

# ДЕТЕКТОРЫ С РЕГИСТРАЦИЕЙ КОЛЕЦ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА—ЧЕРЕНКОВА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ (ОБЗОР)

*А. И. Ронжин*

Институт физики высоких энергий, Серпухов

Рассмотрены детекторы с регистрацией колец излучения Вавилова — Черенкова и их применение в экспериментах на ускорителях.

Vavilov—Cherenkov radiation ring spectrometers and their application in accelerator experiments are considered.

## ВВЕДЕНИЕ

Идентификация частиц является одной из важнейших задач в экспериментах по физике высоких энергий. Примером наиболее общей и трудной задачи является идентификация частиц в процессах с множественным рождением вторичных частиц, например, в  $p\bar{p}$ - или  $e^+e^-$ -соударениях [1—3]. В этом случае требуется одновременное разделение по сортам нескольких десятков частиц в широком импульсном и угловом диапазоне. Особое место среди приборов, предназначенных для решения этой задачи, заняли спектрометры колец излучения Вавилова — Черенкова, позволяющие идентифицировать частицы по скорости при независимом определении их импульсов или полной энергии.

В данном обзоре рассматриваются особенности работы этих детекторов, область их применения, а также перспективы использования.

Обзор состоит из трех частей. В первой части рассматриваются спектрометры колец, в которых в качестве фотодетекторов используются многоступенчатые пропорциональные и дрейфовые камеры с фоточувствительными добавками. Описаны спектрометры, создаваемые и уже используемые в настоящее время на ускорителях с фиксированной мишенью и на встречных пучках. Во второй части рассмотрены спектрометры с использованием в качестве фотодетекторов позиционно-чувствительных вакуумных фотоприемников. Третья часть посвящена разработкам и перспективам использования данной методики.

**Принцип работы спектрометров и основные соотношения.** При всем существующем разнообразии конструкций спектрометров основными его элементами являются радиатор, в котором при прохождении частиц возникает излучение Вавилова — Черенкова, сферическое зеркало, фокусирующее излучение в кольцо и позиционно-чувствительный фотодетектор, расположенный в фокальной плоскости сферического зеркала. Измеряемыми величинами для однозарядных частиц являются радиус кольца и положение его центра, однозначно связанные со скоростью частицы и углом наклона ее траектории к оси спектрометра. Таким образом, каждая частица идентифицируется в спектрометрах по скорости при независимом изменении ее импульса или полной энергии.

Рассмотрим основные соотношения для спектрометров с фокусирующим сферическим зеркалом. Основополагающее соотношение для излучения Вавилова — Черенкова

$$\cos \Theta = 1/\beta n, \quad (1)$$

$\Theta$  — угол излучения;  $\beta$  — скорость частицы;  $n$  — показатель преломления радиатора. Связь между радиусом кольца в фокальной плоскости  $r$  и углом излучения  $\Theta$  записывается в виде

$$r = f \operatorname{tg} \Theta, \quad (2)$$

$f$  — фокусное расстояние сферического зеркала. Смещение центра кольца  $d$  относительно оси спектрометра, совпадающей с осью сферического зеркала, определяется как

$$d = f \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

$\alpha$  — угол наклона траектории частицы к оси сферического зеркала. Разрешение спектрометров по скорости задается соотношением

$$\left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)^2 = \left[(\operatorname{tg} \Theta \cdot \Delta\Theta)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2\right] / N_0 L \sin^2 \Theta, \quad (4)$$

где  $\Delta n/n$  — дисперсия показателя преломления радиатора;  $L$  — длина радиатора;  $N_0$  — добротность спектрометра — важный параметр, определяющий качество его оптики и фотодетектора:

$$N_0 = 2\pi\alpha z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 \cdot n^2(\lambda)}\right) \frac{k(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda, \quad (5)$$

$\alpha = 1/137$ ;  $z$  — заряд частицы;  $k(\lambda)$  — квантовая эффективность фотодетектора;  $\varepsilon(\lambda)$  — коэффициент светопропускания оптической системы. Количество регистрируемых на кольцо излучения фотоэлектронов записывается в виде

$$N_{\text{фа}} = N_0 L \cdot \sin^2 \Theta. \quad (6)$$

Следует упомянуть еще одно полезное для вычислений соотношение:

$$\Theta^2 = 2(\Delta n - \Delta\beta), \quad \Theta, \Delta n, \Delta\beta \ll 1. \quad (7)$$

Заметим, что разрешение черенковских спектрометров по скорости зависит от точности измерения угла излучения и дисперсии показателя преломления радиатора, а также от количества регистрируемых на кольцо излучения фотоэлектронов.

Основные физические причины, вызывающие размытие колец и достижимую в связи с этим точность в определении углов излучения, следующие:

1. *Дисперсия показателя преломления радиатора.* Размытие угла излучения, обусловленное этим фактором:

$$\Delta\Theta_{xp} = \frac{dn/dE\Delta E}{\sqrt{12} n \operatorname{tg} \Theta}, \quad (8)$$

$dn/dE$  — изменение показателя преломления в диапазоне энергий регистрируемых фотонов  $\Delta E$ .

2. *Многokратное рассеяние частицы в веществе радиатора:*

$$\Delta\Theta_{MH} = \frac{15}{\beta_{pc}} \sqrt{\frac{L/2}{X_0}}. \quad (9)$$

3. *Пространственное разрешение фотодетектора  $\sigma_{пр}$ :*

$$\Delta\Theta_{пр} = \sigma_{пр}/f. \quad (10)$$

4. *Оптические aberrации,* обусловленные различием хода лучей на фотодетектор для фотонов, эмитируемых из различных точек траектории частицы (для оптических систем со сферическим зеркалом):

$$\Delta\Theta_{опт} \approx \Theta^3. \quad (11)$$

5. *К другим причинам* конкретного характера можно отнести изменение угла излучения из-за энергетических потерь в радиаторе, влияние температурного градиента на показатель преломления, смещение угла излучения вследствие изменения траектории частицы в магнитном поле и т. д.

## 1. СПЕКТРОМЕТРЫ С ГАЗОВЫМИ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ФОТОДЕТЕКТОРАМИ

Газовые фотодетекторы начали широко развиваться после работы Сегьюино и Ипсилантиса [4], которые предложили использовать для регистрации координат фотонов дрейфовую камеру с насыщенными парами соединений, имеющих достаточно низкий потенциал фотоионизации. После того как в качестве фоточувствительных добавок стали применять триэтиламин (ТЕА) и тетрадиметил-аминэтилен (ТМАЕ) [5,6], развитие фотодетекторов пошло по двум основным направлениям. Одно направление связано с разработкой фотодетекторов на основе двухкоординатных дрейфовых камер [7], другое — многоступенчатых пропорциональных камер [8]. Таким образом, с момента предложения [4] появилась возможность ис-

пользовать всю развитую мощь методики пропорциональных и дрейфовых камер, а именно: достигнутый уровень технологии изготовления, большие площади и высокое пространственное разрешение для регистрации колец излучения Вавилова — Черенкова.

Сравним свойства ТЕА и ТМАЕ. На рис. 1 показаны квантовая эффективность ТЕА и ТМАЕ, а также спектры пропускания некоторых газов и оптических стекол [9]. Видно, что диапазон чувстви-

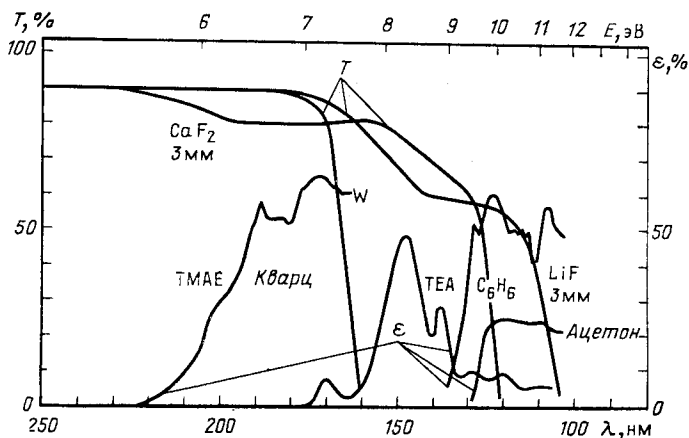


Рис. 1. Квантовая эффективность  $\epsilon$  некоторых фоточувствительных добавок и светопропускание  $T$  различных окон

тельности ТЕА — в области длин волн 140—160 нм, что ограничивает его применение в основном благородными газами и оптическими элементами на основе  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$  и  $\text{LiF}$ , прозрачными в области вакуумного ультрафиолета. В то же время использование ТМАЕ возможно с применением кварцевой оптики и значительно большего набора газовых радиаторов. Это является важным преимуществом ТМАЕ. Среди существующих трудностей регистрации колец излучения в области фотоионизации ТЕА следует отметить ухудшение отражающих свойств зеркал, существенное влияние на поглощение фотонов примесей кислорода и воды (уровень не должен превышать  $10^{-6}$ ), а также сильный рост дисперсии газовых радиаторов в этой области. Следует подчеркнуть также, что механические свойства оптических стекол из  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{LiF}$  позволяют применять их в спектрометрах при давлении газовых радиаторов, близких к атмосферному.

Основным недостатком ТМАЕ является низкое давление его насыщенных паров — 0,2 мм рт. ст. при  $20^\circ\text{C}$  (56 мм рт. ст. для ТЕА), в связи с чем свободная длина пробега фотонов составляет около 15 мм (1 мм для ТЕА). Это требует увеличения размеров конверсионного промежутка до 45—60 мм (в случае ТМАЕ), из-за чего фотодетектор становится чувствительным к фону от прохождения заря-

женных частиц (сигнал от заряженных частиц примерно в 200 раз превышает сигнал от отдельного фотона). Помимо этого значительные трудности возникают с подавлением оптической обратной связи, возникающей из-за конверсии фотонов, образующихся при газовом усилении и проникающих в рабочую область фотодетектора. Еще один недостаток ТМАЕ заключается в том, что он легко окисляется, и это усложняет его эксплуатацию.

Отметим, что регистрация вакуумного ультрафиолета трудна, так как требует создания достаточно сложной системы контроля за чистотой газового радиатора, газовым наполнением камер, долговременной стабильностью и т. д. [10].

**Конструктивные особенности фотодетекторов.** Вначале рассмотрим фотодетектор на основе двухкоординатной дрейфовой камеры,

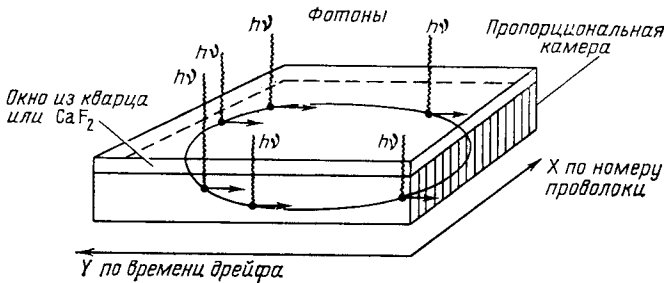


Рис. 2. Изображение двухкоординатной дрейфовой камеры

схематически изображенной на рис. 2. Объем камеры отделен от газового радиатора оптическим окном из прозрачного материала. Фотоны излучения Вавилова — Черенкова, возникающие в радиаторе, пройдя через окно, конвертируют в дрейфовом промежутке в фотоэлектроны, которые затем дрейфуют к области пропорциональной камеры, где происходит их газовое усиление. Одна координата фотоэлектрона, обычно принимаемая за  $Y$ , определяется по времени дрейфа, другая —  $X$  — по номеру сработавшей в пропорциональной камере проволоки. На рис. 3 показано схематическое изображение одной из ранних конструкций камер [5]. Равномерно распределенный в направлении дрейфа потенциал задается при помощи полезадающих проволок, расположенных с равным шагом по обеим сторонам дрейфового промежутка. Выполненные на ранней стадии исследования [10] показали, что полезадающую проволоку необходимо также размещать с обеих сторон входного окна с целью устранения потерь эффективности регистрации фотоэлектронов по длине дрейфового промежутка. Потери были обусловлены поляризацией окон и возникающими в связи с этим искажениями электрического поля.

Одна из основных проблем в детекторах такого типа заключалась в оптической обратной связи, приводящей к большому фону в каме-

рах. Обратная связь приводила как к значительному числу срабатываний соседних проволок, так и к фоновым срабатываниям в области фоточувствительного объема. Это сильно усложняло условия реконструкции колец. Решением проблемы занималось несколько групп, в результате чего определились некоторые конструктивные особенности камер. Способами ее подавления являются постановка вблизи анодных проволок шторок («клуазонов»), введение дополнительных фокусирующих электродов и дополнительного дрейфового

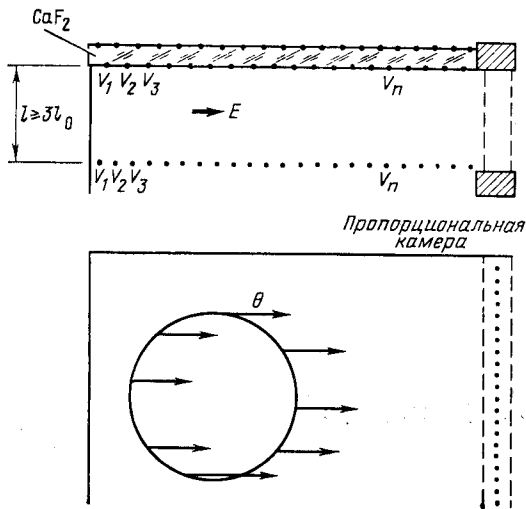


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции камеры ( $l_0$  — средний пробег фотонов)

промежутка, разбивающего процесс газового усиления на два этапа, что позволило также уменьшить ионную обратную связь (рис. 4) [11]. Дополнительным средством является введение в газовую смесь добавок, поглощающих часть спектра фотонов из области вакуумного ультрафиолета. К настоящему времени проблему оптической обратной связи следует, по-видимому, считать решенной.

Устоявшимися параметрами данных фотодетекторов можно считать следующие: длина дрейфового промежутка 20—150 см (соответствующее полное время дрейфа 2—15 мкс), газовое заполнение — метан или метан в смеси с изобутаном (высокая скорость дрейфа, малый коэффициент диффузии электронов, высокое газовое усиление и хорошая оптическая прозрачность), шаг анодных проволок в пропорциональной камере 1—2 мм, коэффициент газового усиления —  $10^5$ . Фотодетектор с данными параметрами и площадью чувствительной области  $1 \times 1$  м содержит до 1000 сигнальных проволок и такое же число каналов считывающей электроники. Каждый канал содержит низкошумящий усилитель — формирователь и время-

цифровой преобразователь. Заметим, что такой фотодетектор имеет  $10^8$  дискретно разрешаемых позиций.

Фотодетектор на основе многоступенчатой пропорциональной камеры (МСПК) разрабатывался и наиболее подробно исследовался группой Шарпака [12]. Схематически фотодетектор изображен на рис. 5. Он содержит входное окно и многоступенчатую пропорциональную камеру, разделенную при помощи электродов на несколько промежутков: конверсионный (С), предварительного усиления (РА),

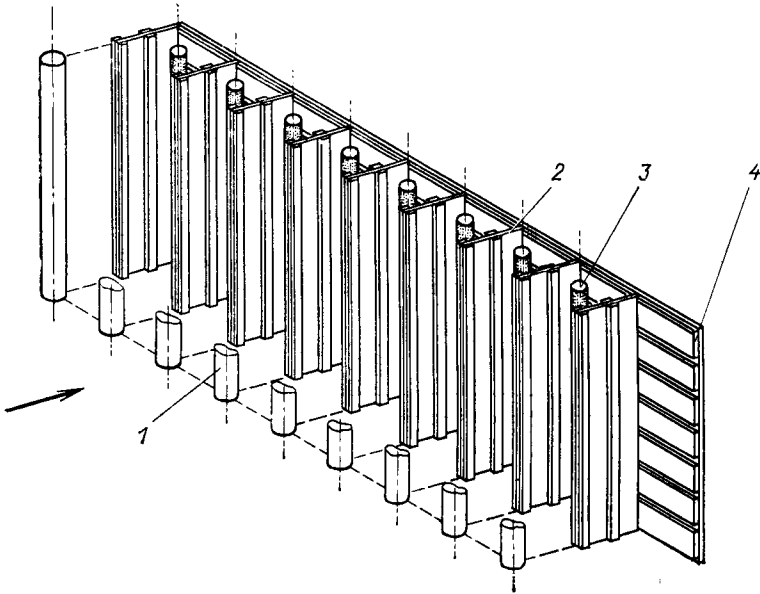


Рис. 4. Структура анодной области камеры:

1 — электрод; 2 — шторка; 3 — анод; 4 — катод (стрелкой показано направление дрейфа фотоэлектрона)

передачи (Т) и пропорционального усиления (РС). В промежутке пропорционального усиления измеряются три проекции координат фотонов:  $U$  — по номеру анодной проволоки,  $X$  и  $Y$  — по наведенному заряду на проволочных катодных электродах, расположенных ортогонально друг к другу и под углом  $45^\circ$  к анодным проволокам. Особенности камеры являются разбиение процесса усиления на два этапа, наличие промежутка передачи и способ расположения сигнальных электродов. Преимуществами такой конструкции являются высокий коэффициент газового усиления (до  $10^7$ ), подавленная обратная связь, локализация лавины в процессе газового усиления, а также возможность управления камерой, которая обеспечивается наличием промежутка передачи. В модели камеры [13] использовались четыре окна из  $\text{CaF}_2$  размером  $100 \times 100 \times 4$  мм каждое. Такие размеры окон были выбраны в качестве прототипа для

рабочего фотодетектора площадью  $800 \times 400$  мм, поэтому особое внимание было уделено конструкции крепления окон. Было найдено решение, обеспечивающее герметичность соединения и исключаящее

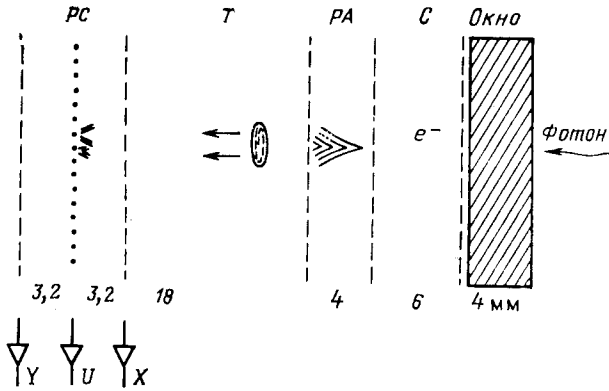


Рис. 5. Схематическое изображение фотодетектора на основе многоступенчатой пропорциональной камеры

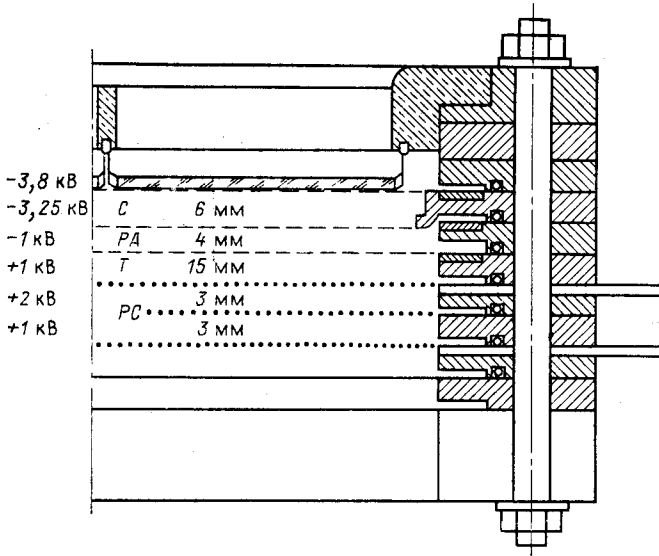


Рис. 6. Изображение конструкции камеры

возможность повреждения окон при их температурной деформации. Оно заключалось в том, что каждое окно площадью  $100 \times 100$  мм по периметру было склеено с квадратной стальной трубкой такого же сечения и толщиной стенки 100 мкм. Другая сторона трубки приклеивалась в выемке в поддерживающей рамке (рис. 6). На этом же



рисунке показаны межэлектродные расстояния в камере и типичные распределения потенциалов на электродах. В промежутке  $C$  происходит конверсия электронов, которые предварительно усиливаются до  $10^3$  в  $PA$ -промежутке. Затем лавина электронов транспортируется через промежуток  $T$  в зону пропорциональной камеры  $PC$ , где коэффициент газового усиления составляет до  $10^4$ . С учетом потерь электронов в промежутке передачи общий коэффициент газового усиления может достигать  $10^7$ . Электроды промежутков: конверсионного, предварительного усиления и передачи изготовлены в виде сетки из нержавеющей проволоки (диаметр проволоки 50 мкм, шаг — 500 мкм). Первая сетка максимально приближена к окну  $CaF_2$ . Катодные электроды пропорциональной камеры изготовлены из медно-бериллиевой проволоки диаметром 50 мкм с шагом 1 мм, анодные — из золоченой вольфрамовой проволоки диаметром 20 мкм. В качестве газового заполнения использовалась смесь 97 % He и 3 % ТЕА, а также смесь 87 % He, 10 %  $CH_4$  и 3 % ТЕА. Информация о месте попадания фотона в камеру считывалась в трех проекциях —  $X$ ,  $Y$ ,  $U$  при помощи аналого-цифровых преобразователей, подсоединенных к каждому сигнальному электроду, причем для катодных электродов использовался метод измерения координат по центру тяжести наведенного заряда. В дальнейшем катодные электроды были объединены в группы по три, так как при этом обеспечивалась требуемая точность. В проекциях  $X$  и  $Y$  пространственная точность ( $\sigma_{x,y}$ ) определения координат фотонов составляла 0,4 мм, в проекции  $U$  точность определялась шагом анодных проволок (1 мм). Амплитудная информация с электродов использовалась для «сшивки» координат данного фотона в трех проекциях.

Перечислим преимущества и недостатки рассмотренных фотодетекторов. Среди преимуществ многоступенчатых камер главными являются высокое газовое усиление, подавленная обратная связь и высокое быстродействие, которое определяется разбросом времени конверсии фотонов и при использовании ТЕА составляет 50 нс. Недостатками фотодетектора является невозможность реконструкции более чем одного кольца во всей рабочей области, причем число точек на кольце не должно превышать пяти [14]. Это обусловлено системой считывания информации, и, как надеются авторы, применение мелкоструктурных катодных электродов позволит устранить этот недостаток. Помимо этого «добротность» МСПК-фотодетектора в 2—3 раза ниже, чем фотодетекторов на основе двухкоординатных дрейфовых камер (ДДК), кроме того, механически МСПК-фотодетекторы гораздо труднее, чем ДДК, использовать в сложной конфигурации — кольцевой, сферической и т. д., необходимой в установках на встречных пучках. Несомненными преимуществами ДДК-фотодетекторов является возможность регистрации событий с большой множественностью колец, сравнительная экономичность электроники, более слабые требования к оптике (при использовании ТМАЕ). Недостатками ДДК-фотодетекторов являются относительно невы-

сокое быстродействие, потери фотоэлектронов в случае больших дрейфовых промежутков, высокая чувствительность к заряженным частицам. Общим важным преимуществом фотодетекторов является возможность перекрытия больших площадей с высоким пространственным разрешением для отдельных фотонов, а недостатками — отмеченные трудности регистрации фотонов из области вакуумного ультрафиолета.

Действующие и создаваемые спектрометры колец с фотодетекторами на основе камер. Далее будут рассмотрены спектрометры, уже использующиеся в экспериментах, а также близкие к завершению.

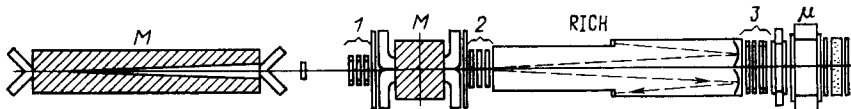


Рис. 7. Схема установки эксперимента E 605 в лаборатории им. Ферми:  
M — магниты; 1—3 — трековые детекторы

Исторически первый спектрометр с МСПК-фотодетектором был создан группой Шарпака и использовался в эксперименте E 605 в лаборатории им. Э. Ферми [16, 18]. Установка (рис. 7) предназначена для исследования жестких процессов образования частиц с большими поперечными импульсами. Одним из основных детекторов в установке является RICH (Ring Imaging Cherenkov Counter), используемый для идентификации  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и протонов в диапазоне импульсов до 300 ГэВ/с. Для этого требуется разрешение по скорости не хуже  $10^{-6}$ . Оно было достигнуто за счет использования в качестве газового радиатора Не при атмосферном давлении и увеличении длины радиатора до 15 м. Радиатор был заключен в два состыкованных объема с размерами  $2 \times 2 \times 7$  и  $3 \times 3 \times 8$  м общей длиной 15 м. В конце объема расположено сферическое зеркало площадью  $2,5 \times 2,5$  м, состоящее из 16 секций, причем каждая из половин зеркала площадью  $1,25 \times 2,5$  м фокусировала излучение Вавилова — Черенкова в двух симметричных относительно оси спектрометра направлениях. Фокусное расстояние сферического зеркала составляло 8 м. Коэффициент отражения зеркала в области фотоионизации ТЕА 75 %. В фокальной плоскости каждой из половин располагались два фотодетектора на основе МСПК-камер площадью  $800 \times 400$  мм каждый. Зависимости числа фотоэлектронов и радиусов колец от импульса в данном спектрометре показаны на рис. 8. На рис. 9 показано измеренное распределение по радиусу колец для  $\pi$ - и  $K$ -мезонов с импульсом 200 ГэВ/с. Полная ширина на половине высоты распределения для  $\pi$ -мезонов составляет 0,9 мм;  $N_0 = 24$ , примерно вдвое ниже, чем при испытаниях макета, из-за примесей кислорода в радиаторе, а также необходимости добавки метана в газовую смесь фотодетектора для обрезания области спектра с большой дисперсией

показателя преломления. Угол излучения для частиц с  $\beta = 1$  составлял 8,7 мрад, каждая из половин спектрометра перекрывала угловой диапазон  $50 \times 100$  мрад. Набор статистики производился в условиях регистрации не более трех точек на кольцо для частиц с  $\beta = 1$ . Эффективность регистрации составляла 95 %. Идентификация  $\pi$ - и  $K$ -мезонов в области максимальных импульсов осуществлялась с 90 %-ным уровнем достоверности. Для идентификации использовалась информация о количестве частиц (не более одной на каждый

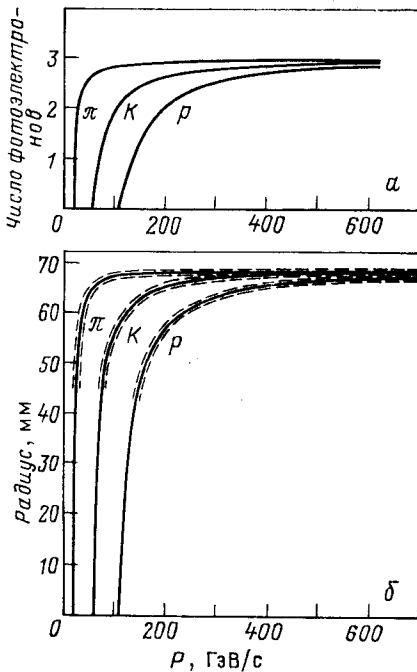


Рис. 8. Зависимости числа фотоэлектронов (а) и радиусов колец (б) от импульса для  $\pi$ -мезонов,  $K$ -мезонов и протонов

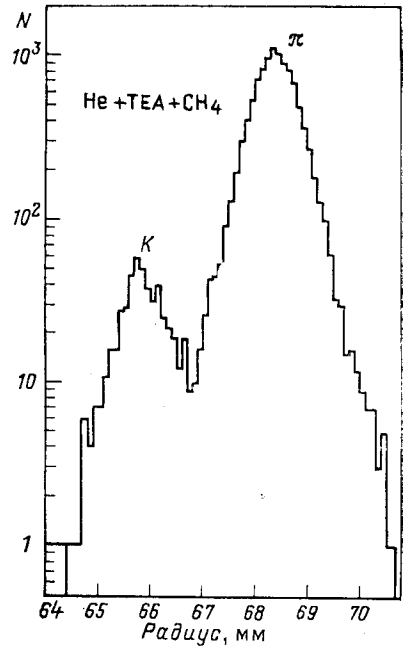


Рис. 9. Распределения по радиусу колец для  $\pi$ - и  $K$ -мезонов с импульсом 200 ГэВ/с

фотодетектор), параметрах траектории и импульсе, получаемая от трековых детекторов и в результате магнитного анализа. Детектор был снабжен системой контроля пропускания газовой смеси и радиатора и эксплуатировался при давлении, незначительно превышающем атмосферное. Рассмотренный спектрометр является первым и пока единственным, в котором использовался МСПК-фотодетектор. Авторы полагают, что его характеристики могут быть улучшены [19—21]. Конструктивные особенности спектрометра типичны для экспериментов с фиксированной мишенью при высоких энергиях.

В настоящее время единственный рабочий спектрометр с ДДК-фотодетектором используется в эксперименте WA-69 в ЦЕРН [15].

Особенностью этого громадного детектора (рис. 10) является возможность одновременной идентификации частиц в широком импульсном диапазоне ( $\pi$ -,  $K$ -мезонов с импульсами от 10 до 160 ГэВ/с) при большой рабочей угловой и радиальной апертуре (углы относительно оси спектрометра до  $30^\circ$ , поперечные размеры  $4 \times 2,5$  м), причем частицы в процессе фоторождения образуются в конечном состоянии с большой множественностью. В спектрометре в качестве радиатора используется азот при атмосферном давлении (показатель преломления в диапазоне чувствительности ТМАЕ —  $1,00031$ — $1,00035$ ); длина газового радиатора по пучку 5 м. Сферическое зеркало общей площадью  $7 \times 4$  м собрано из 80 гексагональ-

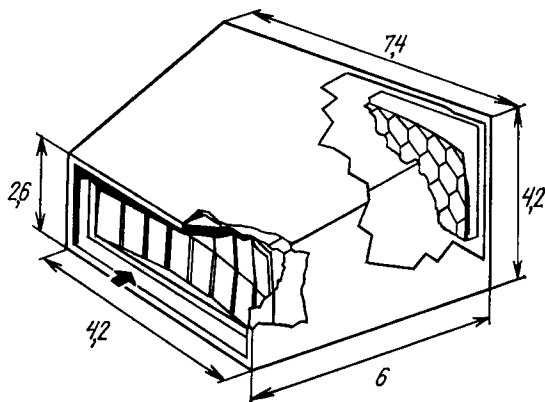


Рис. 10. RICH на омега-спектрометре (размеры даны в метрах)

ных модулей. Фокусное расстояние зеркала 5 м, коэффициент отражения в области фоточувствительности ТМАЕ составляет 85 %. В фокальной плоскости размещено 16 плотно состыкованных ДДК-фотодетекторов  $80 \times 40$  см каждый, образуя общую чувствительную площадь  $320 \times 160$  см. Каждый ДДК-фотодетектор разделен зоной пропорциональной камеры на две половины размером  $80 \times 20$  см (20 см в направлении дрейфа). Шаг проволок в пропорциональной камере составляет 4 мм. Каждая из проволок отделена от соседних шторками. ДДК-фотодетекторы снабжены 32 кварцевыми окнами размером  $80 \times 20 \times 0,3$  см каждое. В качестве газового заполнения используется смесь: 80 % метана, 20 % изобутана и насыщенные пары ТМАЕ. Для обеспечения эффективной конверсии фотонов глубина ДДК-фотодетектора составляет 50 мм. На рис. 11 показаны радиусы колец для  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и протонов в зависимости от импульса. Размытие колец для отдельного фотоэлектрона в единицах  $\sigma$  обусловлено дисперсией показателя преломления газового радиатора — 1,8 мм, вклад оптических aberrаций составляет 1 мм, вклад пространственного разрешения фотодетектора около 1 мм. Суммарное пространственное разрешение для отдельного фотона составляет

3 мм. В расчетах спектрометра закладывалось  $N_0 = 90$ , экспериментально получено  $N_0 = 40$ . При этом среднее регистрируемое количество точек на кольцо излучения для частиц с  $\beta = 1$  составляет 16, что дает точность определения радиусов колец 0,7 мм. На рис. 12 показано распределение по радиусу колец для  $\pi$ -мезонов и протонов с импульсом 100 ГэВ/с. На рис. 13 представлено событие в спектрометре, соответствующее исходному фотону с энергией 170 ГэВ (средняя множественность частиц в событии составляет 7).

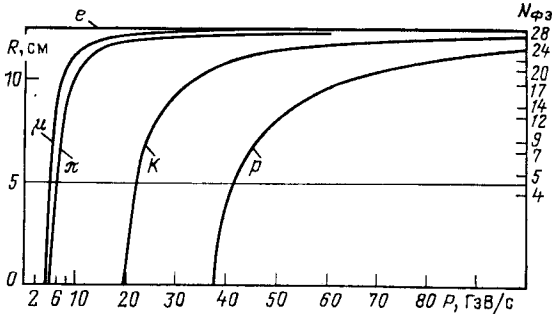


Рис. 11. Зависимости числа фотоэлектронов и радиусов колец для  $\mu$ -,  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и протонов от импульса

В фотодетекторе используется 3200 сигнальных проволок. Каждый канал регистрации содержит низкошумящий усилитель с коэффициентом усиления 200, усилитель-дискриминатор и время-цифровой преобразователь. В каждом канале время-цифрового преобра-

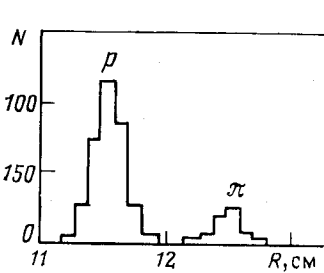


Рис. 12.

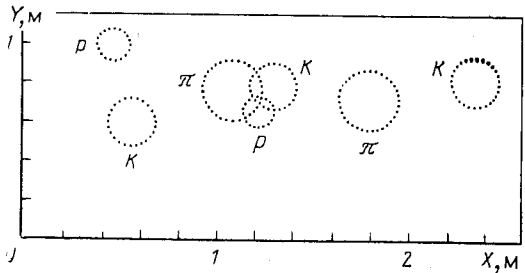


Рис. 13.

Рис. 12. Распределение по радиусу колец  $\pi$ -мезонов и протонов с импульсом 100 ГэВ/с

Рис. 13. Типичное событие в RICH

зователя используются сдвиговые регистры с временем стробирования, соответствующим 4 мм в пространстве камеры, подключенные к циклической памяти  $192 \times 64$  бит (192 — для номеров проволок модуля ДДК, 64 — для измерения времени дрейфа по каждому каналу). Через 500 нс после выработки триггера на взаимодейст-

вие с большой множественностью регистры останавливаются, и за 2,5 мкс информация из циклической памяти считывается. Затем она дешифруется и заносится в 18-битную память (12 бит для номеров проволок для всего фотодетектора и 6 бит для временной информации). Предполагается далее применение многоуровневого процессора, в который поступает информация с трековых детекторов о количестве частиц и их траекториях. Эта информация в матрицах памяти позволяет определить импульсы частиц и центры колец для них. Следующая матрица с заложенной массовой гипотезой предсказывает радиусы колец и количество ожидаемых точек на каждом из них. Далее информация сравнивается с полученной от спектрометра и принимается решение о выработке триггера на считывание полного объема информации со всех остальных детекторов. Время выработки триггера, по расчетам, должно составить 52 мкс.

Методика ДДК-фотодетекторов оказалась весьма перспективной в условиях не очень высокой загрузки установок (на омега-спектрометре поток фотонов в эксперименте не превышает  $10^4 \text{ с}^{-1}$ ), обеспечивая уникальные условия для перекрытия громадных площадей в сложной конфигурации фотодетекторов. В связи с этим она находит широкое применение в установках на встречных  $e^+e^-$ -пучках. Имеется еще одно условие ее адекватной применимости в данном случае в отличие от адронных коллайдеров. Дело в том, что ограниченные размеры установок не позволяют использовать длинные газовые радиаторы (длиной более метра) для идентификации вторичных частиц ( $\pi$ ,  $K$ ,  $p$ ) с импульсами в несколько десятков ГэВ/с, в то время как на создаваемых  $e^+e^-$ -коллайдерах вторичные адроны имеют средний импульс не более 20 ГэВ/с. Этот диапазон хорошо перекрывается при использовании в спектрометрах тонких жидкостных \* радиаторов (около 1 см), а также газовых — длиной не более 1 м. Обладая высоким угловым разрешением (практически в 4 $\pi$ -геометрии), возможностью регистрации событий с большой множественностью в широком импульсном диапазоне, спектрометры колец с ДДК-фотодетекторами заняли особое место в создаваемых установках на ЛЕП [3] и СЛАК [17].

На рис. 14 представлена часть симметричной относительно места встречи  $e^+e^-$ -пучков установки ДЕЛФИ на ЛЕП [3]. Внутри сверхпроводящего соленоида с полем, направленным вдоль пучков, за центральной трековой системой расположены цилиндрический и торцевые спектрометры колец (RICH). Область, занимаемая детекторами в радиальном направлении, лежит в пределах от 1,23 до 1,97 м и в направлении пучков составляет 5,4 м. Цилиндрический RICH содержит в одном объеме жидкостный и газовый радиаторы, в торцевых RICH они объемно отделены друг от друга. Жидкими

\* В этом случае сферическое зеркало не используется, конус излучения Вавилова — Черенкова, выйдя из тонкого радиатора, попадает непосредственно на фотодетектор [25].

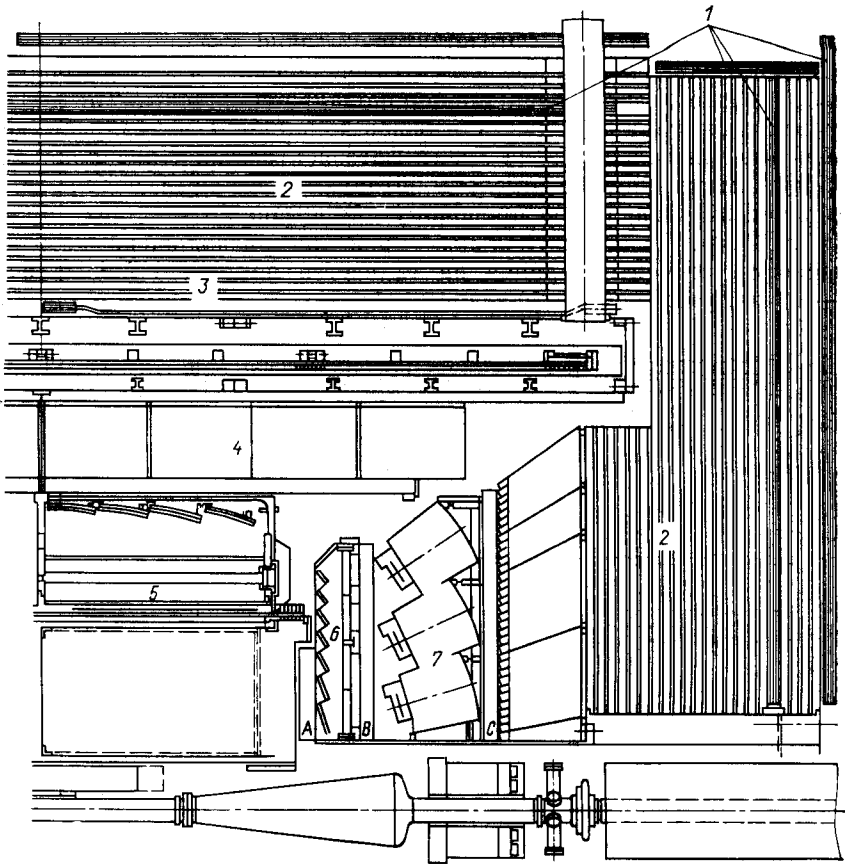


Рис. 14. Часть установки ДЕЛФИ:

1 — мюонные камеры; 2 — адронные калориметры; 3 — сцинтилляционные годоскопы; 4 — цилиндрический электромагнитный калориметр; 5 — цилиндрический RICH; 6 — жидкостной RICH; 7 — газовый RICH

радиаторами перекрываются полярные углы от  $15^\circ$  до  $41^\circ$  и от  $41^\circ$  до  $90^\circ$ , а газовыми — от  $12^\circ$  до  $38,5^\circ$  и от  $50^\circ$  до  $90^\circ$  в цилиндрической и торцевых частях детектора соответственно. Таким образом, жидкостные RICH перекрывают  $96,6\%$ , а газовые —  $83,9\%$  в 4 $\pi$ -геометрии. Секция цилиндрического RICH в плане и в поперечном направлении показана на рис. 15 и 16. В азимутальном направлении RICH разбит на 36 одинаковых секций относительно места встречи  $e^+e^-$ -пучков (всего 72 секции). Каждая секция содержит ДДК-фотодетектор, на который работает и газовый и жидкостный радиаторы. В объеме газового радиатора размещены четыре сферических зеркала (в каждой из секций), сфокусированных на фотодетектор. Поперечные

размеры фотодетектора и жидкого радиатора в каждой секции  $1,45 \times 0,25$  м, глубина фотодетектора плавно увеличивается от 45 до 60 мм в направлении дрейфа фотоэлектронов, где в конце области дрейфа располагается зона пропорциональной камеры. Такая конструкция выбрана с целью уменьшения влияния радиальной компоненты поля соленоида на дрейф фотоэлектронов. Проволоки пропорциональной камеры отделены шторками. Каждый модуль ДДК содержит 91 сигнальную проволоку диаметром 20 мкм, шаг проволок 2,54 мм. Около сигнальных проволок расположена катодная плоскость, сегментированная на 12 частей по глубине ДДК и на 3 — в азимутальном направлении, образуя 36 катодных площадок.

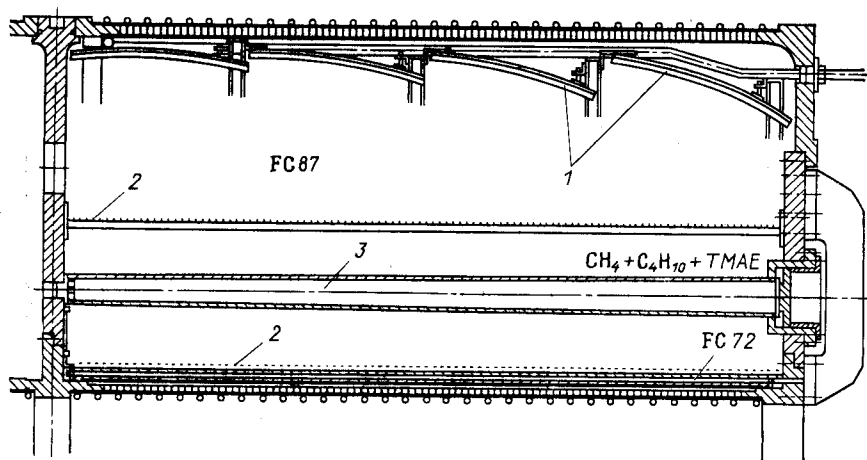


Рис. 15. Секция цилиндрического RICH в плане:  
1 — зеркала; 2 — полевые проволоки; 3 — фотодетектор

Координата конверсии фотона по глубине фотодетектора измеряется для повышения точности определения радиусов колец. Используются кварцевые окна толщиной 5 мм, газовая смесь — метан 80 %, изобутан 20 %, насыщенные пары TMAE при 40 °C. В качестве газового радиатора используется FC 87 ( $T = 40$  °C), а жидкостного — FC 72. Показатели преломления 1,0018 и 1,26 соответственно. Всего цилиндрический RICH содержит 72 фотодетектора, 288 зеркал, 6552 сигнальные проволоки и 2592 катодные площадки.

Газовые торцевые RICH содержат 88 разделенных объемов, каждый со своим зеркалом и фотодетектором. Фокусное расстояние зеркал 48 см. Радиатор — FC 87. Жидкостные торцевые RICH объемно отделены от газовых и работают со своими фотодетекторами. В газовых RICH используется 3300 каналов считывания для сигнальных электродов и 550 — для катодных. Разрабатываемая в стандарте ФАСТБАС считывающая электроника по параметрам близка к ис-



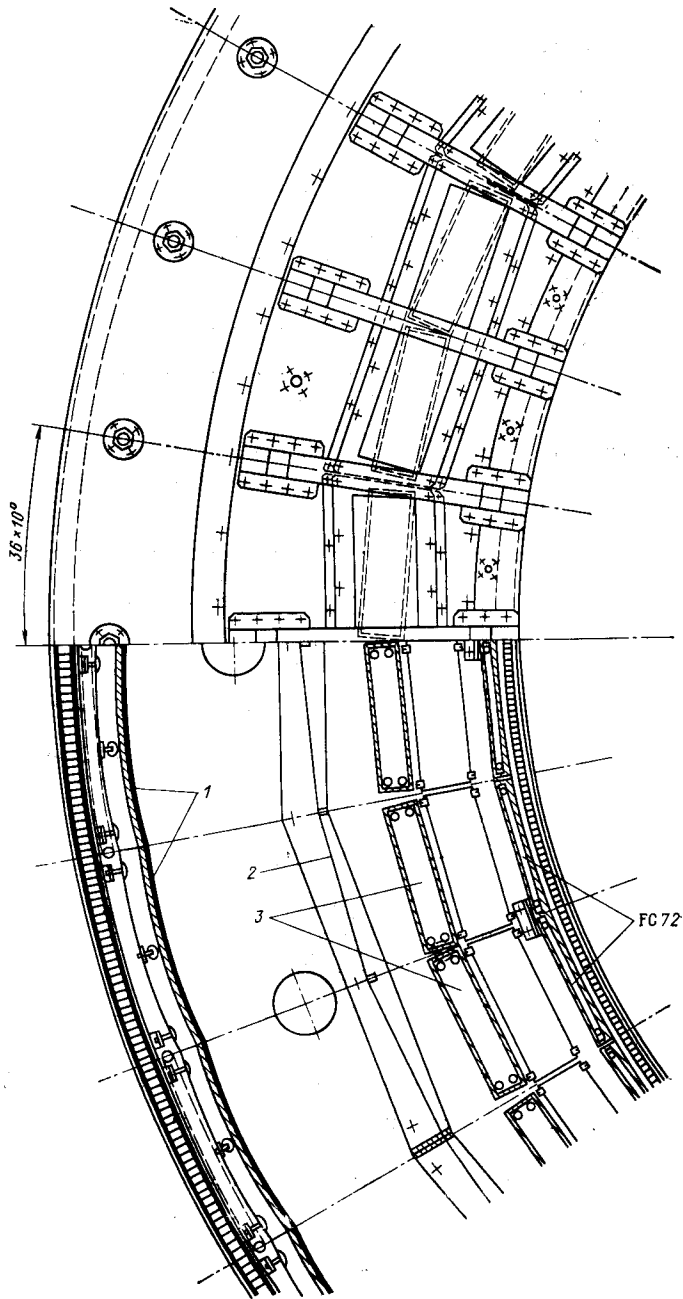


Рис. 16. Секция RICH в поперечном направлении:  
 1 — зеркала; 2 — полевые волокна; 3 — фотодетектор

пользуемой на омега-спектрометре [22]. Ниже приведены расчетные параметры RICH.

Жидкостный радиатор:	FC 72
показатель преломления . . . . .	1,26
Газовый радиатор:	FC 87, $T = 40^\circ \text{C}$
показатель преломления . . . . .	1,0018
Длина газового радиатора, см . . . . .	До 60
Толщина жидкостного радиатора, мм:	
цилиндрического RICH . . . . .	10
торцевого RICH . . . . .	15
Разрешение по скорости:	
газового RICH . . . . .	$10^{-4}$
жидкостного RICH . . . . .	$10^{-3}$
Количество фотоэлектронов:	
газовых RICH . . . . .	До 13
жидкостных RICH . . . . .	До 20

С использованием информации об импульсах и траекториях вторичных частиц RICH должны обеспечивать идентификацию  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и протонов в диапазоне импульсов 2—20 ГэВ/с. Для иллю-

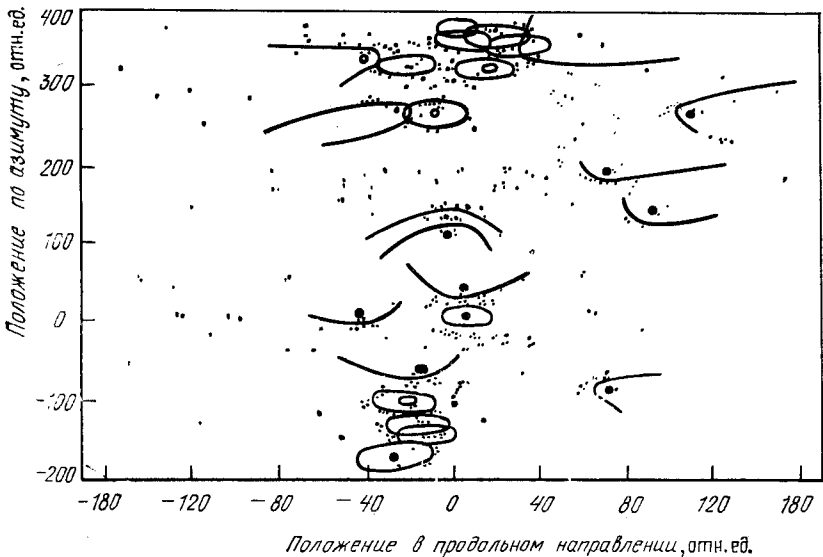


Рис. 17. Типичное ожидаемое двухструйное событие

страции на рис. 17 показан типичный ожидаемый пример события с двумя адронными струями.

В настоящее время для установки СЛД на СЛС [23] создается аналогичный RICH, поэтому приведем лишь отдельные его особенности. В цилиндрической части (рис. 18) используются ДДК-фотодетекторы по 4 в длину с дрейфовым промежутком 80 и шириной

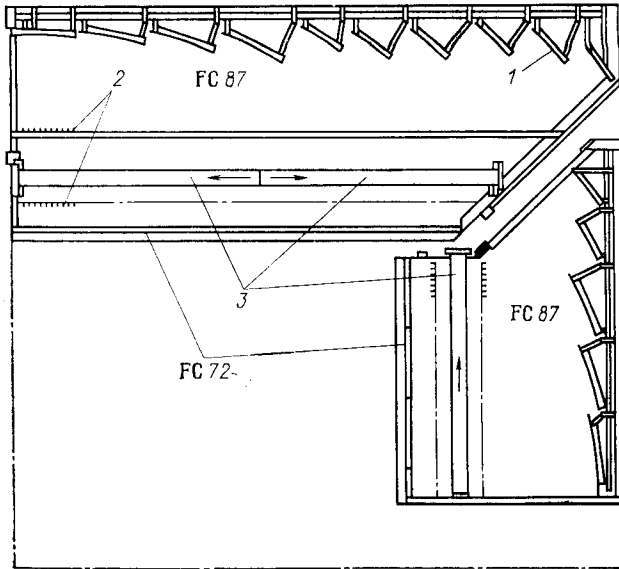


Рис. 18. RICH установки СЛД на СЛЦ:  
1 — зеркало; 2 — жидкие проволочки; 3 — фотодетектор

20 см. Особенностью торцевых RICH является совмещение в одном объеме жидкостного и газового радиаторов, работающих на общий фотодетектор (рис. 19, 20). Конструктивной особенностью фотодетекторов является конфигурация шторок у анодных проволочек и введение

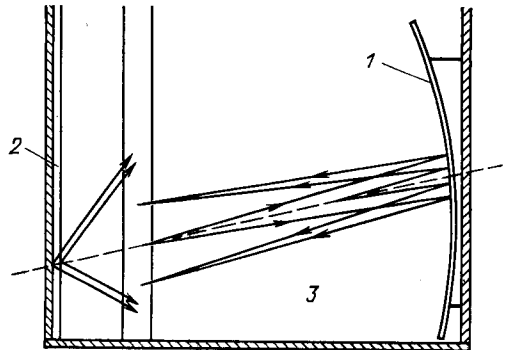


Рис. 19. Изображение части секции торцевого RICH:

1 — зеркало; 2 — жидкий радиатор; 3 — газовый радиатор. Пунктиром показано направление движения частицы, стрелками — направление излучения

дополнительного дрейфового зазора для подавления обратной связи (рис. 21). К настоящему времени на макете выполнены полномасштабные испытания фотодетектора [24]. Получено  $N_0 = 94$  и пространственное разрешение по дрейфовой координате 1,5 мм для дрейфового

промежутка 80 см. Авторы отмечают возникшую проблему значительных потерь фотоэлектронов, обусловленных дрейфовым промежутком.

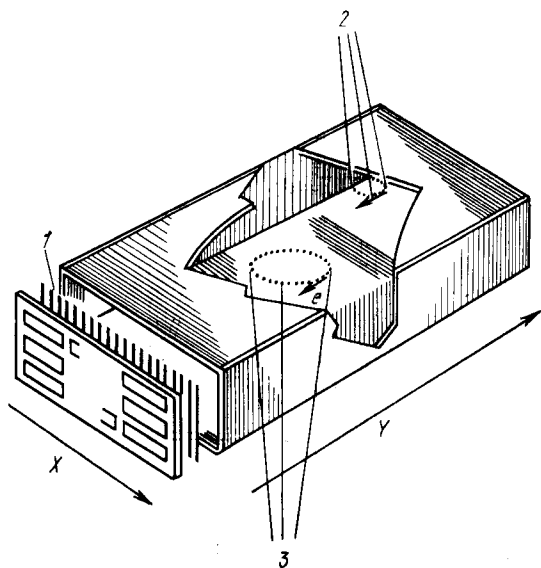


Рис. 20. Схематическое изображение фотодетектора:

1 — анодная плоскость; 2 — фотоны из газового радиатора; 3 — фотоны из жидкостного радиатора

Потери в 2,71 раза происходят на длине 30 см, и в данный момент это основная задача, требующая решения.

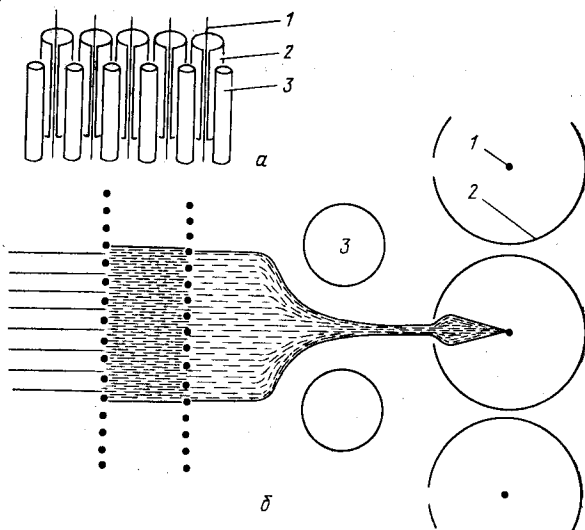


Рис. 21. Анодная часть фотодетектора (а) и структура поля в прианодной области (б):

1 — анод; 2 — катод; 3 — фокусирующий электрод

Таким образом, можно считать, что ДДК-фотодетекторы достигают своей зрелости, и их возможности будут продемонстрированы после запуска ЛЕП и СЛС.

## 2. СПЕКТРОМЕТРЫ С ВАКУУМНЫМИ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Первые фотографии колец излучения Вавилова — Черенкова были сделаны В. П. Зреловым на пучке протонов с энергией 660 МэВ и демонстрировались в Нобелевской лекции П. А. Черенкова [25]. В дальнейшем кольца были зарегистрированы при помощи электронно-оптических преобразователей, разработанных в нашей стране М. М. Бутсловым [26]. Методика регистрации колец с помощью вакуумных фотоприемников являлась, по сути, дальнейшим развитием методики газовых дифференциальных черенковских счетчиков (ДЧС) [27, 28]. Важным шагом, который был сделан на пути ее реализации, явилась замена узкой кольцевой диафрагмы в ДЧС на позиционно-чувствительный фотоприемник, расположенный в фокальной плоскости сферического зеркала. В историческом плане непосредственными предшественниками спектрометров колец в современном понимании можно, по-видимому, считать ДЧС, в которых фотоумножители просматривали несколько концентрических зон в фокальной плоскости [29].

Вакуумные фотоприемники обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с рассмотренными фотодетекторами на основе камер. К ним относятся регистрация излучения Вавилова — Черенкова в видимой области и соответствующая этой области высокая квантовая эффективность фотокатодов (до 40 %; отметим, что  $N_0 = 100$ , давно достигнутое значение для черенковских счетчиков с фотоумножителями), а также более высокое быстродействие и возможность использования в связи с этим в триггере первого уровня. Регистрация излучения в видимой области уменьшает технические трудности в случае использования газовых радиаторов под давлением, при этом снижаются требования к оптическим элементам и контролю за стабильностью их параметров, отсутствует необходимость использования систем очистки газовых смесей, «деликатных» в обращении fotocувствительных добавок и т. д.

Отсутствие вакуумного позиционно-чувствительного фотоприемника, сравнимого по размерам и координатному разрешению с фотодетекторами на основе камер, является основным препятствием на пути реализации рассматриваемой методики. Напомним, что фотоприемник площадью  $1 \text{ м}^2$ , сравнимый по разрешению с камерами, должен иметь около  $10^6$  дискретно разрешаемых позиций. Очевидно, что создание такого фотодетектора — сложная техническая задача. Тем не менее в ряде случаев спектрометры с вакуумными фотоприемниками оказались реализуемыми, а фотодетекторы — удовлетворяющими предъявленным требованиям.

В ряде задач возникла необходимость идентификации частиц в интенсивных пучках в относительно небольшом угловом диапазоне. Например, в [30] для подобной задачи рассмотрен спектрометр с фокусировкой колец в точку для частиц с  $\beta = 1$  и с уменьшенным

изображением колец для частиц с  $\beta < 1$ . В оптической схеме (рис. 22) в наборе линз использовался аксикон для компенсации хроматической дисперсии. В качестве фотоприемника использовалась матрица  $11 \times 11$  ФЭУ Р760 фирмы Хамамацу, диаметр ФЭУ 14 мм. Получено разрешение по скорости  $1,4 \cdot 10^{-5}$  (вклад оптических aberrаций  $1,1 \cdot 10^{-5}$ , пространственного разрешения фотодетектора  $0,5 \cdot 10^{-5}$ ) в угловом диапазоне  $\pm 3$  мрад при углах излучения до

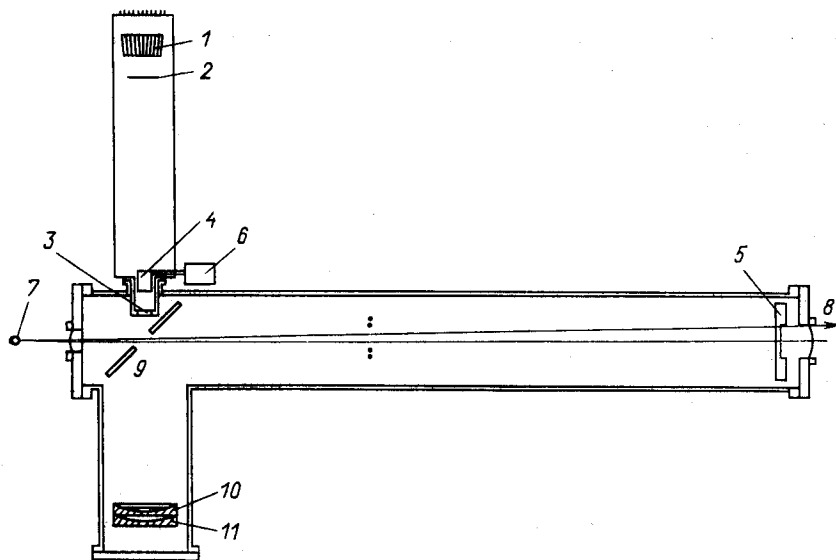


Рис. 22. Схематическое изображение детектора колец:

1 — матрица ФЭУ; 2 — полевые линзы; 3 — оптическое окно и полевая линза; 4 — линза; 5 — сферическое зеркало; 6 — телемонитор; 7 — мишень; 8 — частица; 9 — плоское зеркало; 10 — аксикон; 11 — сферическое зеркало

35 мрад (в качестве радиатора использовалась смесь газов). Детектор обеспечивал разделение  $\pi$ - и  $K$ -мезонов до 30 ГэВ/с. Позднее Менье [31] предложил оптическую схему, позволяющую расширить угловой диапазон регистрируемых частиц (рис. 23). Следует подчеркнуть, что данная оптическая схема подходит для мишеней малого размера (около 3 мм) и при отсутствии магнитных элементов между мишенью и детектором. В оптической схеме используется сферическое зеркало с фокусным расстоянием  $F$ , изображение мишени в зеркале находится за фокальной плоскостью в точке  $T_1$ . В этой точке располагается первая полевая линза  $L_1$ . Место ее расположения выбрано с учетом того, что для всех частиц, вылетающих из мишени под различными углами, лучи света падают на линзу симметрично и ее размер определяет, в частности, диапазон регистрируемых углов излучения. Чтобы убрать линзу из пучка, используется плоское зеркало. В принципе постановка линзы  $L_1$  обеспечивает условия

фокусировки колец с уменьшением их размеров, но наличие в оптической схеме линзы  $L_2$  позволяет варьировать фокусное расстояние в широких пределах. Использование дублета линз с вариацией расстояния между ними упрощает условия фокусировки при использовании различных газовых радиаторов и позволяет компенсировать

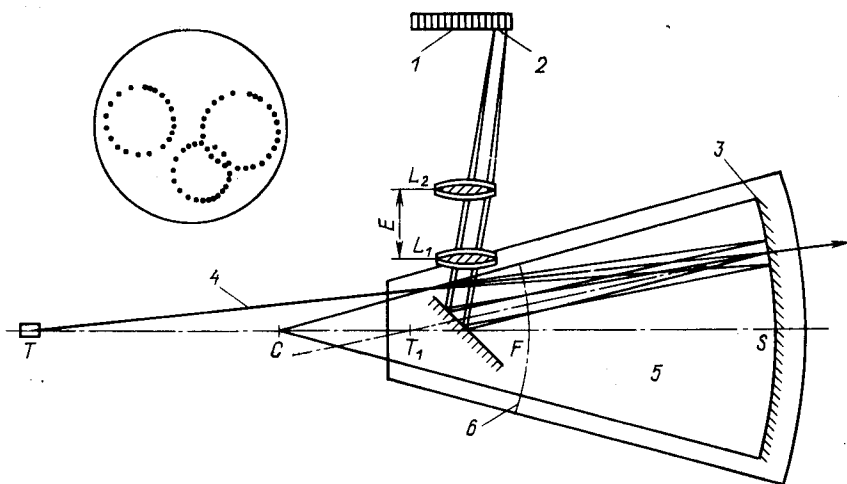


Рис. 23. Оптическая схема широкоапертурного детектора:

1 — матрица ФЭУ; 2 — область фокусировки колец; 3 — сферическое зеркало; 4 — частица;  
5 — радиатор; 6 — фокальная плоскость

дисперсию показателя преломления. Таким образом, метод уменьшения изображения колец позволяет расширить в ряде случаев угловой диапазон регистрируемых частиц, обеспечивая приемлемый уровень необходимого количества дискретных вакуумных фотоприемников.

Другое направление в создании фотодетекторов связано с надеждами использования электронно-оптических преобразователей (ЭОП) в оптических схемах с уменьшением изображения колец. По количеству дискретно разрешаемых позиций ЭОП с площадью рабочей области в несколько десятков квадратных сантиметров и разрешением около 30 пар линий на 1 мм не уступают рассмотренным фотодетекторам на основе камер. Попытки преодолеть их основной недостаток — невысокое быстродействие — заключаются в поиске быстрых фосфоров и реализации режима управления. Одно из ранних экспериментальных достижений в методике регистрации колец с применением четырехкаскадного ЭОП относится к работе Гизе [32]. В этой работе описана 10-метровая черенковская камера, наполненная не при атмосферном давлении, в которой используется сферическое зеркало с фокусным расстоянием 10 м. Для выборки событий с числом точек на кольце более пяти получено разрешение по скорости  $6 \cdot 10^{-7}$ .

Реализацией комбинированного фотодетектора с применением ЭОП занималась группа из Фермиевской лаборатории (эксперимент E 609) [33]. Фотодетектор показан на рис. 24. В фотодетекторе используется ЭОП размером  $50 \times 50$  мм с пространственным разрешением 50 мкм. В спектрометре используется оптическая схема с уменьшением изображения, содержащая два сферических зеркала (рис. 25).

Фотодетектор (рис. 24) содержит два каскада усиления света, причем последний каскад подключен к прибору с зарядовой связью (ПЗС) 1. Два каскада усиления используются для превышения сигнала над уровнем шумов ПЗС. Фотодетектор содержит входное кварцевое окно 5, оптоволоконную шайбу 4, фотокатод 6 и промежуток усиления на микроканальной пластине (МКП) 3. Затем используется быстрый фосфор 7 с временем высвечивания 160 нс, оптоволоконная шайба 10 для уменьшения изображения, ЭОП с фото-

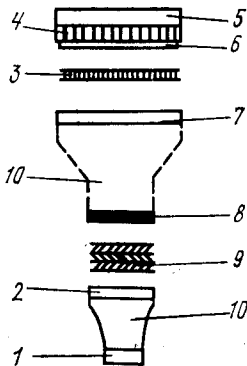


Рис. 24. Схематическое изображение фотодетектора

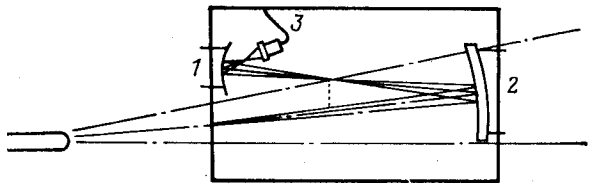


Рис. 25. Оптическая схема детектора: 1, 2 — сферические зеркала; 3 — фотодетектор

катодом 8, тремя каскадами усиления на МКП 9 и фосфором 2 с временем высвечивания 2 мкс. Далее используется еще одна оптоволоконная шайба 10, выводящая свет на ПЗС 1 размером  $12 \times 12$  мм с числом элементов  $390 \times 244$ . Авторы отмечают, что основная трудность при работе с фотодетектором заключалась в нестабильности МКП, поэтому, в частности, пришлось использовать несколько каскадов усиления. Был создан и испытан макет спектрометра: фотодетектор стабильно отработал 1000 ч. Получено значение  $N_0 = 28$ . В рабочем спектрометре предполагается разделение л- и К-мезонов с импульсами до 60 ГэВ/с. Среди других предложений с применением МСПК и ЭОП в спектрометре можно указать работу Гильморэ [34]. Предполагается использование ЭОП с управлением по триггеру.

С целью уменьшения количества фотоприемников в спектрометре колец в ИФВЭ была предложена оптическая схема, в которой одномерные позиционно-чувствительные фотоприемники располагаются



по радиусам секторов в фокальной плоскости сферического зеркала [35]. В качестве фотоприемников использовались как предложенные и разработанные в ИФВЭ годоскопические фотоумножители (ГФЭУ) [36, 37], так и линейки с дискретными ФЭУ 85 [38]. В данной оптической схеме одна координата фотона определяется по номеру сектора, в котором расположен соответствующий одномерный позиционно-чувствительный фотоприемник, а вторая — по расстоянию от центра фокальной плоскости до области засветки соответствующего фотоприемника. Напомним, что принцип работы ГФЭУ, используемых в данной оптической схеме, заключается в изменении задержки выходного сигнала в зависимости от координат области освещения протяженного фотокатода.

Первый детектор колец на ГФЭУ был создан и использован в эксперименте по наблюдению ядер антитрития [39]. С тех пор был достигнут прогресс в параметрах ГФЭУ, что позволило создать на их

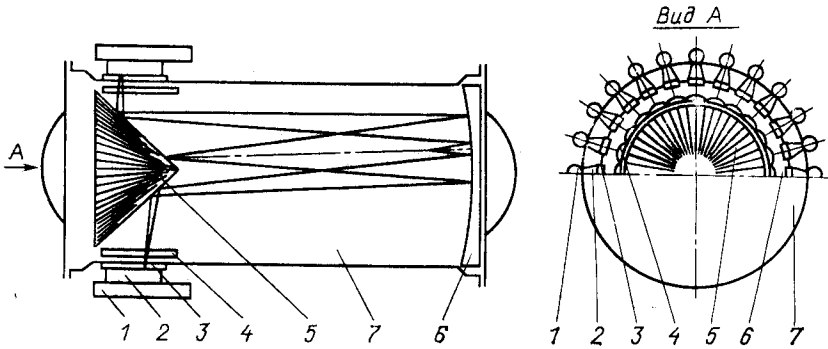


Рис. 26. Оптическая схема СКОЧ

основе широкоапертурный спектрометр колец СКОЧ [40] для установки ФОДС [41]. Спектрометр предназначен для идентификации  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и протонов в широком расходящемся пучке в диапазоне импульсов 5,5—30 ГэВ/с. Оптическая схема СКОЧ показана на рис. 26. Оптическая схема содержит газовый радиатор 7, в котором при прохождении частицы возникает черенковское излучение, сферическое зеркало 6, фокусирующее черенковское излучение в кольцо в фокальной плоскости, зеркальный конический отражатель 5, трансформирующий фокальную плоскость в цилиндрическую поверхность, фокусирующие цилиндрические линзы 4, окна 3, отделяющие объем газового радиатора от фотодетекторов и годоскопические фотоумножители 1 с зеркальными воздушными световодами 2. Таким образом, кольцо излучения разбивается в фокальной плоскости на секторы, причем изображение части кольца в каждом секторе при помощи цилиндрических линз трансформируется в узкую область в поперечном относительно изменения задержки ГФЭУ направле-

нии на фотокатоде. На рис. 27 показан внешний вид спектрометра. Корпус СКОЧ, рассчитанный на давление до 10 атм, изготовлен из стальной трубы диаметром 1,2 м, к которой подсоединены фланцы, толщиной 2 мм в месте прохождения пучка частиц. В качестве радиатора используется фреон-13 при рабочем давлении 5 атм. Активная длина газового радиатора равна 1,8 м. Диаметр сферического зеркала 1,1 м, фокусное расстояние 2,5 м. Диаметр основания зеркального конического отражателя 70 см, высота 35 см. Расстояние от сферического зеркала до вершины конического отражателя 1,8 м.

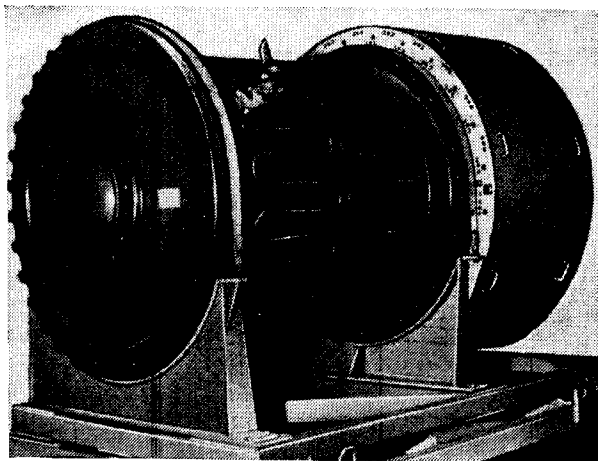


Рис. 27. Внешний вид СКОЧ

Расположенные вплотную друг к другу на кольцевой раме 24 цилиндрические линзы образуют цилиндрическую поверхность диаметром 80 см. Вне объема газового радиатора за выходными окнами расположены 24 годоскопических фотоумножителя с зеркальными воздушными световодами. Световоды содержат по два плоских зеркала, расположенных под углом  $30^\circ$  по отношению друг к другу; входное окно световодов имеет площадь  $200 \times 40$  мм и выходное, обращенное к фотокатоду ГФЭУ —  $200 \times 5$  мм (5 мм в направлении поперек фотокатода). Регистрирующая система выполнена на основе электронной аппаратуры для съема информации в системе СУММА [42]. Каждый из 24 каналов регистрации содержит ГФЭУ, быстродействующий усилитель (на основе  $\mu\text{A 733}$ , коэффициент усиления по напряжению 10, полоса пропускания до 100 МГц), формирователь со следящим порогом 6 УД-19 [43] (точность временной привязки  $\pm 0,1$  нс в диапазоне входных сигналов 5—500 мВ) и время-цифровой преобразователь (ВЦП). В качестве ВЦП использовались модифицированные преобразователи время — время [44]. Усилители и фор-

мирователи размещались в непосредственной близости от анодных выводов ГФЭУ, что позволило свести к минимуму влияние внешних помех. Низкий уровень шумов в канале регистрации ( $10^3$ — $10^4$  с<sup>-1</sup> в одноэлектронном режиме регистрации) был обеспечен применением ГФЭУ с бищелочными фотокатодами, оптимизацией конструкции электродов и выбором соответствующих режимов питания. Использовались ВЦП с ценой канала 1 нс, диапазон измеряемых времен дрейфа составлял 500 нс, интегральная нелинейность ВЦП не превышала 0,5 %, дифференциальная — менее 5 %. Одна из особенностей используемой модификации ВЦП заключалась в постановке быстрых коммутаторов на входах.

В каждом сеансе выполнялась калибровка СКОЧ, которая заключалась в установлении соответствия между координатами попадания фотонов на фотокатоды ГФЭУ, выраженными в величинах цифровых кодов, и углами черенковского излучения в спектрометре. При этом использовалась информация об импульсах частиц и параметрах их траекторий, получаемая от системы дрейфовых камер и в результате магнитного анализа. Для калибровки выбиралось определенное среднее значение импульса с  $\Delta p/P = 20$  %, при котором благодаря наличию в пучке нескольких сортов частиц и его угловой расходимости практически полностью перекрывался весь диапазон углов черенковского излучения, регистрируемого в СКОЧ. Ниже приведены измеренные и расчетные характеристики СКОЧ:

Давление (фреон-13), атм . . . . .	5
Длина радиатора, м . . . . .	1,8—2
Фокусное расстояние зеркала, м . . . . .	2,5
Радиальная апертура, см . . . . .	40
Угловая апертура, мрад . . . . .	30
Диапазон углов излучения, мрад . . . . .	40—100
Количество регистрируемых фотоэлектронов:	
эксперимент . . . . .	6—21
расчет . . . . .	6—20
Экспериментальная добротность $N_0$ . . . . .	20—15 (40—30) *
Разрешение по скорости:	
эксперимент . . . . .	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$
расчет . . . . .	$\pm (1,5—2) \cdot 10^{-5}$
Число каналов регистрации (ГФЭУ, усилитель, формирователь, время-цифровой преобразователь) . . . . .	24

\* После модификации отдельных элементов оптики.

На рис. 28 показаны распределения по квадрату массы  $\pi^-$ ,  $K^-$ -мезонов и протонов в диапазоне импульсов 12,9—25,9 ГэВ/с. На рис. 29 показан один из случаев  $K \rightarrow \mu\nu$ -распадов, регистрируемых в СКОЧ.

Используемая аппаратура позволяла регистрировать несколько сигналов с каждого ГФЭУ за полное время дрейфа  $T_0 = 300$  нс (на один триггерный запуск). Иллюстрацией ее применения является рис. 30, на котором показано событие, соответствующее прохождению через СКОЧ двух частиц одновременно. Такие события отбира-

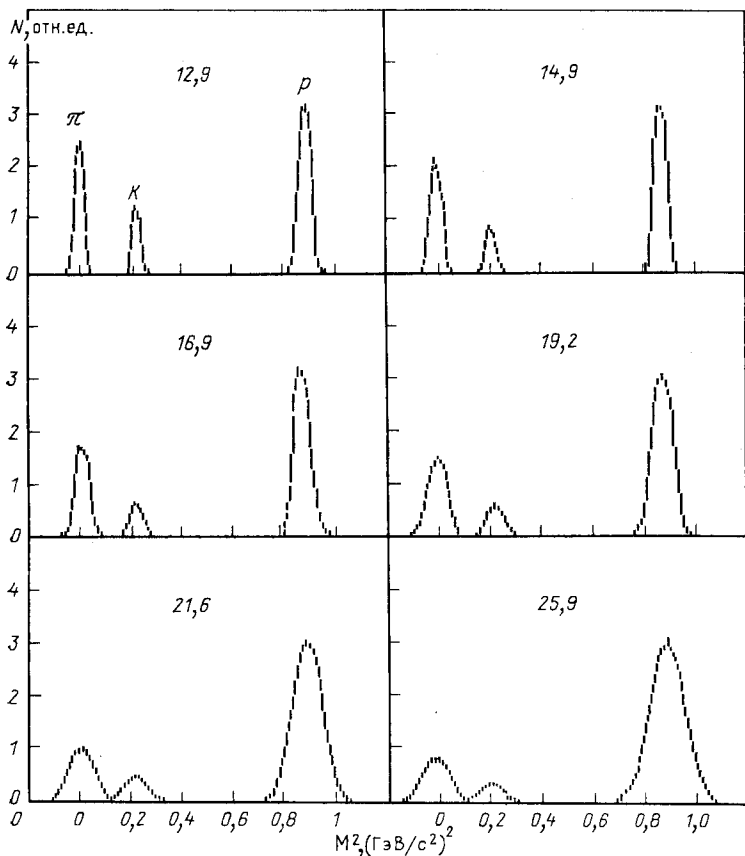


Рис. 28. Распределения по квадрату масс частиц

лись по триггеру, в котором использовалась информация от дрейфовых камер и сцинтилляционных счетчиков на входе в СКЮЧ. Использование многочастичной регистрирующей электронной аппаратуры позволяет упростить реконструкцию событий с несколькими кольцами в спектрометре и помимо этого увеличить количество регистрируемых точек.

В ИФВЭ развивается также методика регистрации колец с использованием рассмотренной оптической схемы и линеек с дискретными ФЭУ. Первый подобный спектрометр использовался в эксперименте по поиску новых стабильных частиц в области масс до  $2 \text{ ГэВ}/\text{с}^2$  [45]. Позднее для экспериментов на гиперонном пучке ускорителя ИФВЭ была создана следующая модификация спектрометра [46]. Его оптическая схема показана на рис. 31. В регистрирующей системе используется 20 одномерных фотоприемников по 16 фотоумножителей (ФЭУ 85) в каждом. Шаг дискретизации в линейке со-

ставляет 5 мм. При длине газового радиатора 1,5 м (давление  $\text{SF}_6$ , 2 атм), фокусном расстоянии сферического зеркала 4 м получено разрешение по скорости  $\Delta\beta/\beta = 1,5 \cdot 10^{-5}$  и  $N_0 = 40$ . Детектор надежно работает в непосредственной близости от мишени, на которую сбрасывается медленно выведенный протонный пучок (загрузка в месте расположения детектора до  $10^7 \text{ с}^{-1}$ ).

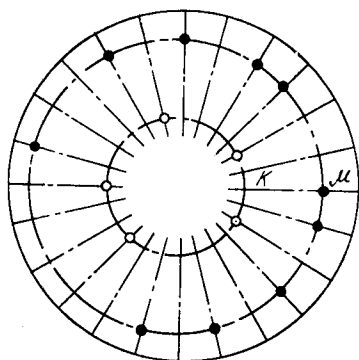


Рис. 29.

Рис. 29. Случай  $K \rightarrow \mu\text{v}$ -распада

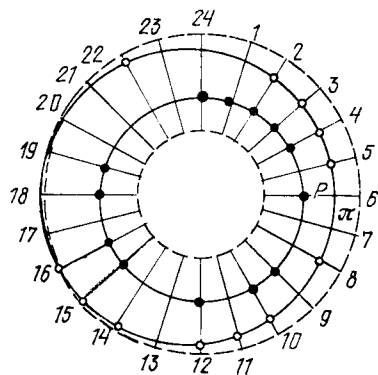


Рис. 30.

Рис. 30. Событие в СКОЧ, регистрируемое с применением многочастичной электроники. Каналы с номерами 2, 3, 4, 10, 12, 15 и 16 сработали по два раза на один триггерный запуск

Следует отметить особенности рассмотренных оптических схем в отношении углового диапазона регистрируемых частиц. Нетрудно видеть, что угловая точность, а также точность измерения радиусов колец ухудшаются, если кольцо выходит за пределы центра используемой системы координат, т. е. центра фокальной плоскости. Условие попадания центра системы в область колец означает, что углы наклона траекторий частиц к оси спектрометра не должны превышать углов излучения. Это накладывает ограничения на угловую расходимость пучков частиц, которая, в частности, для СКОЧ не превышает  $\pm 30$  мрад. Возможности расширения углового диапазона спектрометров с применением ГФЭУ рассмотрены в [47]. Они могут быть реализованы при использовании модификаций ГФЭУ, у которых увеличена длина фотокатода и улучшено пространственное разрешение [48], т. е. увеличено количество дискретно разрешаемых позиций.

Для регистрации частиц в большом угловом диапазоне может быть применен подход, использующий предложение Шлютера [49, 50]. В этом случае в фокальной плоскости сферического зеркала устанавливается оптиковолоконная шайба, при помощи которой свет выводится на фотоприемники. В [47] расчетно показано, что для фотодетектора, сравнимого по размерам и пространственному раз-

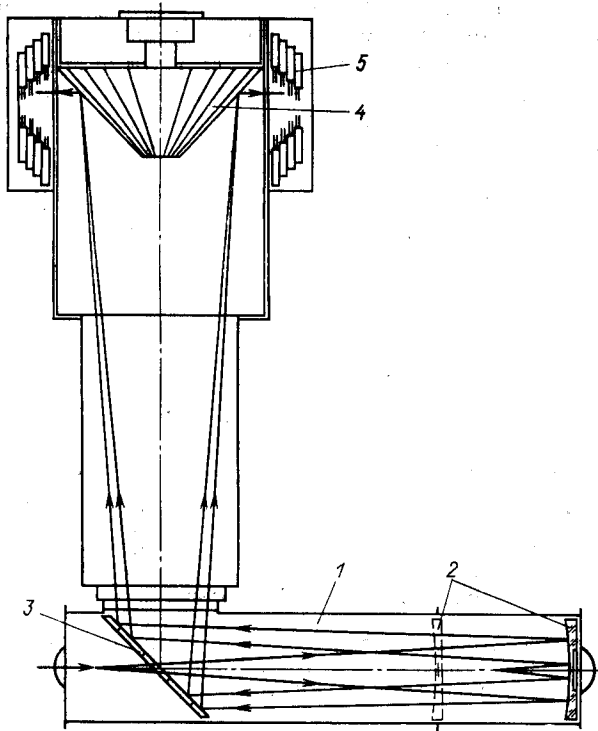


Рис. 31. Оптическая схема многоканального черенковского детектора:  
 1 — радиатор; 2 — сферическое зеркало; 3 — плоское зеркало; 4 — отражатель; 5 — ФЭУ

решению с используемым в Е 605 [17, 18], требуется 200 ГФЭУ в сочетании с волоконной оптикой.

Можно сказать, что методика регистрации колец с применением вакуумных фотоприемников далеко не исчерпала себя. Новые возможности откроются с внедрением многоанодных позиционно-чувствительных сборок. Помимо этого возможности заложены в использовании малогабаритных ФЭУ, а также новых модификаций ГФЭУ. Достоинством последних является возможность замены одним прибором нескольких десятков отдельных малогабаритных фотоумножителей.

### 3. РАЗРАБОТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА

Рассмотрим разработки, направленные на устранение недостатков фотодетекторов на основе камер. Как отмечалось, основными недостатками МСПК-фотодетекторов является невозможность многочастичной регистрации и относительно невысокая добротность. Их устранению посвящена работа [51]. Фотодетекторы показаны на

рис. 32. Вместо промежутка пропорциональной камеры используется плоскопараллельный сеточный электрод с близко расположенным катодным электродом. Естественный путь устранения неоднозначности в определении координат фотонов — разбиение катодного электрода на площадки. В данной конструкции используется катодный электрод, разделенный на три зоны (рис. 33, б). Используя метод «весов и полосок» в показанной конфигурации электрода (рис. 33, а) (отдельная площадка), достигается пространственная точность определения координаты фотона 0,4 мм. Камера испытывалась при заполнении метаном или изобутаном при давлении в диапазоне 5—20 мм рт. ст. с насыщенными парами ТМАЕ (парциальное давление 0,3—0,7 мм рт. ст.,  $T = 20 \div 30$  °С). Общее газовое усиление со-

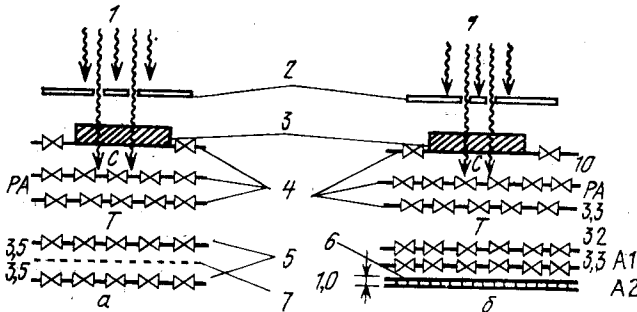


Рис. 32. Схематическое изображение фотодетекторов (размеры даны в мм): а — вариант обычной многоступенчатой камеры; б — в зоне пропорциональной камеры используются плоскопараллельные промежутки  $A_1$  и  $A_2$ ; 1 — параллельные пучки фотонов; 2 — маски; 3 — окна; 4 — сеточные электроды; 5 — сетки; 6 — печатная плата со считывающим электродом; 7 — пропорциональная камера

ставило  $2 \cdot 10^6$ . Лучший результат по координатной точности (0,4 мм) получен с изобутаном. Работа камеры при низком давлении резко снижает ее чувствительность к заряженным частицам. Использование изобутана в сочетании с промежутком передачи практически полностью подавляет оптическую обратную связь. Применение ТМАЕ с целью увеличения  $N_0$  требует увеличения промежутка конверсии, однако авторы надеются использовать разницу во временах конверсии электронов для улучшения условий многофотонной регистрации.

В отношении улучшения характеристик ДДК-фотодетекторов большие усилия тратятся на улучшение спектральных свойств элементов оптики, а также на устранение отмеченных выше недостатков [52, 53]. Имеется ряд разработок, связанных с различными методами считывания информации с фотодетекторов. Они относятся к использованию катодных электродов, выполненных в виде площадок, методу деления токов и т. д.

Ряд разработок посвящен другим конструктивным решениям фотодетектора. В работе Комби [54] испытан игольчатый счетчик.

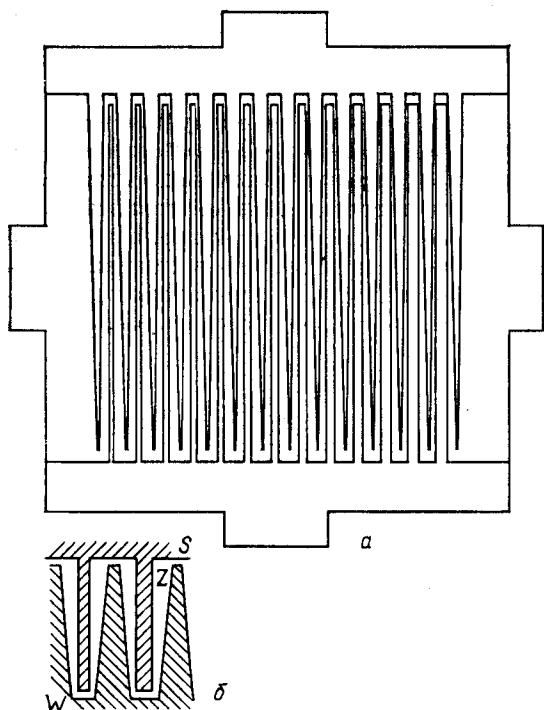


Рис. 33. Структура электрода (а) и схематическое изображение S-, Z- и W-электродов (б)

Испытывались две модификации — с 1024 иглками, образующими матрицу  $32 \times 32$  с шагом 3 мм, и 2500 иглками, расположенными в вершинах равносторонних треугольников со стороной 3 мм. Основные результаты относятся к первой конструкции. Использовались хирургические стальные иглки с радиусом острия ( $12 \pm \pm 3$ ) мкм. Катодной плоскостью служила медная пластина толщиной 2 мм с круглыми отверстиями в месте острия иглол. Острия нахо-

дились на 0,3 мм ниже катодной пластины. Применялось окно из  $MgF_2$  с плотно прижатым к его поверхности первым сеточным электродом. Камера наполнялась смесью аргона с ТЕА, а также метана с ТЕА. Были получены плато в счетной характеристике для отдельных фотонов и значение  $N_0 = 28$  на пучке  $\pi$ -мезонов с импульсом 6 ГэВ/с. В качестве газового радиатора использовался объем с аргоном длиной по пучку 93 см при атмосферном давлении. Изучалось время устойчивой работы иглол. После  $3 \cdot 10^9$  срабатываний отдельной иглолки эффективность регистрации падала вдвое. При исследовании под микроскопом выяснилось, что причиной падения эффективности явились кристаллические образования на острие иглы. После промывки в спирте эффективность восстанавливалась.

Достоинства игольчатых счетчиков в качестве фотодетекторов заключаются в высоком усилении, отсутствии неоднозначности определения координат фотонов, небольшая длительность сигнала, поскольку разряд возникает в области, близкой к острию иглы. Однако при их создании возникают значительные трудности, обусловленные высокой требуемой точностью взаимного положения электродов (несколько десятков микрон на базе в сотни миллиметров). Как и в случае дискретных вакуумных фотоприемников, существует естественная трудность считывания информации, обусловленная боль-



шим числом каналов. В ранних работах [55] с целью экономии электроники предполагалось использовать линию задержки с распределенным сопротивлением. Несмотря на ухудшение загрузочных характеристик, авторы рассматривали это направление как перспективное.

Следует остановиться на разработках, касающихся регистрации колец при помощи камер, работающих в сильноточном режиме [56]. Главные преимущества метода заключаются в высоком газовом усилении и упрощении в связи с этим условий регистрации фотонов, а также в достаточно высоком быстродействии при больших размерах камер. Основная трудность при этом была обусловлена следующими обстоятельствами. Для эффективности регистрации фотонов требуется их хорошая конверсия в фотоэлектроны в газовой среде, а устойчивая работа камеры в сильноточном режиме требует обратного — эффективного поглощения фотонов при газовом усилении. Заметим, что в таком режиме в камерах обычно используются добавки, поглощающие вакуумный ультрафиолет. В работе, выполненной в ИФВЭ, было показано [57], что можно реализовать условия, отвечающие одновременно двум отмеченным требованиям. Продолжаются исследования метода.

Упомянем разработки, касающиеся попыток регистрации фотонов в газовой среде с применением фотокатодов [58]. Основная цель разработок — замена фоточувствительных добавок (типа ТЕА, ТМАЕ) на фотоэмиссионные слои, используемые в вакуумных фотоприемниках, с сохранением всех возможностей камерной методики. Принципиальные трудности метода обусловлены более низкой фотоэмиссией с фотокатодов в газовую среду по сравнению с вакуумом, а также деградацией фотокатодов в атмосфере органических добавок, используемых в камерах. Было показано, однако, что в атмосфере благородных газов при низком давлении (несколько миллиметров ртутного столба) удается получить заметный выход с бищелочного фотокатода (около 10 %) и одновременно коэффициент газового усиления  $\approx 50$  [59]. В другой работе [60] выполнена попытка реализации метода с использованием CsI. Можно указать еще работу [61], в которой отмечается, что в многоступенчатой пропорциональной камере с катодным считыванием удавалось получить одновременно заметную эмиссию с фотокатода и газовое усиление.

Остановимся на возможном применении волоконной оптики для регистрации колец излучения Вавилова — Черенкова. Ее применение оправдано в системах с уменьшением изображения. Помимо этого появляется возможность уменьшить количество каналов регистрации, используя стандартные для волоконной оптики методы кодирования информации. И, наконец, возможно, в принципе, создание фотодетекторов, в которых перед оптиковолоконной шайбой используются промежутки усиления света (например, размножение электронов в газовой среде с последующей регистрацией электролюминесценции).

В заключение рассмотрим разработки, связанные с созданием многоанодных вакуумных фотоприемников. Вначале остановимся на разработках, в которых используется структура: фотокатод — каскад усиления на МКП [62] — многоанодная матрица. В [63] описан фотоумножитель с матрицей из 400 анодов, расположенных с шагом 0,65 мм. Площадь чувствительности сборки  $12 \times 16$  мм. Используется бищелочной фотокатод (квантовая эффективность 18 % на длине волны 430 нм) и два каскада усиления на МКП. Сборка заключена в корпус с наружным диаметром 24,9 мм. Приведены следующие характеристики: разрешение  $\sigma_{XY} = 0,6$  мм, коэффициент усиления ФЭУ  $10^4$ — $10^5$ , передний фронт сигнала 0,6 нс. Имеются и другие аналогичные разработки, отличающиеся конструктивным исполнением [64]. Следует отметить, однако, общие недостатки вакуумных фотоприемников с использованием в качестве умножительной системы МКП. К ним относится значительный темновой ток, эффекты насыщения, ограничивающие быстродействие, а также деградация вторично-эмиссионных слоев, по которым распределен потенциал [63].

Отмеченные явления можно в значительной мере подавить, если использовать в сборках умножительные системы, построенные по принципу дискретных динодов. В работе [65] описан фотоумножитель с дискретными динодами и секционированным анодом. ФЭУ имеет окно диаметром 20 мм, бищелочной фотокатод, 10 динодов, разделенных керамическими кольцами и анод, выполненный в виде матрицы  $4 \times 4$  площадок. Размер каждой площадки  $2,6 \times 2,6$  мм, зазор между ними 0,3 мм. Каждый из десяти динодов содержит по две плоскости электродов треугольного сечения с размером по основанию 0,5 мм и с шагом между электродами 0,5 мм. Электроды в каждой динодной плоскости сдвинуты на небольшое расстояние для устранения оптической и ионной обратной связи. Форма электродов и конфигурация электрического поля оптимизировались с целью обеспечения высокого коэффициента вторичной эмиссии электронов. Измеренные параметры ФЭУ: квантовая эффективность 20 %; коэффициент усиления  $10^6$ , пространственное разрешение по  $X$  и  $Y$  координатам  $\pm 1,7$  мм. Отмечается хорошая стабильность параметров. В рассмотренном ФЭУ для фокусировки электронов использовалось аксиальное магнитное поле.

Макет позиционно-чувствительной сборки без магнитного поля описан в [66]. Диаметр входного окна 75 мм, фотокатод — бищелочной с квантовой эффективностью 22 %, измеренной на длине волны 350 нм. Фотоумножитель содержит 9 сеточных динодов с расстоянием между ними 1,3 мм, расстояние между фотокатодом и первым динодом 7 мм. Входная камера не содержит дополнительных фокусирующих электронов, фотоэлектроны транспортируются на первый динод в так называемой «проективной геометрии». Анод содержит 10 проволочных электродов. Измеренное пространственное разрешение в направлении, перпендикулярном электродам составило  $\pm 3$  мм,

коэффициент усиления ФЭУ  $10^5$ , длительность сигнала по основанию 15 нс. Фотоумножитель при общем напряжении 1000 В благодаря близко расположенным сеточным электродам оказался слабо чувствительным к внешним магнитным полям. Разработки ФЭУ с дискретными диодами и матрицами анодов  $32 \times 32$  выполняются в настоящее время фирмой Филлипс.

По-видимому, данное направление в создании фотодетекторов весьма перспективно. Создание многоанодных сборок большой площади с высоким пространственным разрешением может открыть новые возможности вакуумных фотоприемников в методике регистрации колец излучения Вавилова — Черенкова.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arnison G., Astbury B., Aubert B. e.a.//Phys. Lett. 1983. Vol. 122B. P. 103—116.
2. Banner M., Bloch Ph., Bonaudi F. e.a.//Phys. Lett. 1983. Vol. 122B. P. 476—485.
3. Technical proposal DELPHI. Preprint CERN, LEP/83-3, LEP 32, 1983.
4. Seguinot J., Ipsilantis T.//Nucl. Instrum. and Methods. 1977. Vol. 142. P. 377—391.
5. Seguinot J., Tocqueville J., Ipsilantis T.//Nucl. Instrum. Methods. 1980. Vol. 173. P. 283—298.
6. Anderson D.//Nucl. Instrum. and Methods. 1980. Vol. 178. P. 125—130.
7. Baldin B. Yu., Vrazhnov Yu. N., Bytukov S. I. e.a.//Nucl. Instrum. and Methods. 1977. Vol. 140. P. 409—411.
8. Melchart G., Charpak G., Sauli F.//IEEE Trans. 1980. Vol. NS-27. P. 124—132.
9. Breskin A., Cattai A., Charpak G. e.a.//IEEE Trans. 1981. Vol. NS-28. P. 429—434.
10. Barrelet E., Ekelof T., Lund Jensen B. e.a. Preprint CERN-EP/09, 1982.
11. Seguinot J. Cours Lecture Series, Ring Imaging Cherenkov. Preprint CERN, 1982.
12. Charpak G., Sauli F. Preprint CERN-EP/83-128, 1983.
13. Charpak G., Peisert A., Sauli F.//Nucl. Instrum. and Methods, 1981. Vol. 180. P. 387—396.
14. Mangeot Ph., Coutracon J., Hubbard J. e.a.//Nucl. Instrum. and Methods. 1983. Vol. 216. P. 79—91.
15. Davenport M., Deol R., Flower P. e.a.//IEEE Trans. 1983. Vol. NS-30. P. 35—39.
16. Bouclier R., Charpak G., Cattai A. e.a.//Nucl. Instrum. and Methods. 1983. Vol. 205. P. 403—423.
17. Williams S. Preprint SLAC-3360, 1984.
18. Bouclier R., Charpak G., Santiard J. C. e.a.//IEEE Trans. 1983. Vol. NS-30. P. 30—34.
19. Coutracon G., Crieblie M., Hubbard J. e.a.//IEEE Trans. NS-29. 1982. P. 323—327.
20. Adams M., Bastin A., Coutracon G. e.a.//Nucl. Instrum. and Methods. 1983. Vol. 217. P. 237—243.
21. Bouclier R., Breskin A., Charpak G. e.a. Preprint FNAL FN-351, 1981.
22. Hallewell G. Preprint Rutherford Appleton Laboratory RAL 85-009, 1984.
23. Baltrusaitis R. Preprint SLAC SLC-L1-09, 1982.
24. Ashford V., Bienz T., Bird F. e.a. Preprint SLAC-3772, 1985.
25. Черенков П. А., Тамм И. Е., Франк И. М. Нобелевские лекции. М.:

Физматгиз. 1960.

26. Butslov M. M., Medvedev M. N., Chuvilo I. V., Sheshunov M. V. // Nucl. Instrum. and Methods. 1963. Vol. 20. P. 263—266.
27. Денисов С. П. Препринт ИФВЭ 71-47. Серпухов, 1971.
28. Gorin Yu. P., Denisov S. P., Donskov S. V. e.a. // Nucl. Instrum. and Methods. 1971. Vol. 92. P. 77—80.
29. Гюрданеску Н., Зубарев В. Н., Иванов В. И. и др. Препринт ОИЯИ PI-5460. Дубна, 1970.
30. Benot M., Bertrand J., Maurer A. e.a. // Nucl. Instrum. and Methods. 1979. Vol. 165. 439—461.
31. Meunier R. Preprint CERN EP/85-16, 1985.
32. Giese R., Gildemeister O., Paul W., Schuster G. // Nucl. Instrum. and Methods. 1970. Vol. 88. P. 83—92.
33. Robinson V. // Physica Scripta. 1981. Vol. 23. P. 716.
34. Gooch T., Gilmore R., Jeffery D. e.a. // Nucl. Instrum. and Methods. 1985. Vol. A241. P. 363—374.
35. Вишневский Н. К., Краснокутский Р. К., Лапшин В. Г. и др. // Тр. Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. Дубна, ОИЯИ, Д5805, 1970. С. 305—320.
36. Александрова Н. Ф., Вишневский Н. К., Королькова О. С. и др. Препринт ИФВЭ 69-22. Серпухов, 1969.
37. Васильченко В. Г., Лапшин В. Г., Моич Е. А. и др. // ПТЭ. 1978, № 4. С. 183—187.
38. Карпиков Ю. Д., Соляник В. И. Препринт ИФВЭ 77-35. Серпухов, 1977.
39. Балдин Б. Ю., Вертоградов Л. С., Вишневский Н. К. и др. // ЯФ, 1974. Т. 20. С. 694—708.
40. Абрамов В. В., Алексеев А. В., Балдин Б. Ю. и др. // Nucl. Instrum. and Methods. 1985. A235. P. 497—501.
41. Абрамов В. В., Алексеев А. В., Балдин Б. Ю. и др. Препринт ИФВЭ 81-46. Серпухов, 1981.
42. Бушнин Ю. Б., Денисенко А. А., Дунайцев А. Ф. и др. Препринт ИФВЭ 77-84. Серпухов, 1977.
43. Балдин Б. Ю. // ПТЭ. 1980. № 5. С. 137—141.
44. Битюков С. И., Бушнин Б. Ю., Дзелядин Р. И. и др. Материалы Международного совещания по методике проволочных камер. Дубна ОИЯИ, Д 13—9164, 1975. С. 24—27.
45. Васильченко В. Г., Влацкий Ф. Д., Зелепукин С. А. и др. Препринт ИФВЭ 79-48. Серпухов, 1979.
46. Аюнджанов Г. А., Гришкин Ю. Л., Кузичев В. Ф. и др. Препринт ИФВЭ 86-10. Серпухов, 1986.
47. Балдин Б. Ю., Васильченко В. Г., Волков А. А. и др. Препринт ИФВЭ 85-40. Серпухов, 1985.
48. Васильченко В. Г., Дайковский А. Г., Лапшин В. Г. и др. Препринт ИФВЭ 77-116. Серпухов, 1977.
49. Shluter R. A. // Proc. of Intern. Conf. High Energy Physics. New York, 1961. P. 91.
50. Зрелов В. П. Излучение Вавилова — Черенкова и его применение в физике высоких энергий. Т. 2. М.: Атомиздат, 1968.
51. Dominik W., Anderson D., Breskin A. e.a. Preprint CERN EP/84-29, 1984.
52. Leith P. Preprint SLAC-3829, 1985.
53. Peisert A. Preprint CERN-EP/8206, 1982.
54. Comby G., Chalot J., Quidort J., Zadra A. // IEEE Trans. 1982. Vol. NS-29. P. 328—331.
55. Grove R., Lee K., Perez-Mendez V., Sperinde J. // Nucl. Instrum. and Methods. 1970. Vol. 89. P. 257—262.
56. Алексеев Г. Д., Круглов В. В., Хазинс Д. М. // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13. С. 703—750.

57. Бузулуцков А. Ф., Васильченко В. Г., Ващенко В. Ю. и др. Препринт ИФВЭ 84-108. Серпухов, 1984.
58. Kneller G. Preprint CERN-EP/83—34, 1983.
59. Charpak G., Dominik W., Majeovski S., Sauli F.//IEEE Trans. 1983. Vol. NS-30. P. 134—137.
60. Williams S., Leith P., Poppo M., Ipsilantis T.//IEEE Trans. 1980, Vol. NS-27. P. 91—95.
61. Sauli F. Preprint CERN-EP/82—26, 1982.
62. Lo C., Lecomte P., Lescovar B.//IEEE Trans. 1977. Vol. NS-24. P. 302—311.
63. Oba K., Sugiyama M., Suzuki Y., Yoshimura Y.//IEEE Trans. 1979. Vol. NS-26. P. 346—355.
64. Meunier R., Maurer A.//IEEE Trans. 1978. Vol. NS-25. P. 528—531.
65. Kuroda K.//Nucl. Instrum. and Methods. 1982. Vol. 196. P. 187—197.
66. Kume H., Suzuki S., Oba K., Takeuchi J.//IEEE Trans. 1985. Vol. NS-32. P. 355—359, 448—452.
67. Salomon M., Williams S.//Nucl. Instrum. and Methods. 1985. Vol. A241, №1. P. 210—214.