

548658314

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И Ф В Э 85-40
ОЭФ

Б.Ю.Балдин, В.Г.Васильченко, А.А.Волков,
А.О.Ефимов, В.И.Крышкин, А.Н.Ронжин,
В.И.Рыкалин, Р.М.Суляев

СПЕКТРОМЕТРЫ КОЛЕЦ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ГОДСКОПИЧЕСКИХ ФЭУ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ
С ИМПУЛЬСАМИ ДО 300 ГэВ/с

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И Ф В Э 85-40
ОЭФ

Б.Ю.Балдин, В.Г.Васильченко, А.А.Волков,
А.О.Ефимов, В.И.Крышкин, А.И.Ронжин,
В.И.Рыкалин, Р.М.Суляев

СПЕКТРОМЕТРЫ КОЛЕЦ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ГОДСКОПИЧЕСКИХ ФЭУ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ
С ИМПУЛЬСАМИ ДО 300 ГэВ/с

Серпухов 1985

Аннотация

Балдин Б.Ю., Васильченко В.Г., Волков А.А. и др. Спектрометры колец черенковского излучения на голоскопических ФЭУ для измерения скоростей частиц с импульсом до 300 ГэВ/с: Препринт ИФВЭ 85-40. - Серпухов, 1985. - 14 с., 6 рис., 2 табл., библиогр.: 19.

Рассматриваются варианты спектрометров колец черенковского излучения на ГФЭУ для идентификации π , K, p с импульсом до 300 ГэВ/с

Abstract

Baldin B.Yu., Vasil'chenko V.G., Volkov A.A. et al. Cherenkov Radiation Ring Spectrometers with Hodoscope PMS for Measurement of Particle Velocity with Momentum upto 300 GeV. IHEP Preprint 85-40. - Serpukhov, 1985. - p. 14. figs. 6, tables 2, refs.: 2.

Versions of the Cherenkov radiation ring spectrometers with HPM's for π , K, p identification (momentum upto 300 GeV/c) are considered.

В последние годы интенсивно развивается методика идентификации частиц с помощью спектрометров колец черенковского излучения (СКОЧ, МЧС, RICH, CRID и т.д.)^{/1-12/}. В отличие от дифференциальных черенковских счетчиков (ДЧС), у которых в фокальной плоскости установлены узкие кольцевые диафрагмы, в спектрометрах колец черенковского излучения (СКОЧ) используются позиционно-чувствительные фотодетекторы. Эти обстоятельства обеспечивают следующие основные преимущества СКОЧ по сравнению с ДЧС. Спектрометры позволяют работать в широком диапазоне скоростей и одновременно с высокой точностью определять скорости β нескольких частиц в пучках с большой угловой расходимостью. Создаваемые в настоящее время спектрометры различаются по типу используемых фотодетекторов. Большое распространение получили фотодетекторы на основе многоступенчатых пропорциональных^{/1/} и двухкоординатных дрейфовых камер^{/2/}. Однако в подобных детекторах, как правило, существуют трудности с подавлением оптической обратной связи. Обратная связь возникает из-за большого газового усиления ($\sim 10^6$), необходимого для эффективной регистрации отдельных фотонов в среде, заполненной насыщенными парами соединений с низким потенциалом фотоионизации^{/3/}. Эффективная регистрация света из области вакуумного ультрафиолета (область фотоионизации ТЕА^{/1/}, ТМАЕ^{/4/}) требует применения дорогостоящей и "деликатной" в обращении оптики (LiF, CaF₂, MgF₂, оптический плавный кварц). При использовании данной оптики возникают дополнительные технические трудности в отделении фотодетектора от объема газового радиатора в случае регистрации частиц относительно невысоких энергий, когда газовый радиатор находится под давлением. Особые требования предъявляются к чистоте радиатора. Так, например, уровень примесей O₂, H₂O, сильно поглощающих ультрафиолет, не должен превышать 10⁻⁷. В этих условиях необходим контроль за стабильностью элементов оптики спектрометра, что, естественно, усложняет работу с ним. Помимо этого в многоступенчатых камерах существует проблема восстановления колец с числом точек на кольце больше пяти^{/5/}. Она может быть решена за счет увеличения числа элементов, на которые разбивается катодная плоскость.

Однако этот путь неизбежно приводит к резкому возрастанию числа каналов регистрирующей электроники. В двухкоординатных дрейфовых камерах количество одновременно регистрируемых точек может быть повышено до нескольких сотен, но это достигается за счет ухудшения быстродействия детектора.

Эксперименты с использованием подобных фотодетекторов планируется проводить в условиях невысокой загрузки спектрометров (фоторождение на Омега-спектрометре^{/6/}, ДЕЛФИ на ЛЕП^{/7/}, детектор CRID в SLAC^{/8/}).

Следует отметить, что, несмотря на обилие разработок фотодетекторов, основанных на фотоионизации в газовой среде, в эксперименте используется пока только один спектрометр с многоступенчатой камерой во ФНАЛ (эксп. Е605)^{/1/}.

В настоящее время созданы и применяются в эксперименте фотодетекторы на основе дискретных малогабаритных вакуумных фотоприемников^{/9/}. Однако создание фотодетекторов большого размера в этом случае затруднено из-за резкого роста количества фотоприемников и числа каналов регистрирующей электроники.

В 1968 году в ИФВЭ были разработаны ГФЭУ^{/10/}, нашедшие применение в спектрометрах колец черенковского излучения. Первый спектрометр на ГФЭУ использовался в эксперименте по наблюдению ядер антитрития^{/11/}. В дальнейшем был изготовлен и исследован широкоапертурный спектрометр СКОЧ^{/12/}, предназначенный для идентификации π , K, p с импульсом до 30 ГэВ/с. Опыт работы со спектрометром показывает перспективность использования подобных приборов и в области больших импульсов частиц.

Разрешение черенковского счетчика по скорости, как известно, выражается соотношением

$$\left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)^2 = [(\operatorname{tg}\theta \cdot \Delta\theta)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2] / N_0 L \sin^2 \theta, \quad (1)$$

θ - угол черенковского излучения; $\frac{\Delta n}{n}$ - дисперсия показателя преломления газа; L - длина газового радиатора. Величина N_0 называется "добротностью" и определяется квантовой эффективностью фотодетектора и светопропускающей способностью оптической системы:

$$N_0 = 2\pi a \cdot Z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) \frac{k(\lambda) \epsilon(\lambda) d\lambda}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где $a = 1/137$; Z - заряд частицы; $k(\lambda)$ - квантовая эффективность фотодетектора; $\epsilon(\lambda)$ - коэффициент светопропускания оптической системы.

Из соотношения (1) следует, что разрешение по скорости для частиц высоких энергий ограничивается точностью измерения угла черенковского излучения и дисперсией показателя преломления ра-

диатора. На рис. 1 показана зависимость показателя преломления He, Ne, Ar от длины волны при атмосферном давлении и 0° С. Видно, что величина хроматической дисперсии сильно растет с уменьшением длины волны регистрируемого света и определяется типом используемого фотодетектора. Величина отношения $(\frac{\Delta n}{n})^2 / N_0$ определяет вклад дисперсии радиатора в разрешение спектрометров по скорости. Расчеты показывают, что для области длин волн 140÷160 нм (CaF₂ + ТЕА), 160÷200 нм (кварц + ТМАЕ), 260÷600 нм (диапазон чувствительности бишелочного фотокатода с кварцевым окном) величины $(\frac{\Delta n}{n})^2 / N_0$ примерно одинаковы. При использовании ГФЭУ уменьшение величины $(\frac{\Delta n}{n})^2 / N_0$ возможно на пути создания новых типов фотокатодов с максимальной чувствительностью в указанной области длин волн.

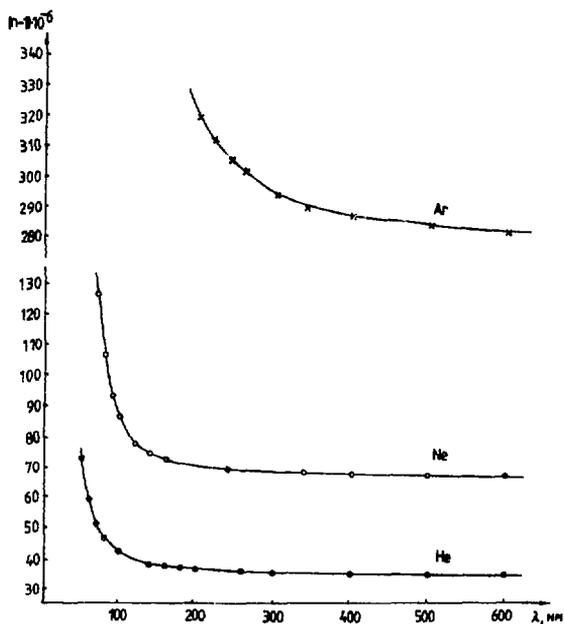


Рис. 1. Зависимость показателя преломления гелия, неона, аргона от длины волны света при нормальных условиях.

Обеспечение разрешения по скорости СКОЧ на уровне 10^{-6} при высокой множественности регистрируемых частиц влечет за собой определенные требования к таким параметрам ГФЭУ, как величина квантового выхода, пространственное разрешение в одноэлектронном режиме и загрузочные характеристики.

В настоящее время в качестве фоточувствительных слоев в ГФЭУ применяются бищелочные фотокатоды ввиду низкого уровня термоэмиссии и высокой квантовой эффективности^{/13/}. В табл. 1 приведены материалы, являющиеся наиболее перспективными для создания фотокатодов^{/14/}.

Таблица 1.

Материал	Максимум спектральной чувствительности λ , нм	Максимальный квантовый выход Υ , %	Плотность тока термоэмиссии 20° С, А/см ²
K_2CsSb	400-450	30	$10^{-16} \div 10^{-17}$
$K_2CsSb(0)$	400	35	10^{-16}
$(Cs)Na_2KSb$	400	30	$10^{-15} \div 10^{-16}$
$GaAs(Cs)$	400	25	$10^{-16} \div 10^{-17}$

Конструкция катодной камеры такова, что позволяет достаточно просто реализовать в приборах массивные фотокатоды с вдвое более высокой квантовой эффективностью.

Необходимая величина разрешения по скорости определяет требования к позиционному разрешению фотодетектора. Например, для величины $\Delta\beta/\beta = 5 \times 10^{-7}$ при $\theta = 10$ мрад и фокусном расстоянии сферического зеркала $f = 10$ м пространственное разрешение ГФЭУ должно быть не хуже 0,5 мм. В настоящее время разработан и изготовлен новый прибор ГФЭУ-30П^{/15/}, для которого $2r = 0,5 \pm 0,6$ мм. В стадии изготовления находится ГФЭУ-30IV с $2r = 0,3 \pm 0,35$ мм. С точки зрения улучшения пространственного разрешения применение в ГФЭУ фотокатодов с отрицательным электронным средством обеспечивает определенные преимущества. В этом случае фотоэлектроны термолизованы по скоростям и углам вылета, что обеспечивает в 3-4 раза более высокое пространственное разрешение по сравнению с другими типами фотокатодов.

Максимальная интенсивность пучков, в которых могут работать спектрометры, определяется загрузочными характеристиками фотодетекторов. Учитывая то обстоятельство, что на одно событие срабатывает только часть фотодетекторов из общего их количества,

максимальная интенсивность частиц, пропущенных через спектрометр, может быть выше максимальной нагрузочной способности отдельного фотодетектора. Загрузочные характеристики ГФЭУ определяются типом диодной системы. В ГФЭУ-30 используется распределенная диодная система, как одна из самых простых в изготовлении^{/16/}. Эта диодная система обеспечивает усиление до 10^8 . Рабочее усиление выбирается 10^7 . В этом случае длительность одноэлектронного сигнала по основанию составляет 4 нс. Для эффективной регистрации одноэлектронных сигналов с усилением 10^7 требуется обеспечить порог дискриминатора 0,5–1 мВ. Необходимая чувствительность достигается каскадированием широкополосного усилителя и высокочувствительного формирователя^{/12/}. Длительные измерения на пучке показали, что при усилении 10^7 диодная система ГФЭУ-30 стабильно работает при интенсивности $\leq 7 \cdot 10^6$ частиц/с. Дальнейшее улучшение нагрузочных характеристик ГФЭУ связано с применением сосредоточенных диодов^{/13/}. Расчет показывает, что такие диодные системы могут обеспечивать длительность одноэлектронного сигнала 1 нс при нагрузках до 10^8 частиц/с. Предельное число сигналов, регистрируемых за полное время дрейфа T_0 , ограничено быстродействием используемых амплитудно-компенсированных мод привязки к сигналам ГФЭУ^{/17/}. Для используемой удельной задержки ГФЭУ 15 нс/см обеспечивается регистрация до 10 сигналов при равномерном их распределении.

Для разделения π , K , ρ с импульсами до 300 ГэВ/с требуется разрешение по скорости $\frac{\Delta v}{v} \geq 10^{-6}$ (рис. 2). Оно достигается за счет использования в качестве радиатора He или Ne и увеличения длины СКОЧ до 10–20 метров. Поскольку ГФЭУ является однокоординатным фотодетектором, в разработанных спектрометрах использовалась оптическая схема, показанная на рис. 3. Она содержит сферическое зеркало, фокусирующее черенковский свет в кольцо фокальной плоскости, конический отражатель, трансформирующий фокальную плоскость в цилиндрическую поверхность, зеркальные световоды, ГФЭУ. В принятой оптической схеме одна координата фотона определяется по времени дрейфа в ГФЭУ, а другая – по номеру сектора, в котором расположен соответствующий ГФЭУ.

Важной характеристикой СКОЧ является угловой аксептанс $\Delta\phi$, который равен

$$\Delta\phi = \frac{\ell}{f} - \Delta\theta, \quad (3)$$

ℓ – длина фотокатода ГФЭУ (для ГФЭУ-30 $\ell = 200$ мм), $\Delta\theta$ – диапазон регистрации углов черенковского излучения. Переход в область более высокого разрешения по скорости требует увеличения f . При этом $\Delta\phi$ уменьшается как $1/f$. Возможность увеличения $\Delta\phi$ заключена в использовании модификации ГФЭУ-30III с длиной фотокатода 50 см или в увеличении ℓ путем использования нескольких

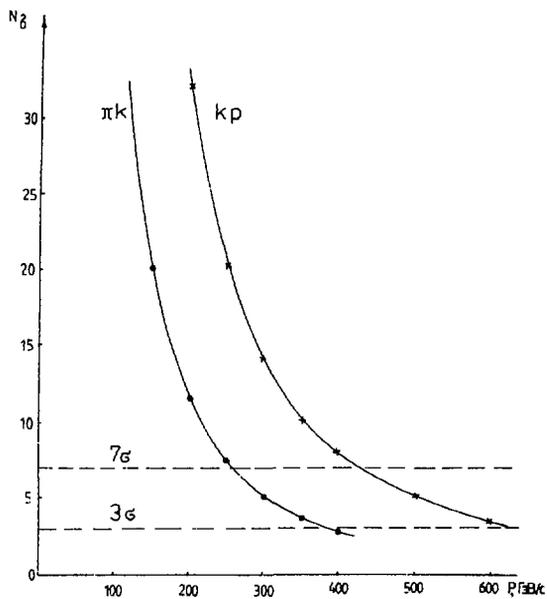


Рис. 2. Уровень разделения π , K, p (в единицах $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-7}$) в зависимости от импульса.

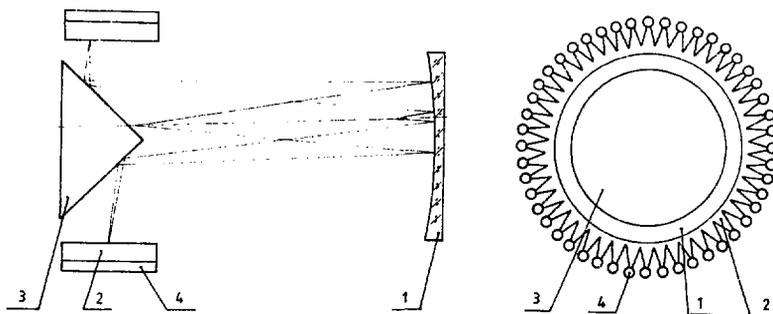


Рис. 3. Оптическая схема спектрометров колец черенковского излучения на ГФЭУ с разбиением фокальной плоскости на сектора: 1 - сферическое зеркало; 2 - световод; 3 - зеркальный конический отражатель; 4 - ГФЭУ.

ГФЭУ в каждом секторе. В табл. 2 представлены основные расчетные параметры СКОЧ, предназначенные для разделения π , K , ρ с импульсом до 300 ГэВ/с. При расчете использовалась величина $N_0 = 50$. Опыт работы со СКОЧ/12/ показал, что такая величина добротности может быть достигнута при использовании кварцевой оптики с высоким качеством светосбора.

Таблица 2. Основные характеристики спектрометров колец черенковского излучения (СКОЧ), предназначенных для идентификации π , K , ρ с импульсом до 300 ГэВ/с.

1. Максимальное давление рабочего газа, атм	7
2. Общее количество каналов регистрации (гodosкопический фотоумножитель – усилитель – амплитудно–компенсированный формирователь – время–цифровой преобразователь), шт.	32
3. Параметры ГФЭУ:	
а) длина фотокатода, мм	200
б) чувствительность, мкА/лм.	50
в) пространственное разрешение в одноэлектронном режиме, 2σ , мм	0,3
г) количество одновременно регистрируемых точек на ГФЭУ	10
4. Количество секторов, на которые разделены черенковские кольца, шт.	32
5. Длина газового радиатора, м	10/20
6. Фокусное расстояние сферического зеркала, м	10/20
7. Радиальная апертура, диаметр, мм	400/100
8. Диапазон углов черенковского излучения, мрад	10–25/5–11,5
9. Количество регистрируемых на кольцо черенковского излучения фотоэлектронов, шт.	5–30/3–10
10. Загрузка детектора, част/с	10^6 – 10^7
11. Разрешение по скорости, $\Delta\beta/\beta$, (FWHM)	2×10^{-6} – 5×10^{-7}
12. Добротность N_0	50

Итак, расчеты показывают, что при использовании около 30 ГФЭУ с рассмотренной выше оптической схемой, реально создание спектрометров с $\Delta\beta/\beta = 10^{-6}$, угловой апертурой до 10 мрад

и диаметром в несколько десятков сантиметров. Такие спектрометры могут, например, применяться в пучках для мечения, в спектрометрах для идентификации частиц, летящих в переднем конусе и т.д.

Для регистрации частиц в большом угловом диапазоне может быть использован другой подход. Изображение кольца черенковского излучения в фокальной плоскости сферического зеркала собирается на фотокатоды ГФЭУ-30П при помощи оптического волокна, прозрачного к черенковскому излучению (рис. 4). В этом случае в фокальной плоскости устанавливается матрица из оптического волокна^{/18/}, состоящая из отдельных элементов. Каждый элемент представляет собой квадрат размером, например, 200×200 мм², собранный из одномиллиметрового оптического волокна. Волокна разводятся на ГФЭУ следующим образом. Первая строчка первого элемента заводится на первую строчку первого ГФЭУ, вторая — на первую строчку второго ГФЭУ, ..., двухсотая — на первую строчку двухсотого ГФЭУ, первая строчка второго элемента заводится на вторую строчку первого ГФЭУ, ..., двухсотая на вторую строчку двухсотого ГФЭУ и т.д. На один ГФЭУ с шириной рабочей области 20 мм и длиной 200 мм заводится 20 строчек по одной из каждого элемента матрицы. Используя 200 ГФЭУ-30П можно изготовить фотодетектор с площадью рабочей области около 1 м² и пространственным разрешением по координатам X и Y не хуже 1 мм.

На рис. 5 показаны спектры пропускания оптического волокна диаметром 1 мм на основе полиметилметакрилата и кварца^{/19/} в оболочке. Измерения показали, что при прохождении света с длиной волны 370 нм (область максимума чувствительности бишелочного фотокатода) через органическое волокно диаметром 1 мм и длиной 1 метр его количество уменьшается вдвое. Кварцевое волокно в этих же условиях вносит ослабление в 1,2-1,3 раза.

С целью уменьшения объема используемого волокна возможна светопередача с фокальной плоскости на фотодетектор при помощи волокон, состыкованных со стороны фокальной плоскости с плотно упакованными зеркальными световодами (рис. 6). Это позволяет уменьшить объем используемого волокна в k раз, где k — отношение площади входного окна световода к площади поперечного сечения волокна. Для оценки потерь света при данном способе светопередачи были выполнены измерения в следующих условиях. Диаметр входного и выходного окон зеркального конического световода — 2,5 и 1 мм, высота — 20 мм. Максимальный угол падения света к образующей конической поверхности — 100 мрад. Интенсивность освещения входного окна равномерная. Ослабление света, вносимое зеркальным конусом и переходом конуса на волокно составило 1,5. Таким образом, в указанных условиях общее ослабление света не превышает 2 для кварцевого волокна и 3 — для органического волокна. Такой уровень потерь обеспечивает получение величины $N_0 \approx 30-50$.

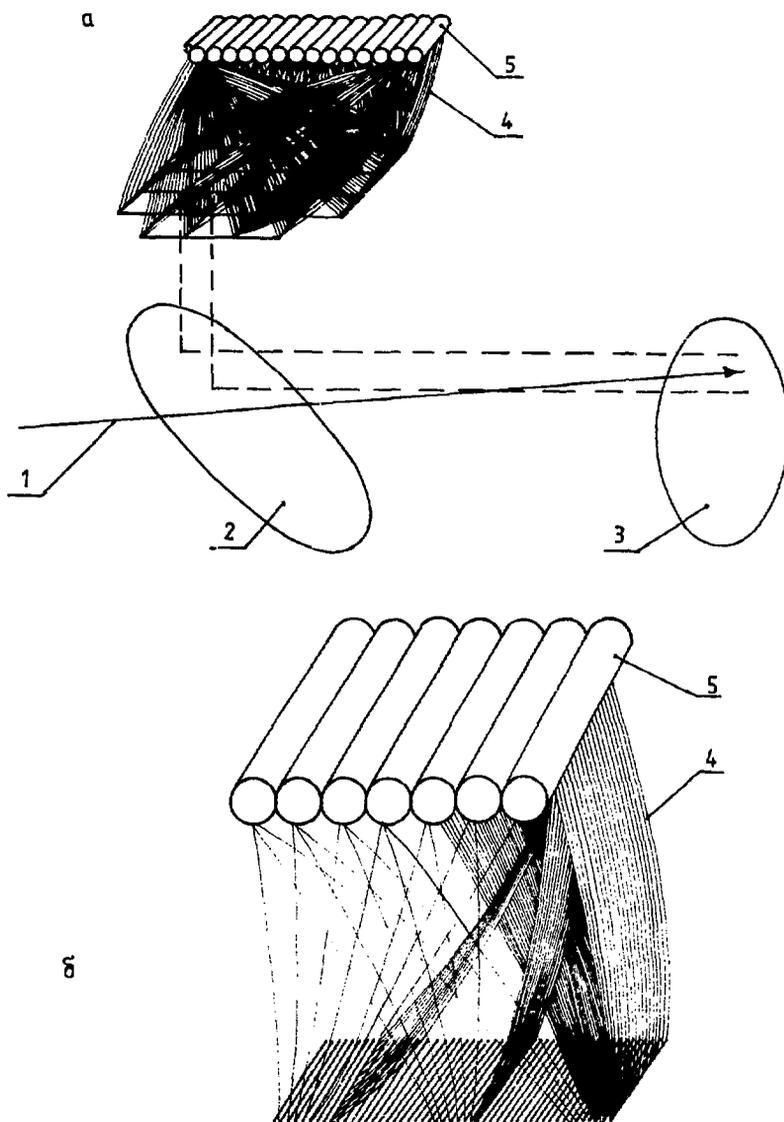


Рис. 4. Схематическое изображение спектрометра колец черенковского излучения с большим угловым аксептансом (а) и вариант фотодетектора на ГФЭУ с оптическим волокном (б). 1 - траектория частицы; 2 - плоское зеркало; 3 - сферическое зеркало; 4 - оптическое волокно; 5 - ГФЭУ.

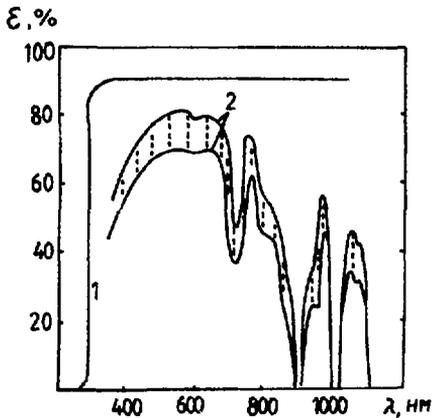


Рис. 5. Зависимость эффективности пропускания света для двухслойного волокна диаметром 1 мм и длиной 1 м: 1 - кварцевое волокно; 2 - волокно на основе ПММА.

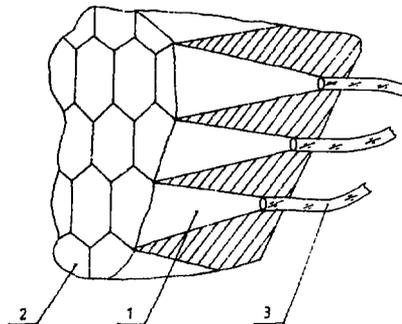


Рис. 6. Участок матрицы зеркальных световодов для передачи изображения с фокальной плоскости сферического зеркала спектрометра на фотодетектор с помощью оптических волокон: 1 - зеркальный световод; 2 - входное окно световода; 3 - оптическое волокно.

В данной оптической схеме для облегчения распознавания многочастичных событий необходимо, чтобы максимальный размер радиусов колец не превышал 100 мм, т.е. вписывался в размер одного элемента матрицы. Рассмотренный вариант фотодетектора позволяет реализовать спектрометр для идентификации π, K, p с импульсом до 300 ГэВ/с и угловой расходимостью около 100 мрад. Необходимо отметить, что регистрация многочастичных событий невозможна без измерений траекторий частиц трековыми детекторами. Кроме того, для идентификации частицы необходимо знать ее энергию или импульс. Так, например, для разделения π, K, p с импульсом 300 ГэВ/с достаточно измерять энергию или импульс с 20%-ной точностью.

Таким образом, достигнутые в настоящее время характеристики ГФЭУ позволяют создать спектрометры колец черенковского излучения для идентификации π, K, p с импульсом до 300 ГэВ/с. При этом в отличие от спектрометров, использующих проволочные координатные детекторы, имеются следующие преимущества:

1. Обеспечивается малое мертвое время при относительно небольшом числе каналов регистрирующей электроники.

2. Регистрация света в видимой области снижает требования к оптическим элементам спектрометров (чистоте газового радиатора, прозрачности окон, отражающим свойствам зеркал и т.д.).

3. Снимаются проблемы с оптической обратной связью, неопределенностями в восстановлении колец с большим количеством регистрируемых точек, отсутствует необходимость использования газовых смесей с химически активными фоточувствительными добавками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bouclier R., Breskin A., Charpak G. et al. - Preprint FNAL FN-351, 7180, 605, 1981.
2. Baldin B.Yu., Bytukov S.I., Vrazhnov Yu.N. et al. - Nucl. Instr. and Methods, 1977, v.140, p. 409.
3. Eek L.O., Ekelof T., Fransson K. et al. - IEEE Trans. on Nucl. Science, 1984, v.NS-31, p. 949.
4. Seguinot J. and Ipsilantis T. - Nucl. Instr. and Methods, 1977, v.142, p. 377.
5. Bouclier R., Charpak G., Santiard J.C. et al. - IEEE Trans. on Nucl. Science, 1983, v.NS-30, p. 30.
6. Davenport M., Deol R.S., Flower P.S. et al. - IEEE Trans. on Nucl. Science, 1983, v. 1, p. 35.
7. Technical proposal DELPHI, CERN/LEPC/83-3, LEPC32, 1983.
8. Williams S. - Preprint SLAC-PUB-3360, SLAC, 1984.
9. Карпеков Ю.Д., Соляник В.И. - Препринт ИФВЭ 77-35, Серпухов, 1977.
10. Вишневецкий Н.К., Краснокутский Р.Н., Лапшин В.Г. и др. - В кн.: Труды международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. - Дубна: ОИЯИ, Д5805, 1971, с. 305.
11. Балдин Б.Ю., Вертоградов Л.С., Гришкевич Я.В. и др. - ЯФ, 1974, т.20, с. 694.
12. Абрамов В.В., Алексеев А.В., Балдин Б.Ю. и др. - Препринт ИФВЭ 83-180, Серпухов, 1983.
13. Васильченко В.Г., Волков А.А., Евдокимов В.Н. и др. - Препринт ИФВЭ 84-158, Серпухов, 1984.
14. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н. и др. - Одноэлектронные фотоприемники. - М.: Атомиздат, 1973, с. 83.
15. Васильченко В.Г., Евдокимов В.Н., Рахматов В.Е. и др. - Препринт ИФВЭ 84-157, Серпухов, 1984.
16. Васильченко В.Г., Лапшин В.Г., Монич Е.А. и др. - Препринт ИФВЭ 77-57, Серпухов, 1977.

17. Васильченко В.Г., Исаков В.В., Марин В.Н. и др. - Препринт ИФВЭ 84-159, Серпухов, 1984.
18. Shluter R.A. - In.: Proc. of Int. Conf. H.E. Physics.- New York, 1961, p. 91.
19. Унгер Г.Г. Оптическая связь. - М.: Связь, 1978, с. 54.

Рукопись поступила 3 января 1985 года.

Б.Ю.Балдин и др.

Спектрометры колец черенковского излучения на годоскопических ФЭУ
для измерения скоростей частиц с импульсами до 300 ГэВ/с.

Редактор М.Л.Фоломешкина, Технический редактор Л.П.Тимкина,
Корректор М.И.Онегина.

Подписано к печати 28.01.85 г. Т-01237. Формат 80х90/16.
Офсетная печать. Печ.л. 0,88. Уч.-изд.л. 0,83. Тираж 270.
Заказ 343. Индекс 3624. Цена 14 коп.

Институт физики высоких энергий, 142284, Серпухов Московской обл.

Цена 14 коп.

Индекс 3624.

П Р Е П Р И Н Т 85-40, И Ф В Э, 1985.
