

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-100

P13-99-100

Р.А.Астабатьян, С.П.Лобастов, Д.Т.Мадигожин,  
В.Д.Пешехонов, Ю.К.Потребеников

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА РПИ  
НА ОСНОВЕ СТРОУ

1999

## Введение

В современных экспериментах по физике высоких энергий в последнее время все более широкое применение находят детекторы рентгеновского переходного излучения (РПИ) на основе тонкопленочных дрейфовых трубок (строу) в качестве детектирующих элементов (см., например, [1]). Процессы, имеющие место в детекторах РПИ, достаточно хорошо изучены [2], поэтому при создании таких детекторов можно заранее оптимизировать их параметры с учетом требований конкретного эксперимента. Как правило, такие параметры, как количество модулей (число каналов регистрации), общая и радиационная длина, в значительной мере определяющие режетирующую способность детектора РПИ, задаются только условиями эксперимента и обычно оптимизации не подлежат.

В качестве объектов, подлежащих оптимизации, в настоящей работе выбраны методы выделения РПИ - фотонов, а также конструкция регистрирующей плоскости модуля, составленной из строу. Прототипом детектора, подлежащего оптимизации, выбран детектор РПИ установки NOMAD [3]. Характеристики радиатора (число слоев в модуле – 315, толщина полипропиленового слоя - 15 мкм, расстояние между слоями – 250 мкм), число модулей - 9, полная радиационная длина детектора РПИ  $0,1 \div 0,11 X_0$  при этом оставались неизменными.

### Расчет характеристик детектора РПИ для разных методов выделения фотонов

Хорошо известно, что спектральные характеристики РПИ (средняя энергия фотонов  $E_\gamma \approx 5-10$  кэВ; угловое распределение  $\Theta_\gamma \leq 1$  мср, средняя множественность поглощенных фотонов на единичный детектирующий элемент  $N_\gamma \sim 1$ ) таковы, что фотоны РПИ приходится регистрировать на фоне ионизационных потерь энергии первичной частицы, а флуктуации этого фона являются решающим фактором, влияющим на разрешающую способность детектора. Все современные действующие детекторы РПИ основаны на методе энерговыделения [4], когда к ионизационным потерям энергии частицы в детекторе добавляется энергия поглотившихся фотонов. Очевидно, что для минимизации вклада от первичной частицы единичный детектирующий элемент должен содержать

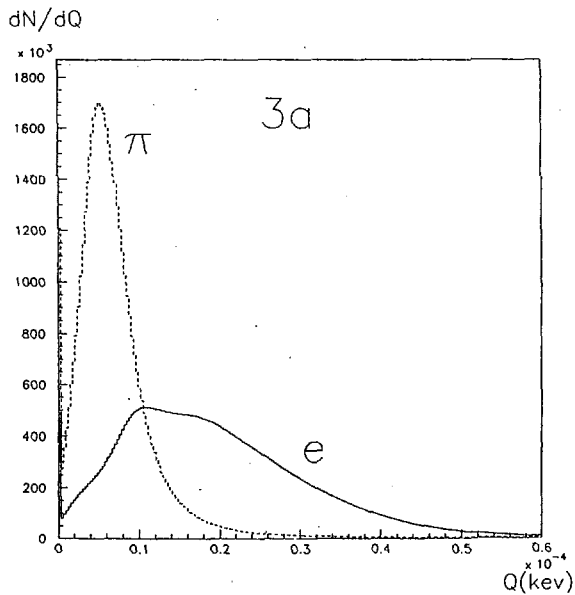


Рис. 1. Спектры энерговывделений в газе строу для электрона и  $\pi$ -мезона с импульсом 10 ГэВ/с

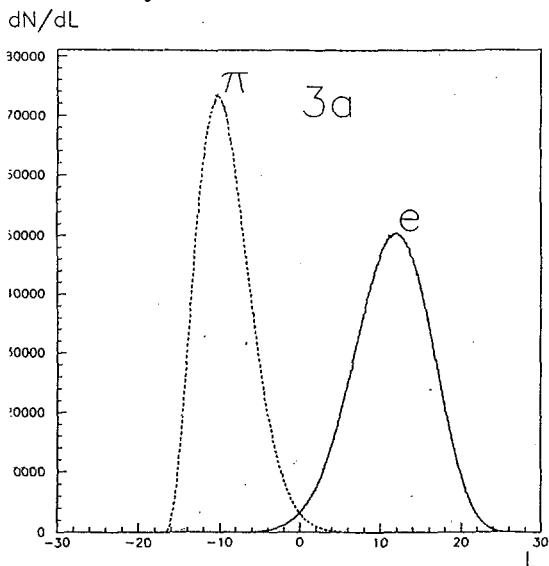


Рис. 2. Распределение параметра правдоподобия  $\pi$  - мезона и электрона с импульсом 10 ГэВ/с 9-модульного детектора РПИ для Q - метода

ограниченное количество вещества. Наиболее оптимальным, с точки зрения достижения наилучшей режекции частиц, является расположение после радиатора ряда тонких детектирующих элементов в единичном модуле [5,6]. Ясно, что такое построение детектора РПИ приводит к значительному увеличению детектирующих элементов. Поэтому в практических применениях в едином детектирующем элементе проводится многократная регистрация сигналов, превышающих данный порог по локальному энерговыделению (обычно 4–5кэВ). Эти локальные энерговыделения обусловлены  $\delta$  – электронами, образованными на следе первичной частицы и фотоэлектронами от поглощения переходного излучения. Такой метод регистрации принято называть кластерным (N - методом) [7,8], в противовес Q - методу, когда проводится суммирование энерговыделений в детекторе. Сравнение этих методов, с точки зрения достижения наилучшего разделения частиц, в настоящее время приводит к неоднозначным выводам из-за множества факторов, влияющих на возможность выделения фотонов РПИ в кластерном режиме. Однако наиболее принципиальным отличием двух этих методов является потеря информации о весе (энергии) фотонов РПИ в N - методе и числе фотонов в Q - методе. Поэтому определенный интерес представляет расчет и сравнение режектирующей способности детектора РПИ при сочетании двух этих методов, когда при идентификации используются оба признака: энерговыделение в детекторе и число кластеров [9].

Проведены расчеты детекторов РПИ для  $e/\pi$  - режекции изолированных частиц с импульсом 10 ГэВ/с при следующих методах выделения РПИ - фотонов:

1. Подсчет числа кластеров по выделенным группам строу от каждого модуля; этот метод позволяет оценить режектирующую способность детектора РПИ при организации быстрого триггера для предварительного отбора событий;
2. Подсчет числа кластеров в строу расположенных вдоль траектории частицы (N - метод);
3. По энерговыделению в строу расположенных вдоль траектории частицы (Q - метод);
4. По двумерным распределениям (Q, N).

Расчеты проводились с использованием системы GEANT [10], дополненной программами генерации и фотопоглощения РПИ. При этом проводилась коррекция на экранирование пространственного заряда и на конечное энергетическое разрешение детектора. Корректирующий коэффициент выхода РПИ принимался равным 0,5 во всех проведенных расчетах. Принималось также, что кластеры пространственно разделяются, если расстояние между ними превышает 1,6 мм. В пределах этой дистанции более чем один кластер принимался за один. Детектирующим элементом выбран строу диаметром 16 мм, изготовленный из каптоновой пленки толщиной 50 мкм. Рабочим газом служила смесь 70% Хе + 10% СО<sub>2</sub>+20% CF<sub>4</sub>. Были рассчитаны распределения энерговыделений в строу для режекции π-мезона и электрона, распределения кластеров в строу, суммы кластеров вдоль траектории и по отобранным группам. Эти рассчитанные распределения являются исходными для определения зависимости коэффициента режекции π - мезона от эффективности регистрации электрона всеми перечисленными методами.

Имея функции  $f_{\pi}(Q)$ ,  $f_e(Q)$  распределения энерговыделения  $Q$  (рис. 1) в единичном модуле и двумерные функции распределений  $f_{\pi}(Q,N)$ ,  $f_e(Q,N)$ , где  $N$  - число кластеров в единичном модуле, выбором случайных комбинаций  $Q_i$  или  $(Q_i, N_i)$  для электрона и π - мезона, вычислялся параметр правдоподобия  $L = \sum_{i=1}^n \log(f_e / f_{\pi})$ . При этом исходные функции распределений получены усреднением по всем 9 модулям и считались некоррелированными.

На рис. 2 приведены распределения параметра правдоподобия  $L$  для π - мезона и электрона, полученные методом статистических испытаний для  $Q$  - метода. Отметим удовлетворительное согласие распределений на рис. 1,2 с аналогичным в работе [3]. Если в распределениях типа приведенного на рис. 2 выбрать определенное пороговое значение для  $L$ , выше которого находится доля электронов, и определить коэффициент режекции π - мезонов, то между ними получаются зависимости, представленные на рис.3(кривые 3а, 4а). Нумерация кривых соответствует номерам перечисленных методов идентификации. Аналогичные зависимости

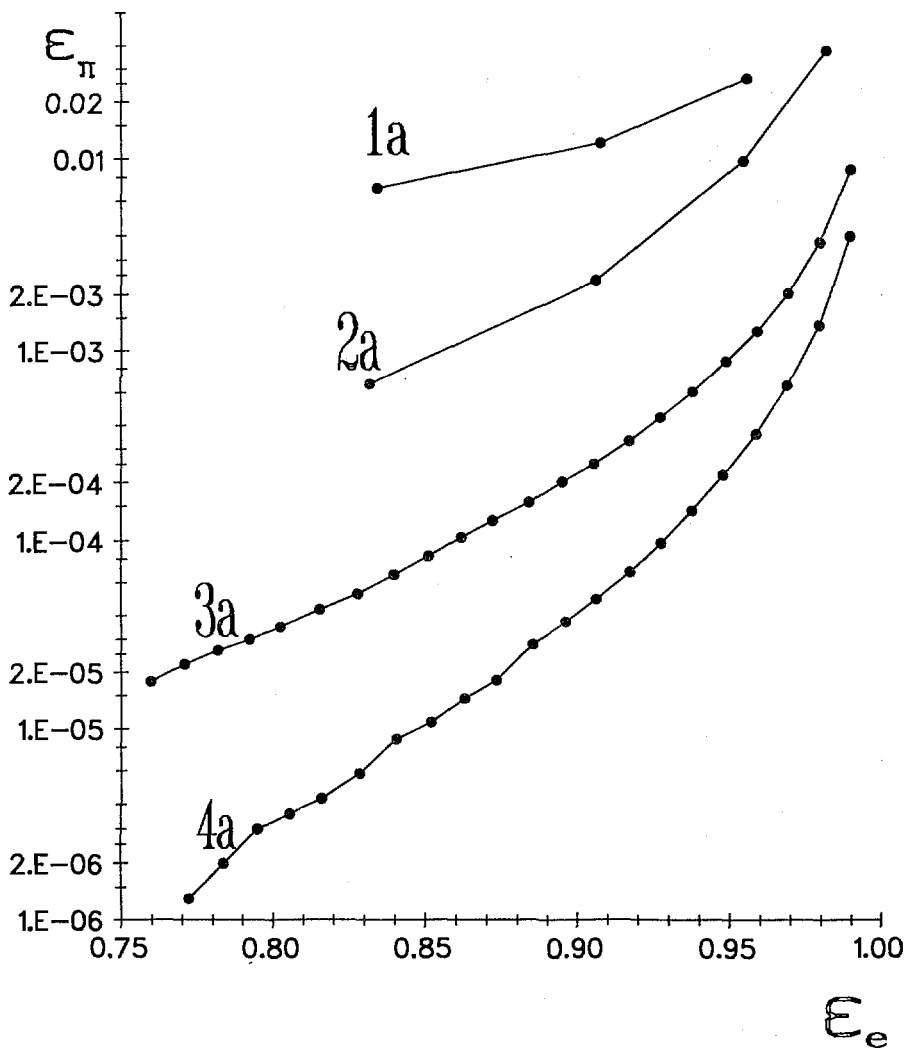
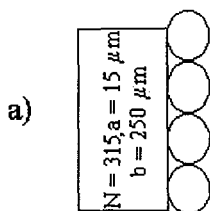
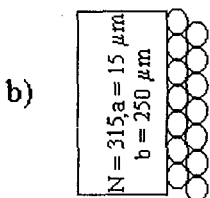


Рис. 3. Зависимость коэффициента режекции  $\pi$  - мезона от эффективности регистрации электрона для разных методов выделения фотонов РПИ в строу



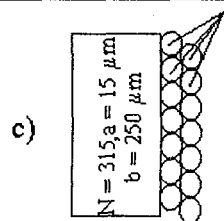
$$D = 16 \text{ mm} \quad P = 1 \text{ atm} \quad X = 0,101 X_0$$

$$N_m = 9 \quad N_{ch} = N_0$$



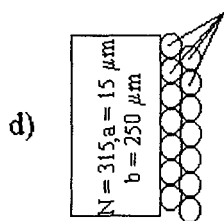
$$D = 8 \text{ mm} \quad P = 1 \text{ atm} \quad X = 0,104 X_0$$

$$N_m = 9 \quad N_{ch} = 4 N_0$$



$$D = 8 \text{ mm} \quad P = 1 \text{ atm} \quad X = 0,104 X_0$$

$$N_m = 9 \quad N_{ch} = N_0$$



$$D = 8 \text{ mm} \quad P = 2 \text{ atm} \quad X = 0,111 X_0$$

$$N_m = 9 \quad N_{ch} = N_0$$

Рис. 4. Схематический вид рассматриваемых модификаций модуля детектора РПИ.

$D$  – диаметр строу,  $P$  – давление газовой смеси,  $X$  – количество вещества в детекторе РПИ,  $N_m$  – число модулей,  $N_{ch}$  – число регистрационных каналов

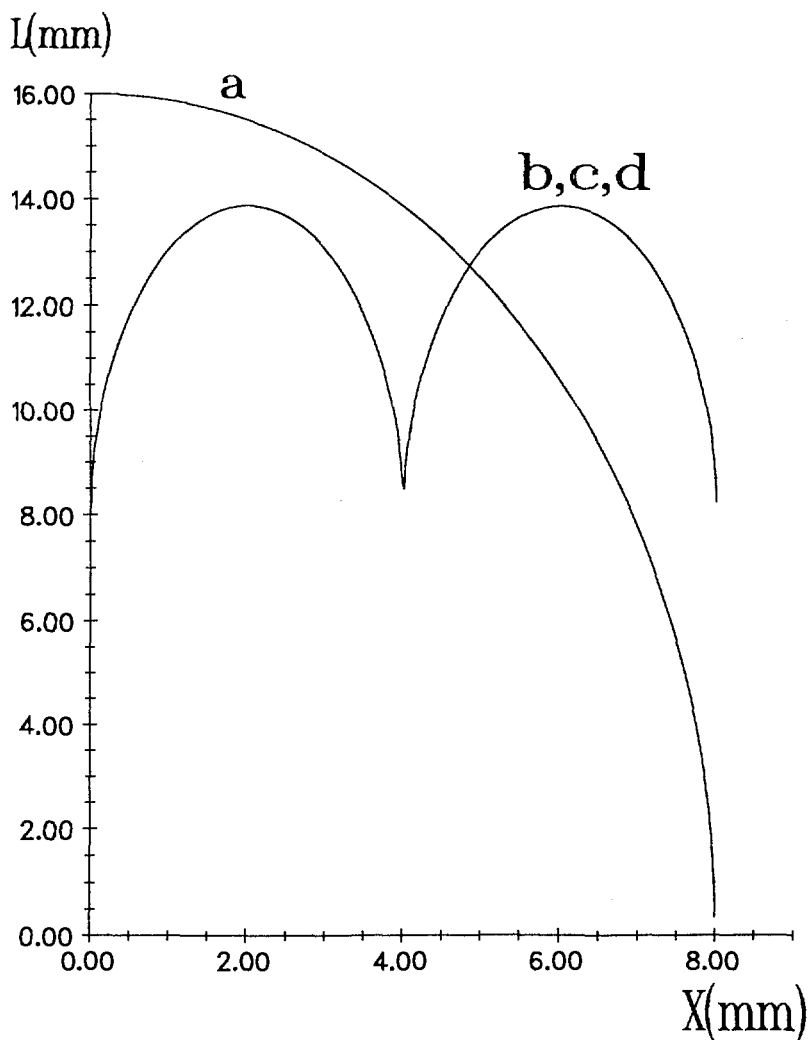


Рис. 5. Зависимость длины газового промежутка по пути частицы от точки влета в строу, при нормальном падении



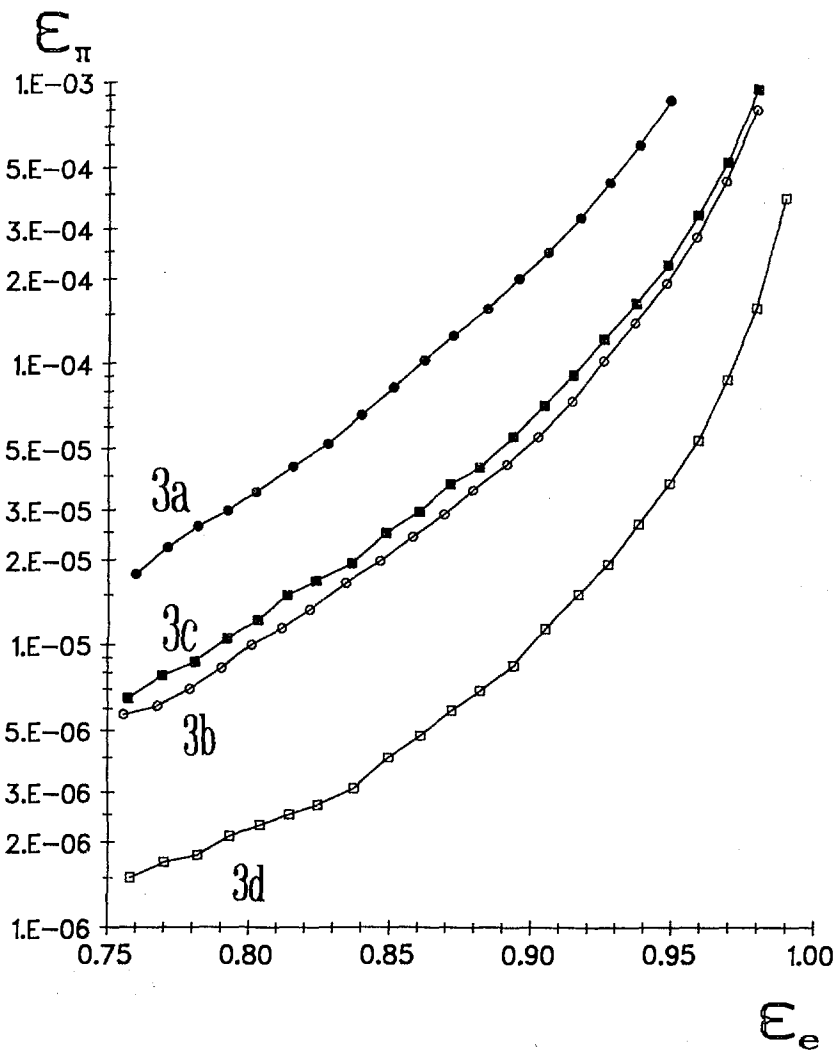


Рис. 6. Зависимость коэффициента режекции  $\pi$  - мезона от эффективности регистрации электрона для разных модификаций модуля; Q - метод

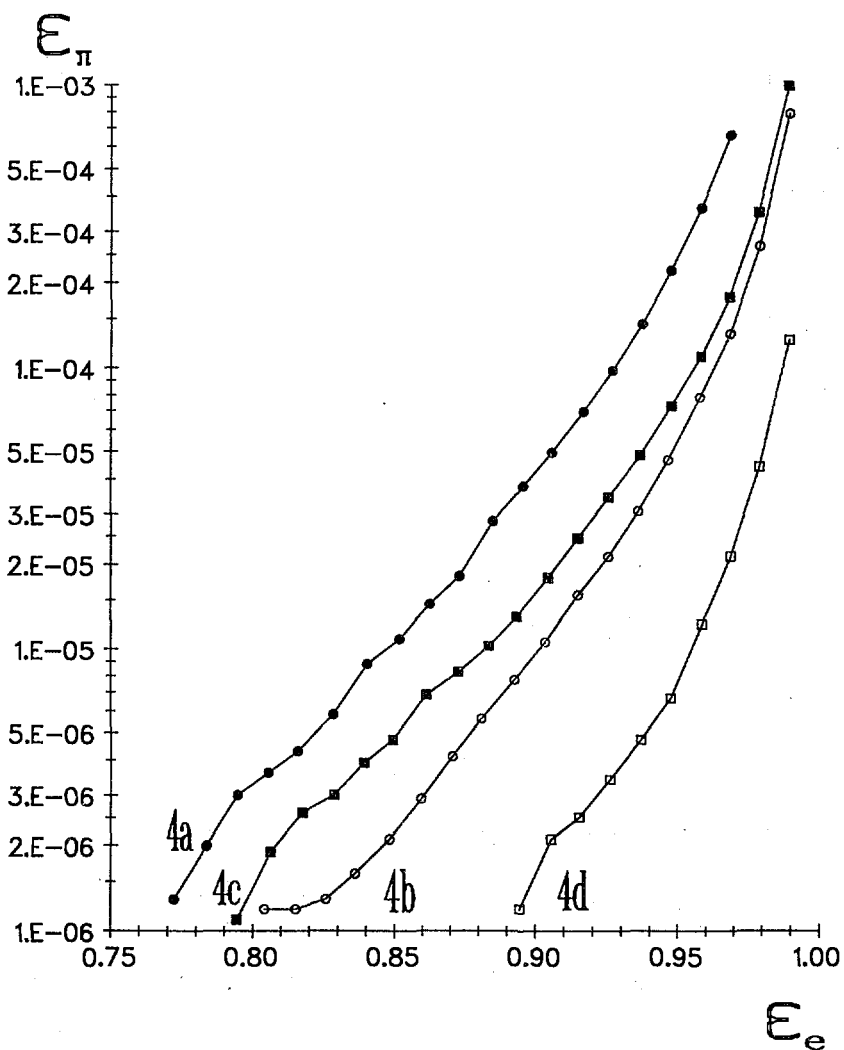


Рис. 7. Зависимость коэффициента режекции  $\pi$  - мезона от эффективности регистрации электрона для разных модификаций модуля; (Q, N) - метод.

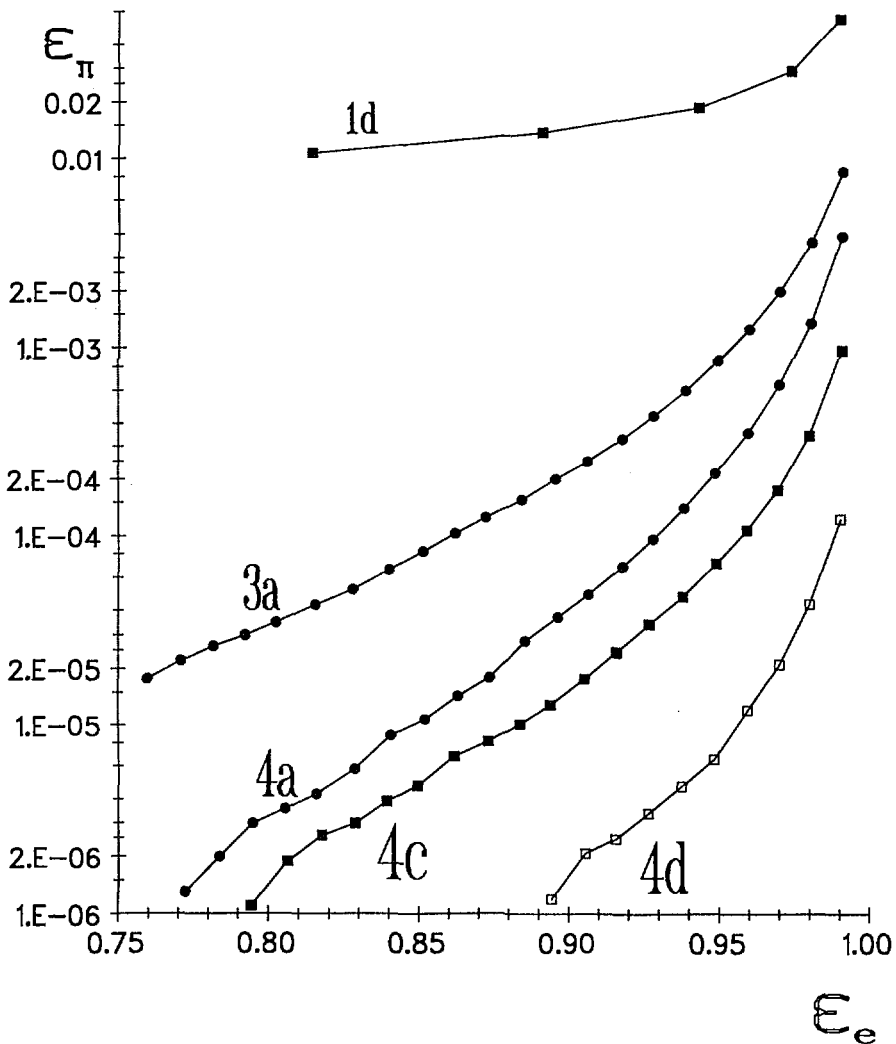


Рис. 8. Конечные результаты оптимизации. Зависимость коэффициента режекции  $\pi$ -мезона от эффективности регистрации электрона

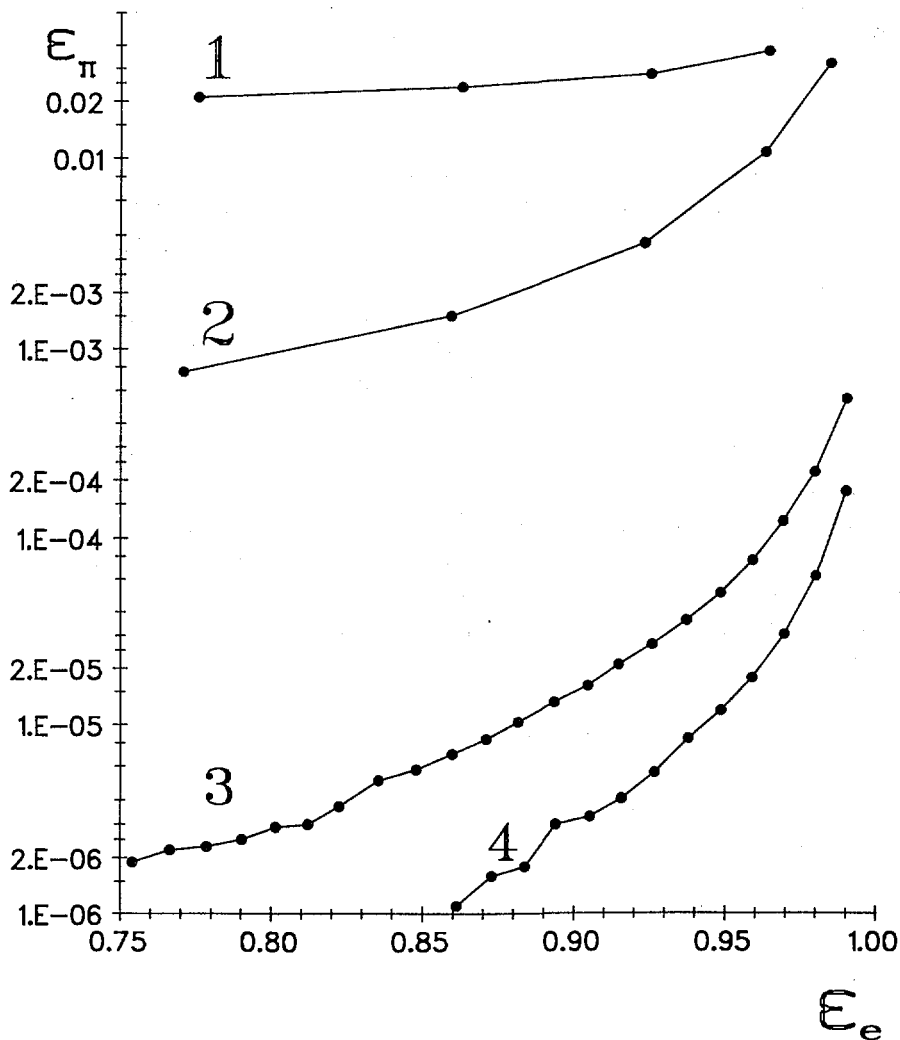


Рис. 9. Зависимость коэффициента режекции  $\pi$  - мезона от эффективности регистрации электрона; расчет для установки по изучению редких распадов

для кластерного метода (кривые 1а, 2а) получаются непосредственно из распределений суммы кластеров в строу вдоль траектории частиц или по сформированным группам строу (в расчетах группа состояла из 10 строу). Кривая 4а рис. 3 наглядно демонстрирует преимущество идентификации по двум признакам: общему энерговыделению и числу кластеров в строу.

### **Оптимизация конструкции детектора РПИ**

Недостатком детекторов РПИ на основе строу является цилиндрическая форма строу, не обеспечивающая равномерного поглощения фотонов РПИ и приводящая к дополнительным флуктуациям, ухудшающим режектирующую способность детектора. Поэтому представляет определенный интерес расчет детекторов РПИ с более оптимальным расположением строу, с компенсацией нечувствительных областей, обусловленных формой строу.

На рис. 4 представлено схематическое изображение одиночных модулей, составляющих детектор, для начально выбранного прототипа (а) и модифицированных вариантов (b, c, d) с наложенными друг на друга плоскостями, составленными из строу половинного диаметра. Такая конструкция существенно уменьшает флуктуации, связанные с цилиндрической формой строу. Это видно из рис. 5, на котором представлена зависимость длины газового промежутка по пути частиц от точки влета в строу при нормальном падении частиц. Насколько это сказывается на режектирующей способности, показывают конкретные расчеты детекторов РПИ, составленных из модулей, изображенных на рис. 4. Расчеты проводились по всем четырем представленным выше методам выделения РПИ - фотонов в строу. Нумерация кривых на всех последующих рисунках аналогична нумерации на рис.3: цифры означают способ выделения фотонов, а буквы - принадлежность к типу модуля РПИ (рис. 4).

На рис. 6, 7 представлены результаты расчетов по Q - и (Q, N) - методам, соответственно. Видно существенное улучшение режектирующей способности при замене плоскости из строу диаметром 16 мм двойным слоем из строу половинного диаметра. Отметим, что кривые (3b, 4b) на этих рисунках соответствуют

случаю съема сигналов с каждого строу и, следовательно, увеличению числа каналов регистрации в четыре раза. Объединение группы из четырех строу в один (кривые 3с, 4с) приближают к начальным условиям выбранного прототипа.

Одним из преимуществ детекторов РПИ на основе строу по сравнению с традиционными пропорциональными камерами является возможность создания более компактных модулей путем увеличения давления газовой смеси. Кривые (3d, 4d) рис. 6, 7 демонстрируют существенное улучшение режектирующей способности детектора РПИ при увеличении давления газовой смеси до двух атмосфер. Однако отметим, что в случае, когда четыре строу объединялись в один регистрационный канал, не учитывалось увеличение эквивалентной емкости, что может заметно ухудшить пространственное разделение кластеров в строу. Для учета этого фактора, а также более корректной оценки пространственного разрешения кластеров необходимо моделировать форму сигнала с строу с учетом всех факторов, влияющих на форму сигнала, в том числе процессов диффузии. Такое моделирование не проводилось, а пространственное разделение кластеров принималось равным 1,6 мм во всех проведенных расчетах.

Конечные результаты расчетов детекторов РПИ при неизменных начальных условиях с выбором наилучших результатов для каждого шага оптимизации демонстрирует рис. 8:

- для выбранного прототипа; идентификация Q - методом (3а);
- для выбранного прототипа; оптимизация (Q, N) - методом (4а);
- для оптимизированной конструкции модуля, с наложением плоскостей, составленных из строу половинного диаметра с объединением в регистрационный канал групп из 4-х строу; (Q, N) - методом (4с);
- с давлением газовой смеси 2 атм; (Q, N) - методом (4d).

Кривая 1d рис. 8 демонстрирует режекцию  $\pi$  - мезонов при организации быстрого триггера для наиболее оптимального варианта детектора РПИ. Для такого варианта проведен расчет детектора РПИ предполагаемой установки NA48 по изучению редких распадов. Уменьшение общей длины детектора до 80 см (задаваемой геометрическими размерами планируемой установки)

при этом проводилось за счет уменьшения размеров радиаторов до 275 слоев в модуле. Результаты расчетов в принятой нумерации кривых, соответствующей методам выделения фотонов РПИ для варианта (d) модуля, представлены на рис. 9. Видно, что предложенные методы оптимизации позволяют достичь на предполагаемой установке NA48  $e/\pi$  - режекции изолированных частиц с импульсом 10 ГэВ/с на уровне  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ , при 90% эффективности регистрации электронов.

### Заключение

Предложенные методы оптимизации могут существенно улучшить режестирующие возможности детекторов РПИ. При этом авторы осознают, что оба предложенных варианта оптимизации связаны с некоторым усложнением конструкции и существенным увеличением регистрирующей электроники, требующей одновре - менной регистрации энерговыделения и числа кластеров в строу.

С другой стороны, менее оптимистичные оценки пространственного разрешения кластеров в строу и реальные экспериментальные условия не допускающие считать детектируемые частицы изолированными, не позволяют рассматривать значения рассчитанных коэффициентов  $e/\pi$  - режекции как абсолютные.

Авторы выражают благодарность сотруднику Физического института им. П.Н.Лебедева И. Гавриленко за предоставление программ генерации и фотопоглощению РПИ.

### Литература

1. ATLAS Collaboration. ATLAS Inner Detector Technical Design Report, v.1., CERN/LHCC/97-16, 1997.
2. Dolgoshein B. Nucl.Instr. and Meth. A 326, 1993, p.434.
3. Bassompierre G. et al., Nucl.Instr. and Meth. In Phys. Res. A 411, 1998, p.63.

4. Алиханян А.И. и др. ЖЭТФ, т.41, Вып.6, 1961, с.2002.
5. Испирян К.А. и др. Труды международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий, Ереван, 12-17 мая 1977, с.209, Ереван, ЕрФИ, 1977.
6. Оганесян А.Г. и др. Труды международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий, Ереван, 12-17 мая 1977, с.269, Ереван, ЕрФИ, 1977.
7. Ludlman T. et al. Nucl.Instr.and Meth. 180, 1981, p.413.
8. Fabjan C.W. et al. Nucl.Instr. and Meth. 185, 1981, p.119.
9. Astabatyán R.A. et al. Nucl.Instr. and Meth. A219, № 1, 1983, p. 78.
10. Brun R., Carminati F. GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library, Writeup W 5013, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 апреля 1999 года.