о регистрации события могло вырабатываться по сигналу с временного тракта гамма-спектрометра в течение одной микросекунды после прохождения пучковой частицы. При этом порог дискриминатора временного тракта устанавливался на уровне 3 МэВ. Во-вторых, подтверждение могло осуществляться по амплитуде сигнала со спектрометрического канала гамма-детектора. В этом случае подтверждающий сигнал вырабатывался специальным процессором, опрашивающим один из амплитудно-цифровых преобразователей и сравнивающим преобразованное значение с числом, задаваемым оператором на передней панели блока. На эту операцию затрачивалось около 15 мкс.

В специальных случаях, когда требовалось набрать большую статистику конвертированных гамма-квантов, запуск установки дополнялся требованием срабатывания всех плоскостей блока дрейфовых камер ДС5.

Запуски основного типа осуществлялись десять раз из шестнадцати.

Во втором типе запусков, так называемом запуске без критериев, необходимыми условиями являлись срабатывание пучкового телескопа $S_1 \cdot S_2 \cdot A_1 \cdot A_2$ и всех плоскостей блока дрейфовых камер ДС2. Запуск без критериев осуществлялся один раз из шестнадцати. В этих запусках регистрировалась информация о падающем пучке, которая необходима для нормировки экспериментальных данных.

Для калибровки детекторов и контроля за работой установки были задействованы еще четыре типа запусков.

Как уже отмечалось, один раз в цикле из шестнадцати осуществлялся так называемый мезонный запуск. Два запуска из шестнадцати производились для регистрации импульса от светодиода. Эти данные использовались для калибровки гамма-спектрометра во время набора статистики.

Один раз в цикле из шестнадцати производился запуск, не синхронизированный с прохождением частицы. При обработке данных по этим запускам определялись нулевые отсчеты АЦП.

Последний из типов запусков - тестовый - генерировался после импульса ускорителя. Во время этого запуска осуществлялся контроль электроники дрейфовых камер, производилась калибровка ВЦП, по сигналам от светодиода контролировался спектрометрический тракт.

БЫСТРАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Отбор событий, вызвавших срабатывание сцинтилляционных счетчиков, проволочек ДС2, канала временного тракта гамма-спектрометра, плоскостей ДС5, производился с помощью быстрой электроники, в которую входили дискриминаторы с регулируемым порогом и продлевающимся импульсом, схемы совпадений, генераторы задержек и другие блоки. Пороги дискриминаторов устанавливались на уровне 100 мВ, ширины импульсов в каналах совпадений составляли 20 нс, в каналах антисовпадений - 40 нс.

Выделение пучка происходило с помощью схемы, на вход антисовпадений которой был подан задержанный сигнал со счетчика S_2 длительностью 0,5 мкс. Это гарантировало регистрацию только тех событий, перед которыми через счетчик S_2 не прошла ни одна частица в течение времени минимум 0,5 мкс. Образующий триггером сигнал запуска длительностью 0,5 мкс стробировался сигналом S_2 и заносился в регистр "LATCH", что давало отметку о наличии пучковых частиц после запуска. Запрет прохождения частицы в интервале времени 0,5 мкс до и после запуска был необходим для подавления двутрековых событий.

Для формирования сигнала старта ВЦП импульс совпадений $S_1 \cdot S_2 \cdot A_1 \cdot A_2$ расширялся до 50 нс и стробировался сигналом со счетчика S_2 , так что передний фронт стартового импульса соответствовал переднему фронту сигнала со счетчика S_2 . Для уменьшения временного разброса сигнал со счетчика S_2 формировался в непосредственной близости от ФЭУ на уровне дискриминации 50 мВ. В случае отсутствия готовности установки запуск блокировался потенциалом "INHIBIT", который снимался либо после очистки информационных блоков для событий без подтверждений, либо после передачи данных в ЭВМ.

Все схемы совпадений работали в режиме перекрытий импульсов, что использовалось для проверки правильности задержек сигналов с помощью регистрации ширин выходных импульсов.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ

Электронная система синхронизации, управления набором данных и их регистрации, а также система связи с ЭВМ созданы в стандарте КАМАК и помещаются в трех крейтах, организованных в ветвь КАМАК универсальным драйвером ветви ^{9/}. Регистрирующая аппаратура установки состоит из коммерчески доступных блоков КАМАК, последовательность которых определяет формат массива физической информации. Блок-схема системы управления и регистрации, типы электронных блоков и количество считываемых с них слов приведены на рис.12.

Блок регистра "LATCH" использовался для запоминания вспомогательной информации о событии. Для регистрации сигналов быстрой электроники, измерения времени события в растяжке и времени прохождения частицы через γ -спектрометр применялись два блока пересчетных устройств. Три блока амплитудно-цифровых преобразователей регистрировали информацию с γ -спектрометра, ширины перекрытий сигналов на схемах совпадений, данные с черенковских ливневых счетчиков. Информация с дрейфовых камер регистрировалась 12 блоками время-цифровых преобразователей по 8 каналов каждый. Очередность модулей регистрирующей аппаратуры была подобрана таким образом, что передачу можно было начинать, не ожидая окончания конверсии в преобразователях.

Система управления и синхронизации была создана на основе блоков, разработанных специально для эксперимента. Ее задачами являлись синхронизация работы установки, ЭВМ и устройств представления данных с циклом ускорителя, выработка последовательности запусков, калибровка ВЦП, отбор событий по критериям. С помощью специально разработанных блоков было обеспечено сопряжение с ЭВМ графического дисплея **ТЕКТРОНИХ-611**^{10/}, алфавитно-цифрового терминала **DZM-180-KSR**^{11/} и пульта управления установки^{12/}.

Для управления установкой, сбора и анализа данных применялась удаленная ЭВМ типа **ЕС-1040**. Работой программ можно было управлять из домика экспериментаторов при помощи терминала **DZM-180-KSR** и пульта управления, результаты анализа выводились на АЦПУ вычислительной машины, а также на дисплей и терминал установки. Драйвер ветви КАМАК присоединялся к селекторному каналу ЭВМ через блок связи^{13/} и блок сопряжения с **ЕС-1040**^{14/}. Драйвер с помощью блока сопряжения ветви обеспечивал выполнение команд КАМАК как в одиночных, так и групповых режимах, позволяя выполнять двустороннюю блочную передачу данных. Он осуществлял синхронизацию работы программ с работой установки. На время растяжки пучка ускорителя блок сопряжения имел специальный режим работы, в котором очередные события передавались в ЭВМ как один массив данных. Пропускная способность установки при передаче данных в ЭВМ составляла 1400 событий в секунду, т.е. 420 Кбайт в секунду.

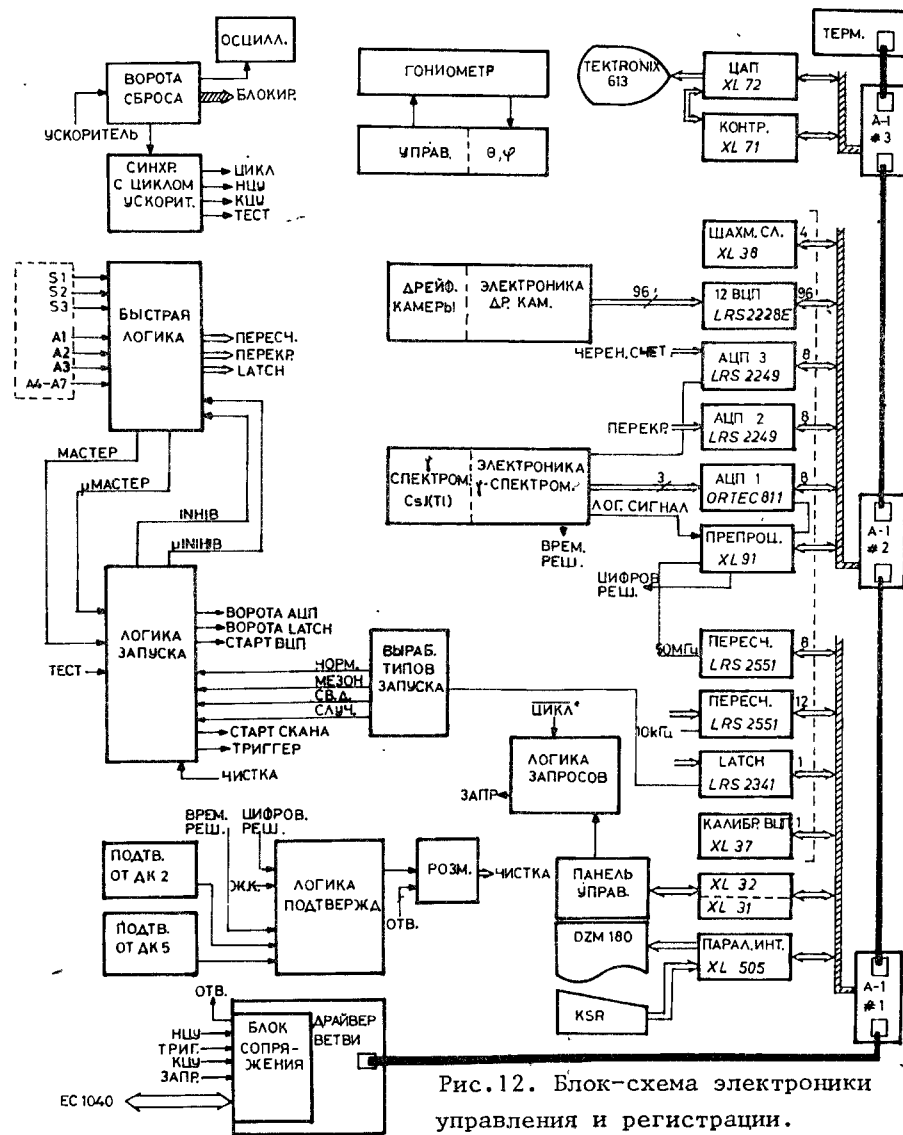


Рис.12. Блок-схема электроники управления и регистрации.

ОН-ЛАЙН-ПРОГРАММЫ

Совокупность он-лайн-программ была специально создана для изучения процессов каналирования частиц высоких энергий. Программы обеспечивали решение вопросов сбора и накопления данных^{15/}, восстановление траекторий частиц по информации с дрейфовых камер, анализ экспериментальной информации, передачу результатов анализа на терминал и дисплей в домик экспериментатора.

Константы, необходимые для восстановления траекторий частиц, вычислялись по информации с дрейфовых камер. Начало отсчета времени в каждом канале определялось по нижней границе в распределении времени дрейфа, скорость дрейфа вычислялась из суммы времен дрейфа по отсчетам с двух сопряженных проволок в соседних плоскостях. Сдвиги дрейфовых плоскостей относительно общей системы координат находились по отклонению координат в данной плоскости от прямой.

Восстановление траектории заряженных частиц позволяло получать информацию о пространственных, угловых и энергетических характеристиках пучка. Координатные распределения пучка в z -позиции счетчика A_2 , мишени и γ -спектрометра использовались для их юстировки. Программой реконструировались треки конвертированной e^+e^- -пары, по их параметрам вычислялся угол вылета гамма-кванта.

Распределение углов входа частиц в мишень, углов вылета, заряженной частицы и гамма-кванта, углов рассеяния, а также возможность наложения на эти гистограммы различных критериев отбора позволяли получать необходимые физические характеристики исследуемого процесса.

Задание пределов гистограмм, наложение критериев, заказ новых гистограмм, их обнуление можно было выполнять с пульта ЭВМ и из домика экспериментатора. Всего в программе было задействовано около 660 гистограмм. Между импульсами ускорителя программы выполняли анализ около 20% ÷ 50% данных. В целом совокупность информации с пересчетных устройств, распределения с АЦП и характеристики событий, восстановленные по данным дрейфовых камер, достаточно полно представляли особенности исследуемого процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана установка, созданная для изучения процессов спонтанного излучения заряженных частиц высоких энергий в монокристаллах, адекватная поставленной задаче. Величина фонового излучения соответствует количеству вещества около 5×10^{-4} радиационных длин. Установка обеспечивает разрешение по углу входа частиц в кристалл около 6 мкрад, по углу выхода - около 30 мкрад, разрешение установки по углу рассеяния составляет около 33 мкрад. Примерно для 4% событий измерялись углы вылета γ -квантов, точность измерения составляла около 4 мкрад. Установка работала на линии с ЭВМ ЕС-1040. Она может регистрировать до 1400 событий в секунду и оснащена развитой системой математического обеспечения.

В заключение авторы благодарят академика Н.Н.Боголюбова и профессора Л.Ледермана за внимание к эксперименту, выражают благодарность академику А.А.Логунову и персоналу ускорителя ИФВЭ за помощь в проведении исследований. Авторы благодарят

профессора Н.Н.Говоруна, академика А.М.Балдина и коллектив Лаборатории высоких энергий за постоянную поддержку. Авторы благодарят коллектив Серпуховского научно-экспериментального отдела ОИЯИ, за помощь в создании установки. Авторы благодарны профессору Р.Желязному за содействие в работе. Участники эксперимента из США выражают благодарность коллективам Объединенного института ядерных исследований и Института физики высоких энергий за гостеприимство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водопьянов А.С. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, с. 474; Elishev A.F. et al. Phys.Lett., 1979, 88B, p. 387.
2. Filatova N.A. et al. Nucl.LAB-PUB-81/34-EXP, Batavia, 1981.
3. Filatova N.A. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1977, 143, p. 17.
4. Guzik Z. FERMILAB, FN-301, Batavia, 1976.
5. Водопьянов А.С. и др. ОИЯИ, P13-80-225, Дубна, 1980.
6. Carrigan R.A. et al. FERMILAB-79/43-EXP., Batavia, 1979.
7. Kumakhov M.A. Phys.Lett., 1976, 57A, p. 17. Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1978, 29, с. 786; Кумахов М. А. ЖЭТФ, 1977, 72, с. 1489; Кумахов М.А., Трикалинос Х.Г. ЖЭТФ, 1980, 78, с. 1623.
8. Люк К.Л., Юань Ву Цзянь-Сюн. Методы измерения основных величин ядерной физики. "Мир", М., 1964.
9. Нгуен Фук, Смирнов В.А. ОИЯИ, 10-8712, Дубна, 1979.
10. Гузик З., Форицки А. ОИЯИ, 1-81-29, Дубна, 1981.
11. Гузик З., Форицки А. ОИЯИ, 13-13010, Дубна, 1980.
12. Гузик З., Сутулин В.А., Форицки А. ОИЯИ, 13-12952, Дубна, 1980.
13. Горбунов Н.В., Морозов Б.А. ОИЯИ, 11-11334, Дубна, 1978.
14. Гузик З., Форицки А. ОИЯИ, 12-81451, Дубна, 1981.
15. Говорун Н.Н. и др. ОИЯИ, P10-12968, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июля 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
D3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
D1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
D1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271.	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Водопьянов А.С. и др.

P13-82-547

Спектрометр для исследования спонтанного излучения, возникающего при прохождении позитронов и электронов высоких энергий через монокристаллы

Описана установка, работавшая на пучке электронов и позитронов ускорителя ИФВЭ и предназначенная для исследования процессов излучения релятивистских частиц в монокристаллах. Параметры установки позволяют детально исследовать процессы спонтанного излучения, возникающего при каналировании заряженных частиц высоких энергий в монокристаллах. Установка дает возможность, с высокой точностью восстанавливать траектории частиц до и после кристалла, измерять импульс вторичной частицы и производить ее идентификацию, определять угол вылета гамма-кванта и его энергию. Толщина вещества в установке, дающего фон тормозного излучения, составляет 6×10^{-4} радиационных единиц. Установка работает на линии с ЭВМ ЕС-1040 и обеспечена развитой системой программ.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Filatova N.A. et al.

P13-82-547

A Spectrometer to Study Spontaneous Radiation due to the Channeling of High Energy Electrons and Positrons in Single Crystals

An experimental setup is described which is designed to study radiation effects due to the channeling of high energy charged particles in a single crystal. The setup consists of drift chambers and scintillation counters and operates on an electron-positron beam line at the Serpukhov accelerator. The design of the setup makes it possible to study in detail spontaneous radiation effects due to the channeling of high energy charged particles in a single crystal. The setup allows one to reconstruct particle trajectories with high precision, to determine the momentum of secondary particle, to identify their types, and to measure the angles and energies of emitted photons. The total amount of material along the beam direction is approximately 6×10^{-4} radiation lengths. The setup operates on-line with an ES-1040 computer and is provided with an advanced program package.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute For Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.