



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 97-38
ОЭФ

В.Д.Апокин, Н.И.Беликов, А.Н.Васильев, Ю.М.Гончаренко,
О.А.Грачев, В.Н.Гришин, А.М.Давиденко, А.А.Деревщиков,
Ю.А.Ильин, В.А.Кормилицын, Ю.А.Матуленко, В.А.Медведев,
Ю.М.Мельник, А.П.Мещанин, Н.Е.Михалин, В.В.Мочалов,
А.И.Мысник, С.Б.Нурушев, Д.И.Паталаха,
А.Ф.Прудкогляд, В.Л.Рыков, Л.Ф.Соловьев,
В.Л.Соловьянов, Ю.В.Харлов, В.Ю.Ходырев, Б.В.Чуйко,
К.Е.Шестерманов, А.С.Якутин, Л.В.Алексеева*, Л.В.Ногач*
Институт физики высоких энергий, Протвино

Н.С.Борисов, Э.И.Бунятова, Ю.М.Казаринов, Ю.Ф.Киселев,
В.Г.Коломиец, М.Ю.Либург, В.Н.Матафонов,
А.Б.Неганов, Б.С.Неганов, Ю.А.Плис, Ю.А.Усов, А.Н.Федоров
Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ, Дубна

**УСТАНОВКА ПРОЗА-М ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОДНОСПИНОВЫХ АСИММЕТРИЙ В ИНКЛЮЗИВНОМ
ОБРАЗОВАНИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ
НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ИФВЭ**

Направлено в ПТЭ

*Аспирант МГУ

Аннотация

Апокин В.Д., Беликов Н.И., Васильев А.Н. и др. Установка ПРОЗА-М для исследования односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании нейтральных мезонов на ускорительном комплексе ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 97-38. – Протвино, 1997. – 23 с., 14 рис., 2 табл., библиогр.: 24.

В работе описана автоматизированная установка для измерения односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании нейтральных мезонов на 14-м канале ускорителя У-70 ИФВЭ. Измерения проводились как на вторичном пионном пучке с импульсом 40 ГэВ/с, так и на первичном пучке протонов с энергией 70 ГэВ, выведенном в зону установки с помощью изогнутого монокристалла. Описаны основные характеристики регистрирующей аппаратуры и системы сбора данных.

Abstract

Apokin V.D., Belikov N.I., Vasiliev A.N. et al. The Experimental Set-up PROZA-M to Study Single-Spin Asymmetry in the Inclusive Neutral Meson Production at the U-70 Accelerator: IHEP Preprint 97-38. – Protvino, 1997. – p. 23, figs. 14, tables 2, refs.: 24.

The apparatus designed to study single spin asymmetry in the inclusive neutral meson production at the 14-th channel of the U-70 accelerator is described. The measurements were carried out with the use of secondary pion beam with 40 GeV/c momentum, and primary proton beam with 70 GeV/c momentum extracted from the main ring by bent crystal installed in the vacuum tube of the U-70. The main features of the apparatus, and the data acquisition system are described.

Введение

В последние десятилетия одним из наиболее перспективных направлений в физике высоких энергий стали поляризационные исследования. Заметный вклад в развитие этого направления внесли эксперименты на установке ПРОЗА [1]. На этой установке в 1977-1985 гг. при импульсе 40 ГэВ/с проводились измерения асимметрии в ряде эксклюзивных зарядовообменных реакций:

$$\begin{aligned}\pi^- p_{\uparrow} &\rightarrow \pi^0 n \quad [2], \\ \pi^- p_{\uparrow} &\rightarrow \eta n \quad [3], \\ \pi^- p_{\uparrow} &\rightarrow \omega n \quad [4], \\ \pi^- p_{\uparrow} &\rightarrow \pi^0 \pi^0 n \quad [5], \\ \pi^- p_{\uparrow} &\rightarrow f_2(1270) n \quad [5], \\ \pi^- p_{\uparrow} &\rightarrow K^0 \Lambda \quad [6],\end{aligned}$$

в большинстве из которых была обнаружена асимметрия в образовании нейтральных мезонов на уровне 15 – 30%.

Затем в 1986-1991 гг. на модифицированной установке ПРОЗА-М были проведены измерения асимметрии в инклюзивных реакциях на пионном пучке с импульсом 40 ГэВ/с. В частности, в реакции $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$ при 90° в с.ц.м. и $p_T \approx 2,5$ ГэВ/с была наблюдена асимметрия $\approx 30\%$ [7].

В 1992 г. началась подготовка установки ПРОЗА-М к исследованиям односпиновой асимметрии в инклюзивном образовании нейтральных мезонов (преимущественно π^0 -мезонов) на пучке протонов энергии 70 ГэВ в центральной области. Вывод внутреннего пучка протонов осуществлялся впервые с помощью использования новой техники изогнутых монокристаллов. В полном объеме установка была подготовлена к работе в 1995 г. В марте 1996 г. на ней был проведен первый сеанс по набору статистики. В настоящее время идет обработка экспериментальных данных.

В данной работе описана автоматизированная установка ПРОЗА-М для измерения односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании нейтральных мезонов на 14-м канале ускорителя У-70 ИФВЭ. Статья построена следующим образом. В первой главе описан новый способ вывода внутреннего протонного пучка У-70

на экспериментальную установку ПРОЗА-М и даны краткие характеристики пучковой аппаратуры. Вторая глава содержит описание поляризованной мишени с “замороженными спинами”. Отмечаются некоторые особенности этой мишени. Основные детекторы установки ПРОЗА-М, электромагнитные калориметры, описаны в третьей главе. Четвертая глава посвящена методам контроля стабильности энергетической шкалы калориметров. Детали калибровки электромагнитных калориметров на электронных пучках представлены в пятой главе. Шестая глава содержит описание электронной аппаратуры, триггера на большие поперечные импульсы и системы сбора данных. В заключении кратко перечислены основные физические результаты, полученные на установке ПРОЗА-М в 1989-1990 гг. и опубликованные в научных журналах.

1. Параметры пучка и пучковой аппаратуры

1.1. Измерения проводились как на пучке π^- -мезонов, так и на пучке протонов с энергией 70 ГэВ. Для протонного пучка впервые в мире была реализована схема вывода из вакуумной камеры ускорителя с жесткой фокусировкой на действующую физическую установку с помощью изогнутого монокристалла. Вывод протонов из ускорителя осуществлялся по тому же направлению, что и вывод π^- -мезонов от внутренней мишени с импульсом 40 ГэВ/с (14 канал). Разумеется, полярность и токи в элементах каналов перестраивались на положительный пучок с импульсом 70 ГэВ/с (см. рис. 1). Кристаллический дефлектор (КД) был установлен внутри вакуумной камеры 25-го прямолинейного промежутка на расстоянии 1 м от выходного среза 24-го блока по железу. Дефлектор представлял собой изогнутый на угол 80 мрад (для попадания протонов на ось канала 14) монокристалл Si, имевший форму параллелепипеда $L \times H \times T = 65 \times 15 \times 0,6$ мм³. Кристалл в рабочем положении был расположен на расстоянии 55 мм от центральной орбиты пучка в У-70. Для наведения на монокристалл первичного пучка протонов использовалось локальное искажение (бамп) замкнутой орбиты. Кроме того, для точного наведения выведенных 70-ГэВных протонов на поляризованную мишень существовала возможность менять угол и координату установки кристалла в вакуумной камере по отношению к падающему пучку протонов с помощью прецизионного гониометрического устройства. Подробно вывод пучка с помощью кристалла описан в работе [8].

При помощи двух линз обеспечивалась фокусировка пучка на мишень эксперимента. Для коррекции по вертикали и горизонтали падающих частиц использовались два специальных магнита СП-140.

Для увеличения эффективности вывода с помощью кристалла и улучшения временной структуры выведенного пучка вводилась “тонкая” внутренняя мишень, которая размещалась до кристалла по ходу пучка и рассеивала первичный пучок протонов. Эффективность работы кристалла составила порядка $1 \cdot 10^{-4}$ (отношение числа протонов на поляризованной мишени к числу падающих на кристалл протонов У-70).

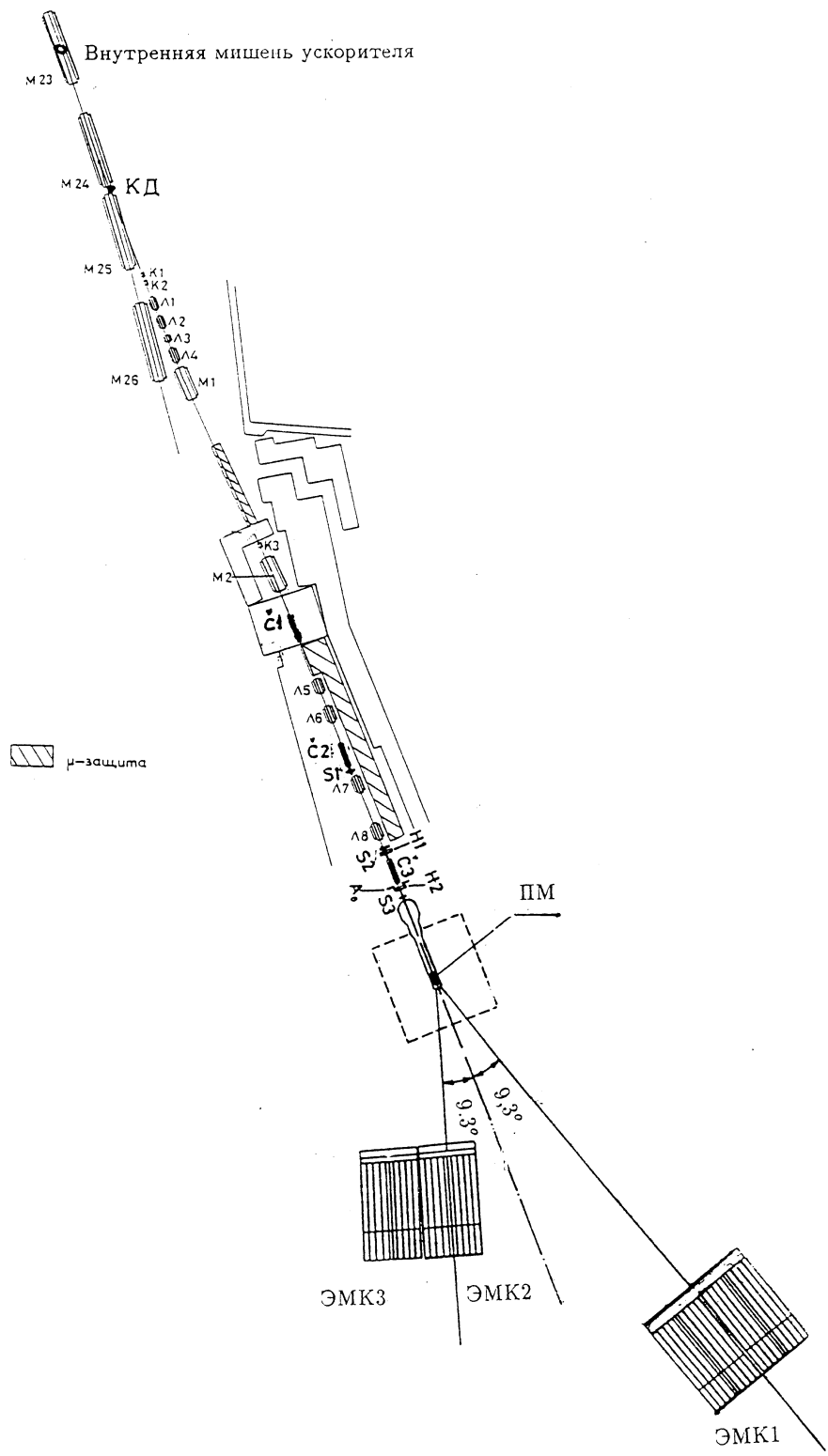


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ПРОЗА-М (детали в тексте).

Минимальный размер пучка на поляризованной мишени получался, когда мишень была установлена строго по оптической оси канала, то есть фокусировка на мишень проходила оптимальным образом, и пучок проходил через центр мишени. В то же время нестабильность работы ускорителя в связи с необходимостью обеспечения одновременной работы нескольких физических установок приводила к изменению горизонтального положения пучка на мишени, в среднем, в пределах 5 мм в течение полутора часов. По вертикали пучок был стабилен в пределах 1 мм. Профиль пучка на годоскопах и в центре мишени в последнем сеансе изображен на рис. 2. Размер пучка на мишени по горизонтали составил $\sigma_x = 4$ мм, а по вертикали $\sigma_y = 3$ мм. Угловые расходимости пучка составили $\sigma_x = 2$ мрад и $\sigma_y = 1$ мрад. Разброс пучка по импульсу $\Delta p/p = 10^{-3}$. Коллиматоры К1 и К2 обеспечивали формирование размеров пучка в X и Y плоскостях (скрейперы). Коллиматор К3 позволял варьировать импульсный интервал полезного пучка.

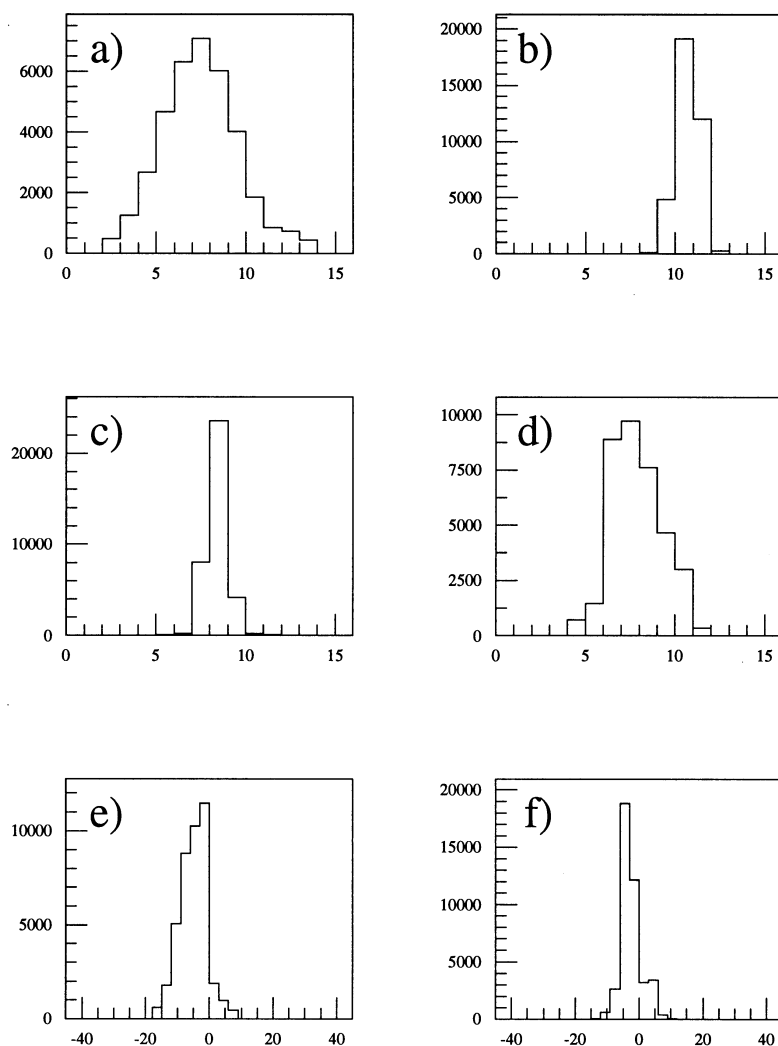


Рис. 2. Распределения профиля пучка на годоскопах: а) X1, б) Y1, в) X2, д) Y2 и в центре мишени: е) профиль по горизонтали; ф) профиль по вертикали.

1.2. Сцинтилляционные счетчики полного потока работали в интенсивном пучке частиц, и от них требовалась высокая эффективность регистрации заряженных частиц, падавших на мишень. Для решения этой задачи счетчики были обеспечены автономными источниками питания, расположенными на делителях фотоумножителей (ХР-2010 для S1 и S2, ФЭУ-87 для S3).

Источники питания представляли собой преобразователи первичного напряжения 36 В в высоковольтное напряжение $\leq 2,5$ кВ и напряжения подпитки последних четырех динодов ФЭУ. Рабочее напряжение на счетчиках устанавливалось с помощью блока ручного управления напряжением, находящимся в экспериментальном домике. Такая система питания запускающих счетчиков обеспечивала надежную их работу при интенсивности пучка в канале до 10^7 част./с. При загрузке пучком $3 \cdot 10^6$ част./с количество случайных совпадений в телескопе $S1 \cdot S2 \cdot S3$ не превышало 3%. Схемы источников питания и устройства управления представлены на рис. 3 и 4, соответственно.

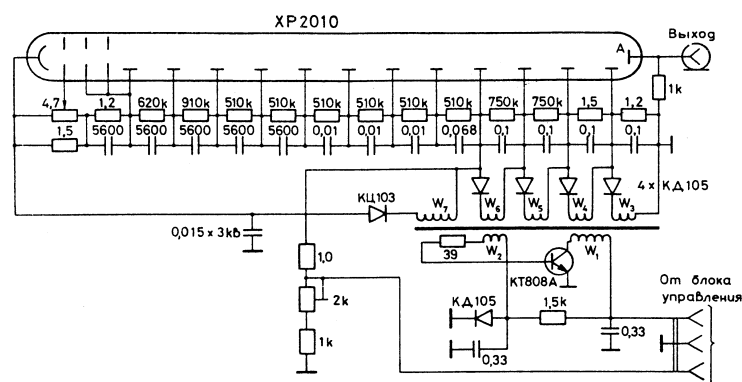


Рис. 3. Принципиальная схема источника питания запускающих счетчиков S1-S3.

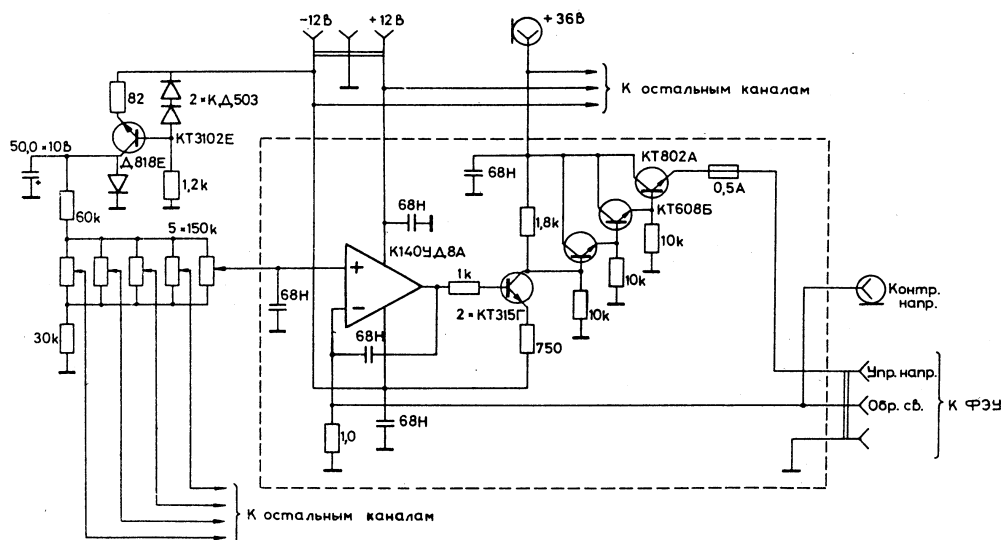


Рис. 4. Принципиальная схема блока ручного управления источниками питания запускающих счетчиков.

1.3. Два годоскопа Н1 и Н2, установленные перед поляризованной мишенью на расстоянии 8,7 и 3,2 м, соответственно, служили для выработки триггерного сигнала и определения координат падающих на мишень заряженных частиц. Годоскоп Н1 состоял из двух плоскостей, содержащих по 16 сцинтилляционных счетчиков с размерами $5 \times 5 \times 85$ мм³. В годоскопе применялись фотоумножители типа ХР2010. Питание фотоумножителей годоскопа осуществлялось от высоковольтного источника питания “Мел”. Годоскоп Н2 состоял из двух плоскостей, содержащих по 12 сцинтилляционных счетчиков с размерами $2 \times 5 \times 40$ мм³. Счетчики годоскопа были выполнены на базе малогабаритных фотоумножителей типа ФЭУ-60 и снабжены формирователями типа НПФ-12 [9]. Применение формирователей, имеющих низкий порог срабатывания, позволило отказаться от источников питания, осуществлявших “подпитку” последних четырех динодов ФЭУ, при сохранении высоких рабочих характеристик. При загрузке $3 \cdot 10^6$ част./с эффективность каждой плоскости составила 95% при общей эффективности 81%. При повышении интенсивности пучка до 10^7 част./с эффективность (суммарная) годоскопов резко падала (приблизительно до 40-45%), поэтому оптимальным режимом набора была интенсивность пучка в пределах $(3-5) \cdot 10^6$ част./с падающих протонов. Питание фотоумножителей годоскопа осуществлялось от двух высоковольтных источников БНВ-16П. Напряжение 6 В для питания формирователей подавалось от низковольтного источника БП-6.

2. Поляризованная мишень

В установке ПРОЗА-М использовалась поляризованная мишень замороженного типа (см. рис. 5) [10]. Такие мишени имеют ряд преимуществ перед мишенями с непрерывной динамической накачкой поляризации ядер. Хотя в обоих случаях при накачке поляризации используются большие магнитные поля ($> 2,5$ Т) с высокой однородностью $\Delta B/B \simeq \pm 10^{-4}$ во всем рабочем объеме мишени, в случае “замороженных” мишеней для удержания поляризации можно использовать достаточно слабые ($> 0,25$ Т) и с невысокой однородностью ($\sim 1\%$) магнитные поля. Оригинальный способ создания магнита, компактного по конструкции и сочетающего обе функции, накачки и удержания поляризации, был предложен в работе [11] и усовершенствован в дальнейшем для установки ПРОЗА-М в работе [12]. Магнит состоял из двух раздвижных полюсов с пермендюрowymi наконечниками (49 КФ), смыкавшихся при накачке поляризации до зазора 7,4 см и размыкавшихся при наборе статистики до 25 см. В результате обеспечивался большой полезный телесный угол. При этом ток в обмотках был неизменным и составлял 760 А, что обеспечивало поле 2,1 Т при накачке и 0,6 Т при удержании поляризации. Была достигнута максимальная поляризация мишени $87 \pm 3\%$. В среднем при наборе статистики она составляла 80%.

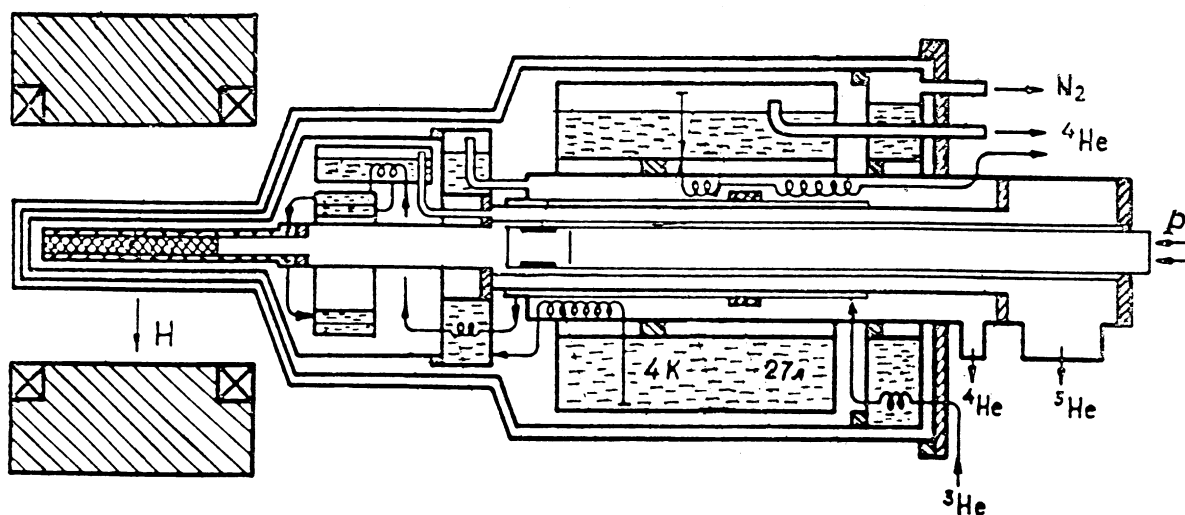


Рис. 5. Общая схема протонной поляризованной "замороженной" мишени.

Другой особенностью мишени является использование тонкостенного горизонтального криостата. В результате возникли два преимущества. Во-первых, возможность окружения рабочей области мишени охранными счетчиками с 2π -геометрией по азимуту. Во-вторых, из-за тонких боковых стенок (малых ядерных и радиационных длин) можно было регистрировать низкоэнергетические частицы (заряженные и фотоны). Эти качества мишени были эффективно использованы при измерении спиновых эффектов в эксклюзивных зарядообменных реакциях, а также в кумулятивных процессах. Мишень должна была обладать следующими характеристиками — выдерживать интенсивность падающего пучка до 10^7 прот./с и иметь большое время релаксации (порядка 1000 часов), большой телесный угол и минимум вещества на пути γ -квантов.

В качестве рабочего вещества использовался пропандиол ($C_3H_8O_2$) в виде шариков диаметром 2 мм с коэффициентом заполнения $\sim 60\%$, заключенных в тefлоновую ампулу диаметром 20 мм и длиной 200 мм. Ампула была помещена в криостат, способный обеспечить температуру $0,33^\circ\text{K}$ в режиме накачки поляризации до $0,016^\circ\text{K}$ в режиме заморозки. Общее потребление жидкого гелия не превышало 1,2 л/час в режиме динамической поляризации и 0,5 л/час в "замороженном" режиме. Набор статистики продолжался около двух суток, реверс поляризации мишени занимал около четырех часов. Мишень отработала надежно в течение двадцати лет.

3. Электромагнитные калориметры (ЭМК)

В экспериментах на установке ПРОЗА-М исследовалась асимметрия в инклюзивном рождении нейтральных (прежде всего π^0) мезонов по каналу распада на два гамма-кванта в центральной области и задней полусфере в с.ц.м. Энергия ре-

гистрируемых γ -квантов находилась в интервале от 1,5 до 25 ГэВ. Регистрирующая аппаратура состояла из трех электромагнитных калориметров (ЭМК1-ЭМК3). В качестве детекторов гамма-квантов использовались черенковские счетчики полного поглощения из свинцового стекла [13]. Отличительными особенностями таких счетчиков являются: высокое быстродействие, хорошее энергетическое разрешение и долговременная стабильность. Электромагнитные калориметры ячеистой структуры, собранные из таких счетчиков, позволяют в большом телесном угле регистрировать события с несколькими гамма-квантами и восстанавливать массы начальных нейтральных мезонов, распадающихся на них.

ЭМК1 состоял из 480 счетчиков с радиаторами из свинцового стекла ТФ1-00, уложенных в виде прямоугольной матрицы (24 вертикальных столбца по 20 счетчиков в каждом), ЭМК2 и ЭМК3 содержали по 144 счетчика (12 вертикальных столбцов по 12 счетчиков в каждом). Калориметры размещались с левой и правой стороны от пучка (см. рис. 1) на расстоянии около 7 м для ЭМК1 и около 3 м для ЭМК2 и ЭМК3 от центра мишени. Эти расстояния были выбраны из условия надежного разделения двух перекрывающихся ливней от γ -квантов распадных π^0 -мезонов с поперечными импульсами до 4 ГэВ/с в ЭМК1 и до 2 ГэВ/с в ЭМК2.

Центральные счетчики ЭМК1 и ЭМК2 располагались по отношению к центру мишени под углом $9,3^\circ$ в горизонтальной плоскости, что соответствовало для 70 ГэВ углу 90° в с.ц.м. двух начальных протонов. ЭМК3 располагался в области отрицательных x_F . Физический аксептанс ЭМК1 (геометрическая эффективность, умноженная на эффективность реконструкции) составил в максимуме $\sim 10\%$ при значениях поперечного импульса π^0 -мезонов от 2 до 3 ГэВ/с. Физический аксептанс ЭМК2 также был на уровне 10% в области p_T около 2 ГэВ/с, а ЭМК3 на уровне 2% в области x_F от -0,2 до -0,3 ГэВ/с и $p_T \sim 1,5-2,0$ ГэВ/с.

Все детекторы были изготовлены в ИФВЭ.

3.1. Конструкция

Внешний вид ЭМК1 показан на рис. 6. Счетчики калориметра были заключены в светонепроницаемый силовой корпус, внутри которого можно было разместить 1024 счетчика, уложенных в виде прямоугольной матрицы $32(X) \times 32(Y)$.

Для физического сеанса 1996 г. в калориметре были использованы 480 счетчиков. Внутри корпуса также располагались: система светодиодного мониторинга, контрольные счетчики, распределительные панели. Каждая распределительная панель обеспечивала работу двух соседних столбцов калориметра. Высоковольтные и сигнальные кабели от каждого счетчика включались в разъемы на панели. В точку подсоединения сигнального кабеля от счетчика на панели был подключен высокочастотный кабель, по которому сигнал со счетчика шел на амплитудный анализ и через сопротивление 1 кОм — на выходы дешифратора и входы пассивного линейного сумматора, предназначенного для организации триггера на суммарное энерговыделение.

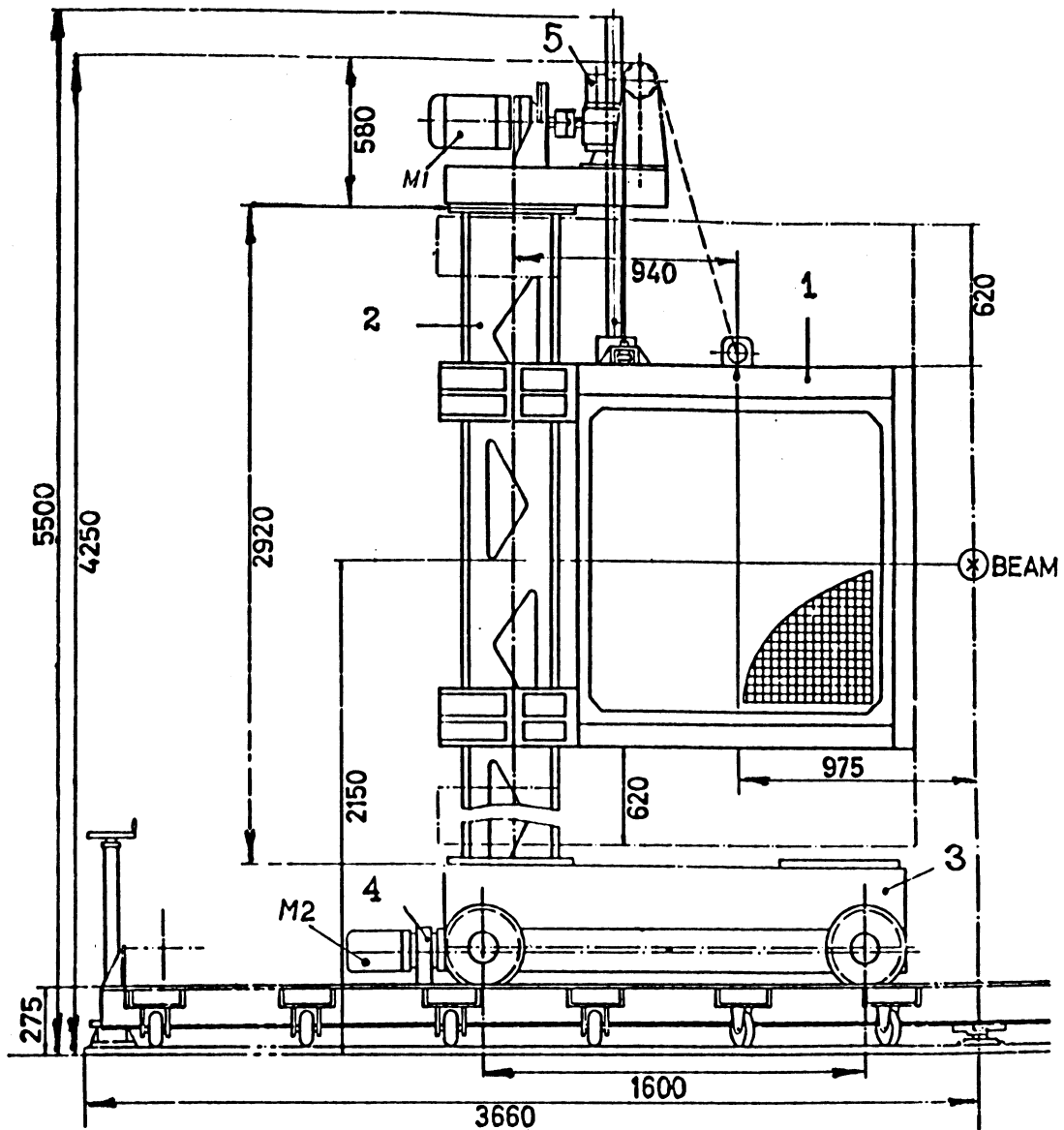


Рис. 6. Внешний вид ЭМК1: 1 — светоизолированный силовой корпус, зафиксированный на жесткой раме; 2 — направляющая колонна; 3 — горизонтальная платформа; 4,5 — датчики горизонтального и вертикального перемещений; M1, M2 — электродвигатели систем перемещения.

Конструкция калориметра позволяла перемещать светоизолированный корпус в горизонтальном и вертикальном направлениях поперек пучка. Таким образом, пучок мог сканировать все счетчики калориметра. Сканирование счетчиков контролировалось высокоточными устройствами контроля вертикального и горизонтального перемещений. Для управления перемещением использовался блок дистанционного управления [14], который имел два режима работы: перемещение от ручного пульта управления и автоматическое перемещение от ЭВМ. Блок-схема пульта дистан-

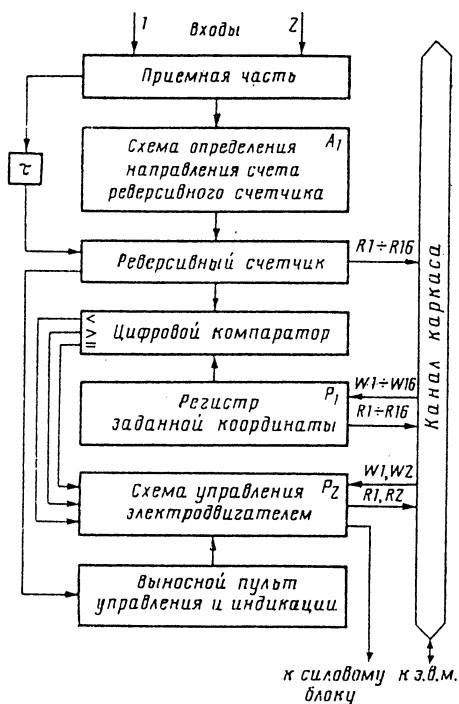


Рис. 7. Структурная схема блока автоматики управления движением.

3.2. Счетчики с радиаторами из свинцового стекла, источники высоковольтного питания

Счетчики электромагнитных калориметров были изготовлены из прозрачного свинцового стекла ТФ1-00, имевшего следующие характеристики:

- плотность — $3,86 \text{ г/см}^3$;
- радиационная длина $X_0 = 2,5 \text{ см}$;
- критическая энергия — $15,8 \text{ МэВ}$;
- показатель преломления $n=1,6522$.

Счетчики были обернуты алюминизированным майларом толщиной 20 мкм. Номинальные размеры счетчика были $38 \times 38 \times 450 \text{ мм}^3$ (18 радиационных длин). Черенковский свет, возникающий в стекле от электромагнитного ливня, регистрировался 12-диодным ФЭУ-84-3, имевшим сурьмяно-калиево-цезиевый фотокатод типа S-200 с максимумом квантовой чувствительности на длине волны 410 мм. Диаметр фотоумножителя 34 мм, длина 100 мм. Конструкция счетчика показана на рис. 8а.

Для обеспечения стабильной работы ФЭУ в линейном режиме использовались разработанные и изготовленные в ИФВЭ специальные высокостабильные высоковольтные источники питания [15]. Высоковольтные источники с регулируемым напряжением в пределах $500 \div 2000 \text{ В}$, рабочим током $I=1 \text{ А}$ при долговременной

ционного управления приведена на рис. 7. При работе в любом режиме текущая координата отображалась на индикаторе, скорость перемещения по X и Y составила соответственно 9,5 и 4 мм/с. Точность установки горизонтальной платформы составляла $\pm 0,2 \text{ мм}$.

ЭМК2 и ЭМК3 представляли собой идентичные блоки, содержавшие матрицы 12×12 счетчиков из свинцового стекла ТФ1-00. Внешние размеры корпусов равны $700 \times 940 \times 1110 \text{ мм}^3$. Внутреннее устройство ЭМК2 и ЭМК3 подобно устройству ЭМК1, поэтому подробно не описывается.

Оба блока калориметров ЭМК2 и ЭМК3 были установлены вплотную друг к другу на одной подставке, имевшей автоматизированное управление.

стабильности $\Delta V/V \leq \pm 1 \cdot 10^{-4}$ и источники подпитки для четырех последних диодов ФЭУ с $V_{раб} = 100 \div 250$ В, $I_{раб} \leq 300$ мА и $\Delta V/V \leq \pm 1 \cdot 10^{-4}$.

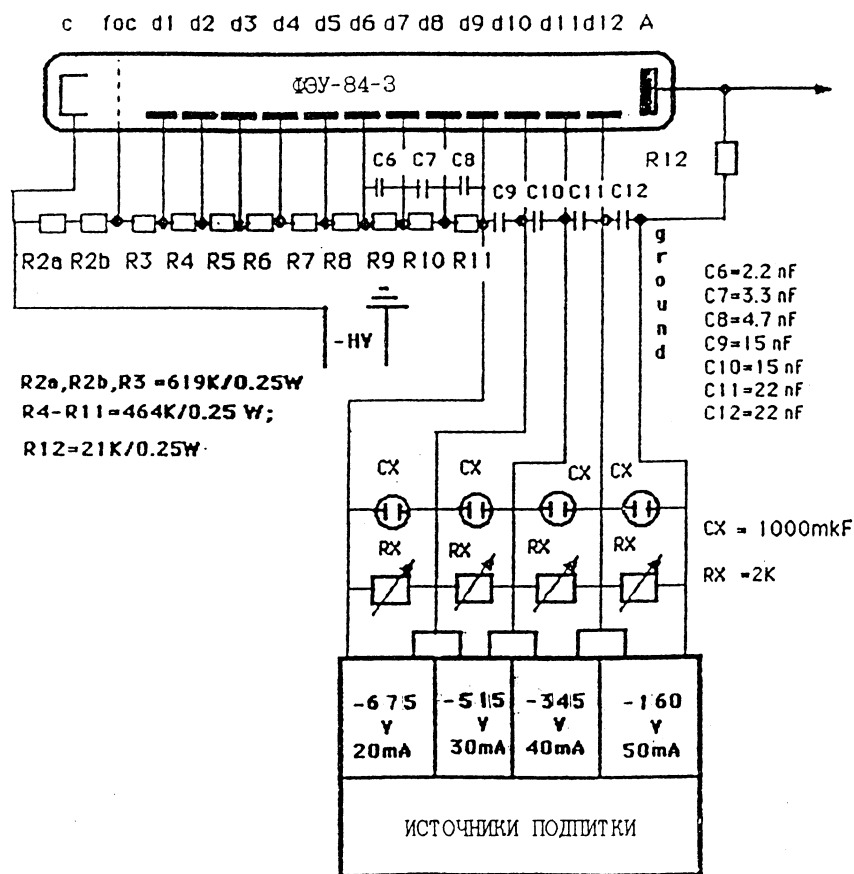
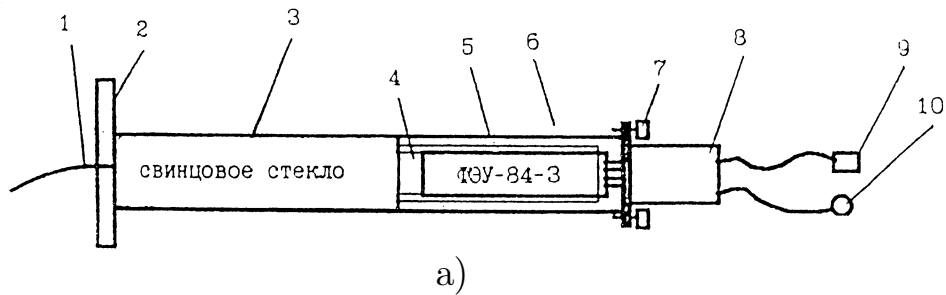


Рис. 8. а) Конструкция счетчика: 1 — световодное волокно; 2 — алюминиевая плита; 3 — алюминизированный майлар; 4 — силгардовый световод; 5 — магнитный экран; 6 — пластиковая трубка; 7 — прижимные винты; 8 — высоковольтный делитель; 9 — высоковольтный разъем; 10 — сигнальный разъем. б) Схема высоковольтного делителя ФЭУ и подпитки.

Источники были выполнены по двухконтурной схеме. Первый, тиристорный, контур служил для регулирования выходной мощности. Регулирование осуществлялось изменением фазового включения тиристора. Тиристорный регулятор поддерживал постоянным среднее значение напряжения на коллекторе регулирующего транзистора второго контура на уровне 120 В для высоковольтных источников и 50 В для источников подпитки с точностью около 1%. Второй, транзисторный, контур был осуществлен по схеме последовательного включения регулирующего элемента. Он осуществлял стабилизацию и подавление пульсаций выходного напряжения. Источники питания имели защиту от короткого замыкания на выходе.

Для питания счетчиков ЭМК1 использовался один высоковольтный источник и четыре источника подпитки. Счетчики ЭМК2 и ЭМК3 питались от другого такого же комплекта источников питания.

На рис. 8б показана схема высоковольтного делителя ФЭУ и подпитки.

Для регулирования высоковольтного напряжения на ФЭУ, установленных в ЭМК1, был специально разработан и изготовлен в ИФВЭ механический манипулятор, программно управляемый от ЭВМ [16]. Он состоял из матрицы 32×32 подстроечных резисторов типа СП-37Б (1 Вт, 2,2 МОм), двухкоординатной каретки, цангового зажима оси резисторов, системы аппаратного и программного обеспечения. Манипулятор был рассчитан на регулирование высоковольтного напряжения на 1024 ФЭУ в пределах 250 В. (В физическом сеансе 1996 г. использовались 480 каналов манипулятора.)

Функциональная схема программного управления манипулятором, реализованная на установке ПРОЗА-М, показана на рис. 9. ЭВМ по каналу СУММА передавала командные коды в блоки локальных систем управления (БУ): перемещения платформ по координатам X и Y , подъема и опускания цанги (координата Z) и вращения цанги (координата φ). После выдачи управляющего сигнала функции управления манипулятором передавались от ЭВМ к БУ соответствующей локальной системы. БУ вычисляли управляющую функцию, которая в виде широтно-модулированных импульсов через импульсный усилитель мощности поступала на исполнительный сервопривод.

Конструктивно все блоки управления были размещены в каркасе СУММА и занимали два одиночных и два двойных места. Усилители мощности были размещены в отдельном каркасе ВИШНЯ и имели автономное питание. Манипулятор был установлен на корпусе ЭМК1. Высоковольтное питание от высоковольтного источника подводилось к нему одним кабелем типа РК-50-4-12. От манипулятора высоковольтное напряжение разводилось на делители ФЭУ проводом МГШВ-0,14 длиной 1,5 м.

При подборе рабочего напряжения счетчиков в электронном пучке с импульсом 26 ГэВ/с на каждый счетчик в среднем затрачивалась 21 с (включая паузы между циклами).

Для управления и контроля за рабочим напряжением электромагнитных калориметров ЭМК2 и ЭМК3 применялся распределительный блок с механическим регулированием на 300 каналов. Изменение напряжения на ФЭУ в каждом канале

осуществлялось вручную с помощью многооборотных резисторов и контролировалось цифровым вольтметром.

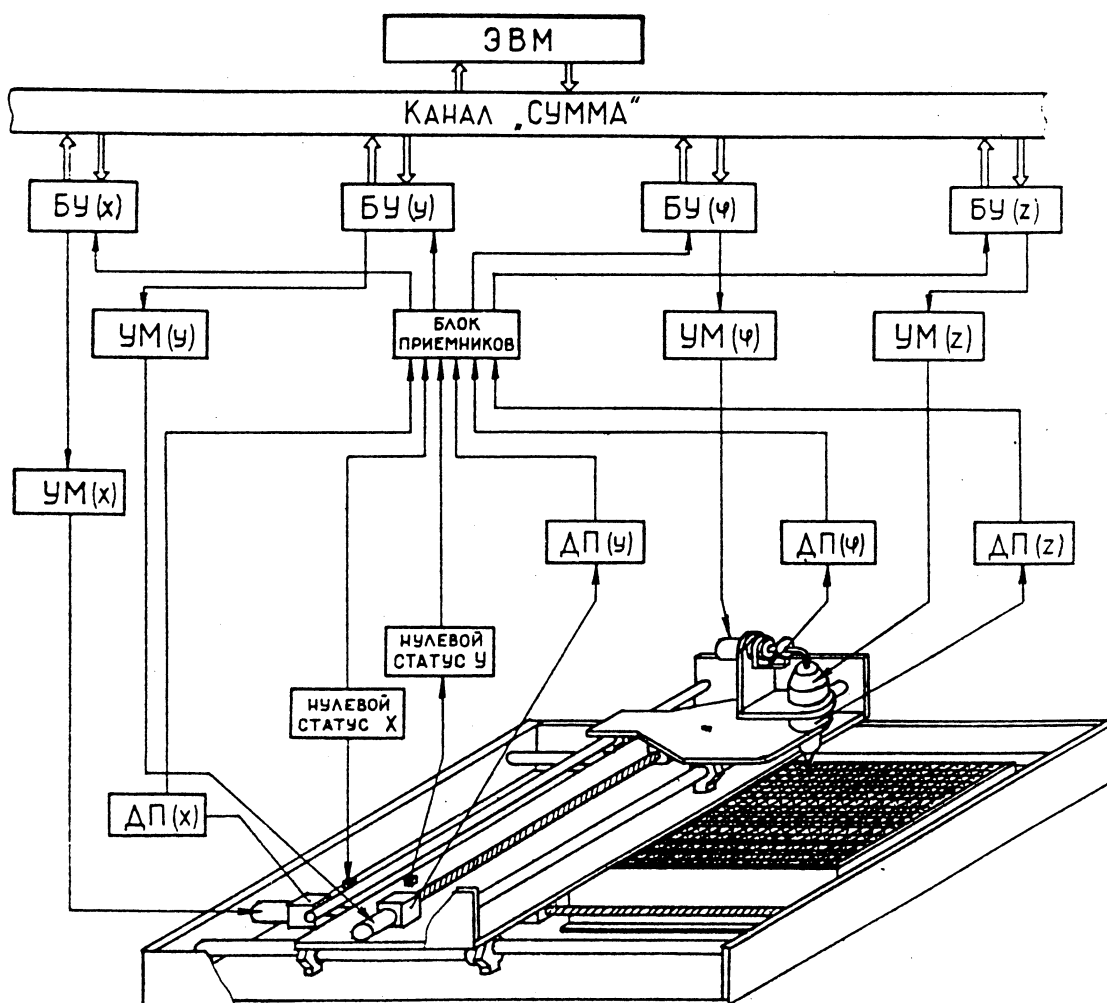


Рис. 9. Функциональная схема системы программного управления манипулятором: БУ(x), БУ(y), БУ(z), БУ(ϕ) — блоки локального управления по координатам x, y, z, ϕ ; УМ(x), УМ(y), УМ(z), УМ(ϕ) — усилители мощности локальных систем управления по соответствующим координатам; ДП(x), ДП(y), ДП(z), ДП(ϕ) — датчики положения.

4. Мониторинг энергетической шкалы

При измерении асимметрии на поляризованной мишени большое значение имеет стабильность энергетической шкалы детектора, иначе в результате измерения может войти большая ложная асимметрия. Появление большой ложной асимметрии связано прежде всего с тем, что поляризованные атомы водорода дают в сечение малый вклад ($\approx 11\%$) при глубоконеупругом рассеянии на большие углы. С учетом того, что средняя поляризация мишени составляет порядка 80%, величина фактора

разбавления может достигать ~ 10 . В нашей кинематической области измерений инвариантные сечения сильно зависели от поперечного импульса $\sigma \approx e^{-4p_T}$. Представим себе, что энергетическая шкала при измерениях на поляризованной мишени с разными знаками поляризации систематически смещена на 0,5%. Это приведет к изменению в сечении на 4% при $p_T = 2$ ГэВ/с и, с учетом фактора разбавления, к ложной асимметрии 20%. Поэтому для получения надежного результата и небольшой ложной асимметрии необходимо следить за стабильностью энергетической шкалы детектора с точностью порядка 10^{-3} .

Контроль за стабильностью энергетической шкалы осуществлялся следующими способами:

- 1) мониторингом каждого счетчика электромагнитного детектора при помощи светодиода;
- 2) мониторингом светодиода;
- 3) дополнительной калибровкой на массу π^0 -мезона.

Мониторинг при помощи светодиода позволяло следить за стабильностью электронного тракта (усилением фотоумножителя, потерями в кабельных трассах, коэффициентом преобразования АЦП) каждого канала.

Для определения коэффициентов, связывающих амплитуду в каждой ячейке детектора с энергией, выделившейся в этой ячейке, проводилась специальная калибровка детекторов на электронном пучке.

Мониторинг самого светодиода необходимо ввиду того, что амплитуда сигнала самого светодиода также может зависеть от внешних факторов и поэтому необходимо следить за стабильностью этой амплитуды.

Наконец, на уровне обработки данных можно было провести дополнительную перекалибровку детектора по массе π^0 -мезона.

С точки зрения аппаратуры, нас интересуют два первых пункта, которые мы рассмотрим более подробно.

Система мониторинга счетчиков детектора ЭМК1 была построена следующим образом: весь детектор (480 каналов) был разбит на 4 части и каждая часть детектора засвечивалась своим светоизлучающим диодом зеленого цвета. Спектральная характеристика зеленого светодиода имела хорошее перекрытие со спектральной чувствительностью ФЭУ-84, который использовался для регистрации черенковского света со свинцового стекла. Для засветки 120 каналов одним светоизлучающим диодом использовался мощный генератор, выполненный по схеме повторителя напряжения. (Авторское свидетельство N 1799220.)

Для устранения нестабильности световых выходов при изменении питающих напряжений использовался источник опорного напряжения, определявший амплитуду выходных импульсов генератора.

Форма импульса на светодиоде формировалась коаксиальной линией, включенной на входе повторителя напряжения. (Заявка на изобретение N 96101891/20 от 31.01.96.)

Для контроля стабильности каждого из 4 светодиодов были установлены отдельно два контрольных ФЭУ с размещенными на их поверхности кристаллами

ортоаллюмината иттрия с α -источником, и два волокна с каждого из 4 светодиодов были заведены на каждый из контрольных ФЭУ. Управление поджигом каждого драйвера по отдельности осуществлялось подачей опорного напряжения на нужный драйвер.

Описанная выше новая автоматизированная система мониторинга электронных трактов счетчиков ЭМК1 надежно отработала в течение месячного физического сеанса 1996 года. Информация собиралась и записывалась с помощью отдельной от основной системы сбора данных. Анализ этих мониторинговых данных показал, что следует ожидать от этой системы точности контроля за стабильностью энергетической шкалы ЭМК1 на уровне 0,1% за один час измерений. Это означает, что систематические ошибки измерений асимметрии, обусловленные нестабильностью энергетической шкалы, не превысили, например, 4% для характерного поперечного импульса π^0 -мезона 2 ГэВ/с, что исключительно важно для поляризационных экспериментов.

Детекторы ЭМК2 и ЭМК3 мониторировались с помощью красных светодиодов, от которых свет передавался к каждому счетчику с помощью сцинтилляционных волокон. Дополнительная калибровка на массу π^0 -мезона позволяла контролировать энергетическую шкалу на уровне 0,15% за 10 часов измерений.

5. Калибровка электромагнитных калориметров

Калибровка калориметров проводилась на пучке электронов с импульсом 26,6 ГэВ/с и заключалась в определении коэффициентов, переводивших амплитуду сигнала каждого счетчика A_{ij} в энергию E_{ij} .

$$E_{ij} = c_i A_{ij}, \quad (1)$$

где i — номер счетчика, j — номер события. Величина c_i — чувствительность счетчика — зависела от коэффициента усиления всего электронного тракта, включавшего в себя фотоумножитель (ФЭУ) и амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП). Для мониторинга коэффициентов усиления тракта использовался светодиод, свет от которого с помощью волоконной оптики передавался на каждый ФЭУ и давал сигнал с амплитудой L_i .

Если есть стабильный источник света, то

$$E_{ij} = \frac{k_i}{L_i} A_{ij}, \quad (2)$$

где k_i — эквивалентная энергия i -го светового сигнала. Это позволяет исключить долговременную нестабильность коэффициента усиления тракта, так как A_{ij} и L_i изменяются подобным образом. Метод определения калибровочных коэффициентов c_i и k_i , использовавшийся на установке ПРОЗА-М, подробно описан в работе [17].

Во время калибровки калориметров в марте 1996 года импульсный разброс пучка, по оценкам, составил $\sigma(E)/E = 2,5\%$. На рис. 10а представлен суммарный энергетический спектр по 288 счетчикам калориметров ЭМК2 и ЭМК3. Видно, что полное энергетическое разрешение $\sigma(E)/E$ составило 3,9%. Если вычесть квадратично импульсный разброс пучка, то энергетическое разрешение ЭМК2 и ЭМК3 в сумме составило $\sigma(E)/E = 3,1\%$.

Следует отметить, что в ЭМК2 и ЭМК3 более 30% всех счетчиков расположены на границах калориметров, где калибровочные коэффициенты определяются с бóльшими погрешностями, чем в центре детекторов из-за поперечной утечки электромагнитных ливней. Для счетчиков, находившихся на краю, при помощи специального алгоритма с учетом формы ливня находилась энергия, вытекавшая за пределы детектора. На рис. 10б представлен типичный энергетический спектр для ливней, полностью разместившихся внутри калориметра ЭМК2. Энергетическое разрешение на $\sim 20\%$ лучше, чем полное, и составляет $\sigma(E)/E = 2,5\%$ после учета импульсного разброса пучка, что характерно для электромагнитных калориметров из свинцового стекла при таких энергиях.

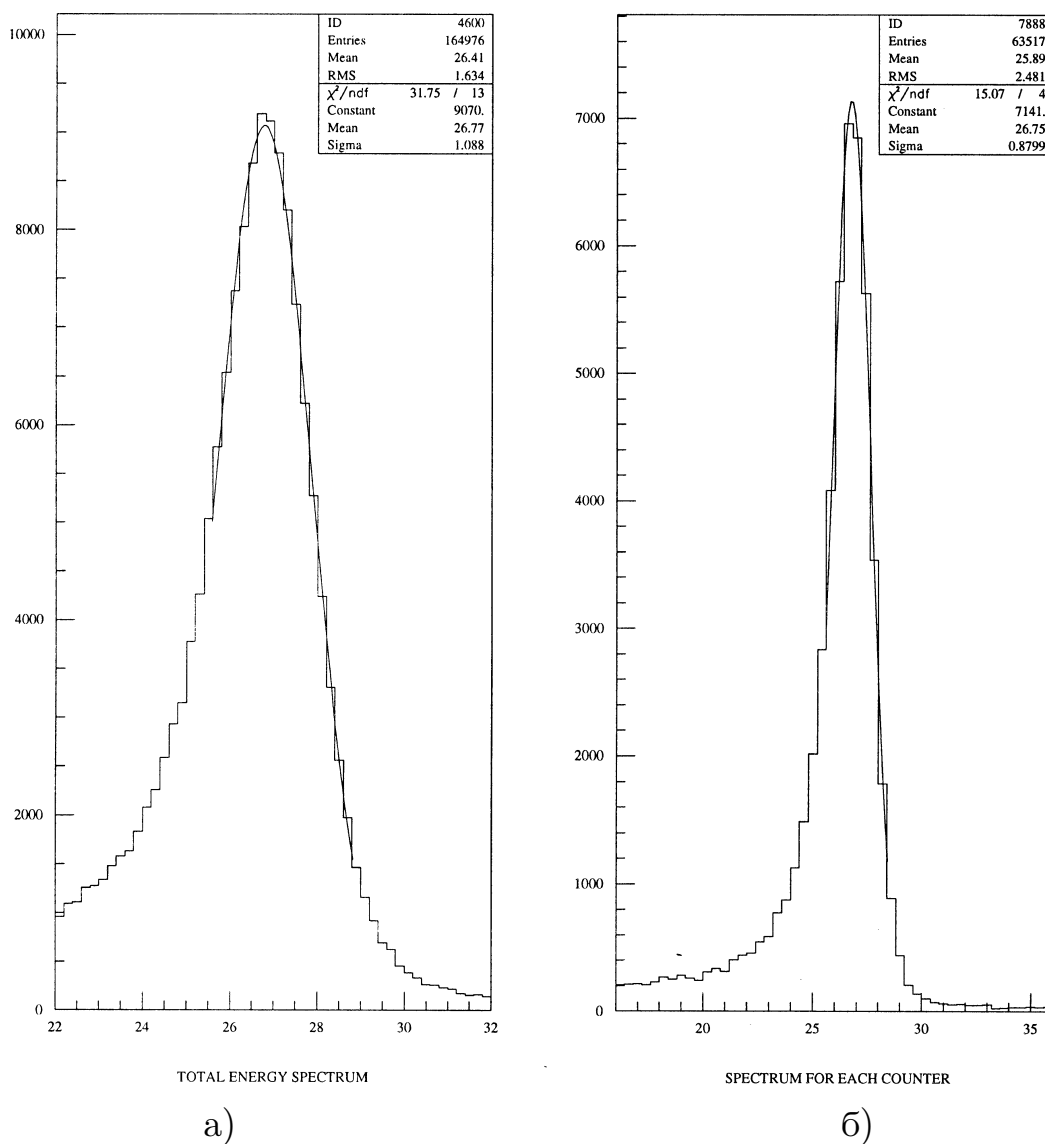


Рис. 10. а) Суммарный энергетический спектр по 288 счетчикам калориметров ЭМК2 и ЭМК3. б) Характерный энергетический спектр для области калориметра вдали от границ.

В табл. 1 представлены значения калибровочных коэффициентов c_i (в МэВ/канал) для трех калориметров. Видно, что чувствительность счетчиков, в среднем для трех калориметров, составила около 10 МэВ на один канал АЦП.

Таблица 1. Значения калибровочных коэффициентов c_i для ЭМК1, ЭМК2 и ЭМК3

Калориметр	Коэф.	Минимум	Максимум	Среднее	rms
ЭМК1	c_i	3,0	13,9	8,5	1,5
ЭМК2	c_i	7,7	18,1	11,5	1,8
ЭМК3	c_i	8,0	19,1	12,2	1,7

6. Электронная аппаратура, триггер на большой поперечный импульс p_T и система сбора данных

Электронная аппаратура состояла из унифицированных модулей наносекундной электроники, блоков амплитудных преобразователей, пересчетных приборов, регистров и другой вспомогательной аппаратуры СУММА [18]-[19], которая размещалась в семи каркасах. Считывание в ЭВМ производилось с пяти каркасов одной ветви. Функционально электроника установки разделялась на 4 части: пучковую, триггерную, спектрометрическую и обслуживающую. В 1995-1996 годах на установке была полностью заменена регистрирующая электроника амплитудного анализа.

Использование новой 12-битной электроники (аналого-цифровых преобразователей П-267 [20]) позволило более точно определять энергию ливней. В старых 10-битных АЦП чувствительность составляла порядка 30 МэВ на канал (в новых 10 МэВ), что приводило к потере энергии — малая энергия в счетчиках (до 100 МэВ) терялась. Использование новых АЦП позволило более точно восстановить энергию. На рис. 11 (вверху) изображены энергетические спектры электронов для сборки 3×3 ячейки (эквивалент старой электроники — сплошной линией) и сборки 5×5 ячеек (прерывистой линией). Внизу изображены утечки ливня за сборку 3×3 ячейки. Средние утечки составляют 4,2%.

Массовые спектры показаны на рис. 12. Данные на рисунке приведены для следующих областей (см. табл. 2).

Таблица 2.

Рисунок	Калориметр	Энергия, ГэВ	p_T	x_F	Среднее	rms
a	ЭМК1	12	1,75	0,03	136,2	11,6
b	ЭМК1	16,6	2,25	0,07	141,6	13,8
c	ЭМК2	10	1,75	-0,025	136,3	17,1
d	ЭМК3	3,5	1,25	-0,2	115,1	12,8

Массовые спектры фитировались функцией Гаусса, а комбинаторный фон — полиномом 3-й степени.

На старой электронике разрешение по массе составляло $\sigma = 22$ МэВ.

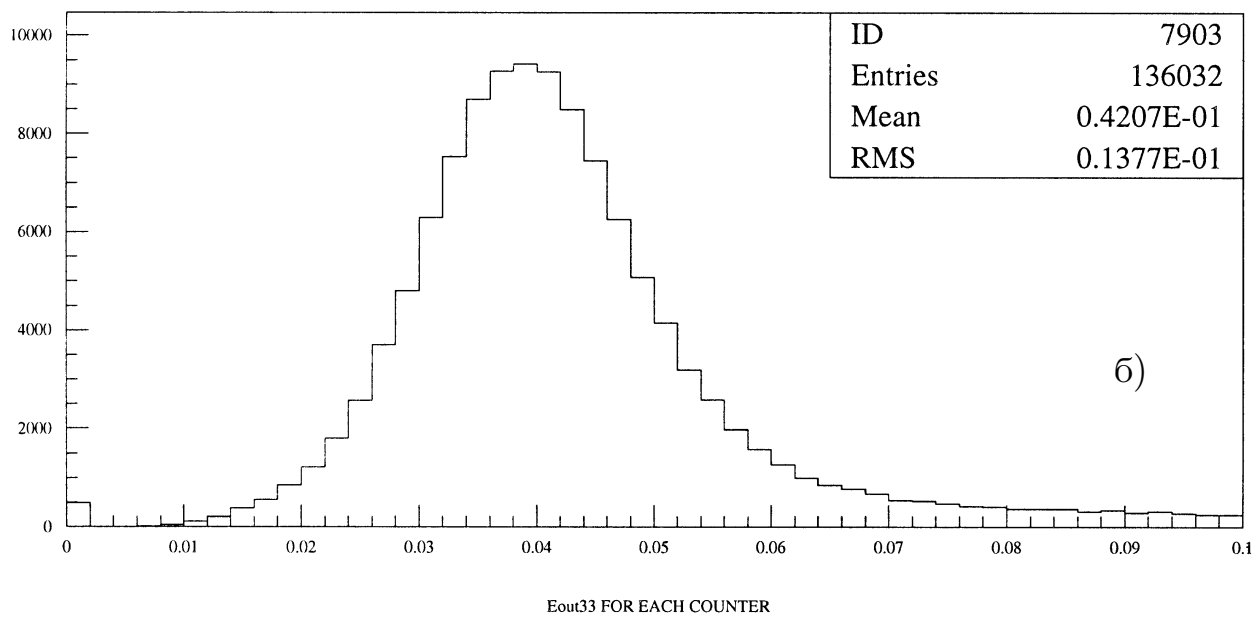
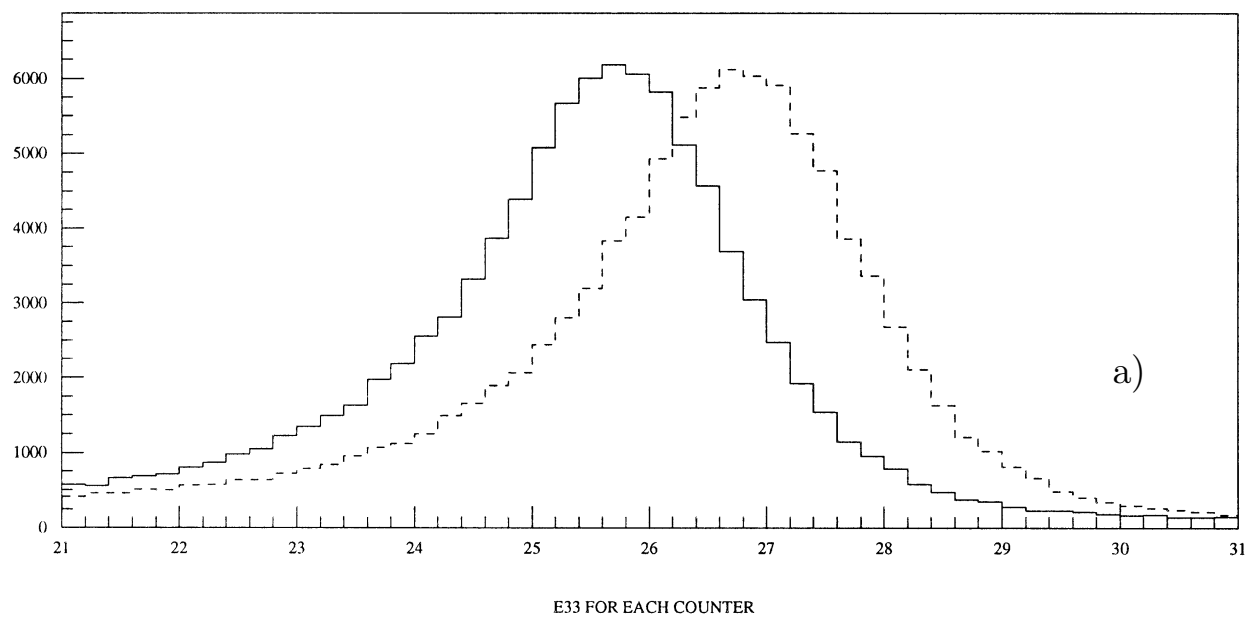


Рис. 11. а) Энергетические спектры электронов, регистрируемых в области 3×3 счетчика (сплошная линия) и 5×5 счетчиков (пунктирная линия). б) Распределение части энергии, вытекающей за пределы области 3×3 счетчика.

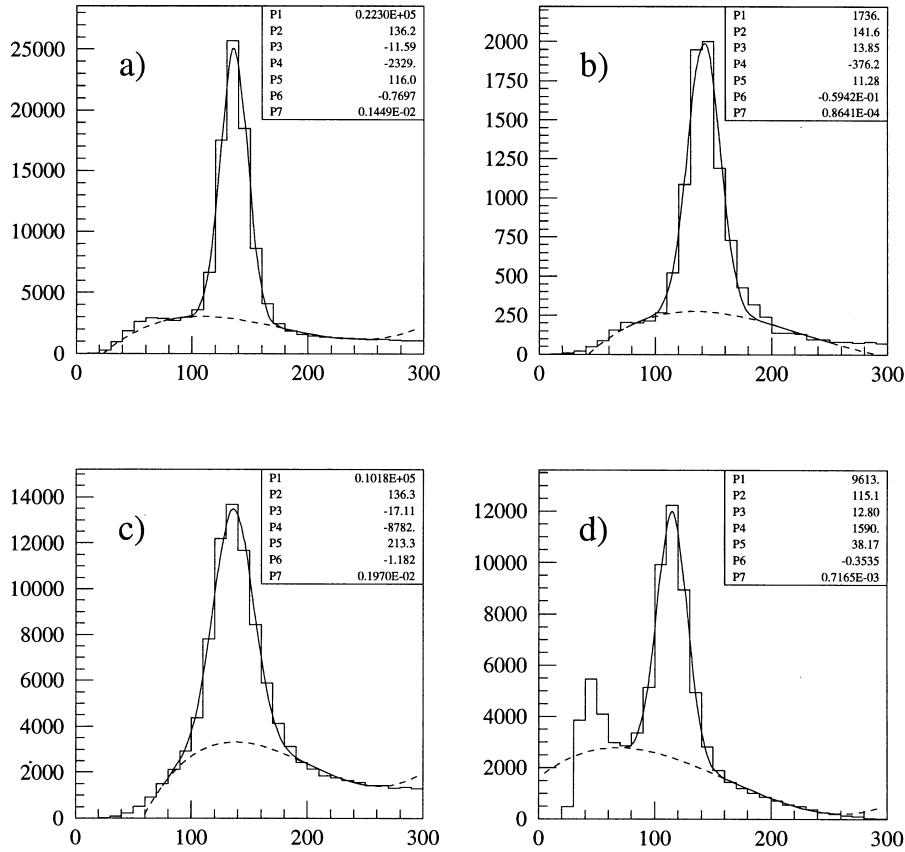


Рис. 12. Массовые спектры π^0 -мезонов на трех калориметрах (детали в тексте).

Увеличение ширины массового спектра для ЭМК2 связано с особенностями алгоритма при восстановлении перекрывающихся между собой ливней, а в этом детекторе число таких ливней велико. Было обнаружено, что масса восстанавливаемых мезонов зависит от их энергии (при низких энергиях масса меньше из-за порога электроники). Именно поэтому в ЭМК3 масса равняется 115 МэВ, так как в этом детекторе относительные потери энергии максимальны из-за низкой регистрируемой энергии самих π^0 -мезонов ($\sim 1,5-4$ ГэВ). Зависимость массы от энергии показана на рис. 13. Для восстановления правильной массы энергия до 5 ГэВ (E_c) поправлялась в E_H по фор-

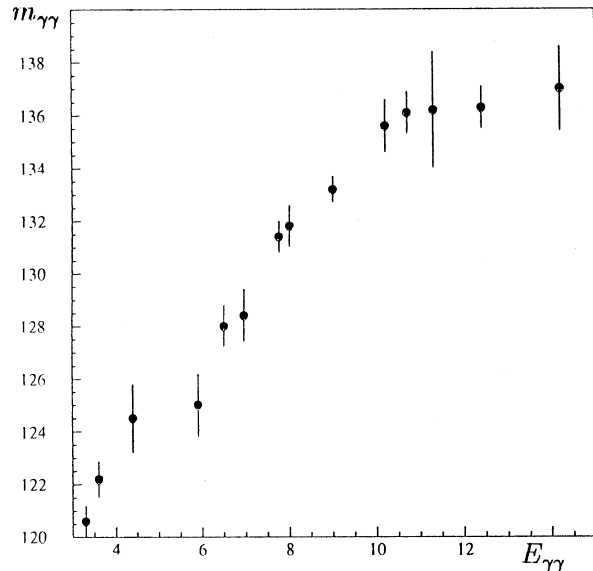


Рис. 13. Зависимость величины массы π^0 -мезона от его регистрируемой в калориметре энергии.

муле $E_n = E_c(1 + 0,41(5 - E_c))$ для $(5 - E_c) > 0$. После поправки энергетической шкалы масса на ЭМКЗ стала близка к табличному значению.

Сечение образования нейтральных мезонов под 90% в с.ц.м., как было отмечено выше, имеет крутую зависимость от p_T , пропорциональную $\exp(-4p_T)$. Для отбора событий с большими p_T была создана триггерная система для подавления событий с малыми p_T . Схемы триггерных систем, использовавшиеся для ЭМК1-ЭМКЗ, были аналогичны и различались лишь числом элементов. Схема триггера для ЭМК1 представлена на рис. 14. Суммирование и усиление импульсов от 20 счетчиков, принадлежавших одному столбцу калориметра, выполнялось одним модулем, установленным на распределительной панели данного столбца. Такая процедура выполнялась для каждого из 24 столбцов ЭМК1 (12 для ЭМК2 и ЭМК3). Вторым каскадом системы являлся линейный сумматор вертикальных сборок с учетом весовых коэффициентов, пропорциональных синусу среднего угла рассеяния (только для ЭМК1 и ЭМК2) для данного вертикального столбца (расстояние от оси пучка до данного столбца), т.е. $E \sin \Theta$, где E — энергетический вклад каждой вертикальной сборки, $\sin \Theta$ — синус угла рассеяния. Для ЭМК3 применялся триггер на суммарное энерговыделение в калориметре.

Далее сигнал разветвлялся в линейном разветвителе на два канала. Один из выходных сигналов разветвителя подавался на вход АЦП, что позволяло производить контроль за энерговыделением в ЭМК и работой триггера. Сигнал со второго выхода разветвителя через децибелльный ослабитель поступал на вход порогового устройства, что позволяло установить требуемый порог по энергии p_T срабатывания триггерного устройства. Для принятия окончательного решения сигнал НРТ1 поступал в блок логики триггера установки.

Для увеличения доли полезной информации, записываемой на магнитную ленту, был разработан и введен в строй цифровой процессор для триггера второго уровня. Использовался специализированный контроллер, позволявший считывать информацию из АЦП, вычитать пьедесталы и производить вычисление суммы E_o взвешенных амплитуд считываемой информации.

Величина E_o вычисляется по формуле

$$E_o = \sum_i A_i C_i,$$

где A_i — значение амплитуды, C_i — весовой коэффициент, i — номер канала.

Вычисление величины E_o выполнялось во время считывания амплитуд из АЦП. Выработка решения происходила через 200 нс после вычитывания последнего канала АЦП. При положительном решении триггера информация переписывалась в буферную память, при отрицательном обнулялась.

Контроллер, позволявший цифровым способом быстро определять значение p_T , использовался для ЭМК2 для части статистики и в случае отрицательного решения информация с данного крейта (данного детектора) не записывалась на магнитную ленту.

Система сбора данных представляла из себя двухмашинный комплекс связанных между собой ЭВМ СМ-4-МЕРА (на основе процессора “Электроника-125”) и

СМ-1420. На ЭВМ СМ-4-МЕРА с полной памятью 256 Кбайт информация принималась и записывалась на магнитную ленту. Аппаратная скорость передачи данных в ЭВМ СМ-4-МЕРА была 400 Кб/с. Для приема данных в этом компьютере был отведен буфер длиной 92 Кбайт. Примерно раз в пять циклов У-70 информация передавалась на ЭВМ СМ-1420 для контроля и обработки "в линию". Скорость передачи данных из ЭВМ СМ-4-МЕРА в ЭВМ СМ-1420 (аппаратная и программная вместе) составляла 6-7 Кб/с.

При обработке "в линию" проводилась проверка качества работы регистрирующей электроники, осуществлялся контроль за стабильностью энергетической шкалы и поведением пучка.

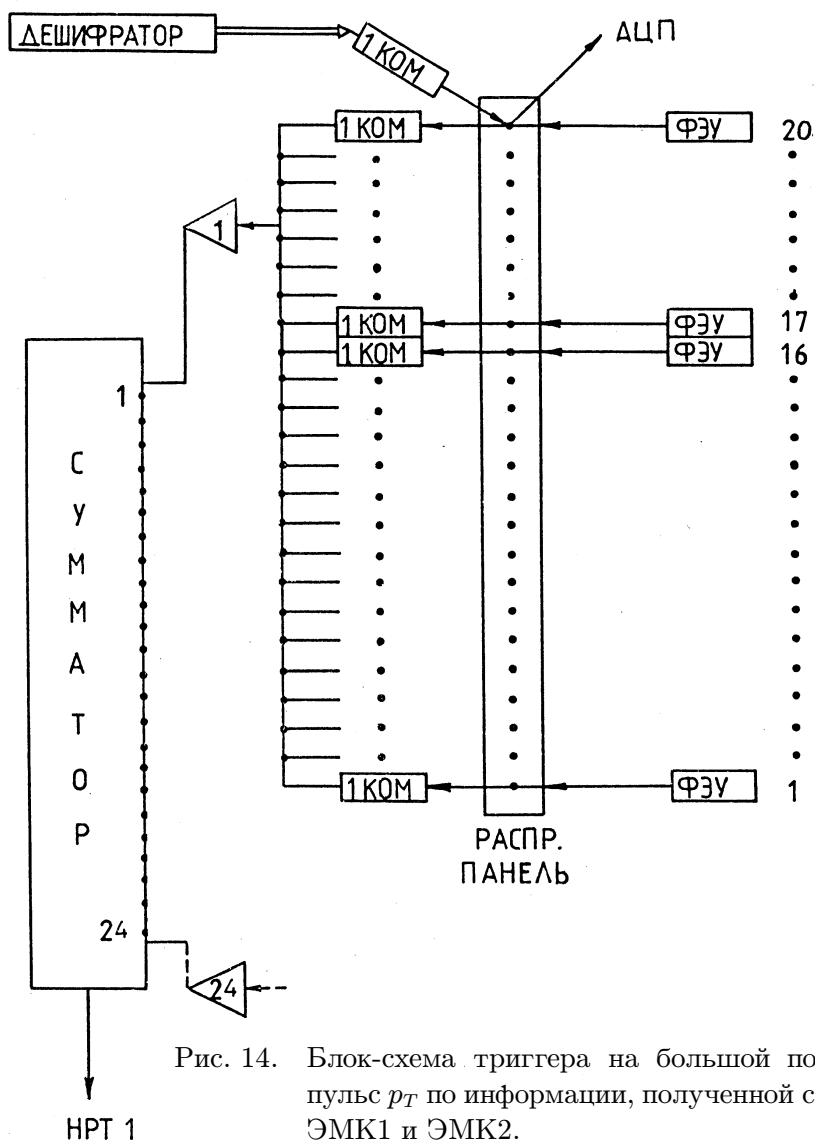


Рис. 14. Блок-схема триггера на большой поперечный импульс p_T по информации, полученной с калориметров ЭМК1 и ЭМК2.

Заключение

На описанной в работе установке ПРОЗА-М были проведены измерения односпиновой асимметрии в инклюзивных реакциях в разных конфигурациях.

Установка надежно отработала в течение последних десяти лет и показала хорошие эксплуатационные качества. За это время были получены интересные физические результаты [21]-[24].

Модифицированная установка ПРОЗА-М в той конфигурации и с теми системами — мониторингования, регистрирующей и триггерной электроники, которые описаны в данной работе, успешно отработала в физическом сеансе 1996 года. Записано на ленту около 23 миллионов событий, 80% из которых получено на поляризованной мишени. Данные в настоящее время обрабатываются.

Авторы глубоко признательны за участие в создании установки ПРОЗА-М сотрудникам ИФВЭ В.А.Сенько, А.Н.Сытину и И.Н.Чурину из ОИЯИ.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 97-02-16010).

Список литературы

- [1] Аввакумов И.А. и др. // ПТЭ, 1987, №5, с.46.
- [2] Arokin V.D. et al. // Nucl. Phys., 1985, v.B255, p.253.
- [3] Arokin V.D. et al. // Zeit. Phys., 1987, v.C35, p.173.
- [4] Аввакумов И.А. и др. // ЯФ, 1985, т.42, с.1146.
- [5] Апокин В.Д. и др. // ЯФ, 1988, т.47, с.727.
- [6] Аввакумов И.А. и др. // ЯФ, 1985, т.42, с.152.
- [7] Arokin V.D. et al. // Phys. Lett., 1990, v.B243, p.461.
- [8] Aseev A.A. et al. // Nucl. Instr. Meth., 1993, v.A330, p.39.
- [9] Балдин Б.Ю. и др. — Препринт ИФВЭ 79-20, Серпухов, 1979.
- [10] Борисов Н.С. и др. — Препринт ОИЯИ 1-80-98, Дубна, 1980.
- [11] Бурхин М.М. и др. // ПТЭ, 1981, №1, с.30.
- [12] Грачев О.А. и др. // ПТЭ, 1993, №3, с.189.
- [13] Akopdjanov G.A. et al. // Nucl. Instr. Meth., 1977, v.140, p.441;
Binon F. et al. // Nucl. Instr. Meth., 1981, v.188, p.507.
- [14] Аввакумов И.А. и др. — Препринт ИФВЭ 86-66, Серпухов, 1986.

- [15] Василевский А.В. и др. — Препринт ИФВЭ 84-2, Серпухов, 1984.
- [16] Беликов Н.И. и др. — Препринт ИФВЭ 86-65, Серпухов, 1986.
- [17] Адамс Д.Л. и др. — Препринт ИФВЭ 91-99, Протвино, 1991.
- [18] Бушнин Ю.Б. и др. — Препринт ИФВЭ 72-49, Серпухов, 1972.
- [19] Алферова О.И. и др. // ПТЭ, 1975, №4, с.56.
- [20] Зимин С.А. и др. — Препринт ИФВЭ 93-50, Протвино, 1993.
- [21] Апокин В.Д. и др. // ЯФ, 1989, т.49, с.156.
- [22] Апокин В.Д. и др. // ЯФ, 1989, т.49, с.165.
- [23] Апокин В.Д. и др. // ЯФ, 1989, т.50, с.695.
- [24] Arokin V.D. et al. // Phys. Lett., 1990, v.B243, p.461.

Рукопись поступила 16 июня 1997 г.

В.Д.Апокин, Н.И.Беликов, А.Н.Васильев и др.

Установка ПРОЗА-М для исследования односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании нейтральных мезонов на ускорительном комплексе ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 18.06.97. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.
Печ.л. 2,87. Уч.-изд.л. 2,2. Тираж 150. Заказ 1165. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

