

С 344.1  
Н 623



ЛЕКЦИИ  
ДЛЯ МОЛОДЫХ  
УЧЕНЫХ

Н. М. Никитюк

**Электронные методы  
экспериментальной физики  
высоких энергий**

**ДУБНА**

ИЛ № 102

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛЕКЦИИ ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

P1-87-909

Выпуск 42

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- А.Н.Сисакян — председатель
- А.Т.Филиппов — зам. председателя
- Г.М.Гавриленко — ученый секретарь
- В.Б.Беллев
- Б.В.Васильев
- В.П.Гердт
- В.А.Загребнов
- Г.В.Мицельмахер
- В.А.Никитин
- В.Р.Саранцева
- Д.В.Ширков

100 369

ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

0344.1  
H 623

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Содержание

	Стр.
I. Общие вопросы детектирования и формирования сигналов .....	3
II. Обработка и использование детектируемых сигналов .....	5
III. Спектрометр БИС-2 .....	8
IV. Формирование и обработка световых сигналов .....	12
1. Оптические сцинтилляционные световоды .....	12
2. Шифтеры .....	15
3. Регистрация световых сигналов с помощью фотодиодов ...	18
4. Оптические системы регистрации и обработки данных ...	22
V. Кремниевые детекторы и мониторы .....	26
1. Кремниевые детекторы .....	26
2. Кремниевые мониторы .....	32
VI. Калориметры .....	36
1. Общие вопросы .....	36
2. Разновидности калориметров .....	38
3. Организация считывания сигналов в калориметрах .....	45
4. Формирование триггер-импульсов в калориметрах .....	46
VII. Методика многопроволочных пропорциональных камер .....	50
1. Катодное считывание .....	50
2. Цифровые методы обработки кластеров .....	54
3. Специальные методы кодирования .....	55
4. Пример применения метода катодного считывания .....	56
5. Регистрация данных в общем виде .....	58
6. МПК как трековый детектор .....	62
7. Развитие методики пропорциональных камер .....	64
VIII. Методика дрейфовых камер .....	65
1. Общие вопросы .....	65
2. Разрешение неопределенностей типа "слева-справа" .....	69
3. Методика дрейфовых камер .....	70
4. Времяпроекционные дрейфовые камеры .....	72
5. Достижения в разработке АЦП и ВАК .....	73
IX. Фильтрация физической информации на линии с ЭВМ .....	78
1. Общие вопросы .....	78
2. Частота триггер-импульса и скорость фильтрации .....	79
3. Основные способы аппаратной фильтрации .....	80
4. Методы выделения прямых треков .....	81
5. Метод генерации масок .....	83
6. Особенности триггерных систем, используемых в экспери- ментах на встречных пучках .....	83
Литература .....	88

I. Общие вопросы детектирования и формирования сигналов

Способ детектирования частиц основан на потере части (а в калори-  
метрах и всей) энергии частиц благодаря их взаимодействию с веществ-  
вом детектора. В ряде случаев информация может быть также получена  
из акта взаимодействия частиц. В конечном итоге детектирование част-  
иц предполагает измерение заряда, наводимого на электродах детек-  
тора. С помощью фильтра и усилителей полезный сигнал должен быть  
выделен и усилен на уровне шумов, которые всегда присутствуют.  
Уровень шумов может быть резко уменьшен, если имеется возможность  
поместить детектор в криостат.

Электроды детектора имеют определенную емкость, которая в зависи-  
мости от типа детектора изменяется в широких пределах. Например,  
в жидкостных калориметрах величина емкости электродов может состав-  
лять  $10^{-7}$  Ф. Поэтому в цепи детектор-усилитель нередко используются  
согласующие трансформаторы. С точки зрения разработчика электроники  
детектор заряженных частиц можно рассматривать как "черный ящик",  
содержащий чаще всего множество выходных каналов с емкостным импе-  
дансом. Амплитуда выходных сигналов в зависимости от типа детектора  
может меняться в очень широких пределах - в шести порядках!

При создании усилителей слабых сигналов приходится считаться с шу-  
мами, которые возникают в усилителе наряду с детектируемыми сигнала-  
ми. Различают два различных источника шумов /I/: помехи или навод-  
ки, появляющиеся в результате некачественного монтажа или вызванные  
источниками электромагнитных колебаний; шумы, возникающие вследствие  
флуктуации электрических зарядов в транзисторах и радиодеталях.  
При тщательно продуманной конструкции усилителя первый тип шумов мо-  
жет быть сведен к минимуму. Второй тип помех полностью ликвидировать  
нельзя, так как он неуправляем.

Основными источниками шумов, вызванных флуктуациями электрических  
зарядов, являются тепловые (контурные) шумы, шумы входного тока  
активного элемента и шумы выходного тока транзистора или электрон-  
ной лампы. Для лучшей оценки влияния отдельных компонентов источник  
шумов заменяют некоторым активным сопротивлением, генерирующим теп-  
ловые шумы того же значения (рис. 1). Контурные шумы и шумы входно-  
го тока имеют одинаковую частотную зависимость и действуют на входе  
схемы. Их можно представить в виде одного эквивалентного сопротивле-  
ния  $R_p$ , которое включается параллельно источнику сигналов- детек-  
тору (параллельный генератор шума). Спектральная плотность этого ге-  
нератора шума имеет вид

$$\overline{i_{ш}^2} = 4kT/R_p.$$

Цепь, в которой возникают шумы выходного тока активного элемента (дробовой эффект), как правило, имеет малую постоянную времени и отделена от входной цепи. Поэтому эквивалентным источником шумов является чисто активное сопротивление  $R_s$ , которое включается в схему замещения последовательно с детектором. Это сопротивление называют генератором последовательного шума. Спектральная плотность записывается в виде:

$$\bar{e}_{ш}^2 = 4KTR_s.$$

Естественно возникает вопрос: какой минимальный полезный сигнал может быть усилен, если использовать малощумящие усилители? Ответ на этот вопрос, в частности, дается в работе [2], в которой детально рассматриваются базовые принципы детектирования и формирования сигналов в детекторах элементарных частиц. Оптимальное построение детектора зависит не только от его свойств, но и от фундаментальных ограничений, вытекающих из свойств вещества. Критерием минимального заряда, который может быть усилен, является эквивалентный заряд шума ENC (от англ. *equivalent noise charge*), который вычисляется из выражения

$$(ENC)^2 = 4KTC_{\text{вх}} \frac{\sqrt{R_s}}{R_p},$$

где  $K$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $C_{\text{вх}}$  - входная емкость усилителя,  $R_p$  - параллельный генератор шума,  $R_s$  - генератор последовательного шума.

Типичная величина ENC при нормальных условиях составляет 10-30 зарядов электрона. Наименьший шум получается при том условии, что выходная емкость детектора равна входной емкости усилителя. Оптимальное согласование детектора с усилителем может быть достигнуто несколькими способами. В первую очередь используются транзисторы, имеющие малые величины  $C_{\text{вх}}$ . Применяются высокочастотные биполярные транзисторы (частота 5 ГГц и  $C_{\text{вх}} \approx 1$  пФ) и полевые транзисторы (частота 1 ГГц).

Дробовой шум базы препятствует использованию биполярных транзисторов для формирования сигналов меньше чем  $10^8$  с. Кремниевые полевые транзисторы дают хороший эффект для времен  $10^{-7}$  с. На рис. 2 приведена временная диаграмма, где по оси ординат отложены величины ENC, а по оси абсцисс - длительности сигналов, регистрируемых на выходах различного типа детекторов.

Отличительная особенность основных типов полупроводниковых детекторов состоит в том, что их емкость зависит от смещающего напряжения. Поэтому изменение смещения приводит к изменению емкости детектора и, следовательно, к изменению сигнала на его нагрузке. В свою очередь нестабильность емкости детектора приводит к изменению сигнала на его нагрузке, крайне нежелательного для полупроводникового детектора, так как он обладает очень высокой разрешающей способностью.

Поэтому в таких детекторах используются зарядочувствительные усилители, в которых вводится отрицательная обратная связь по заряду, которая стабилизирует не только усилитель, но и сам источник сигнала - детектор.

## II. Обработка и использование детектируемых сигналов

Данные о событии, считываемые от детектора, представляются как в виде аналоговых сигналов, так и в виде дискретных логических импульсов. Усиленные линейно-аналоговые сигналы несут в себе информацию как об амплитудах детектируемых сигналов, так и о времени их появления относительно стартового импульса, который вырабатывается, как правило, с помощью сцинтилляционного телескопа. В позиционно-чувствительных детекторах, используя аналоговые сигналы, можно с помощью метода деления заряда определить координату взаимодействия частицы.

Амплитуда детектируемого сигнала обычно несет в себе информацию об энергии частицы или о ее природе. В многоканальных спектрометрах физики высоких энергий используются гибридные методы обработки сигналов, т.е. такие, в которых данные представляются и обрабатываются как в аналоговой, так и в дискретной форме. Роль таких методов существенно возросла в связи с разработкой АЦП типа "флэш", с помощью которых можно оцифровывать сигналы с частотой 100 МГц и с достаточно высокой точностью (6 - 8 бит).

Количество данных, регистрируемых в дискретной форме, существенно возросло в связи с широким развитием координатных и трековых детекторов. Причем один и тот же сигнал может быть использован как в спектральном тракте, так и в виде логического сигнала, он используется для обработки в специализированных процессорах. Число каналов регистрации в одной крупной установке может составлять десятки и даже сотни тысяч. В табл. I приведены общие характеристики трековых детекторов.

Естественно, что усиление и формирование сигналов, рождаемых в веществе детектора, не является самоцелью. Детектирование частиц означает нечто большее, чем их локализация в пространстве. Используя электронно-вычислительную технику, можно измерить энергию - импульс частиц, их квантовые числа, произвести идентификацию частиц и проч. Например, в результате взаимодействия двух частиц рождается большое число вторичных частиц: заряженные и нейтральные адроны с различными массами, лептоны и фотоны. Для получения информации о каждой частице необходимо выполнить следующие измерения:

- локализовать траектории заряженных частиц в пространстве, т.е. измерить их пространственные координаты и направление движения,

ТАБЛИЦА I

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Детектор		Пространственное разрешение МКН		Быстродействие, нс	Скорость срабатывания элемента, Гц	Время восстановления, нс	Способ регистрации
		Практическое	Оптимальное				
непрерывного действия	Сцинтиллятор	300	300	1-10	$10^7$		ФЭУ лавинные фотодиоды
	МКК	600	100	100	$10^6$	ограничено	быстрая электроника
	Дрейфовые камеры	150	50	100+1000	$10^7$	$10^4$ Гц на мм анодной проволочки	
импульсного действия	Искровые камеры	300	100	$10^3$	$10^5$	$10^6$	фотопленка, электроника
	Стримерные камеры	200	20	$10^3$	$10^5$	$10^6$	фотопленка
	Пузырьковые камеры	250	50	$10^6$	$10^4$	$10^7$	фотопленка

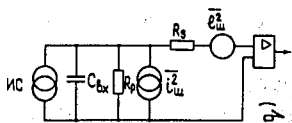


Рис. 1. Эквивалентная схема входа с двумя генераторами шума.

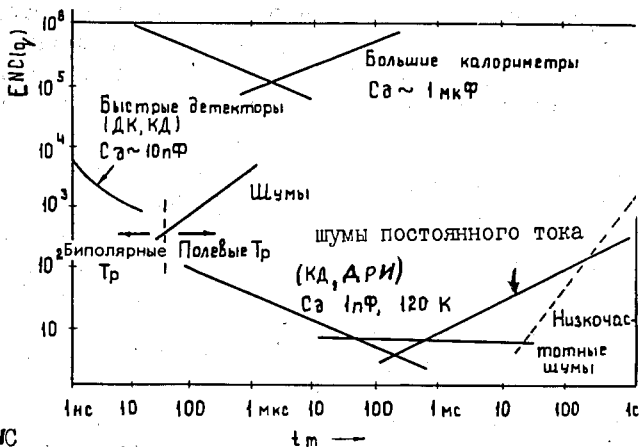


Рис. 2. Диаграмма, характеризующая ENC

для различных типов детекторов. ДРИ - детекторы рентгеновского излучения.

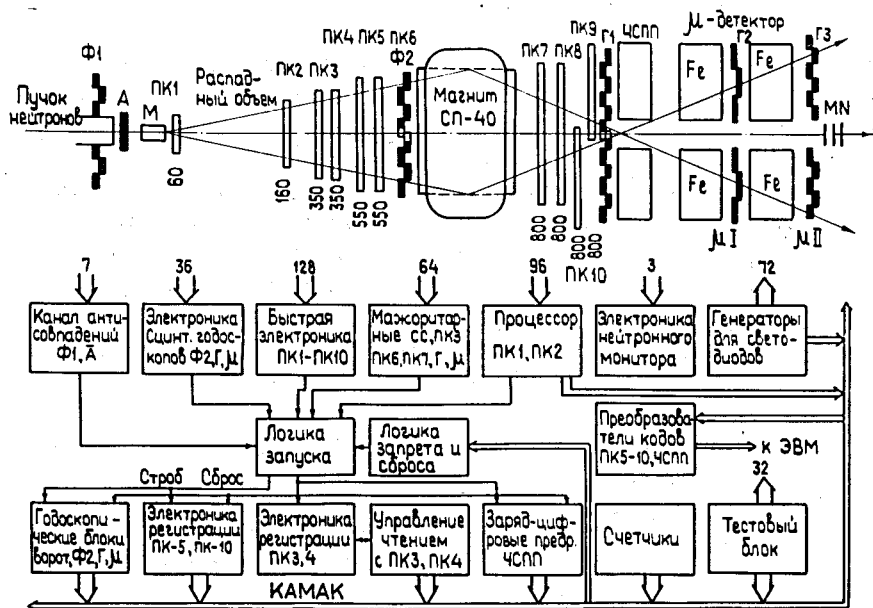


Рис. 3. Схематическое расположение детекторов установки БИС-2.

- определить заряд, величину импульса и кривизну траектории в магнитном поле.

Одновременно измеряя импульс и энергию или импульс и скорость, определяют массу частиц. Можно также получить энергию, направление и природу нейтральных частиц, детали взаимодействия каждой частицы с веществом (сильное, слабое, электромагнитное). Эти данные используются для их классификации.

Каждый метод детектирования предполагает взаимодействие частицы с веществом детектора для получения заметного сигнала. Это взаимодействие изменяет некоторые параметры детектируемой частицы: энергию, направление движения, импульс, или может быть даже изменена ее природа (распад). Для решения вышеперечисленных задач во вновь планируемых экспериментах на встречных пучках в единой системе объединяются различные по параметрам детекторы. Такие спектрометры являются источниками огромного числа (сотни тысяч и более) аналоговых и дискретных сигналов. Эти и другие факторы предъявляют высокие требования к ядерной электронике и средствам обработки физической информации. Ниже рассматривается пример построения и основные характеристики спектрометра БИС-2.

### III. Спектрометр БИС-2

Для поиска новых частиц на нейтральном пучке серпуховского ускорителя создан спектрометр БИС-2 ОИЯИ. Достигнутые для БИС-2 характеристики находятся на уровне параметров лучших спектрометров, созданных для изучения странных частиц и редких резонансов /3/.

На рис. 3 приведено схематическое расположение детекторов установки БИС-2 и структурная схема электроники запуска и регистрации данных.

Формирование пучка. Установка расположена на канале нейтральных частиц. Этот канал ориентирован на внутреннюю бериллиевую мишень И диаметром 2 мм и длиной 20 мм под углом  $11,3$  мрад к циркулирующему пучку протонов. Полная длина канала от внутренней мишени до головных элементов БИС-2 составляет около 65 м. Пучок нейтронов формируется системой из трех стальных коллиматоров с суммарной толщиной 9 м, которые обеспечивают размеры пучка в области углеродной мишени спектрометра 48 мм по горизонтали и 65 мм по вертикали.

От гамма-квантов пучок очищается дистанционно управляемым свинцовым гамма-фильтром, максимальная толщина которого может достигать 20 см. Заряженные частицы удаляются из пучка полем ускорителя и расположены непосредственно за гамма-фильтром полем магнита СП-129. После магнита СП-129 частицы пучка проходят по вакуумпроводу. На выходе

канала пучок состоит в основном из нейтронов с небольшой примесью  $K^0$  - мезонов (порядка 1,5%).

Спектрометр. Основу спектрометра составляют магнит СП-40, система из II пропорциональных камер (ПК) и сцинтилляционных счетчиков (Г). Для регистрации и идентификации электронов, позитронов и гамма-квантов в составе спектрометра имеется черенковский ливневый детектор-годоскоп (ЧСП). Для регистрации и идентификации мюонов имеется детектор мюонов MI и MII, состоящий из железных уплотнителей и годоскопических сцинтилляционных счетчиков Г2, Г3. Небольшая примесь в пучке заряженных частиц (около 1,5 %) убирается из эксперимента счетчиком совпадений А. Поток нейтронов контролируется нейтронным монитором MN.

Магнит. В БИС-2 используется спектрометрический магнит СП-40 с эффективной длиной магнитного поля 200 см и апертурой  $100 \times 29$  см. В экспериментах по поиску очарованных частиц величина магнитного поля СП-40 была выбрана так, чтобы поперечная составляющая импульса заряженных частиц, регистрируемых БИС-2 и пересекающих поле СП-40, изменялась на 0,64 ГэВ/с.

Пропорциональные камеры. ПК спектрометра используются как в системе запуска БИС-2, так и для восстановления треков частиц. В спектрометре используется 10 двухкоординатных ПК с общим числом информационных проволочек более 5000. Пропорциональные камеры в спектрометре выполняют следующие функции:

- обеспечение информации о координатах треков зарегистрированных событий,

- участие в выработке импульса запуска спектрометра.

Цифры на верхней части рис. 3 указывают количество проволочек, содержащихся у соответствующей плоскости ПК.

В качестве примера рассмотрим использование ПК для выработки запускающего установку импульса. Простейшим условием запуска установки является требование срабатывания каждой ПК спектрометра. Такое требование легко осуществляется путем использования сигнала "Плоскость", который обеспечивается применением логических сигналов "Быстрое ГЛИ".

Более сложным является требование нахождения числа частиц, прошедших через годоскопическую плоскость ПК. Для его осуществления необходим отбор событий путем использования мажоритарных схем совпадений.

Сцинтилляционные счетчики. В систему сцинтилляционных детекторов, образуемую 50 счетчиками, входят следующие элементы:

I. Система мониторинга нейтронного пучка (MN), состоящая из трёх

счетчиков диаметром 120 мм и толщиной сцинтилляторов 1 см. Между первым и вторым счетчиками расположена свинцовая пластина толщиной 4 мм, при этом первый счетчик включен на антисовпадения с остальными двумя для выделения из пучка нейтральных частиц. Импульсы с нейтронного монитора кроме контроля нейтронного пучка выполняют функции синхронизации работы установки с работой ускорителя.

2. Годоскопическая плоскость П1, состоящая из 14 счетчиков с размерами 200×650×10 мм, используется в системе запуска по числу сработавших счетчиков.

3. Годоскопические плоскости П2, П3 вместе с четырьмя чугунными кубами размером 1,0×1,0×1,25 м каждый образуют детектор, предназначенный для регистрации и идентификации мюонов от распада вторичных частиц. Плоскость П2 содержит 12 счетчиков с размерами 400×600×10 мм. Плоскость П3 содержит 20 счетчиков с размерами 200×650×10 мм. Общее количество вещества в детекторе мюонов составляет 20 ядерных длин.

Черенковский спектрометр полного поглощения ЧСПП. Черенковский годоскоп создан для регистрации электронов и гамма-квантов от распадов вторичных частиц. Годоскоп состоит из 140 идентичных элементов с радиатором из свинцового стекла ТФ-1 (радиационная длина - 2,5 см), образующих два плеча, расположенных справа и слева от оси установки. Среднее энергетическое разрешение элементов в зависимости от энергии пучка позитронов описывается формулой

$$\frac{\Delta E}{E} (FWHM) = \frac{11,4 \pm 4,1}{\sqrt{E / 138}}$$

где E изменяется от 0,2 до 0,6 ГэВ.

Электронная аппаратура. Электроника БИС-2 состоит из аппаратуры, как размещенной непосредственно на ПК, так и расположенной в кейтах КАМАК. Вся аппаратура занимает около 35 кейтов. По своему функциональному назначению электроника может быть разделена на следующие группы.

1. Аппаратура запуска, задачей которой является формирование импульса запуска спектрометра. Основу системы запуска составляет мажоритарная логика, использующая сигналы "Быстрое ИЛИ" с ПК и сигналы со сцинтилляционного годоскопа П1, которая позволяет выделять события с определенным числом вторичных частиц в конечном состоянии. Задержка импульса запуска от момента взаимодействия нейтрона в углеродной мишени составляет 0,5 - 0,6 мкс.

2. Аппаратура регистрации занимает 14 кейтов КАМАК, по 7 кейтов в каждой ветви. В ее состав входит регистрирующая электроника ПК, зарядово-цифровые преобразователи ЧСПП, регистры для сцинтилляционных счетчиков (50 каналов), а также набор пересчетных схем. Длина массива информации на одно событие равна 400 - 600 байт.

Электроника связи обеспечивает работу спектрометра на линии с двумя ЭВМ ЕС-1040 и ТРА - 1001 i.

Кроме аппаратуры в состав спектрометра входят следующие программы:

1. Программа приема, контроля и накопления информации.
2. Тест - программы.
3. Программы геометрической реконструкции событий.

Физические характеристики спектрометра. Важнейшими характеристиками спектрометров, подобных БИС-2, являются их эффективность регистрации вторичных частиц и разрешение по эффективной массе, определяемое разрешением по импульсу и по углу, которое примерно равно 1-3%. Другой важнейшей характеристикой установки является ее разрешение по эффективной массе. Достигнутые для БИС-2 параметры находятся на уровне характеристик лучших спектрометров, созданных для изучения странных частиц и редких резонансов. В табл. 2 приведены разрешения по эффективной массе для некоторых спектрометров, подобных БИС-2.

Таблица 2

№	Авторы, ссылка	Тип спектрометра	Разрешение по $\sqrt{s}$ , массе МэВ/c <sup>2</sup>	Примечание
1.	Семенов Ю.А. Препринт ИТЭФ-34, 1977	с искровыми камерами	4,7 (K <sup>0</sup> )	Исследование редких распадов K <sup>0</sup>
2.	L. Baksaý et al. NIM, v. 133 No. 2, p. 219	с ПК	5,1 (Λ <sup>0</sup> )	Исследование частиц, рожденных около 0° на ISR
3.	M. Bouzquin et al. PL, 87B, 297, 1979	с дрейфовыми и ПК камерами	2,0 (Λ <sup>0</sup> ) 3,0 (Ω <sup>-</sup> )	Измерение времени жизни Ω <sup>-</sup> Измерение парциальных ширин распада Ω <sup>-</sup>
4.	Y. Wise et al. PL, 91B, 165, 1980	с искровыми камерами	2,0 (Λ <sup>0</sup> )	Прецизионное измерение
5.	БИС-2	с ПК	2,0 (Λ <sup>0</sup> ) 4,0 (K <sup>0</sup> )	Поиск новых частиц, распадающихся на Λ <sup>0</sup> (K <sup>0</sup> ) + адроны



#### IV. Формирование и обработка световых сигналов

##### I. Оптические сцинтилляционные световоды

Для сбора, кодирования, детектирования и обработки световых сигналов, которые возникают в результате взаимодействия частиц с веществом детектора, используются гибкие оптические и гибкие сцинтилляционные волоконные световоды-смесители спектра.

Оптические сцинтилляционные световоды, в частности, применяются в экспериментах на встречных пучках со светимостью пучка  $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и с множественностью порядка 20. При этом число  $\bar{\nu}$  - взаимодействий составляет  $10^7/\text{с}$ . Эксперименты показали [4], что применение обычных сцинтилляторов диаметром 1 мм для создания годоскопа оказалось неприемлемым уже при длине 15 см из-за больших потерь на границе сцинтиллятор-воздух. Поэтому были изготовлены оптические сцинтилляционные световоды, которые уже при длине 60 см имеют эффективность 99%. Обычные кварцевые гибкие световоды широко применяются как в технике, так и в физических экспериментах для передачи световых сигналов. Использование таких световодов позволяет поместить ФЭУ в том месте, где не сказываются на их характеристиках влияние магнитного поля анализирующего магнита.

В отличие от обычных оптических световодов оптические сцинтилляционные световоды помимо функций передачи световых сигналов выполняют роль детекторов заряженных частиц с высоким пространственным разрешением (порядка 50 мкм). На рис. 4 приведены геометрические и оптические параметры сцинтилляционного световода. В качестве наполнителя в таких световодах используются или пластиковые сцинтилляторы, или специально изготовленные сцинтилляционные стекла [5]. Для обеспечения условия полного внутреннего отражения имеется второй внешний, состоящий из оптического стекла или оболочки на основе кремния. Причем эта оболочка должна иметь коэффициент преломления меньше, нежели сердечник. Вторая внешняя оболочка представляет собой поглотитель из черного стекла и выполняет роль оптического изолятора.

В результате взаимодействия частицы со сцинтиллятором возникают световые сигналы, которые вследствие внутреннего отражения распространяются к концам световода, где они усиливаются с помощью ФЭУ. Длина затухания составляет 100 - 150 см. Для построения годоскопа из оптических сцинтилляционных световодов составляют плоскости, которые накладываются друг на друга, образуют объемный детектор. В результате получается быстродействующий детектор с высоким пространственным разрешением, которое составляет 2 мм.

В Сагле [6] разработан модуль калориметра, содержащий 6400 оптических



Рис. 4. Геометрические и оптические параметры сцинтилляционного световода.

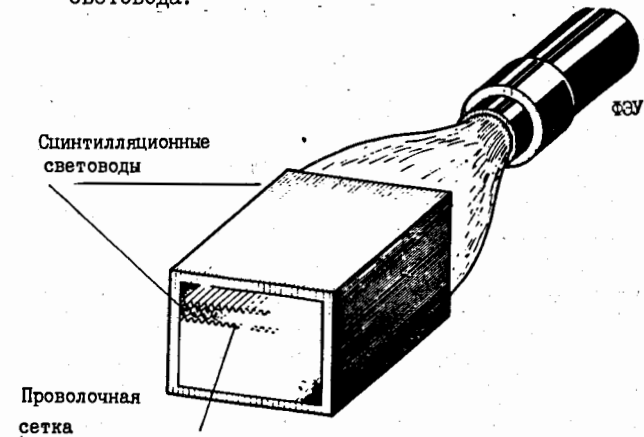


Рис. 5. Модуль сцинтилляционного калориметра.

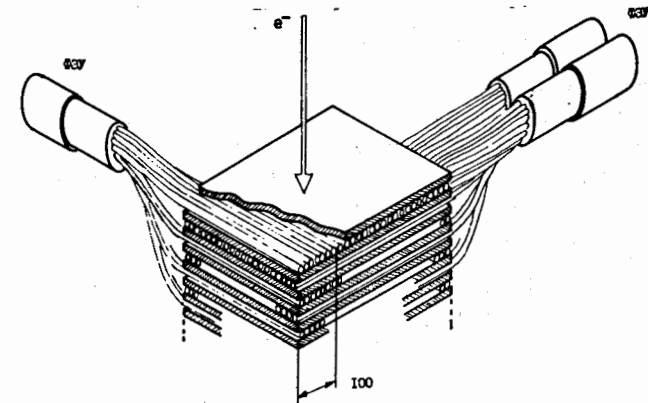


Рис. 6. Модуль сцинтилляционного калориметра с кодировкой.

ких сцинтилляционных световодов, которые образуют 80 плоскостей, сложенных в виде сэндвича, и прослоены металлической сеткой толщиной 0,45 мм (рис. 5). Модуль имеет следующие параметры: радиационная длина 14,5 мм, энергетическое разрешение  $\frac{\delta E}{E} = 11 \pm 2\% \text{ ГэВ}^2$ , общий собираемый свет соответствует  $5 \cdot 10^6$  фотоэлектронам с линейностью в пределах  $I - 25 \text{ ГэВ}$ . Применение таких световодов в калориметрах открывает новые возможности для улучшения энергетического и пространственного разрешения. На рис. 6 приведена схема модуля электромагнитного калориметра, в котором плоскости, состоящие из оптических сцинтилляционных световодов, прослоены пластинами из свинца. Каждая плоскость содержит по 60 световодов, а всего в модуле содержится 50 таких плоскостей.

Для увеличения точности регистрации профиля ливня каждая плоскость разделена на шесть равных частей по 10 световодов в каждой части. Световые сигналы от соответствующих плоскостей одинаковой ориентации через смесители поступают на входы ФЭУ. Характеристики модуля: пространственное разрешение относительно центра "тяжести" ливня  $b_y = 2,7 \text{ мм}$ , при энергии электронов 1 ГэВ энергетическое разрешение  $\frac{\delta E}{E} = 9,8\%$  при толщине конвертора 1 мм /7/.

Кварцевые гибкие световоды, широко применяемые в технике связи, в методике физического эксперимента используются для эффективного кодирования (сжатия) данных, что позволяет применять быстродействующие программируемые ПЗУ для определения координат сработавших сцинтилляторов. На рис. 7 приведена схема времяпролетного спектрометра, который используется в эксперименте по дифракции нейтронов /8/. Каждый из 10 сцинтилляторов с помощью гибких световодов соединен с входами трех различных ФЭУ. В общем случае имеет место соотношение

$$n = \frac{N}{K!(N-K)!}$$

где  $n$  - число сцинтилляторов,  $N$  - число ФЭУ и  $K$  - коэффициент разветвления сигнала. В данном спектрометре при  $n = 84$ ,  $N = 9$  и  $K = 3$ . Однако, используя такую схему кодирования, можно однозначно регистрировать координату только одного сцинтиллятора, от которого поступил сигнал. В соответствии с предложенной методикой /9/ матрица связей  $H_1$  для схемы, изображенной на рис. 7, имеет вид

$$H_1 = \begin{array}{c|c} \begin{array}{l} \text{IIIIIIIOOOO} \\ \text{IIIOOOIIIO} \\ \text{IOOIIOIIOI} \\ \text{OIOIIOIIOI} \\ \text{OOIOIIOIII} \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ \uparrow \\ \text{ФЭУ} \end{array} \end{array}$$

Сцинтилляторы  $\rightarrow$

Если теперь взять булевы суммы (сумму по ИЛИ) 3 и 4, 6 и 7 столбцов, то получаются одинаковые коды. Это значит, что в таком годоскопе невозможно однозначная регистрация двойных кластеров. Данные с выходов ФЭУ поступают на входы программируемого ПЗУ, на выходах которых формируются координаты сработавших сцинтилляторов. В работе /9/ приведена более экономичная схема сетевой кодировки, которую при  $n=16$ ,  $N=8$  и  $K=2$  можно представить в виде матрицы  $H_2$ :

$$H_2 = \begin{array}{c|c} \begin{array}{l} \text{IIIIIOOOOOOOOO} \\ \text{OOOOIIIIIOOOOO} \\ \text{OOOOOOOIIIIIOOO} \\ \text{OOOOOOOOOOIIIII} \\ \text{IOOOIOOOIOOOIOOO} \\ \text{OIOOOIOOOIOOOIO} \\ \text{OOIOOOIOOOIOOOIO} \\ \text{OOIOOOIOOOIOOOIO} \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ \uparrow \\ \text{ФЭУ} \end{array} \end{array}$$

При такой схеме кодирования коэффициент сжатия  $K = \frac{n}{N} = 2$ . Причем однозначно регистрируется одновременное срабатывание вплоть до 4-х сцинтилляторов, расположенных рядом.

## 2. Шифтеры

В последнее время как за рубежом, так и в нашей стране интенсивно развивается направление в методике эксперимента, связанное с разработкой и применением для светособирания и переизлучения световодов - смесителей спектра, которые получили название шифтеров. Использование шифтеров позволяет создавать детекторы больших размеров, состоящие из сотен и более ячеек, имеющих малые размеры. Основное преимущество шифтеров перед обычными световодами заключается в том, что сцинтилляционное излучение голубого цвета, распространяясь вдоль шифтера, преобразуется в излучение зеленого или желтого цвета и передается к ФЭУ с малой площадью фотокатода.

В работе /11/ рассматриваются вопросы применения шифтеров для светособирания в годоскопических спектрометрах полного поглощения типа сэндвич - металл - сцинтиллятор. Даны характеристики шифтеров отечественного и зарубежного производства. Основными параметрами шифтеров являются: максимум спектра излучения, нм, длина затухания в совместном сцинтилляторе в см, световой выход в %, время высвечивания и стоимость. Совместный сцинтиллятор - это обычный сцинтиллятор, который с ФЭУ образует счетчик. В шифтерах максимум спектра излучения составляет 480-530 нм, длина затухания - 85-100 см, время высвечивания 7-10 нс.

На рис. 8 в качестве примера приведено схематическое изображение сэндвича металл-сцинтиллятор, в котором используется шифтер. Между ними помещены две нейлоновые нити с диаметром 0,3, которые необходи-

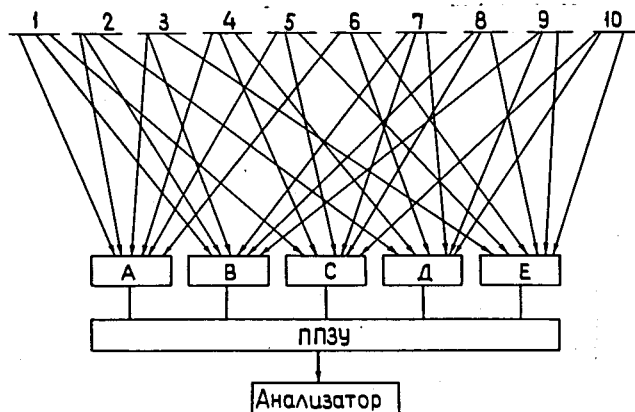


Рис. 7. Блок - схема времяпролетного спектрометра со световой кодировкой.

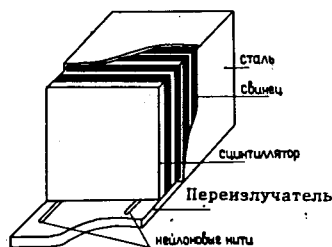


Рис. 8. Модуль калориметра с шифтером.

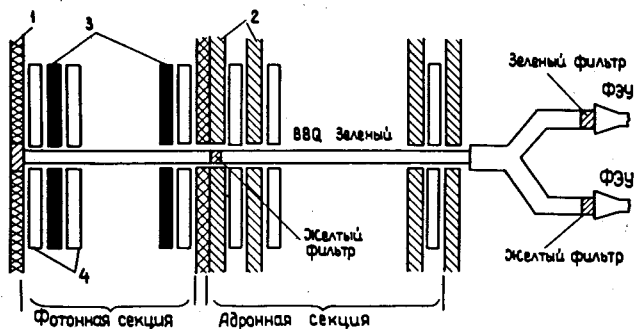


Рис. 9. Модуль калориметра с комбинированным шифтером. 1- алюминий, 2- железо, 3- сцинтилятор.

мы для образования воздушной щели. Она служит для того, чтобы обеспечить минимум потерь общего отраженного света, проходящего вдоль шифтера. В работе /12/ приводятся данные об энергетическом и координатном разрешении спектрометра полного поглощения с шифтером. Он состоит из 25 элементов со структурой свинец-сцинтилятор (толщина 2,8 и 6 мм соответственно) и имеет поперечные размеры 38\*38 мм. При энергии электронов 26 ГэВ точность измерения энергии и координаты равны соответственно 8,8% и 3,5 мм. Важно, что такие спектрометры могут иметь ячеистую структуру.

Существенной новизной можно считать применение в фотон-адронном калориметре комбинированных шифтеров для передачи сигналов отдельно от фотонной и адронной секций калориметра /13/. На рис. 9 приведена схема, иллюстрирующая принцип работы такого модуля. Свет от заданной группы сцинтилляторов проходит через небольшую воздушную щель в общий акрилатный световод, который покрыт материалом, обладающим свойством переизлучения света. Изотропно переизлученный флуоресцентный свет направляется по световоду, который проходит через отверстия в сцинтилляторах, а также сквозь отверстия поглотителей. Часть световода в фотонном калориметре покрыта флуоресцирующим конвертором, который излучает световые волны желтого цвета длиной 590 нм. Части световода, проходящие через адронную секцию калориметра, покрыты материалом другого типа (BBQ), который переизлучает зеленый свет на волне 490 нм. В итоге две компоненты света, излучаемые в фотонной и адронной секциях, по одному и тому же световоду поступают к соответствующим ФЭУ. Причем перед каждым ФЭУ располагаются соответственно зеленый и желтый фильтры. Такая конструкция счетчика позволяет создавать компактные и экономичные модули калориметров. Испытания калориметра при облучении электронами с энергией 15-100 ГэВ и пионами, 15-340 ГэВ, дали величины энергетического разрешения  $\frac{\sigma}{E} = 0,17\sqrt{E}$  и  $\frac{\sigma}{E} = 0,03+0,74\sqrt{E}$  соответственно.

Ведутся работы, направленные на существенное улучшение таких важных параметров шифтера, как длина волны переизлучаемого света и длина затухания /14/. Необходимы шифтеры, у которых переизлучаемый свет имел бы пик на большей длине волны. Созданы шифтеры с длиной затухания 91 см. Определенный интерес представляют конструкция и параметры модуля фотонного калориметра, в котором одновременно используются как обычные шифтеры, так и шифтеры, выполненные в виде гибких световодов /15/. На рис. 10 приведена схема такого модуля. Калориметр состоит из 9 таких модулей, имеет размеры 5\*5 см и включает 60 пластин, каждая пластина состоит из стеклянной плоскости толщиной 2 мм и сцинтилляционной плоскости толщиной 5 мм. С 4-х сторон эти плоскости покрыты тонкими пластиковыми листами /толщина 1,5 мм/, содержащими шифте-

ры. Свет, испускаемый каждой пластиной, вначале переизлучается с помощью шифтера и затем собирается с помощью полистирольных оптических световодов. Затем переизлучается второй раз и передается для усиления на ФЭУ с малым катодом. Получено энергетическое разрешение  $\Delta E/E = 0,1\sqrt{E}$  для электронов в пределах 0,25-5,0 ГэВ/с.

Использование оптических световодов для передачи световых сигналов в калориметрах имеет следующие преимущества:

- имеется возможность располагать ФЭУ вдали от магнитного поля,
- для светособирания можно использовать ФЭУ малого диаметра или малогабаритные кремниевые светодиоды,
- компактность, простота конструкции модуля, малая мертвая зона между отдельными модулями калориметра.

### 3. Регистрация световых сигналов с помощью фотодиодов

В ряде работ показано, что кремниевые лавинные фотодиоды или малогабаритные вакуумные фотодиоды могут быть с успехом использованы вместо ФЭУ для регистрации световых сигналов, поступающих от высокоплотных сцинтилляторов типа ВГО, CsI и NaI. Однако эти работы носят пока исследовательский характер. Малые размеры, стабильность характеристик, их независимость от окружающего магнитного поля делают фотодиоды идеальными приборами при создании калориметров. Они хорошо сопрягаются с гибкими световодами. Мониторы, в которых используются матрицы из фотодиодов, применяются для регистрации треков в реальном масштабе времени.

В настоящее время в калориметрах используются только ФЭУ. Однако для точных измерений в калориметрах они неэффективны (большие размеры, сложность контроля характеристик и проч.). Начато изучение возможности замены ФЭУ на фотодиоды, которым присущи многие положительные качества полупроводниковых приборов. В табл. 3 [16] даны характеристики ФЭУ и фотодиодов при условии, что сигналы регистрируются от сцинтилляторов типа NaI. Считывание с помощью фотодиодов на современном этапе имеет ряд недостатков, которые, видимо, будут устраняться по мере совершенствования технологии: нет внутреннего усиления, поэтому требуется усилитель с низким уровнем шумов, они имеют большую входную емкость, при большой площади кристалла фотодиоды имеют значительный темновой ток, частота работы не превышает 1 МГц, что недопустимо при работе с высокой интенсивностью.

В современных фотодиодах уровень шумов составляет 400 фотоэлектронов на см<sup>2</sup> поверхности [17], в некоторых случаях это ограничивает возможность считывания сигналов непосредственно от пластических сцинтилляторов. Далее, нет хорошего согласования эмиссионного спектра

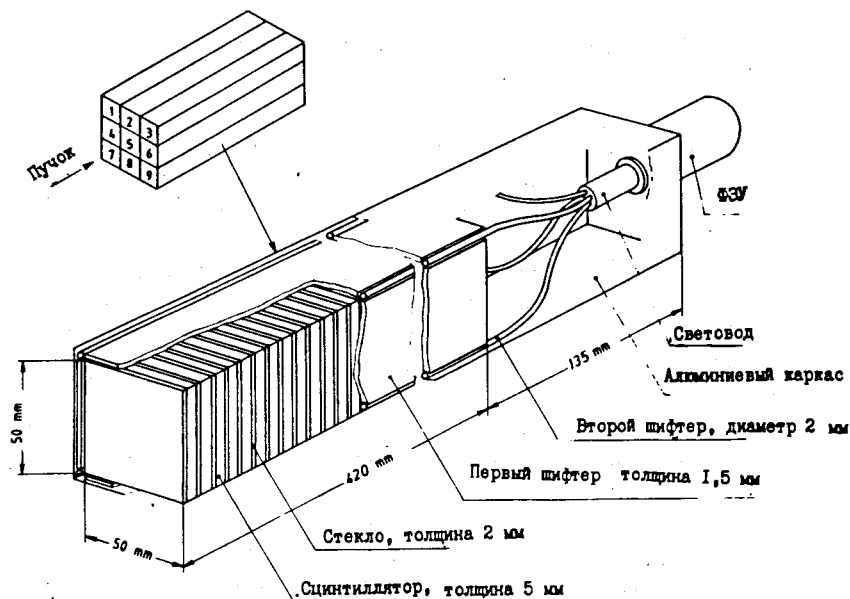


Рис. 10. Модуль калориметра с шифтером в виде гибкого световода.

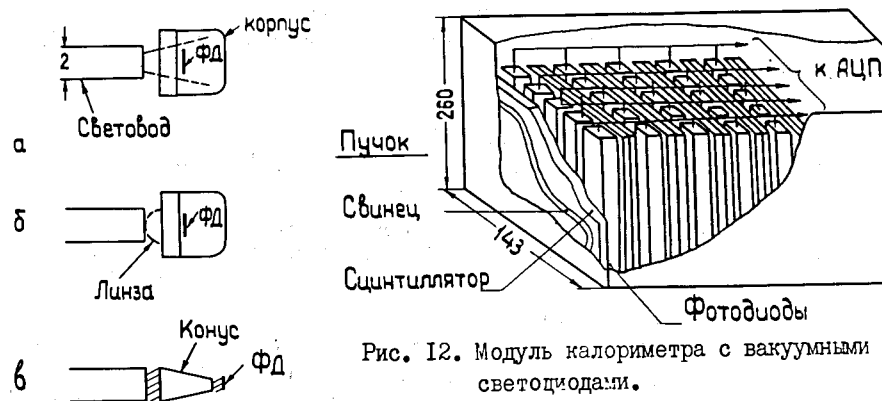
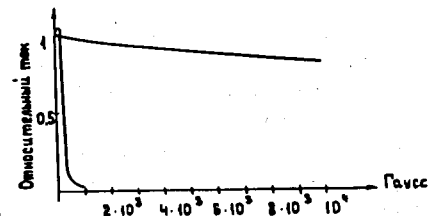


Рис. 11. Три способа стыковки световода с фотодиодом.

Рис. 13. Кривая зависимости выходного тока от магнитного поля.



пластических сцинтилляторов и фотодиодов. Типичная схема считывания состоит из зарядочувствительного предусилителя, усилителя-формирователя и элемента памяти. Такие же цепи используются и при считывании данных от полупроводниковых счетчиков. Время нарастания сигнала, составляющее 10 нс, хорошо согласуется с временными параметрами электронных усилителей с чувствительностью 700 фотоэлектронов. В обзоре /18/ рассмотрены вопросы применения фотодиодов в экспериментальной физике.

Важным моментом является стыковка световодов с фотодиодами. В обзоре /19/ приводятся три схемы стыковки, которые приведены на рис. 11. При непосредственной стыковке передается до 15% света. Наибольший сбор дает использование конуса из стекла (40%), как это показано на рис. 11в.

Наряду с ФЭУ и полупроводниковыми фотодиодами в физике высоких энергий применяются и малогабаритные вакуумные фотодиоды, например при создании модулей калориметров. Такие фотодиоды имеют следующие параметры /20/: размеры 18,5×2,0×1,5, площадь фотокатода 12,5×4 (размеры даны в сантиметрах), темновой ток 2 пА, напряжение питания 10-100 вольт. Получено энергетическое разрешение для электронов с энергией 10-37 ГэВ - 22%, отношение сигнал/шум равно 2,4. На рис. 12 приведена схема модуля калориметра, в котором используются вакуумные фотодиоды. Модуль состоит из пластин железа и свинца толщиной 0,6-2,5 см, между которыми располагается пластина сцинтиллятора, покрытая шифтером. Сигналы от нескольких плоскостей объединяются и считываются с помощью фотодиодов. Отмечаются следующие положительные факторы, связанные с использованием вакуумных фотодиодов: высокое быстродействие, хорошее временное разрешение (100-200 пс), высокая стабильность, низкая стоимость, малое напряжение питания, высокое энергетическое разрешение, низкая чувствительность к магнитным полям и проч.

Техника ФЭУ также интенсивно развивается, и поэтому было бы неправильно утверждать, что в экспериментах по физике высоких энергий ФЭУ будут вытесняться фотодиодами. В работе /21/ рассмотрено современное состояние техники ФЭУ и вакуумных фотодиодов. Прежде всего новые разработки направлены на совершенствование таких параметров ФЭУ и фотодиодов, как возможность работы в условиях больших магнитных полей, при высоком давлении и большой температуре окружающей среды. Разработаны вакуумные фотодиоды, наполненные ксеноном, которые могут работать в магнитном поле величиной в несколько килогаусс.

Разработан также однокаскадный ФЭУ (фотогриод) со специальной конструкцией фотокатода, анода и динода, который также предназначен для работы в магнитном поле. На рис. 13 приведена кривая зависимости выходного тока от магнитного поля. Быстрый детектор, который работает в магнитном поле, может быть создан на базе

микрочанального фотоумножителя. Испытаны также ФЭУ, предназначенные для работы под большим давлением, порядка 600 атмосфер. Такие ФЭУ предполагается использовать глубоко под водой для детектирования мюонов и нейтрино. Определенный интерес представляет конструкция ФЭУ со сферическим фотокатодом, диаметр которого равен 40 см. Он может работать под высоким давлением и детектировать фотоны в условиях, близких к 4 $\pi$ -геометрии. На рис. 14 и 15 приведены общие виды новых типов ФЭУ.

Таблица 3  
Сравнительные характеристики ФЭУ и фотодиодов

№	Характеристика	ФЭУ	Фотодиод
1	Работа в эксперименте	да	нет
2	Чувствительная поверхность	круглая, определенного диаметра	поверхность 3 см <sup>2</sup>
3	Квантовая эффективность	25%	60%
4	Внутреннее усиление	да	нет
5	Необходимость стабилизации режима	да	нет
6	Последующее усиление	простое	необходим высококачественный усилитель
7	Динамический диапазон	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>
8	Время нарастания	5-50 нс	100 нс
9	Скорость работы	высокая	низкая (1МГц)
10	Чувствительность к шумам	высокая	низкая
11	Размеры (высота)	6 см	1 см
12	Температурная стабильность	1,3%	0,1%
13	Экранирование	сложное	нет необходимости
14	Стоимость	50 дол.	15 дол.

Более 10 лет назад в ИФВЭ был предложен новый тип ФЭУ /119/. Он имеет протяженный фотокатод и позволяет регистрировать координату падающего на него фотона путем измерения времени дрейфа фотоэлектрона до динодной системы. Фотоумножитель был назван годоскопическим (ГФЭУ). Годоскопический ФЭУ является одномерным координатно-чувствительным прибором, в котором координата точки освещения фотокатода определяется по времени дрейфа фотоэлектронов в скрещенном магнитном и электрических полях.

Основная область применения ГФЭУ в экспериментальной аппаратуре -

это использование их в режиме регистрации отдельных фотонов черенковского света или слабых сцинтилляционных вспышек. В работе /120/ дано описание спектрометра колец черенковского излучения и двухкоординатного сцинтилляционного годоскопа на основе ФЭУ. В обзоре /121/ подробно рассмотрено развитие ФЭУ, обсуждаются их основные характеристики, приводятся примеры применения их в детекторах частиц.

#### 4. Оптические системы регистрации и обработки данных

Крупные успехи в разработке оптоэлектронных и чисто оптических логических элементов и средств связи создали предпосылки для разработки оптических процессоров и оптоэлектронных устройств регистрации и обработки физической информации. Необходимо подчеркнуть, что высокое быстродействие, которое, в принципе, может быть достигнуто благодаря применению оптических логических элементов, не является следствием высокой скорости света, а связано с высокой частотой световых колебаний и, что не менее важно, с отсутствием заряда у фотона как носителя полезной информации. Так, скорость распространения оптического сигнала по световоду из стекловолокна составляет 203000 км/с, что близко к скорости электрического сигнала по коаксиальному кабелю. Использование в устройствах обработки физической информации световых колебаний дает много преимуществ, и в частности, оно упрощает развязки между цепями, позволяет регистрировать непосредственно образы треков частиц, создавать эффективные системы мониторинга сцинтилляционных и черенковских счетчиков.

Книга /22/ посвящена вопросам применения оптической электроники в вычислительной технике.

Создаются новые типы трековых детекторов - активных мишеней, в которых используются новые качества и преимущества оптических методов регистрации. В работе /23/ приводится описание и параметры трекового детектора нового типа. Суть его состоит в следующем (рис. 16). Имеется пучок сцинтилляционных световодов, состоящий из  $2,7 \cdot 10^3$  волокон с поперечными размерами  $0,9 \times 1,2$  см и длиной 40 см. Заряженные частицы пересекают его в поперечном направлении и порождают световые вспышки, которые распространяются вдоль пучка, принимаются с помощью фотоприемников, расположенных на входе детектора, и усиливаются. В качестве усилителей используются микроканальные пластины. На выходе детектора помещена фосфорная пластина, которая с помощью оптического разъема подключена к фотодиодной матрице, содержащей  $244 \times 284$  ячеек. Сигналы от фотодиодной матрицы поступают на видеомонитор.

Крупным успехом в создании оптических методов съема и обработки информации в ядерно-физических экспериментах можно считать использование

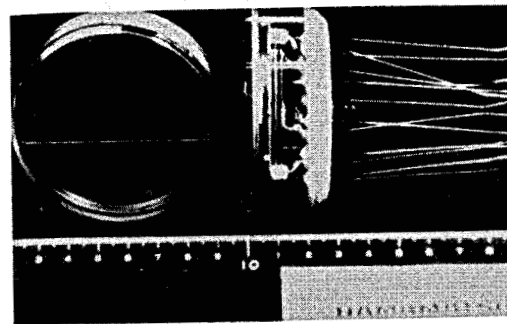


Рис. 14. Общий вид новых типов ФЭУ.



Рис. 15. Общий вид вакуумного фотодиода.

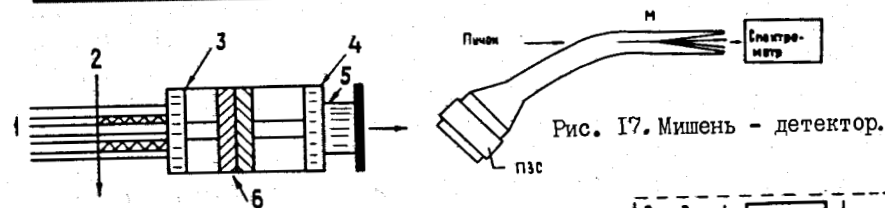
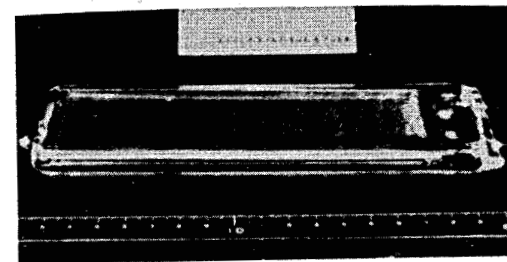


Рис. 17. Мишень - детектор.

Рис. 16. Трековый детектор. 1- световоды, 2- трек частицы, 3- фотокатод, 4- фосфор, 5- оптический разъем, 6- монитор.

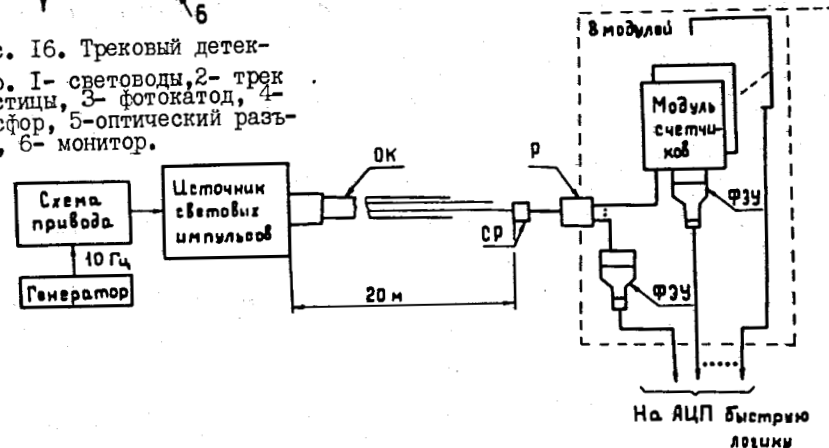


Рис. 18. Блок - схема системы мониторинга счетчиков.

оптического процессора, который предназначен для распознавания треков, регистрируемых в многопроволочных пропорциональных камерах /24/. Важным достоинством процессора является возможность распознавания сложных событий в реальном времени. Процессор обрабатывает оптические сигналы с тактовой частотой, которая ограничена прежде всего быстродействием оптоэлектронных компонентов. Работа процессора основана на сложении некогерентного света от независимых источников.

Входные сигналы, поступающие от МПК, с помощью световодов преобразуются в световые сигналы и разветвляются в заданном направлении с помощью линз и светофильтров. Электронные логические сигналы поступают на входную плоскость процессора, состоящую из матрицы светодиодов, которая расположена в фокусе входной линзы. Эта линза совместно с выходной линзой формирует изображение на фотодиодной матрице. Фильтр, который помещается после второй линзы, представляет собой голографическую пластину. Оптическая система процессора управляется от ЭВМ, что позволяет выполнять селективный отбор треков.

Успехи в разработке сцинтилляционных световодов и оптических методов съема информации, создаваемых на базе ПЗС-структур, позволяют проектировать вершинные детекторы с высокой разрешающей способностью, порядка 10 мкм. Например, в работе /25/ описан вершинный детектор, предназначенный для экспериментов с очарованными частицами. На рис. 17 схематически показана активная мишень, состоящая из сцинтилляционных световодов диаметром 10 мкм. Взаимодействие частиц происходит внутри световода; продукты распада распространяются вдоль соседних световодов, прежде чем они их покинут. Длина пробега частицы составляет 4 мм. Данные о событиях регистрируются с помощью ПЗС-монитора.

Основные достоинства такого детектора-мишени заключаются в следующем:

- вся мишень является активной,
- обеспечивается высокое быстродействие регистрации событий ( $10^4$  час<sup>-1</sup> частиц/с),
- высокое пространственное разрешение,
- события регистрируются в объеме мишени,
- при диаметре пучка сцинтилляторов 5 мм можно зарегистрировать до 300 лучей на один трек.

Работа детектора проверялась на пучке протонов с энергией 15 ГэВ, и были получены изображения треков с пространственным разрешением 100 мкм. Основные ограничения на размеры детектора и на разрешение накладывает характеристика сцинтилляционных световодов.

Серьезной проблемой является создание эффективной системы контроля в тех экспериментах, где число счетчиков составляет несколько сотен и даже тысяч. Если используются ФЭУ, то необходимо калибровать как

амплитуды (т.е. усиление), так и временные параметры. Калибровка усиления важна в калориметрах, где энергия взаимодействующих частиц измеряется по амплитудам сигналов. Точность калибровки должна составлять несколько процентов. Калибровка временных параметров важна для тех сцинтилляционных и черенковских счетчиков, которые используются для получения быстрых совпадений с помощью времяпролетной техники. В работе /26/ описана система калибровки, в которой используется лазер, наполненный азотом, для генерации световых сигналов длительностью 3 нс и с интенсивностью  $10^{15}$  фотонов. Важным узлом данной системы является оптическая линия связи длиной 20 м, по которой сигналы от лазера передаются к сцинтилляционным счетчикам. В кабеле содержится 160 световодов диаметром 200 мкм. Система мониторинга калориметра, состоящего из 4320 счетчиков, описана в работе /27/.

В качестве источника световых сигналов здесь используется мощная ксеноновая лампа, которая имеет эмиссионный спектр, близкий к черенковскому излучению. Кроме того, такая лампа имеет высокую надежность и стабильность в течение длительного времени (несколько лет). Свет от лампы через смеситель поступает в кабель, состоящий из 80 гибких световодов (рис. 18). Каждый из световодов с помощью оптических разветвителей обеспечивает мониторинг модуля калориметра, состоящего из 60 счетчиков. Для обеспечения передачи света к каждому счетчику используются более тонкие световоды диаметром 80 мкм. Расстояние между источником света и счетчиками составляет 20 м.

#### Выводы

1. В современных и будущих экспериментах физики высоких энергий наиболее широкое применение находят электронные и оптоэлектронные методы усиления, регистрации и обработки физической информации.
2. Ведутся интенсивные разработки модулей калориметров, в которых используются шифтеры и волоконные оптические световоды.
3. Разработка оптических сцинтилляционных световодов открывает широкие перспективы для создания высокоточных годоскопов, модулей для калориметров и активных мишеней с высокой разрешающей способностью.
4. Для усиления и регистрации оптических сигналов наряду с ФЭУ в макетных разработках используются малогабаритные полупроводниковые фотодиоды и вакуумные фотодиоды.
5. Большие успехи, достигнутые в разработке оптических и оптоэлектронных приборов, создали условия для построения оптических процессоров, имеющих ряд преимуществ по сравнению с обычными электронными устройствами обработки данных.
6. Несомненный интерес представляют опытные разработки мишеней и детекторов с оптическими методами регистрации и обработки физической информации.

## V. Кремниевые детекторы и мониторы

### I. Кремниевые детекторы

Полупроводниковые детекторы используются в физике высоких энергий более 15 лет. Эта методика базируется на достижениях полупроводниковой технологии. Известны германиевые и кремниевые детекторы. В настоящее время широкое применение находят кремниевые детекторы, поскольку, в отличие от германиевых, они могут работать при комнатной температуре. Следует отметить ряд ценных качеств кремниевых детекторов:

- Высокая чувствительность. Достаточно отметить, что для образования пары электронов в кремниевом детекторе достаточно затратить 3,6 эВ, в газовых 30 эВ и в сцинтилляторах - 300 эВ.
- Хорошее энергетическое разрешение (десятки кэВ).
- Высокая скорость регистрации, до  $10^6$  с.
- Высокая точность - несколько микрон.
- Возможность создания большого числа каналов регистрации на небольшой площади. Разработан 128-канальный кремниевый полосковый детектор, имеющий активную длину 59 мм, толщину 280 мкм и ширину полоски 25 мкм.
- Малая рассеиваемая мощность.

Область применения кремниевых детекторов в физике высоких энергий весьма широка: телескопы, активные мишени, многоканальные позиционно-чувствительные детекторы, кремниевые дрейфовые камеры (новый тип детектора), кремниевый трековый детектор со статическим запоминанием треков частиц (принципиально новый тип детектора). Важно также, что кремниевые детекторы могут работать при значительных магнитных полях /рис. 19/ /30/.

В таблице 4 приведены типичные параметры кремниевых микрополоскового детектора, применяемого в ЦЕРН в эксперименте с очарованными частицами. Такой детектор используется в телескопе, с помощью которого зарегистрировано 4,5 млн. событий при энергии 200 ГэВ.

Современные достижения в области технологии кремниевых детекторов, быстрой электроники и техники больших интегральных микросхем способствуют широкому применению кремниевых детекторов в экспериментальных установках, в том числе и в калориметрах. Работа /28/ посвящена проблемам использования кремниевых детекторов, даны их характеристики. Типичная толщина кремниевых детекторов, применяемых в физике высоких энергий, находится в пределах 100-500 мкм, а сопротивление 2-10 кОм·см. Использование микрополосковых детекторов позволяет получить разрешение 5 мкм. На рис. 20 показан общий вид микрополоскового детектора в разрезе. Полосковые линии имеют длину до 6 см и располо-

жены с шагом 20 мкм друг от друга. Такие детекторы в сочетании с многослойной кремниевой мишенью используются в экспериментах с образованием очарованных частиц, поскольку в этих экспериментах требуются трековые детекторы с высоким разрешением для определения вершины взаимодействия /29/.

Таблица 4

Типичные характеристики кремниевых полосковых детекторов

№	Параметр	Величина
I.	Материал	3 кОм·см, кремний
2.	Толщина	280 мкм
3.	Напряжение смещения	120 В.
4.	Число пар электронов-дырок для частиц с минимальными ионизационными потерями	$24 \cdot 10^3$
5.	Число диодов	1200
6.	Шаг между полосками	20 мкм
7.	Длина полоски	30 мм
8.	Чувствительная поверхность	24×36 мм
9.	Число каналов считывания	100-240
10.	Пространственное разрешение	4,5 мкм
II.	Разрешение двух треков	60 мкм

На рис. 21 приведен общий вид микрополоскового детектора.

Более дешевые детекторы с малым удельным сопротивлением 1-1,5 кОм·см, большими размерами, площадью 20-30 см<sup>2</sup> и толщиной 300 мкм используются в калориметрах /30/. Такие детекторы имеют большую выходную емкость, порядка 3000 пФ. В табл. 5 приведены некоторые данные, характеризующие параметры электронных усилителей в зависимости от выходной емкости детектора. Если не требуется высокое быстродействие, то с целью экономии усилителей при считывании применяется метод деления заряда. Общий заряд детектора распределяется между соседними полосками с помощью взаимной емкости. На рис. 22 приведена схема одного канала усиления. Для считывания сигналов и определения координаты события используются внешние резистивные цепочки и способ последовательного считывания /31/.

Для регистрации событий с большой множественностью применяется метод параллельного считывания сигналов от каждой полоски детектора или сочетание последовательного метода с параллельным. При этом сум-



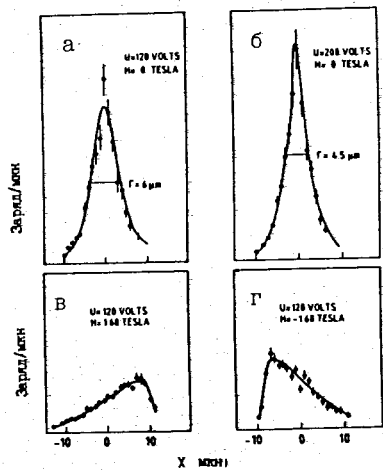


Рис. 19. Зависимость разрешающей способности от магнитного поля и напряжения в кремниевых детекторах.

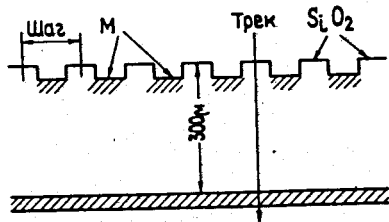


Рис. 20. Микрополосковый детектор в разрезе.

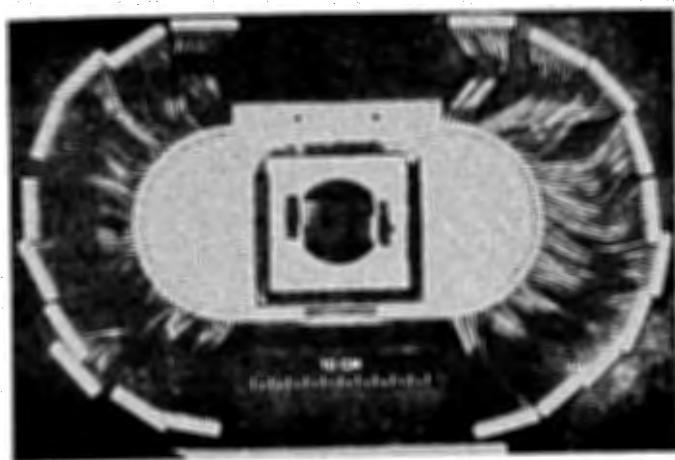


Рис. 21. Общий вид микрополоскового детектора.

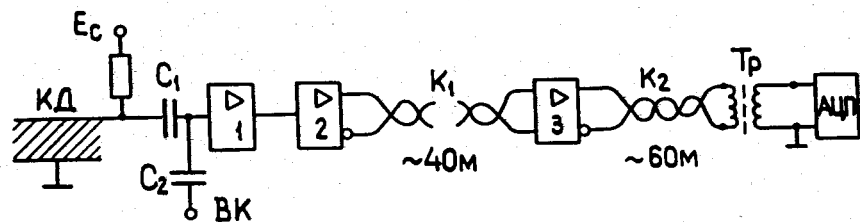


Рис. 22. Схема одного канала усиления и оцифровки.

марный сигнал используется для формирования запускающего (триггерного) импульса. Поскольку выход детектора носит емкостный характер, то для усиления сигналов в основном используются зарядочувствительные усилители. Однако Гатти /32/ показал, что отношение сигнал/шум можно увеличить по крайней мере в  $\sqrt{2}$  раз, если использовать усилитель напряжения. Получено разрешение 23 кэВ при условии, что сигнал считывался от нескольких последовательно включенных полосок (рис. 23).

Таблица 5

Параметры электронных усилителей в зависимости от выходной емкости

Входная емкость усилителя пФ	Величина шума кэВ	Длительность сигнала на выходе нс
20	20	40
200	30	65
3000	150	1 мкс

Телескоп из кремниевых детекторов эффективно используется в качестве вершинного детектора (рис. 24 а). Пучковый телескоп состоит из 6 плоскостей В1-В6. Первые четыре плоскости расположены горизонтально с шагом 50 мкм и объединены в пары. Две другие наклонены к горизонтали на  $\pm 14^\circ$  и имеют шаг 20 мкм. Этот телескоп служит для определения точного положения пучка  $\gamma$  с энергией 200 ГэВ.

Активная мишень М состоит из 10 кремниевых счетчиков толщиной 280 мкм, они расположены на расстоянии 500 мкм друг от друга. Эти счетчики состоят из горизонтальных полосок длиной 26 мм, шаг 20 мкм. Далее за мишенью расположено несколько кремниевых детекторов с шагом 400 мкм. Информация, считываемая от этих детекторов, используется для выработки запускающего импульса, если микропроцессор вырабатывает сигнал о полезном событии.

Вершинный телескоп состоит из 6 микрополосковых детекторов толщиной 280 мкм с активной поверхностью 24×30 мм. Сигналы от этих детекторов считываются методом деления заряда и используются для измерения топологии события с рекордным разрешением 5 мкм. Данные, регистрируемые вершинным детектором, позволяют точно реконструировать обе вершины взаимодействия, как первичную, так и вторичную.

На рис. 24 б более детально показана схема активной мишени. Она сос-

тоит из 10 микрополосковых детекторов с шагом 20 мкм. Они расположены с шагом 500 мкм друг от друга. На расстоянии 20 мм вдоль пучка имеется еще два детектора с шагом 400 мкм. Высокое разрешение, получаемое с помощью микрополосковых детекторов, позволяет решить фундаментальную методическую проблему в физике высоких энергий по определению координаты вершины распада очарованных частиц с временем жизни  $10^{-13}$  с. На рис. 25 приведена гистограмма, иллюстрирующая возможности многослойной кремниевой мишени в эксперименте.

Кремниевый детектор не обладает свойством внутреннего усиления, поэтому на входе усилителя действует заряд, равный числу электронно-дырочных пар, порождаемых энергией заряженной частицы. От стандартного кристалла, имеющего толщину 300 мкм, можно получить сигнал, эквивалентный  $25 \times 10^3$  электронам. Поэтому для кремниевых детекторов необходимы усилители с низким уровнем шумов. Появление многоканальных кремниевых детекторов с микрополосковыми линиями ставит задачу создания таких устройств регистрации, размеры которых были бы адекватны размерам детекторов с учетом числа каналов.

В работе [33] приводятся следующие требования к усилителю считывания: величина ЕМС - 1000-1300 электронов, входное сопротивление - 120 Ом, рассеиваемая мощность - мВт на канал, время нарастания - 2-5 нс, плотность размещения 4 канала на квадратный дюйм. Этим требованиям удовлетворяют усилители, выполненные по гибридно-пленочной технологии. Проблема усиления слабых сигналов (150 нА) является не единственной в процессе считывания данных от кремниевых детекторов. Необходимо также обеспечить создание экономичной схемы регистрации и оцифровки. Одна из таких схем приведена на рис. 26 [34]. После усиления сигналы запоминаются на конденсаторах  $C_1 - C_n$ . Затем с помощью коммутатора данные последовательно заносятся на сдвиговый регистр. Применение К-МОП - технологии для построения такой схемы обеспечивает высокую частоту считывания (5 МГц); устройство имеет 128 каналов считывания и регистрации при рассеиваемой мощности 2 мВт.

Новейшие исследования показывают, что применение кристаллов кремния в будущем откроет весьма заманчивые перспективы. Рассмотрим два примера. Определенный интерес вызывает опытная разработка кремниевой дрейфовой камеры [35, 36]. Принцип действия такой камеры основан на ранее неизвестной схеме транспортировки зарядов в полностью обедненном полупроводнике. В этой схеме электрическое поле, которое осуществляет перенос зарядов, не зависит от поля, которое создает обедненную зону. Возможны следующие области применения подобной схемы переноса зарядов:

- создание полупроводниковых дрейфовых камер с высокой разрешающей способностью,

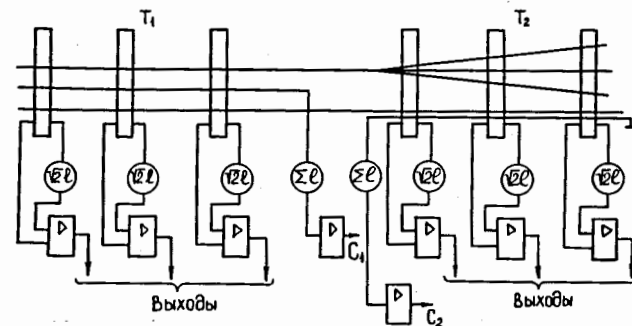


Рис. 23. Параллельная схема считывания.

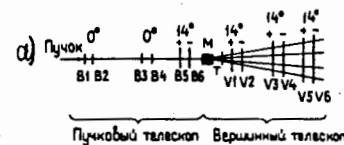


Рис. 24. а - вершинный детектор.  
б - активная мишень.

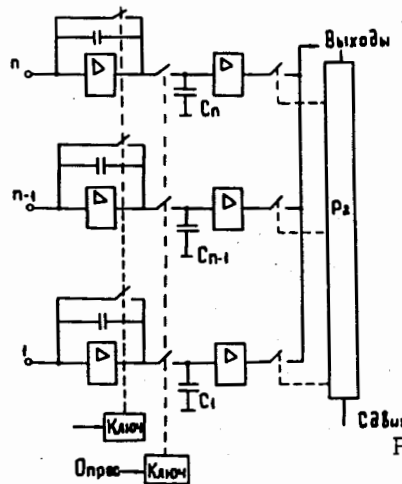
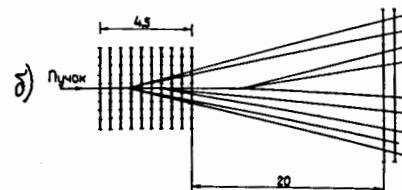


Рис. 26. Схема считывания от многоканального детектора.

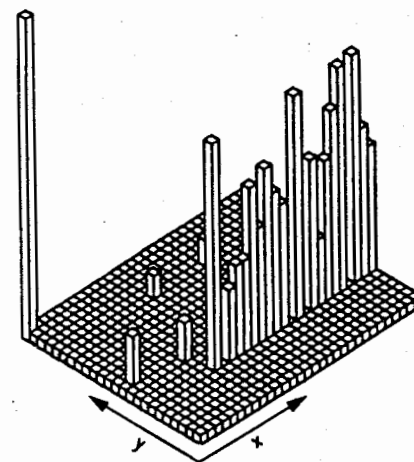


Рис. 25. Гистограмма, иллюстрирующая возможности многослойной кремниевой мишени в эксперименте NA14.

- получение сверхмалых емкостей с целью применения их для создания полупроводниковых спектрометров с большой площадью,  
 - изготовление высокоэффективных фотодиодных матриц и приборов с зарядовой связью.

На рис. 27 показано, как может быть устроена дрейфовая камера с микрополосковыми электродами, с помощью которых создается необходимое для переноса зарядов электрическое поле. Электроны, освобожденные заряженной частицей, сходятся в средней зоне, где имеется потенциальный минимум, и далее дрейфуют в направлении положительного электрода.

Время дрейфа составляет 100 нс на длине 10 мкм. Пространственное разрешение в такой камере может составлять 3 мкм.

В работе /37/ описан принципиально новый тип трекового детектора, в котором трек частицы запоминается в виде заряда в так называемой  $p-i-n$  структуре при температуре жидкого гелия. Такой детектор получил название "криогенный детектор с запоминанием заряда". Под влиянием электрического поля порядка 2 В/мкм заряд может быть сосчитан за время 10 пс. Ожидаемая точность регистрации - 3 мкм. Поскольку заряд может храниться определенное время, то для создания системы считывания в данном случае потребуется гораздо меньшее число усилителей, чем в обычном кремниевом детекторе.

## 2. Кремниевые мониторы

Кремниевые мониторы интенсивно развиваются в последнее десятилетие и применяются для регистрации световых сигналов, для чтения данных и на телевидении. Они имеют малые габариты, идентичные характеристики и малую потребляемую мощность. Важными качествами кремниевых мониторов являются также высокое пространственное разрешение, широкий динамический диапазон, линейность характеристик и отсутствие запаздывания луча. Наиболее широкое применение получили два типа кремниевых мониторов: фотодиодные матрицы (ФДМ) и приборы с зарядовой связью (ПЗС). Различия в принципах действия этих приборов, а также их параметры рассмотрены в работе /38/. В табл. 6 даны основные параметры типичного фотодиода.

На рис. 28 приведена схема ФДМ, которая используется в пикосекундной камере для измерения формы импульсов лазера /39/. Фотодиодная матрица является собственно сканирующей матрицей. Она состоит из 1024 фотодиодов, расположенных на расстоянии 15-20 мкм друг от друга. Мультиплексирование элементов выполняется с помощью МОП-ключей, соединенных с общей выходной шиной. Ключи управляются сигналами, поступающими от сдвигового регистра. Частота импульсов сдвига 3 - 4 МГц. Применение ФДМ позволило получить разрешение 15 пикосекунд, динами-

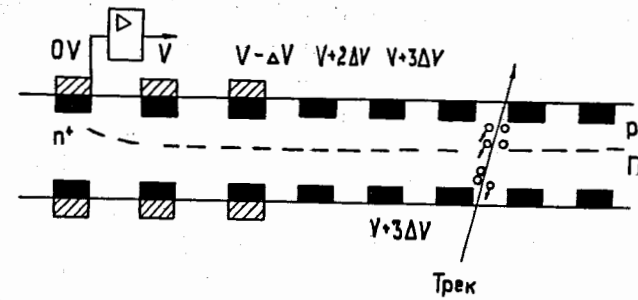


Рис. 27. Схематическое изображение кремниевой дрейфовой камеры.

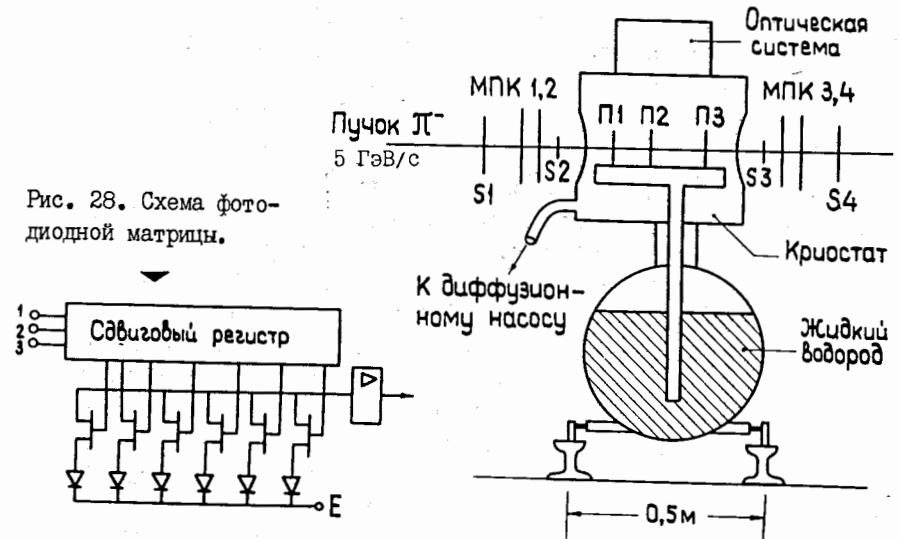


Рис. 28. Схема фотодиодной матрицы.

Рис. 29. Использование ПЗС в качестве трекодетектора. П1-П3 - ПЗС, 1-4 - счетчики, МПК - пропорциональные камеры.

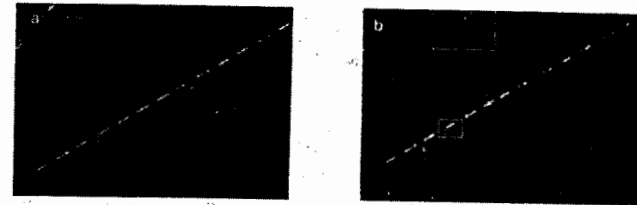


Рис. 30. Зарегистрированные треки: а) с помощью фотодиодной матрицы, б) с помощью ПЗС-монитора.

ческий диапазон 1160 и отношение сигнал/шум  $4 \times 10^3$ . Основной проблемой в технологии ФДМ является создание идентичных матриц.

Таблица 6

Характеристики типичной ФДМ		
№	Параметр	Величина
1.	Размер кристалла	24×10×10 мм
2.	Напряжение смещения	- 20 В
3.	Темновой ток	1,8 нА
4.	Емкость	85 пФ
5.	Ширина ворот для АЦП	4 мкс
6.	Системные шумы	400 электронов
7.	Разрешение	30 кэВ
8.	Число фотоэлектронов	32000 ±10 фэ/ МэВ

Как показано в ряде работ, ПЭС имеют широкие потенциальные возможности использования в ядерно - физических экспериментах. Базовая ячейка ПЭС состоит из большого числа ячеек с механизмом передачи электрического заряда от одной ячейки к другой. Фактически с точки зрения потребителя мы имеем аналоговый сдвиговый регистр (линия задержки). Это

свойство задерживать сигналы является весьма важным применительно к большим детекторам, так как для запоминания сигналов можно использовать более дешевые АЦП и ЗУ. Более детально вопросы применения ПЭС в ядерно - физических опытах рассмотрены в работе /40/. В /41/ изложены физические свойства ПЭС и их технические характеристики. Описаны также применения приборов с зарядовой связью в системах считывания изображений, в запоминающих устройствах и для регистрации треков в стримерной камере. На рис. 29 приведена схема установки, в которой двухмерный ПЭС используется в качестве детектора. Криостат, наполненный жидким водородом, служит для охлаждения ПЭС - матриц П1-П3, что позволяет резко уменьшить темновой ток. Пучок  $\pi^-$ -мезонов формируется так, что его растр около матриц составляет  $\pm 1$  мрад по горизонтали и вертикали. Пропорциональные камеры МПК 1-4 и сцинтилляционные счетчики используются для мониторинга пучка и выработки запускающего установку импульса. В таком детекторе регистрируются 2-трековые события с пространственным разрешением 4,3 мкм. Два трека различаются на расстоянии 40 мкм при эффективности 98%. Система ПЭС-мониторов используется также для регистрации треков частиц в оптической искровой камере. Изготавливаемые в настоящее время матрицы имеют 500×300 элементов с размерами 30×30 мкм, что позволяет

получить хорошее разрешение при относительно большом формате изображения /42/. В электронной схеме управления наряду с ТТЛ-элементами используются МОП- микросхемы, необходимые для управления работой ПЭС-матриц. Используемые в установке ПЭС-матрицы имеют вертикальную структуру, при которой информация одновременно сдвигается во всех колонках к общему сдвиговому регистру, и каждая колонка считывается последовательно. С целью повышения помехоустойчивости монитор смонтирован на отдельной плате и данные передаются по кабелю длиной 2 м к управляющей плате, где смонтирована электроника.

Аналоговый процессор выполняет функции фильтрации шумов, вычитания пьедестала, сбора и хранения данных. Отношение сигнал/шум равно 100. Выходы процессора подключены к входам шести АЦП с временем преобразования 150 нс (6 бит). Данные с выходов АЦП поступают в запоминающее устройство и затем обрабатываются с помощью микроЭВМ. С целью контроля и снятия характеристик ПЭС-монитора трековая информация фотографируется с помощью оптической системы. На рис. 30 приведен один и тот же трек, снятый с помощью пленочной системы и с помощью ПЭС-монитора. Среднее разрешение двух треков составляет 11 мм, в то время как в пленочной системе оно равно 16 мм. Точность измерения вдоль трека равна 10 и 30 мм соответственно.

#### Выводы

1. Кремниевые детекторы имеют широкие потенциальные возможности, особенно в связи с созданием микрополосковых детекторов с большим числом каналов регистрации.
2. Использование детекторов в качестве активных мишеней позволяет создавать вершинные детекторы с высокой разрешающей способностью для изучения свойств очарованных частиц.
3. Интенсивное развитие полупроводниковой технологии создает предпосылки для создания новых типов трековых детекторов, таких как кремниевая дрейфовая камера и криогенный детектор с запоминанием заряда. Эти детекторы имеют точность регистрации порядка 3 мкм.
4. Малые габариты кремниевых детекторов хорошо согласуются с многоканальной электроникой, создаваемой по гибридной технологии.
5. Кремниевые мониторы находят разнообразное применение в ядерной физике: оптические мониторы, трековые детекторы, аналоговые линии задержки и проч.

## VI. Калориметры

### I. Общие вопросы

Успехи и интенсивное развитие физики высоких энергий стимулирует создание мощных ускорителей с высокой светимостью пучка  $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , с энергией несколько сотен ГэВ / и неупругим сечением 50 миллибарн. В свою очередь усиленно развивается техника многоканальных детекторов элементарных частиц. Современные спектрометры физики высоких энергий характеризуются прежде всего тем, что в них объединяется множество различных типов детекторов. Поэтому для считывания информации о пространственных и временных соотношениях требуется огромное количество каналов регистрации и, соответственно, большой объем различной электронной аппаратуры.

Несмотря на крупные успехи микроэлектроники стоимость электронной аппаратуры нередко составляет 30-50% от общей стоимости спектрометра, а число каналов регистрации доходит до 75-100 тысяч /43/. Основную долю стоимости составляют такие электронные блоки, как время-амплитудные конверторы (ВАК) и АЦП.

Большинство спектрометров, создаваемых в настоящее время, носят универсальный характер и содержат следующие компоненты: трековые детекторы / МПК, дрейфовые камеры и проч./, времяпролетные счетчики, электромагнитные ливневые счетчики, адронные и мюонные детекторы, сцинтилляционные счетчики и счетчики из свинцового стекла. В зависимости от эксперимента установка может содержать в себе черенковские счетчики, калориметры и проч.

Каждый из вышеупомянутых компонентов интенсивно развивается, и это касается прежде всего калориметров. Весьма перспективными инструментами в физике высоких энергий являются спектрометры полного поглощения - калориметры, с помощью которых измеряется как энергия, так и координаты частиц. В процессе поглощения образуются вторичные частицы, которые взаимодействуют с веществом детектора. В конце концов вся или большая часть энергии падающих частиц превращается в тепловую энергию. Отсюда и такое название. Однако повышение температуры практически измерить трудно. Поэтому в экспериментах измеряется результат взаимодействия частиц ( ионизация, возбуждение и проч.).

В нашу задачу не входит подробное описание всех типов существующих калориметров и их характеристик. Мы лишь кратко рассмотрим свойства калориметров как источников световых и электрических сигналов. Изучение калориметров в таком аспекте позволит лучше рассмотреть состояние и перспективы развития электроники, применяемой в таких спектро-

метрах. Следует отметить прежде всего следующие положительные качества современных калориметров:

- можно измерять энергию частиц от нескольких МэВ до максимально достижимой в настоящее время на ускорителях, см. табл. 7,
- имеется возможность эффективно отделять лептоны от адронов,
- относительное энергетическое разрешение увеличивается с ростом энергии как  $\sigma/E \approx \text{Const}/\sqrt{E}$ ,
- при фиксированном разрешении длина магнитного спектрометра линейно растет с энергией, в то время как размеры калориметра увеличиваются по логарифмическому закону,
- калориметры пока являются единственными и удобными инструментами для детектирования нейтральных частиц среди вторичных частиц, содержащихся в ливне,
- сигналы, получаемые на выходах ячеек калориметра, как правило, имеют малую длительность (порядка 10 нс) и поэтому могут быть использованы для выработки быстрого триггер-импульса.

Таблица 7

Ускорители с накопительными кольцами

Название	Дата запуска	Ускоряемые частицы	Энергия ГэВ	Светимость см с
ISR	1971		31	$4 \cdot 10^{31}$
SPS	1981	pp, dd	270	$10^{30}$
Isabelle	1986	pp	400	$10^{33}$
FNAL	1984	pp	1000	$10^{30}$
SPEAR	1972	$e^+e^-$	4,2	$10^{32}$
DORIS	1974	$e^+e^-$	5,6	$10^{32}$
VEPP-M	1975	$e^+e^-$	1,3	
DSI	1975	$e^+e^-$	3,7	$10^{32}$
VEPP-3	1977	$e^+e^-$	3,0	$10^{30}$
VEPP-4	1978	$e^+e^-$	7,0	$10^{31}$
PETRA	1979	$e^+e^-$	19,0	$10^{32}$
CESR	1979	$e^+e^-$	8,0	$10^{32}$
PEP	1980	$e^+e^-$	18,0	$10^{32}$
LEP	1986	$e^+e^-$	86,00	$10^{32}$
HERA	1988	$e^-$	30e + 820 p	$10^{31}$

## 2. Разновидности калориметров

Первый спектрометр полного поглощения был использован для измерения адронов в космических лучах Григорьевым и др./44/. Принцип действия спектрометра основан на общем поглощении падающих адронов высоких энергий в толще материала, такого как железо, свинец, между пластинами которого располагается материал детектора (например, сцинтиллятор), где формируются сигналы. В результате взаимодействия первичных частиц с веществом детектора генерируются сложные каскады электромагнитных ливней и адронов (рис. 31,32). В табл. 8 даны типичные параметры сплошных (*continuous*) калориметров.

Таблица 8

Параметр	Вещество детектора				
	Свинцовое стекло	Сцинтилляционное стекло	BCO	MAI	BAF <sub>2</sub>
1. Энергетическое разрешение	$\frac{4,5\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{1,1\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{1,0\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{1,0\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{1,7\%}{\sqrt{E}}$
2. Интегральное время, нс	40	100	300	250	5
3. Радиационная длина, см	2,5	4,35	1,12	2,5	2,1
4. Абсолютная длина, см	42	45	23	41	
5. Световой выход относительно SF-5	1	5,1	10	10	700
6. Радиационное разрушение (10% потерь), рад	2500	8,5	10	10	высокая
7. Число ячеек/м 2,2 рад. длины	400	130	2000	400	570
8. Проблемы, комментарии	Разрушается от радиации	Новый материал	Высокая стоимость, зависимость от темпер.	Гигроскопичен	Сложное считывание

В зависимости от состояния вещества детектора получили распространение три типа калориметров: калориметры с твердым веществом (сцинтилляторы, свинцовое стекло, рис. 33), газовые калориметры (дрейфовые трубки и проч.) и жидкостные калориметры (жидкий сцинтиллятор). В табл. 9 приведены основные параметры сцинтилляционных калориметров /45/. Данный тип спектрометров прежде всего отличается высоким быстродействием. Типичная длительность сигналов (полуширина на полувьсоте) составляет 12 - 15 нс, а в лучших вновь разработанных сцинтилляторах эта величина может составлять 5 - 7 нс.

Таблица 9

Параметры сцинтилляционных калориметров

	Ширина импульса, нс	Разрешение (джиттер) для адронов, нс	Ширина строб-импульса, нс
1. Существующие системы	25	± 2	70 - 100
2. Быстрые сцинтилляторы-шифтеры	8	± 2	20
3. Фотодиодное считывание	8	± 1	20
4. Пространственное разрешение для электромагнитных калориметров	$\frac{10 \text{ ГэВ}}{1 \text{ см}}$	$\frac{100 \text{ ГэВ}}{0,5 \text{ см}}$	
5. Пространственное разрешение (адронные) Поглотитель - железо	$\frac{10 \text{ ГэВ}}{1 \text{ см}}$	$\frac{100 \text{ ГэВ}}{2 \text{ см}}$	
- уран	2 см	2 см	
6. Энергетическое разрешение (сплошного типа) адронные : железо 2,5 см, 70% $\sqrt{E}$ , уран 3 мм, 35% $\sqrt{E}$			
7. Размеры ячеек - 2x2 см, 5,5 см			
8. Динамический диапазон и линейность - хорошие до 1000 ГэВ у адронных и до 50 ГэВ у электромагнитных			

Стандартными элементами считывания сигналов в сцинтилляционных калориметрах являются ФЭУ, которые имеют ряд положительных и отрицательных качеств: хорошее отношение сигнал/шум, большая чувствительная поверхность, высокое быстродействие, в то же время они чувствительны к магнитным полям, неконтролируемый дрейф, насыщение, требуется высокое напряжение питания.

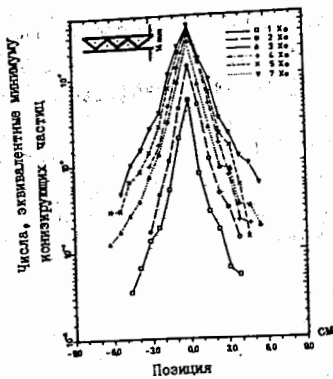


Рис. 31. Вид сбоку на ливень, зарегистрированный в калориметре с дрейфовыми трубками.

Рис. 32. Пример распределения энергии в ячейках электромагнитного калориметра.

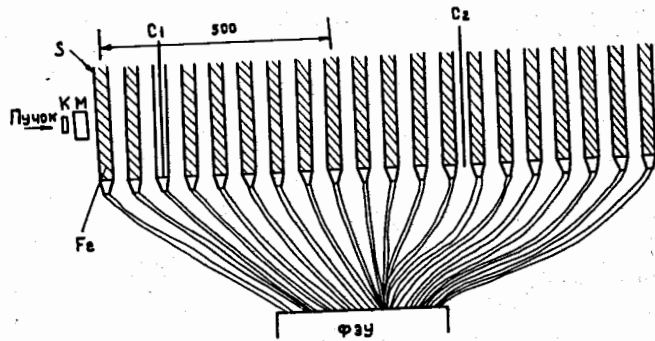


Рис. 33. Модуль сцинтиляционного калориметра. К - внешний конвертор, С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> - свинцовые пластины, S - сцинтиляторы.

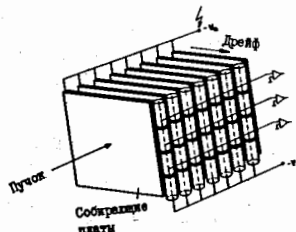


Рис. 34. Модуль калориметра с дрейфовыми трубками.

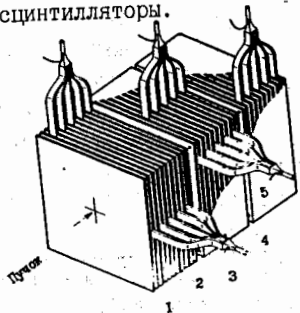


Рис. 35. Модуль адронного годоскопического калориметра. 1 - конверторы, 2 - сцинтиляторы, 3, 4 - световоды, 5 - ФЭУ.

В табл. 10 приведены основные параметры газовых калориметров. Видно, что их временные параметры гораздо хуже, чем у сцинтилляционных калориметров. Газовые калориметры находят применение в установках для изучения электромагнитных взаимодействий, например для определения энергии и направления движения электронов и фотонов. Они имеют, как правило, огромные размеры и в то же время относительно низкую стоимость. Кроме того, такие калориметры имеют хорошую эффективность при низких энергиях электронов.

Физические основы газовых детекторов известны давно. В 1912 г. они были открыты Гейгером. Существенно, что измеряемый сигнал пропорционален сумме сигналов от тех счетчиков, в которых возник разряд. Следует различать дискретные и пропорциональные газовые калориметры. В дискретных приборах трек частицы восстанавливается по отдельным точкам-следам, возникающим в плоскостях детектора. В пропорциональных калориметрах регистрируется суммарный сигнал, пропорциональный энергии, выделяемой в пространстве между электродами. Одним из недостатков дискретных калориметров является то, что при энергии свыше нескольких ГэВ наблюдается насыщение, что затрудняет наблюдение треков.

Для создания газовых калориметров широкое применение находят дрейфовые трубки. Из дрейфовых трубок создаются объемные конструкции детекторов (рис. 34).

Жидкостные калориметры. В первом приближении жидкостные калориметры состоят из металлических пластин (электродов) и заполняющей промежутки жидкости (сцинтилятор, жидкий аргон) /50/. Пластины находятся под различным потенциалом. Сигналы, возникающие на электродах, усиливаются с помощью малошумящих усилителей. В табл. 11 даны параметры жидкостных калориметров. Такие спектрометры имеют следующие положительные качества: стабильность характеристик, хорошее энергетическое разрешение при высоких энергиях, могут работать в магнитном поле, удовлетворительная радиационная стойкость. Одним из существенных недостатков жидкостных калориметров является то, что они нормально работают при низких температурах.

Калориметры можно разделить также на группы по типу частиц, которые они детектируют. Для детектирования электронов и фотонов создаются электромагнитные калориметры, которые имеют меньшие размеры, нежели адронные. Наибольшие размеры имеют нейтринные калориметры, поскольку нейтрино очень слабо взаимодействует с веществом. Как правило, калориметры состоят из множества отдельных модулей. Каждый модуль выполняет пассивные функции - поглощение частиц с помощью поглотителей

(железо, свинец), и активные функции, которые выполняет вещество детектора совместно с регистрирующей электроникой. В отличие от однородных ливневых счетчиков (модулей) в гетерогенных счетчиках функции поглощения частиц и формирования сигналов разделены, что позволяет выбирать подходящий материал и иметь некоторую свободу в способе формирования сигналов, например, получать сигналы для смесителей, схем совпадений и проч. Такие счетчики выполняются в виде сэндвича, т. е. пластины сцинтиллятора или свинцового стекла прослоены пластинами поглотителя.

Таблица 10

Параметры газовых калориметров

Детектор	Пропорциональные трубки и МПК	Насыщенный лавинный режим	Стримерные трубки
1. Минимальная ширина зазора, см	0,7	0,7	0,9
2. Длительность импульса, нс	200	200 - 400	300
3. Временной джиттер, нс	20	20	20
4. Максимальная скорость, МГц	1	1, 10	1
5. Нелинейность	10% при 100 ГэВ	10% при 100 ГэВ	20% при 20 ГэВ
6. Энергетическое разрешение, ГэВ 2,3,6 мм свинца	$\frac{13\%}{\sqrt{E}}, \frac{16\%}{\sqrt{E}}, \frac{22\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{11\%}{\sqrt{E}}, \frac{13\%}{\sqrt{E}}, \frac{19\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{20\%}{\sqrt{E}}$ для свинца 6 мм
7. Влияние магнитного поля	В перпенд. напр. нет, в пар. $\frac{\Delta E}{E} \times 1,4$	Также	Нет
8. Радиационная длина	2,7, 2,0, 1,3	2,7, 2,0, 1,3	2,0, 1,6, 1,1
9. Стабильность	2%	1%	1%

Обычно в экспериментах измеряются следующие параметры ливня:  
- координата максимума ливня  $X$ , порождаемого частицами с энергией  $E$  в единицах радиационной длины:

$$X_{\text{Макс}} = \ln E/E - 1,0,$$

где  $E$ -параметр, характеризующий "критическую энергию в материале".

Другими словами,  $E$ -это энергия электронов, для которой радиационная потеря энергии равна потерям на столкновение и ионизацию;  
- общая глубина (продольная)  $D$ , после которой уже нет увеличения детектируемого сигнала,

$$D = X_{\text{Макс}} + 4 \lambda_{\text{атт}},$$

где  $\lambda_{\text{атт}}$  определяет экспоненциальный спад ливня после максимума;  
- поперечные размеры, характеризующие среднеквадратичную величину места прохождения электронов через критическую энергию при длине пробега в одну радиационную длину  $1/46$ .

Таблица 11

Характеристики жидкостных калориметров

Название	TI-SSO	R-806	SPSI - I44	
Материал	A/P8	A/P8	A/U	A+CH4/U
1. Зазор, мм	5	2	1	1
2. Толщина электродов, мм	2	1,5	1,5	1
3. Радиационная длина, см	2	2	0,6	0,6
4. Абсолютная длина, см	60	60	20	20
5. Напряжение В/мм	0,4	1	-2	-2
6. Время сбора заряда, нс	1400	600	50	25
7. Разрешение, мм для эл/адрон.	3	3	1/5	1/5
8. Энергетическое разрешение эл/адрон., ГэВ	$\frac{9\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{12\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{9\%}{\sqrt{E}}, \frac{28\%}{\sqrt{E}}$	$\frac{9\%}{\sqrt{E}}, \frac{28\%}{\sqrt{E}}$
9. Шум/50 см эл/адрон., МэВ	5	10	100/800	30/300

В ИФЭЭ /47/ созданы годоскопические калориметры, при помощи которых можно измерять не только энергию, но и координаты ливня, которые определяются путем измерения энерговыделения электромагнитного или адронного ливня в его поперечном сечении. При этом достигается точность, которая на порядок величины лучше, чем ширина ливня или размер ячейки калориметра. Для регистрации большого числа фотонов и повышения восстановления кинематики по сравнению со сцинтилляционным



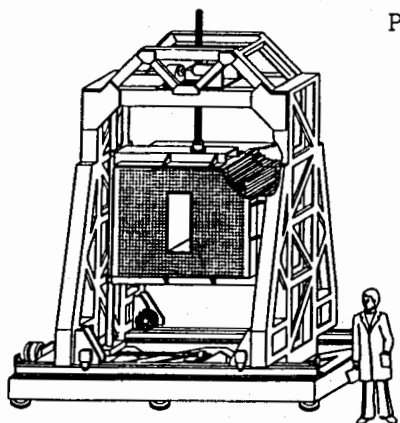


Рис. 36. Общий вид ГАМС - 4000.

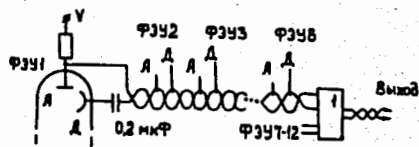


Рис. 37. Схема считывания сигналов в сцинтилляционном жидкостном калориметре.

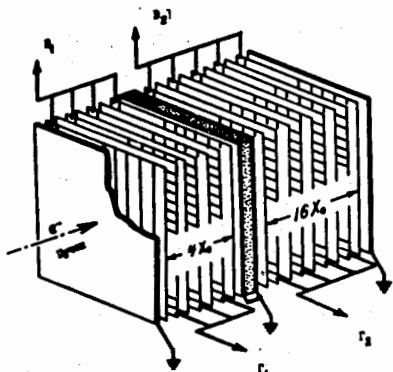


Рис. 38. Модуль жидкостного аргонного калориметра. В, Г - электроды.

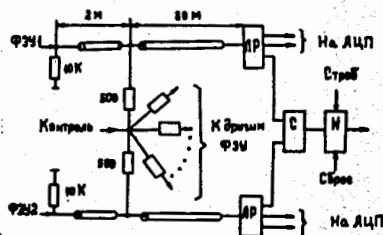


Рис. 39. Схема считывания сигналов от 2-х ячеек сцинтилляционного калориметра. ЛР - линейные размножители, И - усилитель-интегратор, С - смеситель.

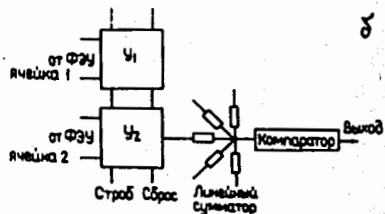
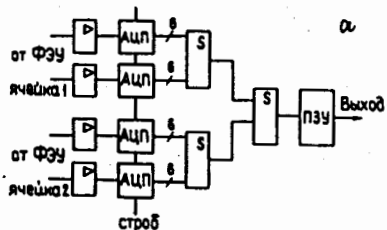


Рис. 40. Способ суммирования сигналов, поступающих от ФЭУ: а) цифровой способ, б) аналоговое суммирующее устройство.

годоскопическим калориметром разработан также годоскопический спектрометр ГАМС /48/. Он представляет собой матрицу из большого числа (свыше 4000) счетчиков полного поглощения (рис. 35), поперечный размер которого сравним с шириной электромагнитного ливня (3 см). На рис. 36 приведен общий (схематический) вид ГАМС-4000, созданный для эксперимента *NA-12* в ЦЕРНе. В табл. 12 приведены параметры годоскопического  $\gamma$ -спектрометра.

Таблица 12

Основные параметры годоскопического  $\gamma$ -спектрометра при  $E = 20 \text{ ТэВ}$

- размеры ячейки из свинцового стекла	4,5x4,5x65 см
- тип стекла	SP25
- тип ФЭУ	2 см, 10 динодов
- общее число ячеек	1,6 $10^4$ , 128x128
- общий вес стекла	90 тонн
- рабочая площадь спектрометра до мишени	30 м <sup>2</sup>
- расстояние от спектрометра до мишени	300 м
- диапазон измеряемых энергий	1 ГэВ - 20 ТэВ
- стабильность	1%
- точность измерения $\gamma$ -квантов	1%
- точность измерения координат $\gamma$ -квантов	лучше 0,5 мм
- разрешение по массе, распавшейся на $\gamma$ -кванты	1%
- расстояние между $\gamma$ -квантами, достаточное для полного разделения ливней	15 см
- расстояние между $\gamma$ -квантами, достаточное для разделения $\eta^0$ -мезонов и одиночных $\gamma$ -квантов	3 см
- число одновременно регистрируемых $\gamma$ -квантов	30 и более
- сигнал/фон	$2 \times 10^4$
- временное разрешение	30 нс
- число принимаемых событий	до $10^7$ /цикл
- число записываемых событий	до $10^4$ /цикл
- время калибровки спектрометра в пучке	2-3 дня
- стоимость одного канала (включая электронику)	800 шв. франк.
- полная стоимость	$12 \times 10^6$ шв. франк.
- срок изготовления	2-3 года

### 3. Организация считывания сигналов в калориметрах

Рассмотрим несколько примеров организации считывания сигналов в калориметрах. На рис. 37 приведена схема считывания сигналов, регистрируемых в одном сегменте жидкостного сцинтилляционного калориметра.

К общей шине, которая представляет собой две скрученные пары проводов, подключены 12 выходов ФЭУ. Суммарный сигнал получается на выходе смесителя. Затем он оцифровывается с помощью АЦП и в таком виде записывается в память ЭВМ. С помощью калориметра измеряется энергия адронов, возникающих при взаимодействии нейтрино с нуклонами /49/. На рис. 38 изображен модуль жидкостного калориметра. Особенностью данной конструкции является то, что в ней как анодные, так и катодные плоскости разделены на несколько полосок, от которых сигналы считываются по независимым каналам. Однако здесь требуется высококачественный усилитель, так как величина наведенного заряда очень мала и электроды не привязаны к потенциалу земли. Вертикальные электроды находятся под низким потенциалом, и поэтому они подключены непосредственно к входам усилителей. Выходная емкость равна 1000 пФ.

#### 4. Формирование триггер-импульсов в калориметрах

Как уже отмечалось выше, калориметры являются источниками огромного количества сигналов, с помощью которых определяются параметры кластеров, идентифицируются события и вырабатывается импульс для запуска установки. Причем обработка сигналов осуществляется как аналоговыми, так и цифровыми методами (рис. 39). На рис. 40 приведена блок-схема, используемая для выработки триггер-импульса. Сигналы, поступающие от ФЭУ после усиления и интегрирования, поступают на входы быстрых АЦП, которые оцифровывают аналоговые сигналы в 6-разрядный код за время 10 нс. Для суммирования данных, поступающих от большого числа каналов, применяется метод каскадного включения двоичных сумматоров /52/. Содержимое ПИЗУ программируется таким образом, чтобы сигнал на его выходе вырабатывался лишь при условии достижения определенного порога энергии. Однако при большом числе каналов регистрации (свыше 100) цифровая схема суммирования получается громоздкой и, что не менее важно, растут задержки сигналов в цепях электронных схем.

Появление быстродействующих аналоговых интегральных микросхем позволяет создавать более быстрые пороговые устройства (рис. 40 а). Суммарный аналоговый сигнал сравнивается с помощью компаратора. Схема получается довольно простой, однако не следует забывать, что функциональные возможности таких устройств ограничены. Например, определяемая величина множественности не превышает 6-7.

Суммирование аналоговых сигналов широко используется также в газовых и жидкостных калориметрах. В работе /53/ описана схема выработки запускающего импульса для калориметра, разработанного в Орсе для обнаружения распадов нуклонов. Установка находится в туннеле глубоко

Рис. 41. Схема для получения суммарного импульса в большом газовом калориметре.

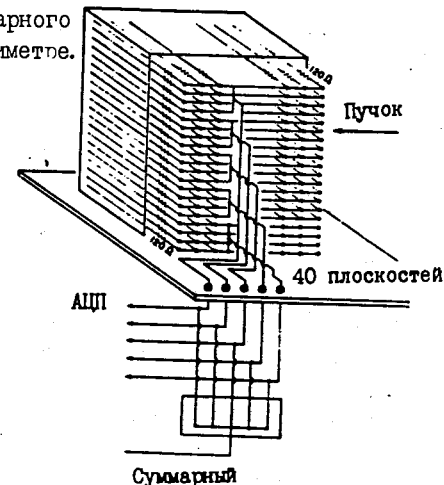


Рис. 42. Схема выработки триггер-импульса.

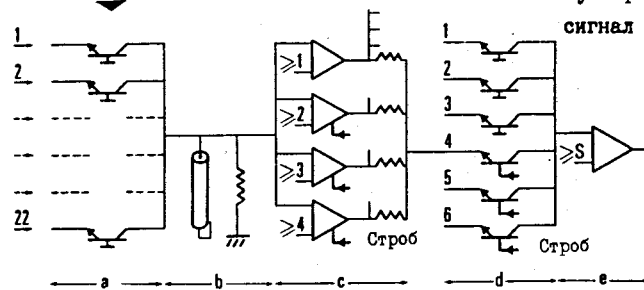


Рис. 43. Аналоговая часть схемы для отбора событий в сцинтилляционном калориметре.

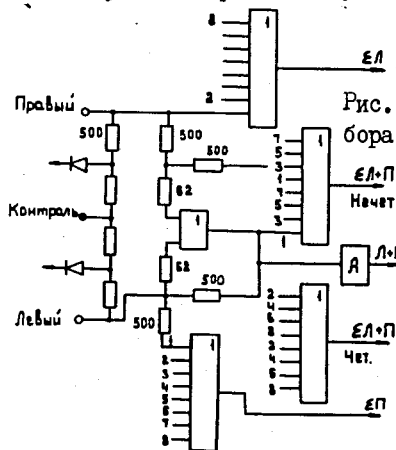
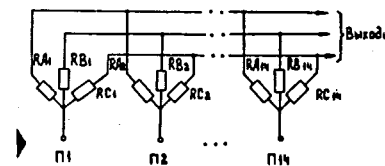


Рис. 44. Аналоговая кодировка сигналов.



под землей. Детектор состоит из счетчиков Гейгера, изготовленных с учетом современной технологии. Общие размеры детектора - 6х20 м. На первом этапе изготовлено 8000 счетчиков длиной 6 м. Счетчики складываются, образуя таким образом плоскости, каждая из которых состоит из 352-х счетчиков (рис. 41). В плоскостях регистрируется множественность сигналов в пределах  $1 \leq m \leq 4$ . Триггерный сигнал вырабатывается при условии, что по крайней мере в каждой плоскости сработало не менее 4-х счетчиков. На рис. 42 приведена схема выработки запускающего импульса. Счетчики объединены в группы по 16 штук в каждой группе. Другими словами, плоскость, состоящая из 352-х счетчиков, разделена на 22 группы, сигналы от которых довольно просто суммируются с помощью транзисторной схемы. Суммарные сигналы от аналогичных плоскостей поступают на входы компараторов. После трехступенчатого суммирования окончательно принимается решение о запуске установки. На рис. 43 приведена схема устройства, предназначенного для формирования запускающего импульса в сцинтилляционном калориметре /54/. В качестве счетчиков здесь используются пластические сцинтилляторы и ФЭУ. Устройство характеризуется следующими тремя особенностями:

- для определения позиции адронного ливня используется сцинтилляционный годоскоп, в котором применены пластики шириной 45 см,
  - сигналы считываются от обоих концов счетчика (слева и справа),
  - отдельно суммируются сигналы от обоих концов каждого счетчика.
- Отношение амплитуд сигналов слева и справа дает координату взаимодействия. Всего в калориметре таким способом регистрируется информация от 1160 счетчиков. Время выработки триггер-импульса составляет 250 нс. Этот импульс используется для стробирования ворот АЦП.

В модульном калориметре с пропорциональными трубками для формирования запускающего импульса разработано аналоговое решающее устройство /55/. Установка служит для детектирования фотонов высоких энергий. Калориметр состоит из отдельных сегментов с размерами 14х14х30 см, которые выбраны исходя из того условия, чтобы размеры сегмента были больше ожидаемых поперечных размеров ливня. В свою очередь сегмент состоит из детектирующих плоскостей, прослоенных свинцовыми пластинами (всего имеется 20 плоскостей). Каждая плоскость состоит из 14 трубок с сечением 1х1 см<sup>2</sup>. В конечном итоге один сегмент калориметра содержит 280 пропорциональных трубок, от которых сигналы поступают на входы блока регистрации. Блок регистрации наряду с усилителями, аналоговой памятью и схемами для мультиплексирования АЦП содержит резистивную цепочку, параметры которой взвешены по определенному закону. С целью повышения точности вся область сегмента

разделена на шесть равных частей. Сигналы от разделенного таким образом сегмента подаются на резистивную цепочку, как это показано на рис. 44. В конечном итоге от каждой части сегмента получается три сигнала RA, RB и RC, причем выполняются условия

$$f_A = R_0/RA = a(x-c)^2 + b,$$

$$f_B = R_0/RB = a(x+c)^2 + b,$$

$$f_C = R_0/RC = 1 - f_A - f_B,$$

где  $-7 < x < 7$  - номер трубки,  $a = 0,008$ ,  $b = 0$ ,  $c = 4,5$ .

Выбор квадратичной функции позволяет регистрировать нулевой, первый и второй момент в поперечном энергетическом распределении в каждой области. Соответствующим выбором констант можно оптимизировать разрешение этих моментов, которые вычисляются по формулам

$$E = SA + SB + SC, \quad \bar{x} = \frac{SB - SA}{4aCE}, \quad \bar{x}^2 = \frac{SA + SB}{2aE} - c^2 - b/a,$$

$$\sigma_x^2 = \bar{x}^2 - \bar{x}^2,$$

где E - общая энергия, поглощаемая в каждой части сегмента, X - центр энергетического распределения и  $\sigma_x$  - стандартное отклонение распределения, SA, SB и SC - выходные сигналы. Использование аналогового решающего устройства позволило надежно дискриминировать отдельные фотоны от  $\pi^0$ - мезонов.

В Лаборатории им. Э. Ферми разработан аналого-цифровой процессор, предназначенный для выделения более сложных событий /56/. На рис. 45 показано фронтальное изображение калориметра, содержащего 132 сегмента. Жирными линиями очерчены два зарегистрированных кластера. Амплитуда сигнала, получаемая в каждом сегменте, умножается на синус полярного угла, характеризующего положение данного сегмента. Импульс, запускающий установку, формируется в том случае, когда суммарная энергия, выделяемая в определенной группе сегментов, превышает заданную величину. Суммарный сигнал получается с помощью быстродействующего аналогового сумматора, в котором используется операционный усилитель с полосой пропускания 1,2 ГГц. Сигналы, поступающие на входы сумматоров, предварительно кодируются при помощи специально изготовленной матрицы совпадений.

Всего в специализированном процессоре параллельно вычисляется 40 суммарных сигналов, с помощью которых окончательно формируется сигнал о запуске установки.

#### Выводы

Калориметры являются одними из основных спектрометров в современной физике высоких энергий. Следует отметить широкое разнообразие типов калориметров, большой диапазон размеров: от нескольких сантиметров

(кремниевые калориметры) до нескольких метров в ширину, глубину и высоту (газовые и жидкостные калориметры). Они являются источниками огромного количества сигналов, для считывания и предварительной обработки которых необходима дорогостоящая электроника.

Наиболее широкое применение в настоящее время находят аналоговые методы съема и обработки сигналов, регистрируемых в калориметрах. Эти методы отличаются высоким быстродействием, экономичностью и простотой решающих устройств. Однако по таким параметрам, как точность, гибкость и универсальность, они уступают цифровым методам.

## VII. Методика многопроволочных пропорциональных камер

### I. Катодное считывание

В ряде экспериментов физики высоких энергий и особенно в прикладных исследованиях, где используются МПК, имеется возможность существенно сократить число каналов регистрации, что приводит к резкому сокращению регистрирующей электроники и упрощению конструкции детектора. Шарпак и Фишер показали [57-59], что на всех электродах МПК, за исключением анодных, наводится положительный сигнал. Катодная плоскость может состоять из проволочек или полосковых линий

(рис. 46). Эти электроды используются для измерения заряда, который имеет определенное распределение, центр которого совпадает с центром лавины (облака электронов), возникшей в результате взаимодействия заряженной частицы с веществом детектора. Важно, что амплитуда и развитие во времени наведенных на катодных электродах импульсов зависит от позиции кластера по отношению к электродам. Этот факт используется для измерения пространственного положения кластера с точностью до 60 мкм. Координаты центра кластера можно вычислять аналоговым, цифровым и аналого-цифровыми способами.

В качестве датчика сигналов широкое применение получила магнитострикционная линия задержки. Этому вопросу, в частности, посвящена работа [60], в которой исследованы вопросы влияния газовых смесей на развитие лавины и на точность регистрации. Если использовать магическую смесь газов, то можно получить пространственное разрешение 100 мкм для линии задержки, в которой скорость распространения сигналов равна 11 нс/см. На рис. 47 приведены три схемы, на которых отражены наиболее распространенные методы регистрации центра кластера [61]. Координата центра кластера вычисляется из выражения (рис. 48)

$$X = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2},$$

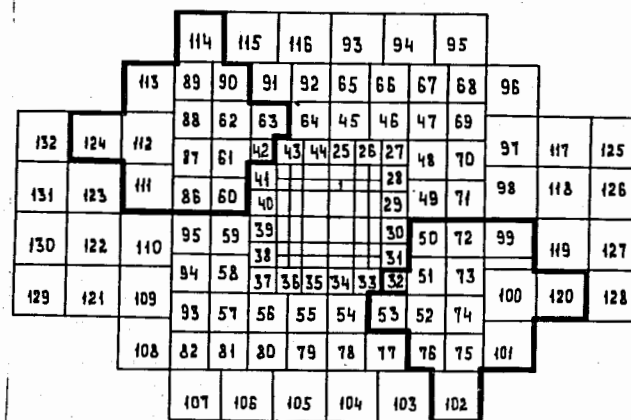


Рис. 45. Фронтальное изображение калориметра.

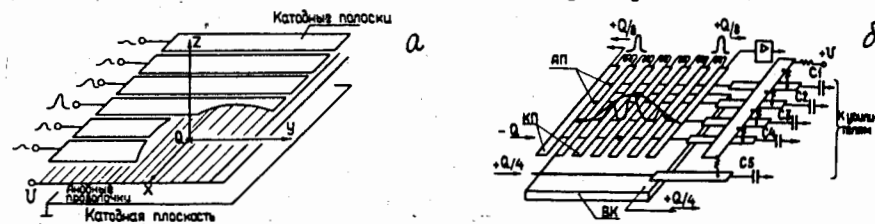


Рис. 46. МПК с катодными полосковыми электродами.

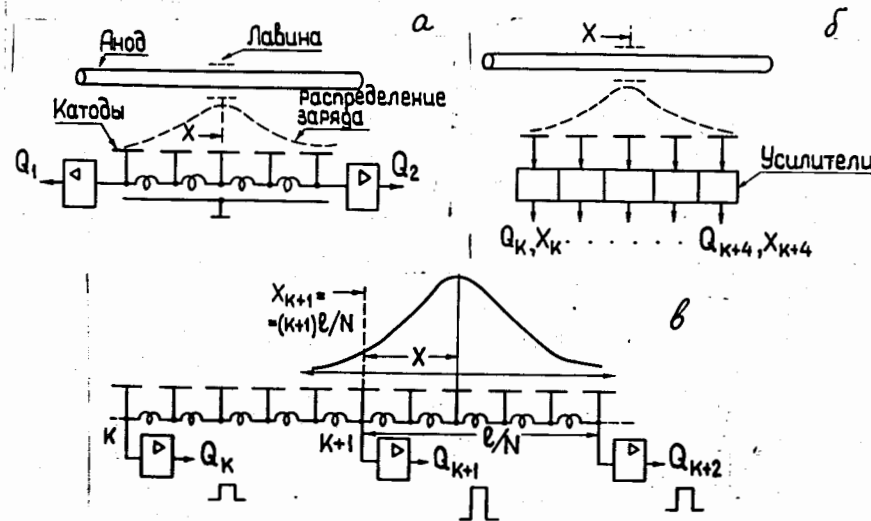


Рис. 47. Методы определения центра кластера.

где  $Q_1$  и  $Q_2$  - величины зарядов, регистрируемых на концах линии задержки. Рассмотренный метод определения центра кластера имеет тот недостаток, что с увеличением размеров камеры (свыше 0,5 м) уменьшается точность регистрации. С целью устранения этого недостатка Шарпак и др. предложили подключить к каждой катодной полоске регистрирующий канал, состоящий из последовательно включенных усилителя, линии задержки, линейной схемы пропускания и АЦП. При этом координата центра кластера вычисляется из выражения /62/:

$$X = \frac{\sum X_k Q_k}{\sum Q_k}$$

На рис. 47 б показаны только усилители. Для реализации такого метода требуется большое количество дорогостоящих АЦП с широким диапазоном (до 12 бит). Применение метода разделения линии задержки на несколько равных частей (рис. 47в) позволяет сократить число каналов регистрации при сохранении точности, присущей параллельному методу. Координата центра "тяжести" лавины вычисляется из выражения

$$X = \frac{\sum X_k Q_k}{\sum Q_k},$$

где  $X_k = (k+1)l/N$ .

После усиления импульсы запоминаются на аналоговом ЗУ и затем с помощью коммутатора пропускаются через специальный фильтр, на выходе которого в момент перехода сигнала через нуль определяется центр тяжести кластера. Точности регистрации, соответственно, обратно пропорциональны  $N^{1/2}$  и  $N^{3/2}$ , где  $N$  - число, на которое разделен электрод.

В ряде работ /63-64/ предложены методы регистрации кластеров, которые сочетают в себе простоту первого метода и точность, присущую второму и третьему методам. Гатти /63/ предложил конструкцию камеры с двумя сеточными электродами, расположенными между анодной и катодной плоскостями. Оригинальное соединение сеточных электродов позволяет сэкономить количество усилителей и получить пространственное разрешение 300 мкм. Путем группирования специальным способом катодных и анодных проволочек /64/ получено пространственное разрешение 190 мкм.

Метод цифрового дифференцирования. Информация, считываемая от катодных электродов, после усиления подается на входы аналоговых вычитающих устройств, которые включены так, что сигналы от каждой из двух соседних проволочек катодной плоскости вычитаются и подаются на входы соответствующих дискриминаторов. Вычитанию амплитуд соседних сигналов соответствует операция цифрового дифференцирования. При этом на месте пика импульсного распределения результирующий сигнал равен нулю. Этот факт используется для регистрации координаты центра кластера /65/.

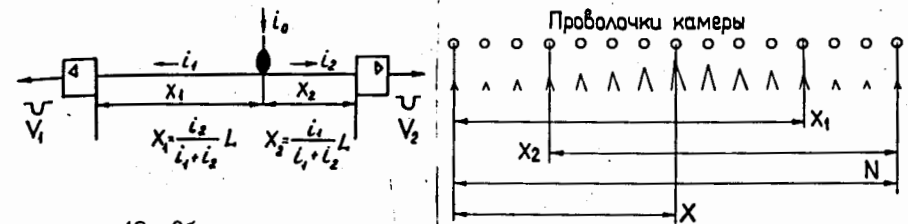


Рис. 48. Общая схема для вычисления координаты методом деления заряда.

Рис. 49. К вычислению центра кластера цифровым способом.

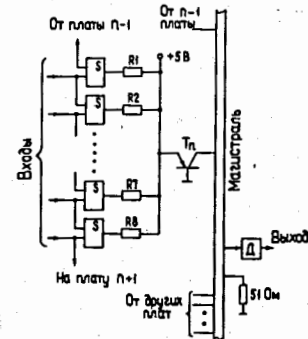


Рис. 50. Схема для определения количества кластеров.

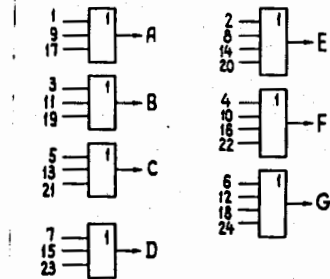


Рис. 51. Схема кодирования для регистрации тройного кластера. Цифрами обозначены номера проволочек.

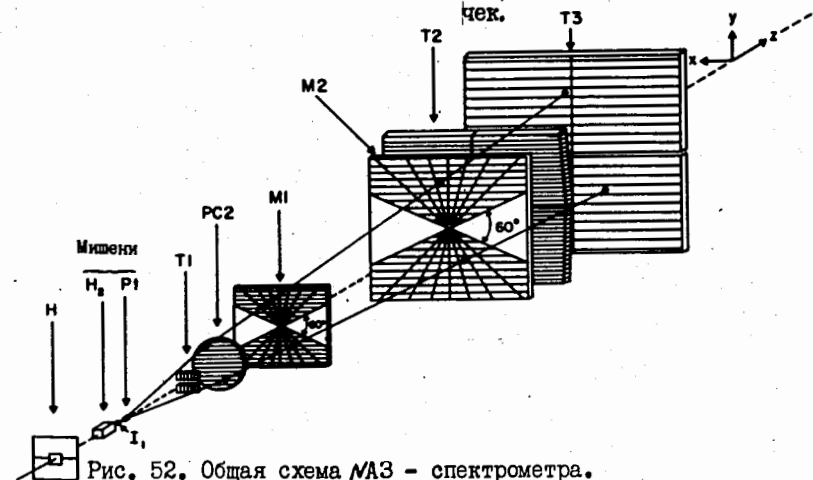


Рис. 52. Общая схема МАЗ - спектрометра.

Т1, Т2, Т3 - годоскопы, М1, М2 - для выработки триггер-импульса, Р1, Р2, .... Р36 - МПК спектрометра.

## 2. Цифровые методы обработки кластеров

С целью регистрации 2-х координат сработавшей частицы данные считываются как от анодных, так и от катодных проволочек. Причем с помощью данных, считываемых от анодных электродов, определяется координата центра кластера, а при чтении сигналов от катодных проволочек определяется центр "тяжести" лавины с довольно высокой точностью (несколько десятков мкм).

Рассмотрим рис. 49, из которого следует, что координата центра кластера вычисляется из выражения

$$X = (N + X1 - X2/2),$$

где  $N$  - общее число каналов регистрации,  $X1$  и  $X2$  - координаты "краев" кластера, которые определяются с помощью приоритетных шифраторов. В зависимости от используемых микросхем время вычисления координаты  $X$  на специальном процессоре составляет 30-100 нс, а точность регистрации равна половине расстояния между анодными проволочками. Координата центра "тяжести" лавины вычисляется по формуле

$$X = \sum A_i X_i / \sum A_i,$$

где  $A_i$  - амплитуда  $i$ -го импульса. С целью экономии числа каналов регистрации в работе /66/ предлагается считывать сигналы только от 3-х центральных проволочек. В этом случае координата  $X$  определяется из выражения

$$X = X1 + (A2 + 2A3) / (A1 + A2 + A3).$$

Для преобразования амплитуд импульсов в цифровой код требуются 10-разрядные АЦП, поэтому время вычисления координаты составляет не менее 1 мкс. Зато точность регистрации равна 10 мкм.

Важным узлом в таком процессоре является устройство для выделения координат 3-х центральных катодных проволочек (полосок). Принципиальная схема такого устройства описана в работе /67/. Она состоит как из аналоговых, так и из цифровых элементов. С помощью аналоговых ключей и цифровой логики выделяются три сигнала, имеющие наибольшие амплитуды. Затем они оцифровываются, а координаты краев кластеров определяются с помощью приоритетных шифраторов.

Приоритетные шифраторы эффективно используются и в том случае, когда в МПК регистрируется не один, а несколько кластеров. Рассмотрим пример /68/. Пусть от МПК на регистр поступило слово, содержащее два кластера и два независимых срабатывания

0111001001111010.

Вначале с помощью схем, состоящих в основном из сумматоров по модулю два, этот код преобразовывается в слово, в котором содержатся

единицы около одного из краев кластера, а обособленные единицы вообще устраняются

010000001000000.

Далее с помощью приоритетных шифраторов определяется как число кластеров, так и их координаты. Если же требуется определение координаты центра кластера, то с помощью специальной схемы находятся координаты его краев и затем по величине разности и суммы этих величин вычисляется координата центра.

Следует отметить, что использование приоритетных шифраторов приводит к резкому увеличению времени регистрации, так как преобразование унитарного кода в двоичный код выполняется параллельно-последовательным способом. Поэтому с целью увеличения быстродействия в тех случаях, когда требуется только подсчет числа кластеров, используются пороговые схемы с применением аналоговых и цифровых элементов. Одна из таких схем приведена на рис. 50 /69/. Сигналы после усилителей-формирователей параллельно поступают на входы сумматоров по модулю два, которые соединены так, что на их выходах формируется код, пропорциональный числу зарегистрированных событий. Например, если на входах сумматоров по модулю два был код 01011101011110, то на выходах формируется код 01010001010000. Далее с помощью дискриминатора вырабатывается сигнал, характеризующий множественность зарегистрированных частиц. В работе /70/ используется аналогичный принцип, только входная логическая цепочка состоит из одновибраторов с прямыми и инверсными выходами и элементов И, что позволяет выделять только одну крайнюю координату кластера.

## 3. Специальные методы кодирования

В ряде случаев применение специальных методов кодирования позволяет получить высокое быстродействие, так как информация считывается и преобразуется в нужную форму параллельно. Так, для регистрации координаты одного кластера в работе /71/ используется диодный шифратор на 4096 входов. Причем диоды шифратора равномерно распределены вдоль камерн вместе с усилителями. Адреса проволочек, число которых 4096, разделены на четыре группы с весами  $8^0, 8^1, 8^2, 8^3$ . Предполагается, что длина кластера не превышает восьми. Тогда независимо от позиции кластера достаточно с помощью мажоритарной схемы просто проанализировать младшие 8 разрядов. Сигнал с выхода мажоритарной схемы используется для стробирования данных на регистр.

С целью уменьшения числа каналов регистрации при определении координаты тройного кластера в работе /72/ используется оригинальная схема кодирования. На рис. 51 приведена схема подключения 24-х проволочек

к входам 7 усилителей-смесителей. Однако такая схема работает правильно только в том случае, если одновременно срабатывает ровно три проволочки.

#### 4. Пример применения метода катодного считывания

Следует отметить, что метод катодного считывания применяется не только с целью регистрации второй координаты зарегистрированной частицы, но и для выработки триггер-импульса при регистрации более сложных событий. С этой целью была изготовлена МПК со сложной конфигурацией электродов. Система из таких камер используется в эксперименте  $\mu$ A3 в ЦЕРН для изучения мюонных пар с большой массой /74-76/.

На рис. 52 приведена схема установки, которая представляет собой магнитный спектрометр, основу которого составляют МПК, сцинтилляционные годоскопы и две МПК М1 и М2 с катодным считыванием. Основные функции триггерной системы заключаются в том, чтобы отбирать массивную пару мюонов и в то же время не регистрировать резонансы с малой массой. Довольно эффективным способом это можно сделать, измеряя поперечный импульс  $M$  одного или двух мюонов, поскольку димюонная масса симметричной пары может быть вычислена из выражения

$$M = p_{T1} + p_{T2}$$

Практически величина  $M$  может быть измерена с помощью двух МПК с катодным считыванием и вычислена с помощью быстрого процессора за время порядка 110 нс. Однако прежде всего необходимо обеспечить быстрый отбор кандидатов в полезные события. Эту функцию выполняет так называемый "предтриггер". Выработка запускающего импульса происходит в тех случаях, когда два мюона зарегистрируются в годоскопе Т3, расположенном позади железного поглотителя толщиной 1,8 м. В этой операции используются данные, регистрируемые с помощью годоскопов Т1, Т2 и Т3. При этом должны выполняться следующие условия:

- всевозможные двойные совпадения сигналов, поступающих от элементов годоскопов Т2 и Т3, которые определяют траектории двух мюонов, должны использоваться только от тех элементов, которые находятся в створе мишени,

- каждая полоска в МПК Т3 ставится в соответствие четырем в МПК Т2, причем совпадение сигналов, поступающих от этих элементов, гарантирует отбор одного мюона,

- отсутствие гало-частиц около счетчика Н обеспечивается тем, что он располагается на расстоянии 10 м за мишенью.

Сигнал предтриггера появляется через 260 нс после акта взаимодействия и используется в следующих целях:

- для стробирования усилителей МПК,

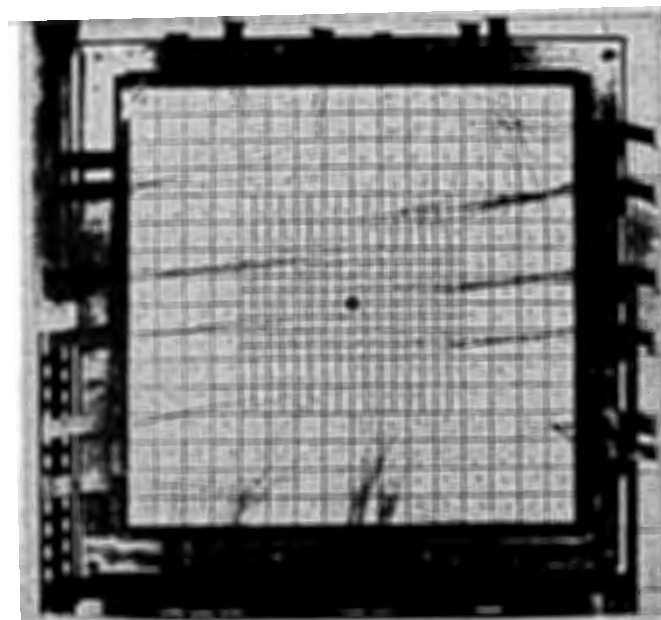


Рис. 53. Общий вид МПК с катодным считыванием.

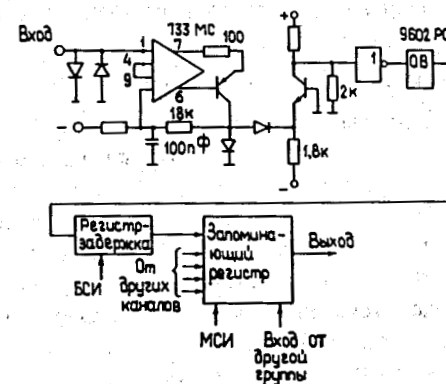


Рис. 54. Схема одного канала считывания и регистрации для МПК.

-для управления работой быстродействующей матрицы совпадений. Здесь мы имеем пример того, как камера с катодным считыванием непосредственно используется для выработки триггер-импульса первого уровня. С этой целью катоды МПК разделены на 20 горизонтальных полосок (рис.53). Каждая полоска, в свою очередь, разделена на 64 ячейки, а в пределах плоскости всего содержится 400 ячеек. Причем в центральной части ячейки имеют размеры 3х3 см, а по краям - 6х6 см. Ячейки покрыты тонким серебряным слоем и отделены друг от друга небольшими промежутками (2 мм).

Когда частица проходит через камеру и происходит взаимодействие, то возникают сигналы как на анодных проволочках (в виде лавины), так и на катодах (ячейках). Сигналы, формируемые в ячейках, поступают на входы матрицы совпадений. Вертикальная компонента поперечного импульса  $p_y$  частицы, рождаемой в мишени и детектируемой в ячейках  $n_1$  и  $n_2$ , расположенных в плоскостях M1 и M2, вычисляется из выражения

$$p_y^V = A / (n_1 - n_2)l,$$

где A - константа.

Величины  $\Delta n = n_1 - n_2$  сравниваются с табличными значениями и в случае совпадения значения  $\Delta n$  с табличным вырабатывается триггерный сигнал первого уровня (150 нс). Координаты сработавших проволочек определяются с помощью приоритетных шифраторов. И, наконец, в специализированном процессоре вычисляется инвариантная масса

$$M = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \theta_{12}^2},$$

где  $\theta$  - угол между треками мюонов. Важным моментом, упрощающим процесс вычислений, является ограниченная множественность регистрируемых частиц.

### 5. Регистрация данных в общем виде

Если по условию эксперимента необходима регистрация большого количества частиц, то создается такая электроника считывания и регистрации, которая обеспечивала бы запоминание сигналов, считываемых одновременно от всех проволочек МПК. Прежде всего рассмотрим типичный канал усиления и регистрации (рис. 54). Импульс, наведенный на проволочке МПК с амплитудой несколько милливольт, поступает на вход дифференциального усилителя. Диоды на входах усилителя служат для защиты от пробоя входного транзистора. Транзистор T1 выполняет функции генератора тока. С помощью транзистора T2 обеспечивается формирование ТТЛ-уровня, необходимого для запуска одновибратора ОВ, который позволяет получить импульс с заданной длительностью (50-100 нс). Тем самым сглаживается расброс (джиттер) поступления импульсов от проволочек МПК. Величина джиттера составляет 10-30 нс.

Импульс с выхода одновибратора поступает на вход 8-разрядного сдвигового регистра, который выполняет функцию регулируемой задержки. Эта задержка необходима для того, чтобы обеспечить передачу полезного сигнала в момент прихода импульса медленного строба от специализированного процессора. Передача полезного сигнала от сдвигового регистра-задержки в цепь запоминающих сдвиговых регистров осуществляется путем подачи тактовых импульсов высокой частоты. Если используются ТТЛ-микросхемы, то частота импульсов сдвига составляет 20 МГц.

Поскольку сигналы от МПК поступают несинхронно с тактовыми импульсами, то относительно высокая частота следования совместно с заданной длительностью сигналов на выходе одновибратора обеспечивают с достаточно высокой эффективностью захват и передачу полезного сигнала.

Использование сдвиговых регистров существенно упрощает канал регистрации. Однако такая схема является относительно медленной. Поэтому с целью повышения скорости набора статистики применяются параллельные методы регистрации на запоминающих регистрах с последующим преобразованием унитарного позиционного кода в двоичный код с помощью приоритетных шифраторов. В модульном исполнении приоритетный шифратор имеет восемь входов и три выхода, на которых формируется двоичный код. Наличие входа расширения позволяет подключать такие модули к большому числу каналов регистрации (50-60). Однако при большом числе каналов регистрации использование последовательной цепочки приоритетных шифраторов приводит к усложнению устройства преобразования кодов и к увеличению распространения сигналов в цепях переноса.

Усложнение аппаратуры прежде всего связано с тем, что для сброса триггеров запоминающего регистра к выходам приоритетных шифраторов подключается дешифратор /77/, число выходов которого равно числу разрядов регистра. Поэтому при большом числе каналов регистрации последний делится на группы. При этом для схемы, обслуживающей каждую группу, требуется свой дешифратор и дополнительные данные для кодирования номеров групп.

В работе /78/ предложен более эффективный способ преобразования унитарного кода в обыкновенный двоичный код. Основные его особенности заключаются в следующем:

- Независимо от числа проволочек в плоскости МПК входные каналы шифратора не делятся на группы. Другими словами, число разрядов на выходе устройства, которое представляет координату сработавшей проволочки, определяется из выражения  $N = \log_2 n$ ,

где  $n$  - число проволочек в плоскости МПК.

- В устройстве принят асинхронный метод управления для внутренней синхронизации и для стробирования данных на выходах. Практически это



значит, что для запуска устройства независимо от количества сработавших проволочек достаточно подать один сигнал "Пуск", который вырабатывается с помощью схемы "Быстрое ИЛИ".

На рис. 55 приведена блок-схема устройства, которая имеет 256 входов и 8 выходов. Входы пронумерованы от 0 до 255 и условно разделены на 16 групп. В свою очередь, группы имеют номера от 0 до 15. Устройство включает в себя 16 схем ИЛИ 0-15, каждая из которых имеет по 16 входов, 32 триггера Т0-Т31, 16 мультиплексоров КМ 0-15, каждый из которых имеет по 16 информационных и по 4 адресных входа, две группы приоритетных шифраторов ПШ1-ПШ2 и ПШ3-ПШ4, два дешифратора ДШ1 и ДШ2, элементы ИЛИ и элемент задержки.

Рассмотрим кратко принцип работы устройства. Данные от входного регистра (на рис. 55 не показан) одновременно поступают на входы схем ИЛИ и на информационные входы всех мультиплексоров. Для определенности допустим, что сработала проволочка с координатой  $34 = 00100010$  (младший разряд справа). Это значит, что в первой группе входов сработала первая проволочка. В этом случае с выхода схемы ИЛИ сигнал поступает на вход триггера Т1 и устанавливает его в состояние логической единицы. После подачи сигнала "Пуск" на информационных выходах приоритетных шифраторов 1-2 вырабатывается код 0010, который представляет старшие разряды координаты сработавшей проволочки или номер условной группы, в которой имеется хотя бы одна единица.

В качестве приоритетного шифратора используется микросхема К155ВВ165, в которой помимо восьми информационных входов и трех выходов имеется еще управляющий вход для подачи сигнала разрешения работы шифратора и два управляющих выхода GS и E0. На выходе GS присутствует низкий уровень напряжения в течение времени, пока на его входах имеются сигналы логической единицы и сигнал разрешения работы. Импульс на выходе E0 сигнализирует о конце работы шифратора. Кроме того, выходы E0 и "Разрешение работы" шифратора используются для параллельного соединения аналогичных микросхем.

Далее код 0010 подается на адресные входы мультиплексоров, и в результате с выхода мультиплексора КМ1 на триггер Т17 поступает сигнал. Импульс с выхода GS через элемент задержки поступает на вход "Разрешение работы" группы приоритетных шифраторов 3-4, и на их информационных выходах формируется код 0010, который совместно с кодом номера группы образует 8-разрядный код номера сработавшей проволочки.

Сигнал с выхода GS приоритетных шифраторов 3-4 используется для стробирования данных на выходной регистр, а с выхода E0 импульс подается на вход стробирования дешифратора ДС1. В результате на его первом выходе появляется сигнал, который устанавливает в состояние "0" триг-

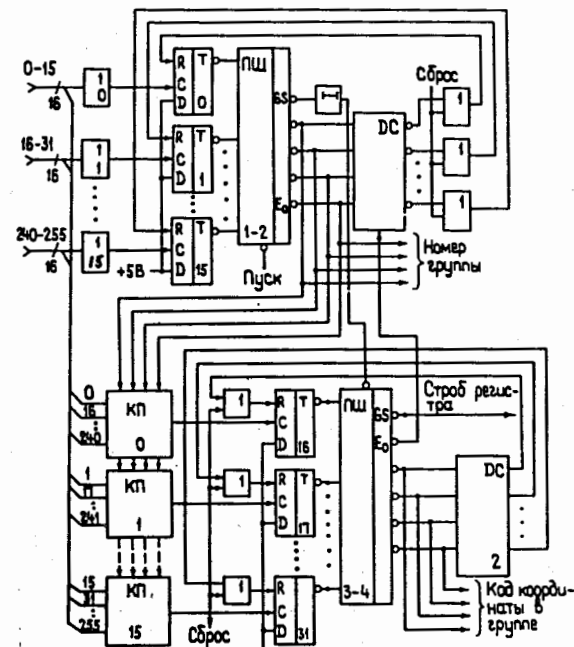


Рис. 55. Блок-схема шифратора.

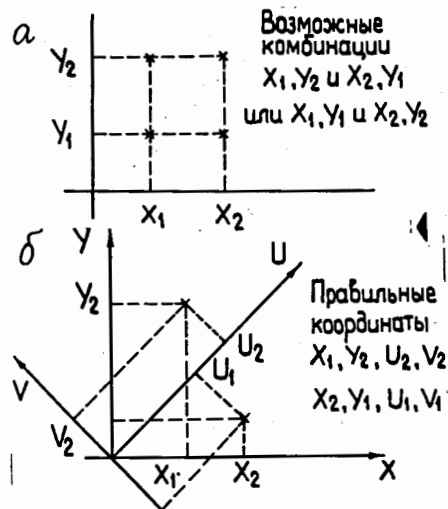
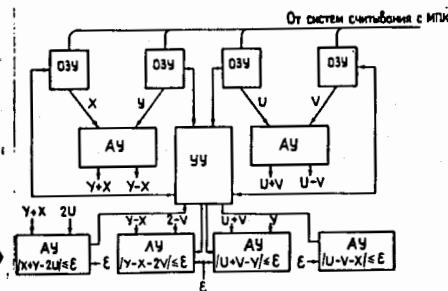


Рис. 56. Устранение неопределенностей с помощью дополнительных детекторов.

Рис. 57. Блок-схема координатного процессора.



гер Т1. Затем на выходе  $E_0$  вырабатывается сигнал "Конец преобразования", и на этом работа устройства заканчивается, так как на его входах отсутствуют данные. В противном случае цикл преобразования повторился бы снова, а импульс "Конец преобразования" выработался бы лишь после установки на "0" всех триггеров устройства.

Следует отметить, что после подачи сигнала "Пуск" устройство работает в бестактовом режиме, что позволяет максимально использовать быстродействие применяемых микросхем и повысить надежность работы. Если применить ТТЛ-микросхемы, то среднее время шифрации одной проволоочки не превышает 100 нс. Если же использовать микросхемы 500-й серии, то время преобразования можно сократить на порядок. Причем экономичность устройства существенно растет с ростом числа каналов регистрации.

Наш обзор по методам регистрации данных от МПК был бы не полным, если бы мы не рассмотрели кратко аналоговый способ регистрации [79]. Такой метод применяется в тех случаях, когда необходима информация не только о координатах сработавших проволоочек, но и об амплитудах регистрируемых сигналов. В цитируемой работе описывается электроника, с помощью которой считывается и оцифровывается информация, поступающая от 6000 проволоочек. Данные от группы, состоящей из 200 проволоочек, с помощью аналоговых ключей последовательно подключаются к 12-разрядному АЦП и затем запоминаются в памяти.

#### 6. МПК как трековый детектор

Информация, регистрируемая в МПК, используется для восстановления треков заряженных частиц. С этой целью создается система из нескольких детекторов, причем каждый детектор состоит из нескольких плоскостей. Наличие двух плоскостей в детекторе позволяет определить пару координат  $X, Y$  в случае одотрековых событий. Если же были зарегистрированы, например, две частицы, то возникает неопределенность в определении координат, как это показано на рис. 56 а. С целью устранения неоднозначности в детектор вводится как минимум две дополнительные плоскости, направление намотки нитей в которых составляет  $\pm 45$  градусов к оси  $X$ . Эти плоскости позволяют вычислить еще две координаты  $U$  и  $V$  (рис. 56 б).

Типичный магнитный спектрометр может содержать несколько таких детекторов, позволяющих определить траекторию частиц. Для нахождения нужных траекторий с помощью определенного алгоритма в каждом детекторе определяется  $n$  пар координат, где  $n$ -число зарегистрированных частиц. После этого начинается не менее трудоемкий процесс восстановления треков. Прежде всего необходимо найти точки пересечения траекторий с МПК. Эту задачу решает координатный процессор.

Четыре координаты, измеряемые для каждой частицы, должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$U = X/\sqrt{2} + Y/\sqrt{2},$$

$$V = -X/\sqrt{2} + Y/\sqrt{2}.$$

Эти уравнения действительны в тех случаях, когда траектории частиц перпендикулярны к плоскостям МПК и их можно упростить, если, например, принять расстояние между нитями в плоскостях  $X, Y$  равным 2 мм (типичная величина). Тогда это расстояние в плоскостях  $U$  и  $V$  будет равно 2,2 мм. При этих условиях для нахождения координат сработавших проволоочек специализированный процессор должен проверить все комбинации  $X, Y, U$ , и  $V$ , одновременно удовлетворяющие неравенствам

$$|X+Y-2U| \leq \epsilon_1, \quad (1)$$

$$|-X+Y-2V| \leq \epsilon_2, \quad (2)$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  - заданные константы.

На практике эффективность детектора не равна 100%. Это значит, что сигналы могут возникнуть не во всех плоскостях одновременно. Так, если не появился сигнал от проволоочки, расположенной в плоскости  $V$ , то для определения координаты зарегистрированной частицы можно использовать неравенство (1), а неравенство (2) используется, если сигнал отсутствовал в плоскости  $U$ . Аналогично для нахождения координаты в тех случаях, когда отсутствовали сигналы в плоскостях  $X$  или  $Y$ , используются неравенства

$$|U+V-Y| \leq \epsilon_3,$$

$$|U-V-X| \leq \epsilon_4.$$

Обычно величина  $\epsilon$  выбирается равной 5 или 6. Алгоритм нахождения нужных координат в основном сводится к многократно повторяющемуся процессу. Эту процедуру выполняет координатный процессор (рис. 57). Координаты  $X, Y, U$  и  $V$  запоминаются на четырех независимых модулях ОЗУ, каждый из которых имеет адресный регистр, счетчик числа слов и регистр числа. Счетчик числа слов фактически выполняет функции указателя стека, индицируя последний адрес ячейки ОЗУ, содержащей координату. В процессе загрузки модуля памяти содержимое всех регистров увеличивается на единицу до тех пор, пока все координаты заданной плоскости не будут записаны. После этого данные записываются в следующий модуль ОЗУ. Для выполнения циклического процесса в устройстве управления УУ вырабатываются три сигнала: установка адресного регистра в исходное состояние, конец адресации и инкремент адресного регистра.

Следует отметить, что соотношения (1) и (2) являются независимыми и могут решаться на отдельных арифметических устройствах. Время, необходимое для нахождения нужных координат в плоскости МПК, пропорционально  $n^3$ , где  $n$  - число зарегистрированных частиц. Процессор, выполненный на ТТЛ-микросхемах, при  $n = 6$  затрачивает на вычисление всех координат 74 мкс, что в 25 раз меньше времени решения аналогич-

ной задачи на ЭМ СДС-7600. Такое быстродействие достигнуто за счет высокой степени параллелизма, применения быстродействующих модулей памяти с временем доступа 35 нс и за счет использования программируемых логических матриц в устройстве управления. Во многих экспериментах на основе определенных допущений треки частиц считаются прямыми линиями, что существенно упрощает алгоритм восстановления полезных треков.

Специализированные процессоры, предназначенные для восстановления прямых треков на основе координат пересечения траекторий в соответствующих плоскостях МПК, получили название линейных процессоров. Алгоритм поиска полезных треков состоит в нахождении всех возможных прямых линий, проходящих через две плоскости в последней МПК, и заданных критериев отбора в остальных плоскостях. Эти критерии приводятся в соответствие с измеренными координатами.

Метод расчета параметров траекторий частиц с учетом магнитного поля рассматривается в работе /81/.

#### 7. Развитие методики пропорциональных камер

Одним из существенных недостатков обычных МПК является малая амплитуда сигнала, считываемого от проволочки детектора, что приводит к необходимости использования высокочувствительных и, соответственно, дорогостоящих усилителей. Этот фактор также ухудшает отношение сигнал/шум.

Крупным успехом в развитии методики проволочных камер следует считать обнаружение, детальное изучение и создание нового типа газоразрядного детектора постоянной чувствительности - проволочной самогасящейся стримерной камеры /82/. Отмечаются следующие положительные качества таких детекторов:

- большая амплитуда считываемого сигнала, который на два порядка больше, чем у МПК,
- сигнал имеет стандартную форму с длительностью 20-200 нс,
- имеет место скачкообразный переход от пропорционального режима к режиму СГС,
- камера имеет постоянную чувствительность,
- стримеры направлены в одну сторону - ту, с которой дрейфуют электроны, что позволяет определять азимут прохождения частицы относительно анодной проволочки и устранять левую-правую неопределенность в дрейфовых камерах.

#### Выводы

Многопроволочные пропорциональные камеры в течение длительного времени (свыше 10 лет) остаются наиболее популярными координатными детекторами в физике высоких энергий. Этому способствовал такой фактор,

как бурное развитие техники интегральных схем. В нашем обзоре не рассматривались вопросы применения МПК в прикладных исследованиях. Эта тема детально освещена в работе /122/.

Использование МПК в физике высоких энергий способствовало развитию техники специализированных процессоров и других средств вычислительной техники. В ряде экспериментов МПК непосредственно используется в триггерных системах первого уровня. В настоящее время МПК успешно применяются в сочетании с другими типами детекторов. Здесь следует отметить работу /83/, в которой описан модуль калориметра, состоящий из кристаллов ВаF. Ячейки калориметра подключены к фоточувствительной камере низкого давления (рис. 58). Такая конструкция детектора позволяет получить высокие временные параметры, хорошую координатную точность и удовлетворительное энергетическое разрешение.

### VIII. Методика дрейфовых камер

#### I. Общие вопросы

Если рассматривать перспективы развития, многообразие и потенциальные возможности, то среди различных типов трековых детекторов техника дрейфовых камер является наиболее популярной в методике физики высоких энергий. Дрейфовые камеры также эффективно используются в качестве вершинных детекторов. По сравнению с МПК дрейфовые камеры отличаются широким разнообразием таких параметров, как геометрия, размеры, ширина дрейфового промежутка и проч. Все эти и другие качества создали предпосылки для разработки камер, в которых регистрируются не только отдельные координаты взаимодействия, но треки частиц и даже многотрековые события. Принципы действия таких камер будут рассмотрены ниже. Вначале рассмотрим общие вопросы.

В большинстве случаев дрейфовые камеры создавались с промежутком 1-3 см и с разрешением 100 мкм. Однако известны детекторы с чувствительной площадью 16 м<sup>2</sup> и с дрейфовым промежутком 15 см. Широкое развитие получили камеры цилиндрической формы. В частности, они применяются в качестве центральных детекторов в экспериментах на встречных пучках. В базовой конструкции электроны, образованные частицами, дрейфуют в однородном магнитном поле с постоянной скоростью по направлению к сигнальным проволочкам. Интервал времени между моментом прохождения частицы и моментом появления импульса от сигнальной проволочки определяет координату взаимодействия частицы. Основное требование к электронике, применяемой в таких камерах, состоит в том, чтобы по возможности точнее измерить время появления импульса от сигнальной проволочки. Эта точность прежде всего зависит от тактовой частоты генератора, используемого в схеме преобразования интервала времени в цифровой код.

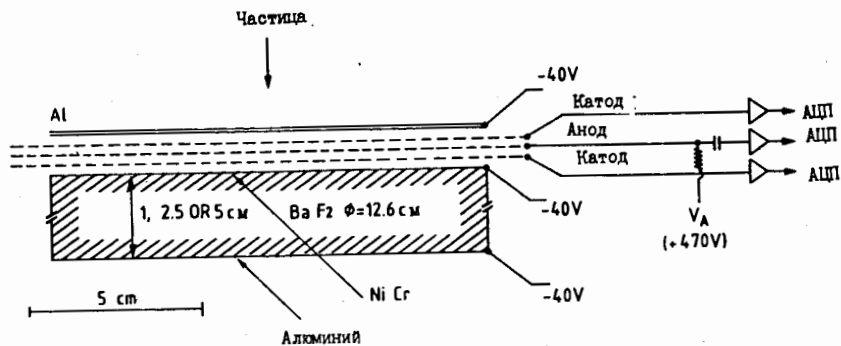


Рис. 58. Модуль калориметра, в котором сигналы считываются с помощью МПК.

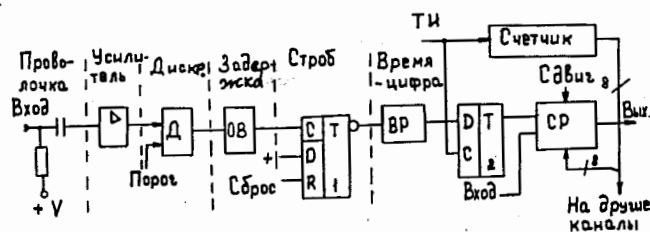


Рис. 59. Типичная схема для одного канала регистрации дрейфовой камеры.

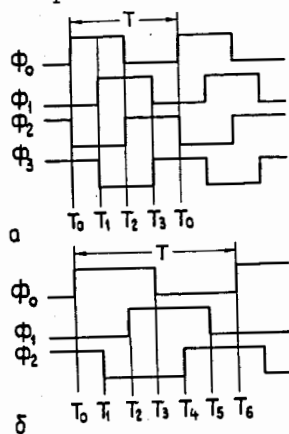
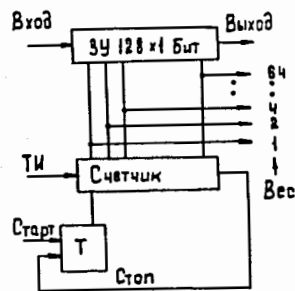


Рис. 60. Временная диаграмма:  
а) для 4-фазного управления,  
б) для 3-фазного управления.

Рис. 61. Схема преобразования временного интервала в цифровой код на основе модуля памяти.



Типичная частота генератора импульсов составляет 100 МГц. При скорости дрейфа 400 нс/см получается разрешение порядка 0,08 мм. Для получения высокого быстродействия разработчики стараются получить от сигнальных проволочек по возможности короткие сигналы. Типичная величина переднего и заднего фронтов составляет 30 и 700 нс соответственно. На рис. 59 приведена принципиальная схема для одного канала регистрации /84/, которую по функциональному признаку можно разделить на две части. В первую часть (так же, как и в канале считывания МПК) входят усилитель, дискриминатор, одновибратор и элемент памяти. Вторая часть схемы является характерной для электроники дрейфовых камер. Она состоит из расширителя импульсов и устройства преобразования длительности импульса в цифровой код. Время дрейфа измеряется с точностью 3 нс. Применение временного расширителя позволяет уменьшить тактовую частоту генератора до 20 МГц. Это в свою очередь приводит к возможности использования обычных ТТЛ-микросхем, за исключением усилителя, который выполнен на микросхеме МС1035. При входном токе 1 мкА на выходе усилителя получается импульс с амплитудой 200 мВ. С выхода дискриминатора импульс поступает на вход одновибратора и далее на вход D-триггера, который стробируется импульсами, поступающими от схемы "Быстрое ИЛИ".

С помощью расширителя сигнал удлиняется в 6 раз. В процессе регистрации событий синхронный счетчик вначале сбрасывается на "0", после чего включается генератор тактовых импульсов. В конце концов в сдвиговом регистре фиксируется код, поступающий с выходов счетчика. Время передачи данных в сдвиговый регистр пропорционально ширине импульса, поступающего от расширителя. Следует отметить, что один и тот же счетчик используется для всех каналов регистрации. Для получения следующей координаты необходимо содержимое сдвиговых регистров переписать в буферное ЗУ. Однако применение расширителя приводит к увеличению времени регистрации.

С целью увеличения быстродействия и повышения разрешающей способности существует тенденция к повышению тактовой частоты за счет применения быстродействующих микросхем и использования многофазного управления. Так, в работе /85/ описана система регистрации, в которой применяется 8-фазное управление сдвиговыми регистрами. При этом эффективная частота равна 330 МГц. Для получения необходимой задержки при такой частоте сдвиговые регистры имеют по 256 ячеек. Причем в каждом канале имеется свой регистр. Проблема потребляемой мощности решена путем разработки специальной технологии изготовления микросхем. Использованию многофазного управления для измерения временных интервалов посвящена работа /86/. Прежде всего следует напомнить, что для

измерения временных интервалов получили применение три базовых метода: метод прямого счета, метод прямого счета с аналоговым расширителем-нониусом и способ измерения, в котором используется два генератора. В первом случае основу схемы составляет высокостабильный генератор и счетчик. При эффективной частоте 500 МГц можно получить разрешение 2 нс. Но такая частота в настоящее время является практически предельной. В схеме с аналоговым нониусом используется метод прямого счета и нониус, состоящий из времянплитудного конвертора, с помощью которого измеряется время по отношению к тактовому импульсу. Используя нониус, можно измерять интервалы времени в пикосекундном диапазоне, а ограничения накладываются временем задержки в компонентах и их стабильностью. Третий способ широкого применения в ядерной электронике не получил. Различные способы и схемы, применяемые для измерения интервалов времени в ядерной электронике, приведены в обзоре /87/ и в работах /88-89/.

Продолжим рассмотрение принципа многофазного управления, которое имеет следующие преимущества перед однофазным управлением:

- Возможность использования более низкой частоты. Так, для измерения 25- наносекундных интервалов времени при 14 - фазном управлении требуемая частота генератора равна всего 28,57 МГц.
- Для построения устройства с таким хорошим разрешением можно использовать микросхемы с малой потребляемой мощностью, что существенно облегчает создание многоканальных систем регистрации.
- Применение низкой частоты облегчает наладку устройства.

Возникает вопрос: какое количество фаз следует выбирать? Немаловажное значение имеет четность фаз управления. Обычно на практике выбирают четное число фаз, например 2, 4 и 8. Деление фаз можно получить с помощью двоичных счетчиков. Однако такое деление имеет существенный недостаток, который можно заметить на примере 4-фазного управления (рис. 60а). Видно, что в случае 4-х фаз можно получить четыре временных интервала. На рис. 60 б приведена временная диаграмма для случая, когда частота разделена на три последовательности, состоящие из трех фаз, но в данном случае получается шесть различных фаз управления. Другими словами, использование нечетного числа фаз приводит к улучшению разрешения в два раза.

Этот факт можно объяснить тем, что нечетные фазы получаются независимо друг от друга, так как изменение фаз имеет место в соответствии с кодом Грея. В работе /90/ описан ВАК, в котором используется 7 - фазное управление в коде Грея. Прибор имеет следующие параметры: основная частота - 125 МГц, временное разрешение - 1 нс, мертвое время - 80 нс, диапазон измерений - 166326640 и 128 мкс, динамичес-

кий диапазон - 100000. Такие прецизионные преобразователи стоят очень дорого, поэтому в многоканальных системах регистрации для оцифровки временных интервалов времени в настоящее время широко применяются модули памяти, которые, по существу, можно рассматривать как многозарядные сдвиговые регистры /91-95/. На рис. 61 приведена одна из таких схем, которая состоит из модуля ОЗУ емкостью 128x1 бит, двоичного счетчика, выходы которого подключены к адресным входам модуля памяти и к выходным шинам.

Устройство имеет два режима работы: фиксация временного интервала и чтение результата оцифровки. Вначале адреса ОЗУ сканируются с помощью двоичного счетчика, начиная с нулевого адреса. Далее, если в какой-нибудь момент времени появляется интервал времени длительностью  $T$  на входе модуля ОЗУ, то все ячейки памяти, к которым имеет место обращение, устанавливаются на "1". В процессе чтения счетчик повторяет счет от нулевого состояния. В момент появления единицы на выходе модуля ОЗУ содержимое счетчика записывается в буферную память. Разрешение в такой схеме зависит от быстродействия модуля ОЗУ и может составлять 10 нс, а временное разрешение между интервалами равно 100 нс. Основной недостаток: чтение можно выполнять лишь после записи, что существенно сказывается на мертвом времени. Это время можно существенно уменьшить, если использовать четыре одинаковых модуля, включенных специальным образом /91/.

## 2. Разрешение неопределенностей типа "слева-справа"

В отличие от МПК, в дрейфовых камерах возникает такая проблема, как определение того, слева или справа от анодной проволоочки прошла частица. Известно несколько способов, которые используются для устранения этой неопределенности /96/. Конструкция с двумя анодными проволоочками, помещенными на небольшом расстоянии друг от друга, позволяет устранить такую неопределенность. В другом варианте две камеры сдвигаются таким образом, что анодная проволоочка одной камеры находится напротив потенциальной проволоочки другой камеры. Время дрейфа  $T$  для частицы, прошедшей перпендикулярно к плоскости камер, однозначно определяет траекторию. Однако для наклонных треков здесь снова возникает неопределенность. Однако если поместить три камеры, то, как это показано на рис. 62, неопределенность для наклонных треков также полностью устраняется. При этом выполняется следующее соотношение:

$$t_0 - t_2 = 1/4 [(t_1 - t_2) + (t_3 - t_2)] - 1/2 T,$$

где  $T$  - максимальное время дрейфа. Используя центральную камеру для определения времени и регистрируя  $t_1 - t_2$  и  $t_3 - t_2$ , можно вычислить величину  $t_0 - t_2$  и в конечном итоге однозначно выполнить реконструк-

цию трека. Применение дополнительных камер существенно усложняет конструкцию детектора, не говоря уже об увеличении количества электронных схем. Имеются попытки использовать для разрешения неопределенностей только электронные схемы. Один из таких методов описан в работе /97/. Суть заключается в том, что электронная лавина развивается несимметрично, и поэтому та сторона, около которой прошла частица, может быть определена по величине сигнала, наводимого на расположенных поблизости электродах. При таком методе регистрации два трека различаются, если частицы пролетают на расстоянии 50 мкм от анодной проволоочки. Этот же эффект используется для определения азимута, по которому развивается лавина. Принцип действия дрейфовой камеры с таким свойством иллюстрируется при помощи рис. 63.

### 3. Методика дрейфовых камер

Методика дрейфовых камер бурно прогрессирует, и поэтому имеет смысл рассмотреть более детально ряд новейших разработок в этой области на примере разработки и применения дрейфовой камеры цилиндрической формы. Классическая дрейфовая камера имеет следующие характеристики: камера обычно содержит 15-20 слоев проволоочек (точек на трек). Примерно половина из этих слоев ориентирована параллельно пучку и направлению магнитного поля. Другие плоскости повернуты на небольшой стереоугол (типичная величина  $\pm 3^\circ$ ) по отношению к оси магнитного поля. Такая система позволяет получить достаточно данных для реконструкции треков частиц. Отдельная дрейфовая ячейка имеет простую структуру: сигнальную проволочку и триплет из потенциальных проволочек (рис. 64). Подобная конфигурация повторяется вдоль окружности. В радиальном направлении ячейки в большинстве случаев открыты. Наибольшая ширина дрейфового промежутка составляет 1-2 см. Особенностью данной конструкции является простота и минимальное число потенциальных проволочек.

Следующим этапом развития методики дрейфовых камер является разработка и использование в эксперименте так называемых образных (*pictorial*) камер, в которых на каждый трек регистрируется 40-200 координат. Измерения проводятся как бы в пространстве детектора, что позволяет точно находить координаты вершин вторичных взаимодействий. Кроме того, появилась возможность идентифицировать частицы путем измерения потерь энергии в газе камеры. Дискретность как в радиальном, так и в азимутальном направлении дает возможность более точно разрешать треки частиц. На рис. 65 приведена общая схема одного из таких детекторов совместно с электронными схемами /97-100/. Детектор имеет ци-

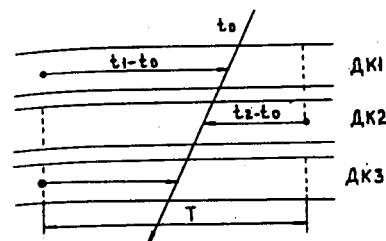


Рис. 62. К вопросу об устранении неопределенностей типа "слева" - "справа".

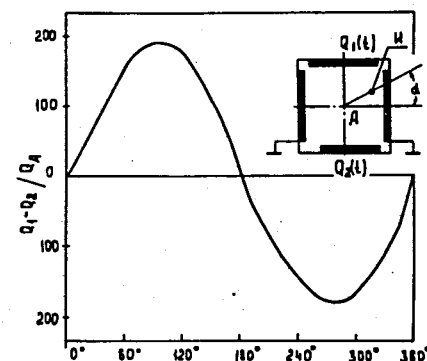


Рис. 63. Принцип определения азимута развития ионизации.

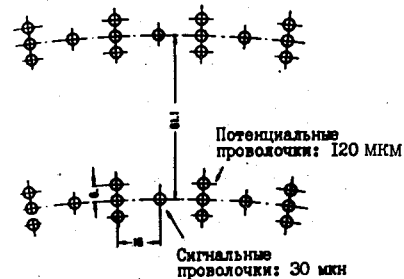


Рис. 64. Геометрия ячейки цилиндрической дрейфовой камеры.

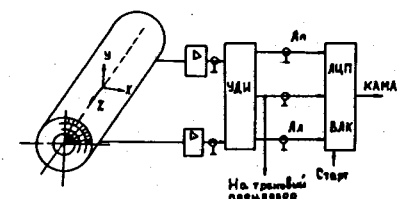


Рис. 65. Схема 3-координатного детектора с электроникой.

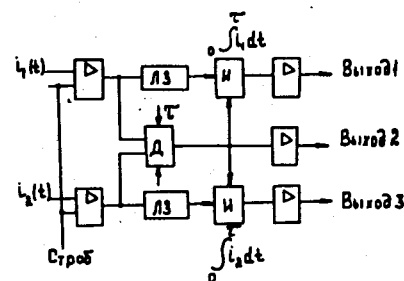


Рис. 66. Схема одного канала регистрации для дрейфовой камеры типа "джет".

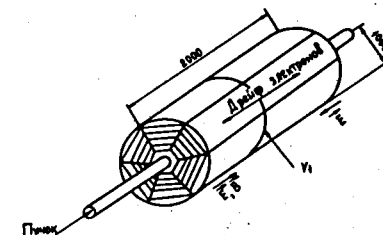


Рис. 67. Общий вид время-проекционной камеры.

цилиндрическую форму. Объем цилиндра заполнен 96 ячейками, каждая из которых состоит из 16 анодных и 19 потенциальных. Длина анодных проволочек равна 2,4 м. Между ячейками расположены полоски из фольги, находящиеся под определенным потенциалом. Определенный интерес представляет электроника и организация регистрации данных в "образных дрейфовых камерах". По функциональному признаку электронику можно разделить на три части: предусилители, которые монтируются непосредственно на детекторе, блок усилителей-дискриминаторов и интеграторов (УДИ), которые расположены в домике экспериментатора и времяамплитудные конвертеры, которые базируются около ЭМ.

Основное требование к УДИ, которое нелегко выполнить, это получение хорошего разрешения для двух соседних импульсов. Эта проблема решена путем стробирования интегратора сигналом, поступающим от дискриминатора таким образом, что интегрирование аналогового импульса происходит только в течение времени  $\tau$ , равного длительности импульса, формируемого на выходе дискриминатора. После этого интегратор отключается, и через 20 нс схема снова может обрабатывать следующий сигнал. На рис. 66 приведена структурная схема блока УДИ, которая подключается к анодной проволочке с обоих концов. Сигналы с выхода блока УДИ поступают на входы модулей ВАК и АЦП. С целью экономии АЦП сигналы предварительно запоминаются на аналоговом ЗУ и затем последовательно подключаются к входам АЦП. Такая схема используется для обработки информации, поступающей от 8 проволочек.

Цифровая информация с выходов АЦП поступает на буферное ЗУ, которое содержит данные как о координатах, так и о числе сработавших проволочек. Многоканальный ВАК построен на базе ОЗУ. Таким образом, для каждой анодной проволочки регистрируется следующая информация: номер проволочки, время дрейфа и две координаты взаимодействия. Причем одна из координат определяется методом деления заряда. Множество измеренных таким образом точек дает картину взаимодействия (треки). Такой детектор использовался в известном UAI - эксперименте /94/, но вместо обычных АЦП использовались АЦП типа "флэш" с временем оцифровки 10 нс (см. ниже).

#### 4. Времяпроекционные дрейфовые камеры

По существу времяпроекционные дрейфовые камеры представляют собой усовершенствованный вариант "образной" камеры (рис. 67). В экспериментальной установке камера окружена сверхпроводящим соленоидом, который обеспечивает магнитное поле величиной 20 кГс. Следует отметить, что чувствительный объем камеры не содержит ни анодных, ни потенциальных проволочек. По существу описываемая камера представляет собой собирающую (sampling) ионизационную камеру, с помощью которой обеспе-

чивается измерение трех координат вдоль траектории частиц. Как видно из рис. 67, электроны дрейфуют в направлении, параллельном магнитному полю. Это поле создается с помощью электрода, выполненного в виде кольца, находящегося под напряжением 150 кВ, а также с помощью охранных колец, расположенных во внутреннем и внешнем радиусе чувствительного объема. Пропорциональные проволочки и сегментированные катодные плоскости обеспечивают измерение двух координат, а третья координата получается путем измерения времени дрейфа электронов. Общее число проволочек равно 2196.

Такая своего рода "бочка" - детектор совместно с оригинальной электроникой имеет уникальные возможности. Всего в детекторе имеется 16020 каналов регистрации, что позволяет осуществлять реконструкцию треков в трехмерном пространстве. Для регистрации и временного хранения аналоговых сигналов, считываемых от 13824 катодных микрополосковых линий, используются ПЭС-матрицы. Более подробно времяпроекционные камеры описаны в работах (99-100).

В итоге новый тип детектора позволяет одновременно измерять импульс и массу частицы.

#### 5. Достижения в разработке АЦП и ВАК

Наиболее массовыми и дорогостоящими приборами в ядерной электронике являются АЦП и ВАК. Причем потребность в них как в современных, так и во вновь планируемых экспериментах непрерывно растет. Современные достижения в разработке больших интегральных схем создают благоприятные возможности для создания дешевых и быстродействующих преобразователей сигналов. В настоящее время с успехом во многих опытах применяются АЦП с параллельным способом преобразования аналоговых импульсов, у которых мертвое время не превышает 10 нс и с дискретностью 6 и 8 бит (101).

Шестиразрядное АЦП типа "флэш" состоит из 63 стробируемых компараторов, резистивной цепочки, шифратора 63  $\rightarrow$  6 бит и выходного регистра (рис. 68). Один из входов компаратора подключен к источнику опорного напряжения, которое делится с помощью резистивной цепочки в пределах  $V_{ref}$  и  $V_{FB}$ . Компараторы стробируются передним фронтом тактового импульса ТИ, а его задним фронтом происходит преобразование унитарного позиционного кода в двоичный код. Типичная тактовая частота составляет 50-100 МГц. Величина сопротивления резистора равна 2 Ом, и поэтому общее сопротивление резистивной цепочки составляет примерно 240 Ом. С целью расширения динамического диапазона к источнику опорного напряжения подключается дополнительное напряжение смещения. Поскольку опорное напряжение может быть подано в виде короткого импульса, то такое АЦП может быть использовано в качестве быстрого ана-

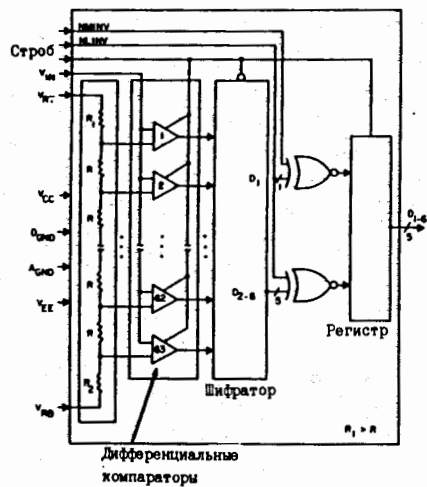


Рис. 68. Схема 6-разрядного АЦП типа "флэш".

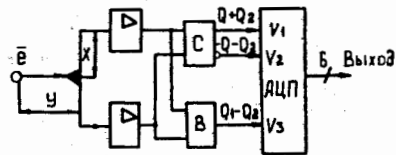


Рис. 69. Применение АЦП типа "флэш" для определения координаты методом деления заряда.

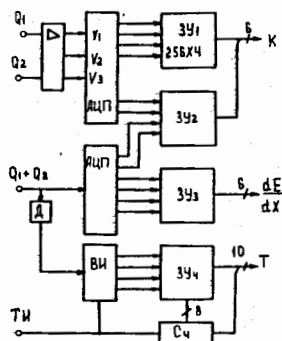


Рис. 70. Применение АЦП типа "флэш" для регистрации трех координат.

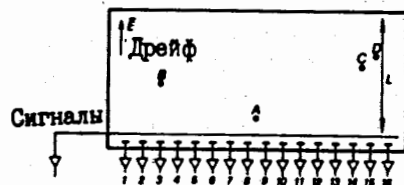


Рис. 71. Ячейка дрейфовой камеры с катодным считыванием.

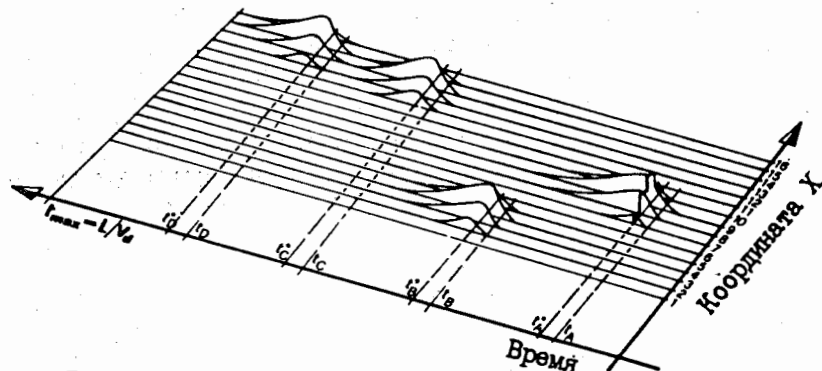


Рис. 72. Развитие сигналов в дрейфовой камере со временем.

логового делителя. Выходная характеристика АЦП определяется уравнением

$$H = 63 \frac{V_{IN} - V_{RR}}{V_{RT} - V_{RB}} \quad (3)$$

Если такой АЦП используется в качестве делителя напряжения, то вход  $V_{IN}$  соединяется с шиной земли, а входные переменные  $V_x$  и  $-V_y$  подаются на контакты  $V_{RT}$  и  $V_{RB}$ .

Тогда уравнение (3) принимает вид

$$H = 63 \frac{V_y}{V_x + V_y}$$

В таком качестве АЦП типа "флэш" применяется в проволочных камерах для определения координаты взаимодействия частиц методом деления заряда (рис. 69). На рис. 70 приведена схема, с помощью которой можно получить измерение одновременно трех физических величин от одной проволочки (слева и справа). В этой схеме используется ОЗУ с временем выборки 20 нс, причем АЦП имеет дополнительное смещение, которое позволяет измерять величину  $dE/dX$ . Второе АЦП используется для измерения координаты методом деления заряда. Третья координата - время дрейфа регистрируется с помощью схемы, выполненной на основе ЗУ с произвольной выборкой. Для повышения точности измерения временных интервалов в устройстве применена интерполяционная схема. В целом данное устройство позволяет регистрировать двумерную информацию о многотрековом событии с периодом  $256 \times 32 \text{ нс} = 8192 \text{ нс}$ .

Возможность регистрации многотрековых событий в дрейфовой камере с большим промежутком иллюстрируется с помощью рис. 71 и рис. 72. На рис. 71 изображена дрейфовая ячейка с катодным считыванием вдоль чувствительной проволочки. Буквами А, Б, С и Д обозначены проекции четырех треков, а на рис. 72 показано развитие сигналов во времени на выходах усилителей, подключенных к катодным полоскам. Высокое быстродействие, присущее новым типам АЦП, позволяет параллельно считывать сигналы от 16 полосок, запомнить их в аналоговой форме с последующим считыванием и оцифровкой в течение 500 нс. Такого разрешения достаточно, чтобы различать отдельные треки с пространственным разрешением  $\pm 200 \text{ мкм} / 1024$ .

В тех случаях, когда применяется только параллельный способ регистрации, для хранения данных применяются быстродействующие модули ЗУ, работающие с тактовой частотой 100 МГц. В работе /95/ описаны три схемы, применяемые для временного хранения чисел, поступающих от быстродействующих АЦП. При прямом способе хранения модули памяти емкостью 1024 бит включаются параллельно так, чтобы данные запоминались в последовательно расположенных ячейках. Другими словами, модуль памяти фактически используется в качестве 1024-разрядного сдвигового регистра. Ячейки памяти адресуются с помощью 10-разрядного синхронного счетчика.



При этом остальные два разряда не используются. Если в заданный момент времени счетчик остановить, то по его содержимому можно определить время оцифровки. Таким способом, в частности, можно измерить форму импульса.

Основной недостаток такой схемы заключается в том, что при считывании цифровых данных в буферную память наряду с полезной информацией записывается много нулевых слов. В итоге на один канал регистрации расходуется большая мощность - 10 Вт при тактовой частоте 100 МГц. В другой схеме с целью сокращения емкости ЗУ используется дискриминатор, вход которого соединен с входом АЦП, а выход - с входом 7-го разряда модуля памяти. В процессе считывания в буферное ЗУ записываются только те слова, у которых в 7-м разряде содержится единица. Однако проблема рассеиваемой мощности в такой схеме остается актуальной. В схеме, изображенной на рис. 73, емкость буферной памяти сокращена на две трети, но схема устройства получается гораздо сложнее, так как здесь требуется отдельный адресный счетчик на каждый канал, аналоговая задержка и модуль памяти емкостью 1024x1 бит. С помощью такой схемы отметка времени выборки делается один раз за событие. Основной недостаток: наличие аналоговой задержки и счетчика в каждом канале регистрации. В цитируемой работе предлагается также оригинальная схема адресации с использованием кода Грея. Все усовершенствования в этом направлении позволяют обеспечить максимальную задержку при минимальной емкости памяти.

Высокое быстродействие, присущее новым типам АЦП, позволяет более эффективно организовать регистрацию данных в широко распространенных системах, где используются ФЭУ (рис. 74). Сигнал, поступающий от ФЭУ, задерживается на время, необходимое для согласования с временем поступления импульса от решающего устройства. Линейные ворота являются наиболее капризной частью устройства. Использование АЦП типа "флэш" совместно с быстродействующей памятью упрощает устройство регистрации (рис. 75). В исходном состоянии, когда нет полезного сигнала, АЦП выполняет оцифровку всех сигналов, поступающих на его вход. Одновременно работает адресный счетчик, который останавливается в момент запоминания полезного события.

Подведем некоторые итоги развития электроники дрейфовых камер. Так, в "классических" камерах измеряется только время дрейфа, по величине которого определяется координата частицы. Причем в основном регистрируется одна искра на проволочку. Далее, в "образных" камерах наряду с временем дрейфа измеряется заряд, наведенный на электроде, и с помощью быстродействующей электроники регистрируется несколько искр с целью регистрации двух треков. В известном UAI- эксперименте, где

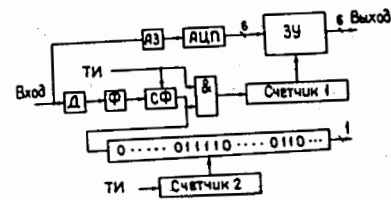


Рис. 73. Экономичная схема оцифровки временных интервалов.

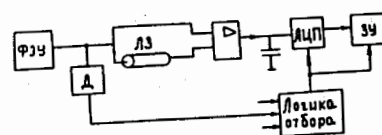


Рис. 75. Схема спектрометрического тракта с использованием быстрых ЗУ и АЦП.

Рис. 76. Обычная комбинационная схема, используемая для реализации булевых функций.

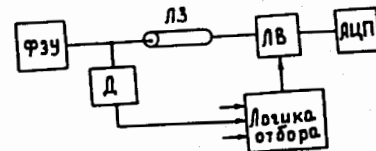


Рис. 74. Обычная схема спектрометрического тракта.

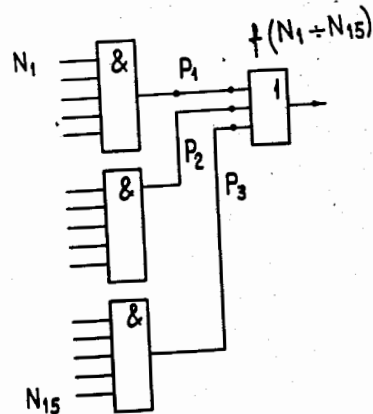


Рис. 77. Структурная схема программируемого устройства для реализации булевых функций.

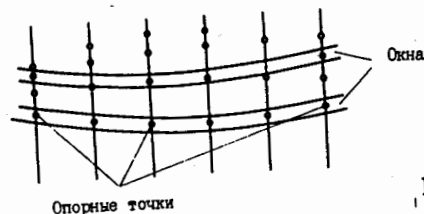
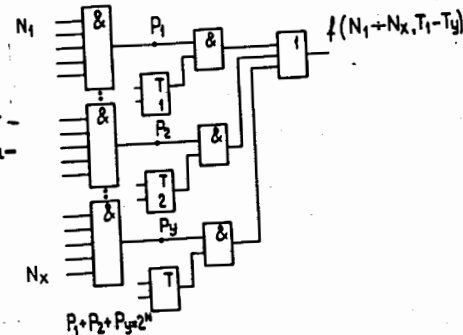


Рис. 78. К пояснению метода окон.

использовались времяпроекционные камеры, применены две новинки. Первая - это матрицы ПЗС в качестве аналоговой памяти, в которых хранилась информация как о временных, так и данные об амплитудах импульсов. Использование ПЗС-матриц позволяет рассматривать времяпроекционную камеру как источник, содержащий несколько миллионов чувствительных датчиков. Причем содержимое ПЗС-матриц считывается и оцифровывается лишь после выработки триггер-импульса.

Другой новинкой является применение в центральном детекторе быстродействующих АЦП типа "флэш". Причем к каждой проволочке подключалось по два АЦП с обоих концов (по одному на один конец). С помощью одного из них методом деления заряда определялась координата частицы, а другой АЦП с логарифмической характеристикой использовался для измерения потери энергии.

Выводы

Методика дрейфовых камер непрерывно совершенствуется. Благодаря широкому функциональным возможностям и параметрам, удовлетворяющим современным требованиям физики высоких энергий, дрейфовые камеры остаются одними из основных трековых детекторов как в современных, так и в будущих экспериментах. Изучаются возможности создания так называемых "микроджет"-камер с высоким разрешением, порядка 20 мкм /105/. Разрабатываются большие дрейфовые камеры с промежутком 50 см для создания калориметра с возможностью регистрации большого количества треков и высоким пространственным разрешением /106/. Высокие требования предъявляются также к электронике /107/. Время оцифровки 8-9 - разрядных АЦП должно составлять 10 нс, а число каналов регистрации в одном эксперименте может превышать 100 тысяч.

## IX. Фильтрация физической информации на линии с ЭВМ

### I. Общие вопросы

Начиная с 1960 г. в экспериментах физики высоких энергий используются ЭВМ с целью сбора и обработки экспериментальных данных. Этому способствовало также развитие и совершенствование многоканальных детекторов заряженных частиц и прежде всего таких, как МПК и дрейфовые камеры. Современные спектрометры имеют высокую скорость работы, и существует тенденция к увеличению этой скорости. Скорость счета в МПК составляет  $10^6$  событий/с, а число проволочек в современном спектрометре может превышать  $10^5$ , и поэтому анализ поступивших данных в реальном масштабе времени представляет собой значительные трудности. Еще более впечатляющая картина получается при регистрации данных в современных и вновь планируемых экспериментах на встречных пучках. Так, в UAI - эксперименте регистрировалось  $3 \cdot 10^6$  16-разрядных

слов! Причем эта информация проходила сложный путь сквозь многоуровневую систему отбора полезных событий. На каждом уровне общее число событий уменьшалось вследствие фильтрации примерно на порядок. Процесс отбора полезных событий в реальном времени получил название фильтрации на линии с ЭВМ. В настоящее время фильтрация на линии с ЭВМ условно делится на четыре уровня.

- Отбор событий, удовлетворяющих определенным топологическим или другим критериям, которые могут охарактеризовать ядерное взаимодействие (множественность частиц, угол отклонения трека и проч.). Эта процедура выполняется логическими схемами с наносекундным быстродействием. Данный уровень характеризуется временем решения - до 500 нс максимум.
- Фильтрация полезных событий при помощи быстрых программируемых логических устройств. Эта процедура включает в себя такие операции, как запись координат событий, зарегистрированных в детекторах, преобразование кодов, отбор кандидатов в полезные события по заданным критериям, восстановление пространственных треков и проч. Время, затрачиваемое на этот процесс, составляет 20 - 100 мкс.
- На третьем уровне (время фильтрации порядка 1 мс) в работу включаются быстродействующие микропроцессоры и микроЭВМ. В основном на этом уровне в более чистом виде восстанавливаются треки зарегистрированных событий, а в некоторых случаях и реконструируются полезные события.
- На четвертом уровне с помощью мощных мини-ЭВМ выполняется окончательный процесс фильтрации и данные записываются на магнитную ленту.

### 2. Частота триггер-импульса и скорость фильтрации

Рассмотрим факторы, влияющие на скорость фильтрации /108/. Допустим, что в установке вырабатывается  $N$  триггер-импульсов, содержащих  $nN$  "хороших" событий, т.е. таких событий, которые после предварительной фильтрации записываются на магнитную ленту для оф-лайн - обработки. Далее полагаем, что устройство отбора имеет два различных значения "мертвого времени: одно  $t_1$ , которое следует после фонового события, и "мертвое" время  $t_2$ , которое наступает после регистрации полезного события. Далее отметим время  $t_3$ , необходимое для завершения регистрации события (оно является частью времени  $t_2$ ). Без фильтра "мертвое" время  $t_3$  следует после каждого триггер-импульса, и поэтому скорость поступления неотфильтрованных событий равна

$$V_1 = \frac{N}{1 + Nt_3}$$

и содержит

$$V_2 = \frac{PN}{1 + Nt_3}$$

полезных событий.

С фильтром при заданной скорости регистрации поступает  $R_1$  "хороших" и  $R_2$  фоновых событий соответственно. Часть событий  $R_1 t_1$  и  $R_2 t_2$  по сути есть потери. В конечном итоге имеем

$$R_1 = (1 - R_2 t_2 - R_1 t_1) PN$$

и

$$R_2 = (1 - R_1 t_1 - R_2 t_2) / (1 - P) N.$$

Из полученных равенств имеем

$$R_1 = \frac{PN}{1 + (1-P)Nt_1 + P N t_2}.$$

Для повышения эффективности работы устройства отбора полезных событий необходимо прежде всего отфильтровать фоновые события с максимальной скоростью. На скорость записи полезных событий существенно влияет также время записи данных на магнитную ленту и допустимая емкость буферной памяти.

### 3. Основные способы аппаратной фильтрации

Способы построения специализированных процессоров различной сложности и их применение были рассмотрены в обзоре /80/. Здесь мы отметим наиболее характерные методы построения триггерных систем и применяемые при этом схемные решения.

Наиболее быстрые специализированные процессоры (СП) и решающие устройства создаются путем использования табличных методов решения простейших булевых и алгебраических выражений. В таких устройствах применяются быстродействующие ЗУ с временем выборки не менее 20 нс, программируемые логические матрицы и матрицы совпадений. Однако последние имеют ограниченные функциональные возможности. В табличной арифметике в настоящее время широко используются также модули программируемой памяти ППЗУ.

Основная проблема, которая возникает при использовании в качестве решающих устройств модулей памяти, — это ограниченное число адресных входов. Так, при емкости модуля 4К имеется всего 12 адресных входов. Однако по сравнению с обычными схемами, используемыми для реализации логических операций, применение больших интегральных микросхем имеет следующие преимущества:

- возможность быстрого программирования с помощью ЭМ схем отбора событий для реализации требуемых логических функций,
- независимость времени выработки триггер-импульса от вида реализуемой функции,
- возможность быстрого получения результата решения в пределах 50-

- 100 нс,

- гибкость и широкие функциональные возможности,

- высокая надежность и резкое снижение стоимости,

- и, наконец, отпадает необходимость в механической коммутации вручную логических блоков.

Использование модулей памяти для создания быстродействующих устройств отбора событий посвящена работа /109/. На рис. 76 приведена обычная комбинационная схема, предназначенная для реализации булевых функций. Нередко в процессе эксперимента появляется необходимость в изменении структуры такой схемы, например исключение из суммы определенных комбинаций входных переменных. Однако в схемах, работающих в наносекундном диапазоне, это приводит к необходимости дополнительной подгонки задержек в кабелях и, соответственно, к дополнительной наладке таких схем. Схема, изображенная на рис. 77, отличается от предыдущей тем, что в ней после многоходовых элементов И помещены двухходовые элементы, которые по входу соединены с выходами соответствующих им программно-управляемых триггеров (на рис. 77 цепи занесения на триггеры не показаны).

Важным моментом в данной схеме является то, что теперь уже  $N$  входных переменных рассматриваются как разряды адреса, который полностью декодируется. Практически это значит, что  $P_1 + P_2 + P_3 \dots + P_N = 2^N$ . В результате сигнал с каждого декодированного адреса появится на выходе в том случае, если есть разрешающий уровень от соответствующей ячейки памяти.

### 4. Методы выделения прямых треков

Известно, что все законы физики сводятся, по существу, к выявлению закономерностей движения изучаемых объектов. И не случайно наиболее важным моментом в эксперименте является нахождение треков полезных событий. При отборе событий с помощью СП наиболее существенными критериями являются геометрические и кинематические свойства треков частиц. Методы нахождения треков во многом зависят от особенности эксперимента, от фоновых условий и проч. Ничего не будут рассмотрены несколько таких способов.

Метод окон. Окно задается с помощью двух или трех опорных точек, которые систематически выбираются среди вычисленных координат, и далее модель трека, например прямая или окружность, интерполируется между этими точками (рис. 78). Затем ищутся координаты внутри окна. Трек считается полезным, если минимум точек имеется внутри заданного окна, в соответствии с выбранным критерием, который зависит от числа камер, их эффективности и геометрии. Ширина окна определяется разрешением камер, их эффективностью и проч.

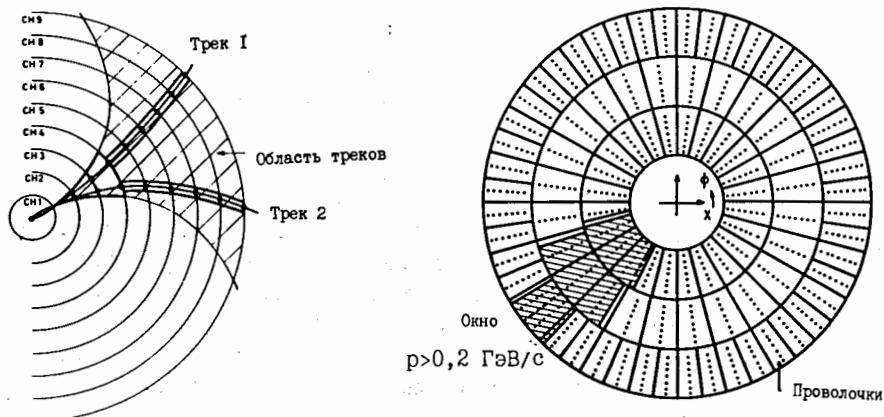


Рис. 79 и 80. К пояснению метода окон.

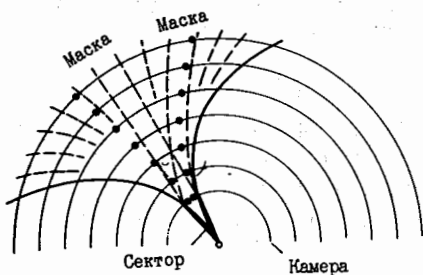


Рис. 81 и 82. К пояснению метода масок.

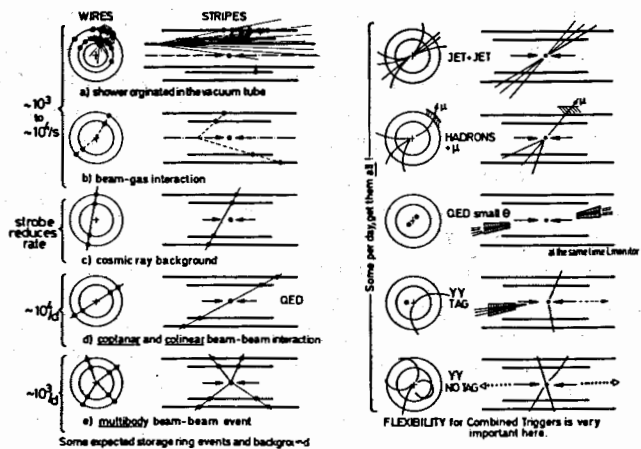
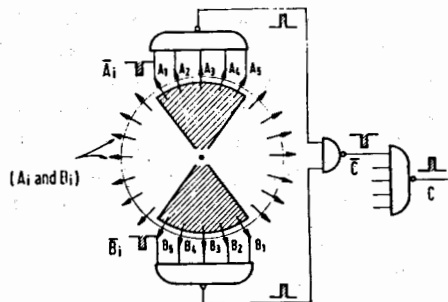


Рис. 83. Топология событий, ожидаемых в накопительных кольцах /I18/.

В коллаборации TASSO, которая базируется на ускорителе PETRA, для поиска треков внутри цилиндрических дрейфовых камер используется микропрограммируемый процессор МО/КА/109,110/. Данные от 9 камер после оцифровки запоминаются в ЗУ микропроцессора. Затем вычисленные азимутальные координаты записываются в ассоциативную память. На каждую камеру приходится по одному такому модулю. Окна задаются с помощью двух точек, расположенных в двух камерах, и с помощью точки пересечения, как это показано на рис.79,80. Алгоритм работы процессора хранится в ПЗУ. Наличие ассоциативного ЗУ позволяет вести поиск внутри каждого окна параллельно. В результате для реконструкции события с пятью лучами требуется всего 1 мс.

Еще более высокое быстродействие можно получить в специальных случаях, когда можно обойтись без программируемого процессора /I12/. В данной работе описано решающее устройство, предназначенное для распознавания треков в эксперименте по поиску распадов двух  $\phi$ -мезонов. Решающим фактором в этом эксперименте, который определил успех, явилось создание процессора с мертвым временем 200 нс.

### 5. Метод генерации масок

Метод масок отличается тем, что координаты треков не измеряются, а зарегистрированные треки быстро запоминаются на триггерных регистрах. Затем генерируются наиболее вероятные координаты треков, и решение находится с помощью мажоритарных схем совпадений. Таким же образом находятся как первичные, так и вторичные вершины взаимодействия в тех экспериментах, где имеет место распад частиц между плоскостями детектора /I10/. В системе TASSO данные регистрируются с помощью шести дрейфовых камер и после оцифровки записываются в регистры масок (рис.81,82). Объем камеры разделен на ячейки по радиусу и по углу:  $k + \Delta k$ ,  $\phi + \Delta \phi$ . Каждой из этих ячеек ставится в соответствие своя маска и мажоритарная схема совпадений 5 из 6. Все схемы совпадений работают параллельно, а маскирование выполняется в течение 800 нс. Если в качестве регистров масок использовать сдвиговые регистры, то отпадает необходимость в отдельной памяти для хранения масок. Этот способ эффективен, когда в качестве детектора служат МПК и данные записаны в виде унитарного позиционного кода.

### 6. Особенности триггерных систем, используемых в экспериментах на встречных пучках

Все эксперименты, проводимые в настоящее время, можно разделить на два класса в зависимости от типов ускорителей, на которых они проводятся;

эксперименты с фиксированной мишенью и эксперименты на встречных пучках, где мишенью являются фактически взаимодействующие частицы. Ускорители с накопительными кольцами характеризуются типом ускоряемых частиц, их энергией, длиной кольца и светимостью. Светимость измеряется в единицах  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ , дающих число взаимодействий в секунду, если сечение равно 1 см. При выработке стратегии в области создания эффективных триггерных систем для экспериментов на современных и планируемых экспериментах работают постоянные группы специалистов /И4/. При очень высокой светимости, порядка  $10^{33} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ , и при неупругом взаимодействии и сечении 50 мб существенная доля событий будет содержать более чем одно взаимодействие в течение мертвого времени детектора. При этих условиях реакции могут возникать с интервалом времени 20 нс, а для 10% взаимодействий возможны и интервалы 2 нс. Расчеты, проведенные в работе /И8/, дают следующие результаты. На ускорителе в ЦЕРН при светимости  $10^{28} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  и сечении 40 мб получается 400 соб./с.

На рис. 83 приведены топологии событий, ожидаемых в накопительных кольцах. При сверхвысоких энергиях ожидаются события с большой множественностью и с большим фоном, источниками которого являются взаимодействие пучка с газом и ливни в ионопроводе. Частота этих реакций составляет 10 с. Как видно из рис. 83, реакции от взаимодействия пучка с газом и ливни порождают треки, которые не совпадают с точками взаимодействия полезных событий, а их направленность одинакова с направлением пучков. Космические частицы некоррелированы с пучком, и поэтому их можно разделить с помощью триггерной системы. События типа  $ee \rightarrow ee, \mu\mu$  нуждаются в нормализации. Они порождают два компланарных и коллинарных трека. События с адронами дают много треков и ливней, которые детектируются с помощью калориметров.

В отличие от ускорителей с фиксированной мишенью, где банч частиц с интенсивностью  $10^{12}$  облучает мишень в течение 1 с, в ускорителях с накопительными кольцами это время может быть значительно больше. Если устройство отбора частиц может выдавать триггер-импульс быстрее, нежели период встречи пучков, то мертвое время отсутствует. Это время для SPS и PETRA составляет 3,8 мкс, 1 мкс для DORIS и 25 мкс для LEP. При таких временных параметрах в триггерную систему могут включаться только быстрые счетчики и трековые детекторы. Однако возникает проблема с дрейфовыми камерами, имеющими большое время дрейфа.

Сложность триггерного устройства зависит от постановки задачи. Во многих из них применяется простое совпадение между сигналами, сопровождаемыми пучки. При этом триггерное устройство работает с частотой

10 кГц и запускается с помощью времяпролетных счетчиков, а трековый процессор выделяет полезное событие. Уменьшить мертвое время можно следующим образом: время решения процессора плюс время срабатывания детектора с электроникой и плюс время, необходимое для подготовки к регистрации следующего события, не превышало бы интервал времени между встречами пучка. Для дрейфовых камер, используемых в TA 550 - эксперименте и в камерах типа "джет" в эксперименте JADE, это время равно 0,5 и 2 мкс соответственно. На выходе трекового процессора, используемого на ускорителе PETRA, полезные события получают с частотой 8, 2, и 0,8 Гц для двухлучевых, трехлучевых и четырехлучевых событий соответственно.

Таким образом, частота и количество полезных событий получаются относительно небольшими по сравнению с частотой и количеством первичных взаимодействий.

Большинство физических установок, создаваемых для проведения экспериментов на встречных пучках, носят универсальный характер и поэтому включают в себя не только множество типов различных детекторов, но и даже целые спектрометры. Каждая часть такой установки вырабатывает собственный триггер-импульс, который анализируется с помощью главного триггерного устройства. На рис. 84 в качестве примера приведена общая схема UA2 - установки, которая предназначена для экспериментов по поиску адронных струй и электронов с большими поперечными импульсами на SPS - ускорителе. Центральная область установки представляет собой калориметр с большим числом ячеек, что позволяет регистрировать адронные струи. Передняя область содержит два магнитных спектрометра, каждый из которых включает тороидальный магнит и девять плоскостей дрейфовых камер. Система из цилиндрических ИПК расположена вокруг пучка в области столкновений и служит для измерения позиции вершины события и направления движения заряженных частиц, рождаемых в этой же области. Здесь же размещены две дрейфовые камеры с ячейками, расположенными по азимуту. Далее перед электронным калориметром находятся ливневые счетчики, прослоенные конвертором (камеры C). Более детально эта установка описана в работе /И6/. Краткое описание, сделанное нами, дает представление о ее сложности. Качественным отличием в организации триггерных систем в больших установках является то, что появилась возможность включать в триггерные системы первого и второго уровня цилиндрические проволочные камеры и путем использования быстродействующей электроники за несколько микросекунд отбирать события по таким критериям, как множественность треков, их компланарность или коллинарность, величина импульса и проч. Все это в конечном итоге позволяет регистрировать редкие события.

Рассмотрим простые расчетные соотношения, которым должны удовлетворять устройства для быстрого отбора событий с целью получения минимального мертвого времени /108/. Обозначим через  $N$  число событий, приходящих в одну секунду в триггерное устройство, которое отбирает  $pN$  полезных событий, причем коэффициент  $p \leq 1$ . Очевидно, что отобранные события поступают с меньшей скоростью, чем приходящие от детектора. Полагая, что после отбора полезного события имеет место мертвое время  $Z$ , получим

$$p' = \frac{p}{1 + ZN}.$$

Мертвое время по существу представляет собой время решения, которое состоит из времени выборки фонового события и времени регистрации полезного события, т. е.  $Z = T_2 + T_3$ . Если получается, что время  $T_2$  меньше интервала времени между соседними банчами, то триггерная система работает без мертвого времени. В этом случае  $Z = pT_3$ . Исходя из этого соотношения, имеем

$$p' = \frac{p}{1 + pT_3}.$$

Поскольку ставится задача максимально уменьшить мертвое время до  $1 - 5\%$ , то необходимо, чтобы  $p' = p$ . При таком предположении имеем

$$pT_3 \ll 1 \quad \text{или} \quad T_3 \ll \frac{1}{N}.$$

Возможны два решения этой проблемы:

-  $p$  должно быть мало настолько, чтобы уменьшить скорость регистрации событий. Этого можно достичь путем выбора времени решения, равного интервалу времени между банчами. При этом триггерное устройство должно по крайней мере распознать адреса сработавших проволочек в центральном детекторе и затем из  $m$  возможных треков выбрать  $n$  нужных ( $m = 1000$  и  $n = 20$ ). Следовательно, типичный триггер имеет более чем 1000 входных шин. Конечно, на первом уровне отбора нет необходимости распознавать детально информацию о кандидатах в полезные треки. Такая процедура выполняется на следующем уровне отбора.

- Время регистрации  $T$  следует выбирать как можно меньшим. Прежде всего это зависит от способа передачи данных. Если события поступают со скоростью одно событие за секунду, то современная техника позволяет передавать в буферную память 10 - 20 Кбайт в течение 10 - 20 мс. Более детально вопросы, связанные с построением эффективных триггерных систем, рассматриваются в обширных трудах, издаваемых в ЦЕРН по результатам проводимых этой организацией конференций и школ /108, 117, 118/.

### Выводы

В экспериментах физики высоких энергий серьезное внимание уделяется созданию многоуровневых триггерных систем. Образно говоря, эти системы выполняют функции многоступенчатых редукторов, у которых на первом уровне данные регистрируются с частотой  $10^6$  Гц, а в конечном итоге на магнитную ленту для последующего анализа и обработки запись происходит с частотой несколько герц.

Качественным отличием триггерных систем, применяемых в 80-х годах, является то, что уже на первом уровне отбора полезных событий наряду со сцинтилляционными телескопами и годоскопами используются цилиндрические МПК и различные модификации дрейфовых камер. В сочетании с быстрой электроникой появилась возможность в реальном времени регистрировать и анализировать до сотни 3-мерных координат на один трек.

Существенно возросло число данных и увеличилась сложность критериев, используемых в процессе фильтрации. Такими данными являются: временные корреляции в банчируемых ускорителях, время пролета, корреляции времени дрейфа, создаваемого частицами, регистрируемыми в соседних камерах, множественность частиц, кривизна трека, количество кластеров в ливневых счетчиках, суммарная энергия, инвариантная масса и проч.

На первом и втором уровне отбора используются специализированные процессоры с табличными методами решения, модули оперативной и программируемой памяти и мажоритарные схемы совпадений. На последующих уровнях отбора применяются системы, состоящие из быстрых микропроцессоров, эмуляторов и мощных микроЭВМ. Все это в конечном итоге обеспечивает успех эксперимента и быстрое получение результата.

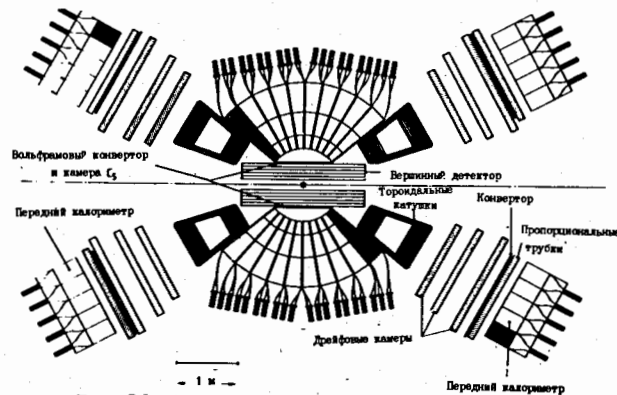


Рис.84. Блок-схема UA2-установки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Цитович А.И. Ядерная электроника. Энергоатомиздат, М.1984.
2. Rehak P. Preprint BNL, Upton, NOG 599.
3. Айхнер Г., Алеев А.Н., Арефьев В.А. Препринт ОИЯИ I-80-644, Дубна, 1980.
4. Borenstein S.R., Palmer R.B. Preprint BNL-98546, Upton, 1980.
5. Blumenfeld H., Bolognese T., Bourdinaud M. et al. DPHPE 84-04, 1984.
6. CERN Courier, 1984, N 24, N 3.
7. Burmeister H., Sonderegger P, Gago J.M. et al. Preprint CERN, CERN-EP/83-136, Geneva, 1983.
8. Niimura N, Yamada K., Kubota T. Nucl. Instrum. and Methods, 1983, v. 211, N 1, p.203.
9. Никитюк Н.М. ПТЭ, 1983, № 3, с.74
10. Bressani T., Caria M, Seru S. et al. Preprint CERN, CERN-EP/83-151, Geneva, 1983.
11. Васильев А.Н., Вишневецкий Н.К., Казаков П.Н. и др. Препринт ИФВЭ ОЭФ-82-62, Серпухов, 1982.
12. Какауридзе Д.Б., Краснокутский Р.Н., Медведев С.А. и др. Препринт ИФВЭ ОИФ-83-III, Серпухов, 1983.
13. Hofmann W., Markees A., Matthiessen U. et al. Preprint DESY, 81/045, Hamburg, 1981.
14. Kamon T., Kondo K., Yamasita A. et al. Nucl. Instrum. and Methods, 1983, v.213, N 1, p.261.
15. Fessler H., Freund P., Gelauer K.M. et al. MOI-PAE/Exp.E1.132, München, 1984.
16. Blamar G., Dietl H., Dobbins J. et al. Nucl. Instrum. and Methods, 1982, v.203, N 1, p.213
17. Dietl H., Eigen G., Fonseca V. Preprint MPI-PAE/Exp.E.130, München, 1984.
18. Рыжников В.Д., Стадник П.Е., Яковлев Ю.А. ПТЭ, № 5, 1984.
19. Borenstein S.R. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1984, vol. NS-31, N 1, p.396.
20. Kononenko W., Selove W., Theodosion G.P. et al. Nucl. Instrum. and Methods, 1983, v.214, N 1, p.237.
21. Hayashi T. Nucl. Instrum. and Methods, 1984, v.225, N 3, p.538.
22. Никитюк Н.М. Свет, кванты и вычислительная техника. "Знание", М., 1967.
23. Binns W.R., Israel M.N., Klarman I. Nuclear Instrum. and Methods, 1983, vol.216, N 2, p.475.
24. Cleland W.E., Krans D.E., Thompson J.A. Nucl. Instrum. and Meth., 1983, v.216, N 2, p.405.
25. Atkinson M., Crennell D., Fisher C., Kurtz N. Preprint Appleton Laboratory, RL-83-074, Chilton, 1983.
26. Berglund S., Carlson P.J., Jacobson J. Nucl. Instrum. and Meth., 1981, v.190, N 3, p.503.
27. Tauch T. KFK- Preprint 83-12, Tristan, 1983.
28. Rancaita P.G. Preprint INFN/AE-83/7, Frascati, 1983.
29. Huams B., Koetz U, Belau E. et al. Preprint MPI-PAE/Exp.E1.104. Hamburg, 1982.
30. Borbiellini G., G. Cecchet, J. Hemmerly. Preprint INEN/TC-83/15, Frascati, 1983.
31. Lamport J.E., Perkins M.A., Tuzzolino A.J., Zamob R. Nucl. Instrum. and Meth., 1979, N 1, p.105
32. Gatti E., Manfred D., Marioli D., Paglia G.E. Nucl. Instrum. and Meth., 1984, v.221, N 3, p.536.
33. Jarron P., Goyot M. Nucl. Instrum. and Meth., 1984, v.226, N 1, p.156.
34. Hoffman R., Lutz G., Hosticka B.T. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1984, v.226, N 1, p.196.
35. Gatt E., Rehak P., Walton J. Preprint BNL. N BNL-34524, Berkley, 1983.
36. Gatti E., Rehak P., Walton J. Nuclear Instrum. and Meth., 1984, vol.226, No 1, p.129.
37. Coon D., Engels P., Plants D. et al. Nuclear Instruments and Methods, 1984, v.226, N 1, p.169.
38. Allinson N.M. Nucl. Instrum. and Methods, 1982, v.201, N 1, p.53.
39. Cavailler C., Fleuret N., Mens A. et al. Preprint CRN 83-15, Strassbourg, 1983.
40. Yazgan E., Kirsten F. IEEE Trans. on Nucl. Science, 1978, v. N 5-NS -25, N 1, p.730.
41. Сороко П.М. ЭЧАЯ, 1979, т. 10, вып.5, с.1038.
42. Bross A., Brown., Dowing R. Nucl. Instrum. and Methods, 1979, v.166, N 2, p.367.
43. Ludlam T., Platner F. Proceedings of the 1983 DPF Workshop on collider detectors. LBL-15973, UC-37, Berkley, 1983.
44. Григоров Н.Д., Мирзин В.С., Рапопорт И.Д. ЖЭТФ, 1958, т.34, с.506.
45. Baltay C., Camilleri L., Cox B. et al. Proceedings of the 1983 DPF Workshop on collider detectors, LBL-15973, UC-37, Berkeley, 1983, p.49.
46. Fabjan C.W., Fischer C. CERN-preprint, CERN-EP-80-27, 1980.
47. Прокошкин Ю.Д. Препринт ИФВЭ № 79-148, Серпухов, 1979.
48. Davidov V.A., Donskov S.V., Inyakin A.V. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1980, vol.174, N 1, p.369.
49. Benvenuti A., Cline D., Ford W.T. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1975, vol.125, N 2, p.447.
50. Краснокутский Р.Н., Федякин Н.Н., Шувалов Р.С. Препринт ИФВЭ № 84-124, Серпухов, 1984.
51. Schuler G. CERN-preprint No 82-09, Geneva, 1982.
52. Гуськов Б.Н., Калинин В.А., Крастьев В.Р., Максимов А.Н., Никитюк Н.М. ОИЯИ, IO-83-714, Дубна, 1983.
53. Budezak B., Eschstruth P., Grelaud B. et al. Preprint Orsay, LAL 83/04, 1983.

54. Holder M., Knobloch J, Lacourt A. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1978, vol.148, N 1, p.235.
55. Blooker C., Brandenburg G.W., Carey R. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1983, vol.216, N 1, p.71.
56. Nelson K.S., Erwin A.R. IEEE Transaction on Nucl. Science., 1983, vol. NS-30, N 1, p.146.
57. Charpak G., Bouclier R., Bressani T. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1968, v.62, p.235.
58. Foeth H., Hammarström R., Rubbia C. Nucl. Instrum. and Meth., 1973, v.109, N 2, p.521.
59. Charpak G., Sauli P. Nucl. Instrum. and Meth., 1973, v.113, N 3, p.381.
60. Lacy J.L. Nucl. Instrum. and Meth., 1974, v.119, N 2, p.483.
61. Radeka V., Boie R. Nucl. Instrum. and Meth., 1980, v.178, N 2, p.543.
62. Breskin A., Charpak G., Demierre C. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1977, v.143, N 1, p.29.
63. Gatti E., Okung H., Artuso M. Nucl. Instrum. and Meth., 1979, v.167, N 2, p.417.
64. Mathieson E., Smith G.G., Gilvin P.J. Nucl. Instrum. and Meth., 1980, v.174, N 1, p.221.
65. Glässel P., Rösler H., Männer R., Sprecht H.J. Nucl. Instrum. and Meth., 1977, v.141, p.111.
66. Jeavons A.P., Fora N., Lindberg B. et al. IEEE Transaction on Nucl. Scien., 1976, v. NS-23, N 1, p.259.
67. Graaf H., Wagendur J.P. Nucl. Instrum. and Meth., 1983, v.217, N 1, p.357.
68. Bird L., Findlay R.G., Raffler A.A., Ohska T. Nucl. Instrum. and Meth., 1979, v.166, N 1, p.155.
69. Ambats I., Areuton M.W., Ayres D.S. et al. Preprint ANL-HEP-PR-80213, Argonne, 1980.
70. Vavra J., Shapiro S. Nucl. Instrum. and Meth., 1979, v.163, N 2, p.415.
71. Glässel P. Nucl. Instrum. and Meth., 1977, v.140, N 1, p.61.
72. Kitawoto S. Nucl. Instrum. and Meth., 1982, v.203, p.613.
73. Beek H.P., Mels W.A., Brinkman A.C. IEEE Transaction on Nucl. Science., 1984, v. NS-31, N 1, p.45.
74. Delepierre P.; Tuplot J.P., Bazan A. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1982, vol.197, No 1, p.317.
75. Badier J., Boucrot J., Burgun G. et al. Preprint CERN/EP 80-36, Geneva, 1980.
76. Boucrot J., Callot O., Dube R. et al. Preprint Orsay, LAL-79/33, Paris, 1979.
77. Aden T., Dahlgren S., Ekelöf T. Nuclear. Instrum. and Meth., 1978, vol. 154, No 2, p.361.
78. НИКИТОК Н.М., В.Н.Самойлов, П.Шюсслер. ИТЭ, № 2, 1984, с.69.
79. Ball R.C., Gustafson H.R., Longo M.J. Preprint UM HE 81-46, 1981, Michigan.

80. Н.М.НИКИТОК. ИТЭ, № 2, 1983, с.17.
81. Hansroul M., Verkerk C. CERN, preprint DD/73/4, Geneva, 1973.
82. Алексеев Г.Д., Круглов В.В., Хазинс Д.М. ЭЧАЯ, т.13, вып.3, 1982, с.703.
83. Anderson D.F., Charpak G., Kusmierz W. et al. CERN-Preprint CERN-EP/84282, Geneva, 1984.
84. Cheng D.C., Kozanecki W.A., Picooni R.L. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 1974, vol.117, No 1, p.157.
85. Etkin A., Kramer M. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1980, vol. NS-27, No 1, p.139.
86. Dhawan S.K. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1983, vol. NS-30, No 1, p.293.
87. Porat D.I. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1973, vol. NS-20, No 1, p.36.
88. Turko B.T. IEEE Transaction on Nuclear Science, vol. NS-31, No.1, p.167.
89. Legrele G, Lugol J.C. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1983, vol. NS-30, No 1, p.297.
90. Festa E. Sellem R. Nuclear Instrum. and Meth., 1981, vol.188, No 1, p.99.
91. Warner B.H. Electronic Design, 1977, No. 1, p.128.
92. Pernicka M. Nuclear Instrum. and Meth., 1978, vol.156, No 1, p.311.
93. Calvetti M., Cittolin S., Cochet C. et al. CERN-preprint, CERN-EP/80-42, Geneva, 1980.
94. Eggert K., Engster C., Koningsveld J. et al. CERN-preprint, CERN-EP/80-85, Geneva, 1980.
95. Bourgeois F. Nuclear Instrum. and Meth., 1984, vol.219, No 1, p.153.
96. Заневский Ю.В. Проволочные детекторы элем. частиц. М. Атомиздат, 1975.
97. Heintze J. Nuclear Instrum. and Meth., 1978, vol.156, No 1, p.227.
98. Farz W., Heintze J. Nuclear Instrum. and Meth., 1978, vol.156, No 1, p.301.
99. Panoher D., Hilke H.J., Loken S. et al. Nuclear Instrum. and Meth., 1979, vol.161, No 1, p.383.
100. Aihara H., Alston-Garnjost M., Badtke D.H. et al. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1983, vol. NS-30, No 1, p.162.
101. Hallgren B., Verweij H. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1980, vol. NS-27, No 1, p.333.
102. Giorgi M., Gasparini F., Moneguzzo A. et al. Nuclear Instrum. and Meth., 1984, vol. 223, No 1, p.113.
103. Calvetti M., Cennini P., Centro S. et al. CERN-preprint, CERN-EP/82-44, Geneva, 1982.
104. Miki T., Iton R., Kamae I. Preprint, Tokyo, No. UT-HE-84/16.
105. Rust D.K. SLAC-preprint, SLAC-PUB-3311, Stanford, 1984.
106. Ambats I., Ayres D.S., Dawson J.W. No ANL-HEP-CP-84-79, Minneapolis, 1984.



107. Ludlam T., Flatner E.D. Proceedings of the 1983 DPF Workshop on collider detectors, LBL-15973, Berkley, 1983.
108. Verkerk K.C. Proceedings of the 1978 CERN School computing, CERN 78-13, Geneva, 1978.
109. Flatner F.D., Etking A., Foley K. Jet al. Nucl. Instrum. and Methods, 1977, vol.140, No 3, p.549.
110. Franke G. DESY - Preprint DESY 80/109, Hamburg, 1980.
111. P.Schildt, H.J.Stuckenberg D. Topical Conference on the application of microprocessors to high energy physics experiments, CERN 81-07, Geneva, 1981.
112. Fenker H.C., Green D.R., Hansen S. Fermilab- Preprint, Fermilab-Pub-82/62-Exp., Batavia, 1982.
113. Katsanevas S., Kostarakis P. Fermilab-conf-83/24-Exp., Batavia, 1983.
114. Shochet Mel. Proceedings of the 1983 DPF Workshop on Collider detectors, LBL-15973, Berkley, 1983.
115. Stuckenberg H.J. Topical conference of the application of microprocessors to high-energy physics experiments, CERN 81-07, Geneva, 1981.
116. Banner M. Proceeding of the 1983 DPF Workshop on collider detectors, LBL-15973, Berkley, 1983.
117. Proceedings of the 1980 CERN School of computing, CERN 81-03, Geneva, 1981.
118. Proceedings 1982, CERN School of computing, CERN 83-03, Geneva, 1983.
119. Васильев А.Н., Вишневецкий Н.К., Матуленко Ю.А. и др. ПТЭ, № 4, 1982, с.52.
120. Абрамов В.В., Алексеев А.В., Балдин Б.Ю и др. Препринт ИФВЭ, № 83-180, Серпухов, 1983.
121. Васильченко В.Г., Рыкалин В.И. ПТЭ, № 1, 1987, с.7.
122. Пешехонов В.Д. ВЧЯЯ, 1986, т.17, вып.5, с.1030-1078.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 декабря 1987 года.

ПЕРЕЧЕНЬ  
лекций, вышедших с 1974 в ОИЯИ

- Фаустов Р.Н. Связанная система частиц в квантовой электродинамике. Вып.1. ОИЯИ; Дубна, 1974.
- Синаев А.Н. Современные аппаратурные системы модульной структуры, используемые при создании измерительно-вычислительных комплексов /КАМАК, ВЕКТОР/. Вып.2. ОИЯИ, 8507, Дубна, 1975.
- Волков Д.В. Кварки как следствие дуальности. Вып.3. ОИЯИ, P2-8765, Дубна, 1975.
- Пальчик М.Я., Фрадкин Е.С. Введение в теорию конформно-инвариантных квантовых полей. Вып.4. ОИЯИ, 2-8874, Дубна, 1975.
- Замори Э. Микропроцессоры. Вып.5. ОИЯИ, P10-8852, Дубна, 1975.
- Биленький С.М. Вопросы физики нейтрино высоких энергий. Вып.6. ОИЯИ, 2-9026, Дубна, 1975.
- Малкин И.А., Манько В.И. Инварианты, когерентные состояния и динамические симметрии квантовых систем. Вып.7. ОИЯИ, P2-9228, Дубна, 1975.
- Волков М.К., Первушин В.Н. Квантовая теория поля с киральным лагранжианом и физика мезонов низких энергий. Вып.8. ОИЯИ, P2-9390, Дубна, 1976.
- Басиладзе С.Г. Интегральные схемы с эмиттерной связью и их применение в наносекундной ядерной электронике. Вып.9. ОИЯИ, 13-9744, Дубна, 1976.
- Аникин С.А. и др. Перенормированные составные поля в квантовой теории поля. Вып.10. ОИЯИ, P2-10528, Дубна, 1977.
- Шляпников П.В. Множественные процессы и инклюзивные реакции. Вып.11. ОИЯИ, P2-10681, Дубна, 1977.
- Капусцик Э. Галилеева инвариантность в теории поля. Вып.12. ОИЯИ, P2-10677, Дубна, 1977.
- Бутцев В.С. Явление возбуждения высокоспиновых ядерных состояний и механизм поглощения отрицательных п-мезонов. Вып.13. ОИЯИ, P15-10847, Дубна, 1977.
- Валуев Б.Н. Применение алгебры Клиффорда к решению задачи Изинга - Онсагера. Вып.14. ОИЯИ, P17-11020, Дубна, 1977.
- Капусцик Э. Нестандартные алгебры квантово-механических наблюдаемых. Вып.15. ОИЯИ, P4-11497, Дубна, 1978.

Блохинцев Д.И. Квантовая механика. Лекции по избранным вопросам. Вып.16. ОИЯИ, P2-11728, Дубна, 1978.

Ширикова Н.Ю. Начинаям работать на ЭВМ CDC-6500. Вып.17. ОИЯИ, P11-11739, Дубна, 1978.

Барбашов Б.М., Нестеренко В.В. Непрерывные симметрии в теории поля. Вып.18. ОИЯИ, P2-12029, Дубна, 1978.

Некоторые проблемы физики высоких энергий /сборник/. Вып.19. ОИЯИ, P2-12080, Дубна, 1978.

Басиладзе С.Г. Электронная регистрирующая аппаратура физического эксперимента. Вып.20. ОИЯИ, P13-12151, Дубна, 1979.

Ефремов А.В., Радюшкин А.В. Партоны, жесткие процессы и квантовая хромодинамика. Вып.21. ОИЯИ, P2-12803, Дубна, 1979.

Говорков А.Б. Введение в теорию кварков. Вып.22, ОИЯИ, P2-12803, Дубна, 1979.

Говорков А.Б. Цветные кварки и глюоны. Вып.23. ОИЯИ, P2-80-6, Дубна, 1980.

Исаев П.С. Глубокоупругое рассеяние лептонов на нуклонах. Партоновая модель нуклона. Вып.24. ОИЯИ, P2-80-325, Дубна, 1980.

Казаков Д.И., Щирков Д.В. Суммирование асимптотических рядов в квантовой теории поля. Вып.25. ОИЯИ, P2-80-462, Дубна, 1980.

Осоков Г.А. Применение методов распознавания образов в физике высоких энергий. Вып.26. ОИЯИ, P10-83-187, Дубна, 1983.

Мальшев В.А. Элементарное введение в математическую физику бесконечно-частичных систем. Вып.27. ОИЯИ, P17-83-363, Дубна, 1983.

Савушкин Л.Н., Фоменко В.Н. Введение в мезонную теорию ядерных взаимодействий и ядерных систем. Вып.28. ОИЯИ, P4-83-369, Дубна, 1983.

Биленький С.М. Осцилляции нейтрино. Вып.29. ОИЯИ, P2-83-441, Дубна, 1983.

Бужек В. Введение в метод стохастического квантования. Вып.30. ОИЯИ, P2-84-419, Дубна, 1984.

Шумовский А.С., Юкалов В.И. Фазовые состояния и переходы. Вып.31. ОИЯИ, P17-85-676, Дубна, 1985.

Владимиров А.А. Введение в квантовые интегрируемые системы. Метод R-матрицы. Вып.32. ОИЯИ, P17-85-742, Дубна, 1985.

Осипов В.А., Федянин В.К. Полиацетилен и двумерные модели квантовой теории поля. Вып. 33. ОИЯИ, P17-85-309, Дубна, 1985.

Шуяц Ш. Стохастичность в динамических системах. Вып. 34. ОИЯИ, P17-86-211, Дубна, 1986.

Ефремов А.В. Введение в квантовую хромодинамику. Вып. 35. ОИЯИ, P2-86-212, Дубна, 1986.

Нестеренко В.В., Червяков А.М. Сингулярные лагранжианы. Классическая динамика и квантование. Вып. 36. ОИЯИ, P2-86-323, Дубна, 1986.

Пепельшев Ю.Н. Регистрация нейтронов /современное состояние и перспективы развития/ Вып. 37. ОИЯИ, P13-86-719, Дубна, 1986.

Боголюбов Н.Н./мл./, Шумовский А.С. Светоизлучение. Вып. 38. ОИЯИ, P17-87-176, Дубна, 1987.

Пушкарлов Д.И. Дефектоны в кристаллах. /Метод квазичастиц в квантовой теории дефектов/. Вып. 39. ОИЯИ, P17-87-177, Дубна, 1987.

Никитюк И.М. От современной алгебры к специализированным процессорам. Вып. 40. ОИЯИ, P10-87-401, Дубна, 1987.

Дубничкова А.З. Непрерывные группы для физиков. Вып. 41, ОИЯИ, P2-87-197, Дубна, 1987.

Требования, предъявляемые к серии брошюр  
"Лекции для молодых ученых ОИЯИ"

Серия брошюр "Лекции для молодых ученых ОИЯИ" издаётся с целью повышения научно-профессионального кругозора и уровня молодых ученых и специалистов ОИЯИ в актуальных областях исследований, ведущихся по тематике Института. Выпуски должны представлять собой законченные циклы лекций, прочитанные в ОИЯИ и ориентированные прежде всего на молодых сотрудников Института.

Лекции должны иметь характер учебного пособия, предназначенного для первого ознакомления с рассматриваемой проблемой, а также содержать обзор её современного состояния. Они должны быть снабжены подробным оглавлением и основной литературой. Большие параграфы рекомендуется разбивать на подпараграфы с вынесенными в оглавление подзаголовками.

Весь текст, включая отдельные главы и параграфы, следует печатать, заполняя каждую страницу целиком.

Рукопись должна быть напечатана на специальных бланках, предназначенных для прямого репродуцирования, которые можно получить в издательском отделе. Все формулы и схемы должны быть вписаны аккуратно и ясно тушью или чернилами черного цвета. Разметка формул не производится, их нумерация должна находиться в конце строки справа в круглых скобках. Текст лекций печатается на машинке с черной (не серой) лентой через 1,5 интервала. Объем лекций не должен превышать 100 страниц машинописного текста.

Рукопись представляется в Редакционный совет серии брошюр "Лекции для молодых ученых ОИЯИ" Советом молодых ученых и специалистов ОИЯИ и Советами молодых ученых и специалистов лабораторий Института. Редакционный совет принимает окончательное решение о целесообразности ее публикации.

Редакционный совет