



Институт Теоретической и  
Экспериментальной Физики

20 – 03

К.Е. Гусев, А.Ю. Соколов.

CERN LIBRARIES, GENEVA



CM-P00053584

**Многопроволочные пропорциональные камеры  
спектрометра МАГ**

**Москва**

**2003**

---

**многопроволочные пропорциональные камеры спектрометра МАГ:**  
препринт ИТЭФ 20 -03/

Е.Гусев, А.Ю.Соколов. М. 2003. 29с.

Анализируются данные по работе многопроволочных пропорциональных камер спектрометра МАГ. Прослеживается прохождение сигнала от заряженной частицы с момента возникновения в камерах до выхода схем усиления. Приводится алгоритм нахождения треков. Изучается влияние подаваемого напряжения, порогового напряжения в электронных схемах усиления сигнала и загрузки на эффективность камер. Рассматриваются особенности отдельных камер и общие закономерности. В процессе длительной работы камер наблюдается эффект старения.

**Multiwire proportional chambers MAGE spectrometer.**

E. Gusev, A. Yu. Sokolov.

The work of multiwire proportional chambers of a spectrometer the MAG is analyzed. The signal from passage of the charged particle from beginning up to an output of schemes of amplification is described. The algorithm of finding of tracks is given. Influence of a submitted voltage, a threshold voltage of electronic schemes of amplification of a signal and beam intensity on efficiency of chambers is estimated. Features of separate chambers and the general laws are considered. As a result of long work of chambers the effect of ageing is observed.

с. 13, список лит. -16 найм.

## 1. Введение

Многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) являются основной частью спектрометра МАГ [1,2]. В настоящее время спектрометр расположен на протонном пучке ускорителя ИТЭФ. На спектрометре проводятся исследования свойств атомных ядер методом адрон-гамма совпадений.

Впервые МПК для регистрации частиц были предложены группой Шарпака в 1968 году [3]. С тех пор многопроволочные пропорциональные камеры использовались во множестве экспериментов. Не представляется возможным перечислить все. Отметим два эксперимента, в которых параметры пропорциональных камер близки к нашим, указывая их особенности. Ссылки на другие эксперименты могут быть найдены в [4] и материалах специальной конференции по проволочным камерам [5].

Телескоп из многопроволочных пропорциональных камер для эксперимента NA24 в Церне [6] состоял из 22 плоскостей камер. Диаметр проволочек равнялся 25 мкм, шаг проволочек - 3 мм, а размер чувствительной области -  $2 \times 2$  м и  $1 \times 1$  м для разных камер. Камеры работали на смеси газов  $\text{Ar}(80\%) + \text{CO}_2(20\%) + \text{фреон 13B1}(0,15\%)$  при интенсивности  $2 \cdot 10^7$  частиц на сброс. Была замечена необходимость подачи напряжения на проволочки поддержки.

В двух камерах, с 128 проволочками, используемых в ОИЯИ Дубна [7], шаг проволочек составлял 2.5 мм, а межэлектродный зазор 7 мм. Камеры работали на смеси газов  $\text{Ar}(67\%) + \text{изобутан}(30\%) + \text{фреон 13B1}(0,2\%) + \text{метилаль}(3\%)$ . Удалось получить эффективность 99.6% при напряжении 4.57 кВ. Ширина плато эффективности составляла 600 В.

## 2. Конструкция пропорциональных камер детектора МАГ

В настоящее время система многопроволочных пропорциональных камер спектрометра МАГ состоит из 25 координатных плоскостей с общим числом сигнальных проволочек около 10 тысяч. Координатные плоскости объединены в блоки, содержащие как взаимно ортогональные Y и Z -проекции, так и плоскости с наклонным расположением проволочек ( $37^\circ$  к вертикальной оси Z). Имеется две плоскости с наклоном проволочек в одну сторону (U) и две с наклоном в другую (W). Объединение камер в блоки позволяет собрать их в компактную конструкцию, достаточно универсальную и удобную в эксплуатации. При необходимости ремонта камер можно получить доступ к любой из плоскостей без полной разборки блока. Для ортогональных плоскостей шаг сигнальных проволочек равен 2.5 мм, для наклонных - 2 мм. Детали конструкции и технологии сборки камер приведены в [8].

Расположение блоков камер и расположения камер в отдельных блоках дано рис.1. Стрелками отмечены направления считывания соответствующих мер. В этих местах на камерах расположены преусилители. Ответствующие проволочки расположены перпендикулярно стрелкам для Y Z камер и под соответствующим углом для W и U камер. Длины Y и Z проводов для одной камеры одинаковы, длины W и U проводов уменьшаются от центра к краям.

Значения координат X пропорциональных камер даны в таблице 1, при этом начало координат совпадает с центром магнита.

Каждая из камер была расположена симметрично относительно осей Y и Z. Более точно определение положения камер проводится с помощью юстировки восстановления прямых треков частицы, проведенных через передние и задние камеры при выключенном магните. При этом определяются сдвиги и ворота камер для наилучшего проведения треков.

Ближе всего к мишени расположена пучковая камера 29Y с размером чувствительной области 240×240 мм.

Перед магнитом расположены три блока малых камер с размером чувствительной области 480×1280 мм. Первый блок составляют камеры 5Y, 6U и 7Z. Во второй блок входят камеры 8Y, 9W и 10Z. Третий составляют камеры 11Y, 12Y, 13Z и 14Z.

**Таблица 1. Координата X пропорциональных камер спектрометра МАГ вдоль оси X. Начало координат совпадает с центром магнита. Мишень имеет координату -255 см.**

камеры	X, см
29Y	-242.8
5Y	-211.4
6U	-209.4
7Z	-207.4
8Y	-171.1
9W	-169.1
10Z	-167.1
11Y	-152.5
12Y	-150.5
13Z	-148.5
14Z	-146.5
15Y	177.8
16Y	179.8

камеры	X, см
17Z	181.8
18Z	183.8
19Y	200.2
20U	224.1
21Z	204.2
22Y	222.1
23W	202.2
24Z	226.1
25Y	243.4
26Y	245.4
27Z	247.4
28Z	249.4

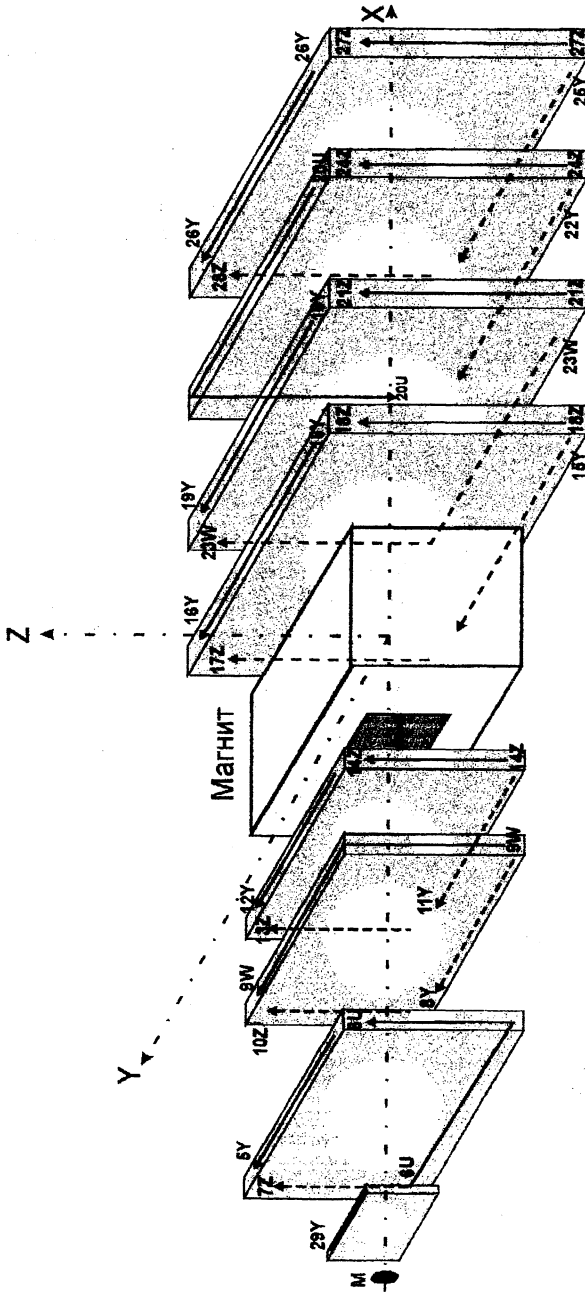


Рисунок 1 Расположение пропорциональных камер спектрометра МАГ. Стрелками отмечены направления соответствующих камер. М мишень.

Пропорциональные камеры за магнитом имеют размер чувствительной бласти 880×1840 мм. Первый блок составляют камеры 15Y, 16Y, 17Z и 18Z. Второй блок образуют камеры 19Y, 23W и 21Z. В третий блок входят камеры 2Y, 20U и 24Z. Четвертый составляют камеры 25Y, 26Y, 27Z и 28Z.

Для сигнальной анодной плоскости используется золоченая проволока из ольфрам-рениевого сплава ВР-20 диаметром 20 мкм. Отрицательное высокое напряжение подается на катодные пленочные электроды, изготовленные из олиэтилентерефталатовой пленки толщиной 20 мкм, на которую нанесено лектродпроводящее покрытие (размельченный углерод со смолой ТФ-60) толщиной 14 мкм, имеющее сопротивление 400 Ом/см. Катодные плоскости асположены по обе стороны от анодной плоскости. Расстояние между анодом катодом равно 7 мм, между катодными плоскостями, соответственно, - 14 мм. Чтобы уменьшить провисание проволочек и неустойчивость в лектростатическом поле, перпендикулярно к проволочкам с двух сторон от их натягиваются поддерживающие изолированные провода. В передних Z камерах и в задних Y камерах имеется одна пара поддержки, в задних Z камерах - две пары поддержки. Проволоки поддержки в паре связываются друг другом с помощью тонкой нейлоновой лески: в передних Z и задних Y камерах - в трех местах, в задних Z камерах - в семи местах. В передних U и W камерах имеется одна пара поддержки, в задних U и W камерах - две пары оддержки. На поддерживающую линию подается напряжение 1.8 кВ. При величении напряжения на поддерживающей линии могут возникнуть разряды с оддерживающей линии на сигнальные проволочки.

К каждой сигнальной (анодной) проволочке подключен импульсный редусилитель. Предусилители скомпонованы в блоки по 32 штуки и асполагаются непосредственно на камерах, соединяясь с проволочками через азъемы. Усиленные сигналы передаются по витым парам (длиной около 10 м) блоки формирования и запоминания сигнала.

### 3. Работа газовой системы

Камеры работают на смеси газов  $\text{Ar}(70\%)+\text{CO}_2(29.80\%)+\text{фреон 13B1}(0,2\%)$  магическая смесь). Так как трудно обеспечить подачу малого количества фреона напрямую, поступаем следующим образом. Вначале приготавливаем смесь з аргона и фреона в следующем соотношении  $\text{Ar}(97\%)+\text{фреон}(3\%)$ , затем аждадая газовая компонента ( $\text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2$ , смесь  $\text{Ar}$  и фреона) из баллона через реуктор, уменьшающий давление на выходе из баллона, поступает на регулятор асхода газа, с помощью которого меняется и контролируется скорость протоа данной компоненты. Выходы трех регуляторов расхода газа объединяются,

и образовавшаяся рабочая смесь поступает в камеры. Устанавливая определенные скорости газовых протоков в регуляторах расхода  $\text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2$  и смеси, получаем рабочий газ в данной пропорции. В системе подачи газа в рабочем режиме было задействовано по два баллона с каждым компонентом ( $\text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2$  и смеси). Редукторы баллонов в паре выставляются на небольшое, но разное выходное давление (с разницей в несколько атмосфер). Такое подключение обеспечивает безостановочную подачу газа из рабочего баллона (баллон с установленным большим выходным давлением) и возможность замены баллона. Также имеется возможность менять поток газа в отдельных камерах.

Рабочая смесь подается в камеры снизу, т.к. она тяжелее воздуха. Постепенно вытесняя воздух через незакрытое отверстие вверху, газ заполняет весь объем камеры.

Суммарный объем камер составляет 400 л. Суммарный проток газов составляет 80 литров в час, что соответствует заполнению камер в среднем за 5 часов.

Вместе с тем, заполнение камер было неравномерным, поэтому для выхода в режим некоторым камерам требовалось больше времени. В общем случае, поток хватает всем камерам для выхода в режим. Во время сеанса в некоторых экспозициях был уменьшен проток газа в два раза, при этом не наблюдалось существенного изменения эффективности камер.

При работе давление газа внутри камер практически равняется атмосферному. Изменение атмосферного давления отражается на работе камер. При увеличении атмосферного давления эффективность камер увеличивалась.

Исследования влияния добавления гасящего газа (потенциал ионизации которого меньше потенциала ионизации основного газа) к магической смеси показали, что добавление к магической смеси 4% метилала приводит к значительному улучшению характеристик смеси [9]. При небольшом сдвиге плато эффективных напряжений наблюдается увеличение длины плато максимальной эффективности по напряжению и отсутствие изгиба в конце плато. Таким образом, переход на смесь

$\text{Ar}(66\%)+\text{изобутан}(29.8\%)+\text{метилаль}(4\%)+\text{фреон 13В1}(0,2\%)$

должен поднять эффективность наших многопроволочных пропорциональных камер.

#### **4. Регистрация заряженных частиц пропорциональной камерой, амплитуда сигнала**

Основные принципы работы МПК приведены в работе Sauli [10]. Рассмотрим работу пропорциональных камер, обращая особое внимание на параметры, важные для пропорциональных камер детектора МАГ.

Проходя через камеру, заряженная частица ионизует вещество, приводя к образованию дельта-электронов. При малой величине электрического поля дельта-электроны просто собираются на аноде. Однако, если электроны за время между двумя соударениями наберут энергию, превышающую потенциал ионизации газа, они сами вызовут ионизацию, что приводит к увеличению количества носителей заряда. Образующиеся при этом ионы дрейфуют к катодам, электроны - к сигнальному аноду. В пропорциональных камерах электронная вина развивается на расстоянии несколько десятков микрон от сигнальной нити, и при типичной скорости дрейфа электронов 5 см/мкс они пролетят это расстояние примерно за 1 нс. Такой короткий импульс от электронов практически не дает вклад в наблюдаемый сигнал, который в основном индуцируется движением положительных ионов.

В используемой нами газовой смеси основным компонентом является аргон. Чистый аргон позволяет получить коэффициент газового усиления  $10^3$ - $10^4$  для больших напряжений. Образующиеся при этом в лавине возбужденные и ионизованные атомы не позволяют дальше увеличивать коэффициент газового усиления.

Возбуждение аргона снимается с испусканием гамма кванта с энергией 0.6 эВ, что выше ионизационного потенциала вещества, образующего катод. Эти электроны, образующиеся на катоде, приводят к подложным лавинам.

С другой стороны, ионы аргона мигрируют к катоду и нейтрализуются с испусканием электрона, что приводит к испусканию фотона или к выбиванию одного электрона из катода и подложной лавине.

Газ  $\text{CO}_2$  с большим количеством вращательных и колебательных возбужденных состояний позволяет поглотить фотоны, испущенные аргоном. Полученная  $\text{CO}_2$  энергия идет либо на упругие столкновения, либо на диссоциацию молекул. Увеличение содержания  $\text{CO}_2$  по отношению к Ar уменьшает коэффициент газового усиления при том же напряжении, вместе с тем становится возможным увеличивать рабочее напряжение, что в итоге приводит к увеличению коэффициента газового усиления.

В соответствии с работой [10], число пар ионов  $n_1$ , образующихся на пути заряженной частицы, вычисляется по формуле

$$= \sum ((dE/dx)_i / e_{0i} \cdot w_i) \cdot l,$$

где  $w_i$  - относительный вес данного атома,  $e_{0i}$  - потенциал ионизации атома,  $l$  - длина пробега частиц.

Потенциал ионизации в Ar составляет 26.3 эВ, в  $\text{CO}_2$  - 32.8 эВ, а  $dE/dx$  в минимуме ионизации равен 2541 эВ/см и 3280 эВ/см [11] соответственно. Наши камеры имеют межкатодный зазор 1.4 см, поэтому в камере образуется в среднем 7 пар ионов ( $n_1 = (2541/26.3 \cdot 0.7 + 3280/32.8 \cdot 0.3) \cdot 1.4$ ) = 137).



Суммарное число образовавшихся лавинных пар  $N$  связано с числом первично образованных пар  $n_1$  через коэффициент газового усиления  $M$ .

$$N = n_1 \cdot M$$

В неоднородном электрическом поле коэффициент газового усиления  $M$  вычисляется через первый коэффициент Таунсенда  $\alpha$  (число электрон-ионных пар, производимых электроном, на единицу длины)

$$M = \exp \left\{ \int_a^b \alpha(r) dr \right\}$$

Параметр  $\alpha$  может быть задан с помощью аппроксимации Корфа

$$\alpha/P = A \cdot \exp(-B \cdot P/E),$$

где  $P$  – давление,  $E$  – электрический потенциал (для образования лавины в расстояниях, меньших чем расстояние между проволочками).

Значения параметров составляют для чистого Аргона  $A(\text{Ar}) = 14 \text{ см}^{-1} \cdot \text{Торр}$ ,  $B(\text{Ar}) = 180 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Торр}$ , для чистого углекислого газа  $A(\text{CO}_2) = 20 \text{ см}^{-1} \cdot \text{Торр}$ ,  $B(\text{CO}_2) = 466 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Торр}$  [10]. Для смеси газов с 70% Ar и 30% CO<sub>2</sub> определяя коэффициенты через коэффициенты для чистых газов следующим образом:

$$A = 0.7 \cdot A(\text{Ar}) + 0.3 \cdot A(\text{CO}_2), \quad B = 0.7 \cdot B(\text{Ar}) + 0.3 \cdot B(\text{CO}_2).$$

В [9] приведены несколько отличные значения параметров  $A$  и  $B$ , а также приведены значения для отдельных смесей газов.

В [12] предпринята попытка определения коэффициентов  $A$  и  $B$ . Для произвольного содержания Ar и CO<sub>2</sub>, показано, что коэффициенты близки к их определению через коэффициенты  $A(\text{Ar})$ ,  $A(\text{CO}_2)$ ,  $B(\text{Ar})$  и  $B(\text{CO}_2)$ .

В области вблизи проволочки напряженность поля  $E = CV / (2\pi\epsilon_0 r)$ ,

где  $C$  – погонная емкость камеры,  $C = 2\pi\epsilon_0 / [\ln(b/d) - \ln(2\pi a/d)]$ ,

$b$  – расстояние от анода до катода ( $b = l/2 = 7 \text{ мм}$ ),  $a$  – радиус проволочки,

$d$  – расстояние между проволочками,  $V$  – напряжение на катоде,

$\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума ( $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ).

Рассмотрим результаты вычислений газового усиления по вышеприведенным формулам для смеси газов Ar(70%)+CO<sub>2</sub>(30%) для разных напряжений шага проволочек 2 и 2.5 мм, При расстоянии между проволочками  $d = 2.5 \text{ мм}$  напряжении на катоде

$V = 4.4 \text{ кВ}$  получаем коэффициент газового усиления  $M = 1.28 \cdot 10^5$ .

При  $V = 4.0 \text{ кВ}$   $M = 2.46 \cdot 10^4$ .

При  $V = 3.8 \text{ кВ}$   $M = 1.09 \cdot 10^4$ .

При  $V = 3.6 \text{ кВ}$   $M = 4.88 \cdot 10^3$ .

Уменьшение расстояния между проволочками до 2 мм, как у наклонных камер, приводит к уменьшению коэффициента газового усиления на порядок. Так, для напряжения 4.0 кВ коэффициент газового усиления составляе

азовался заряд. Также из-за конечной скорости заряженной частицы сигнал передней камеры 5Y приходит на 15 нс раньше, чем от задней камеры 28Z. азброс задержки срабатывания компаратора K521CA4 по выходу "быстрое"  $\Delta$  составляет 15 нс.

аким образом, разрешающее время МПК и электроники, обеспечивающее % эффективность регистрации, составляет примерно 60 нс.

истема приема и запоминания информации с пропорциональных камер за-кается синхронимпульсом от ускорителя и работает непрерывно в течение о времени сброса пучка на мишень, независимо от прихода мастерного нала. Сигнал с каждой проволочки поступает в ОЗУ емкостью 16 бит. Адрес ыки ОЗУ формируется в виде кода Грея и меняется с периодом  $T=70$  нс. В ьльтате в каждую ячейку записывается состояние канала (наличие или от-тствие сигнала с проволочки) в момент смены адреса данной ячейки на сле-ший. Длительность импульса сформированного для записи сигнала с про-рочек составляет  $160 \pm 20$  нс, т.е. сигнал записывается в две или три ячейки.

Таким образом, в каждый момент времени в ОЗУ содержится информация о остояниях проволочки, отделенных друг от друга временным интервалом 0 нс, так что время памяти ОЗУ составляет 1120 нс, а мертвое время канала ыстрации сигнала с проволочки составляет порядка 200 нс.

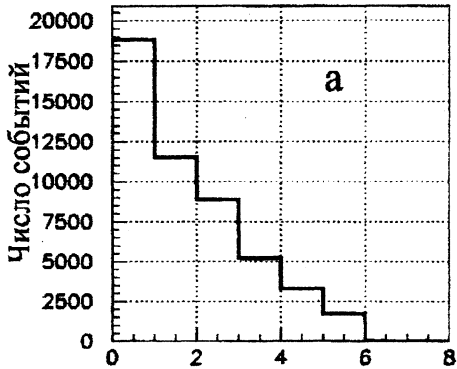
астерный сигнал, который задержан относительно реального события на еделенное время, останавливает счетчик адреса в некотором состоянии. Со-ние ОЗУ, относящееся к зарегистрированному событию, считывается из ьветствующей ячейки. По окончании передачи информации о событии в  $\Delta$  работа счетчика адреса возобновляется. При этом время считывания ин-мации с камер в ЭВМ составляет порядка 15 мкс.

истема считывания информации использует принцип приоритетного коди-ния, т.е. считываются только те ячейки, в которых записаны сигналы. Ин-мация о подряд сработавших проволочках (кластерах) передается в ЭВМ из интерфейс в стандарте КАМАК.

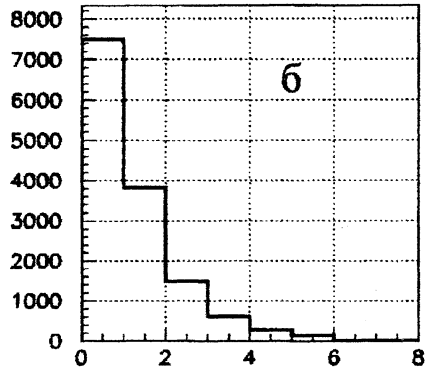
## 6. Кластеры

ажным параметром оценки правильности работы камер является размер ьтера. В идеальном случае, когда частица летит перпендикулярно камере, ькна сработать только одна проволочка ближайшая к траектории (размер ьтера равен 1). К увеличению количества многокластерных событий при-ит как наклон трека, так и дельта-электроны, отошедшие на большое рас-ние от трека частицы. Все это может приводить к ухудшению простран-ного разрешения. В идеальном случае, когда размер кластера равен 1, про-нственное разрешение пропорциональных камер составляет  $d/\sqrt{12}$  [15]. С ьтом кластерности оно может ухудшаться

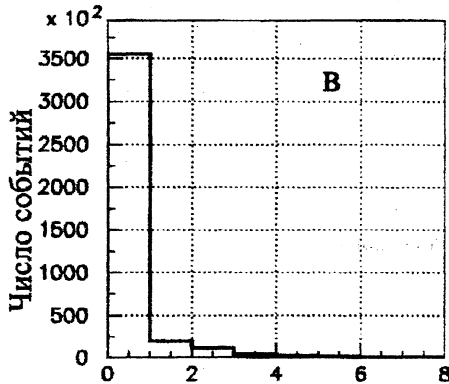
Распределение событий по размеру кластеров для некоторого набора экспозиций приведено на рис. 3. С ростом размера кластера число событий плавно падает. Характер поведения этого распределения зависит от режима работы камеры. На рис 3а и 3б приведены распределения с большими углами рассеяния частиц на мишени для двух камер. На рис. 3в дано распределение событий для пучковых частиц, летящих вперед без взаимодействия. Число двухкластерных событий составляет 5% от однокластерных.



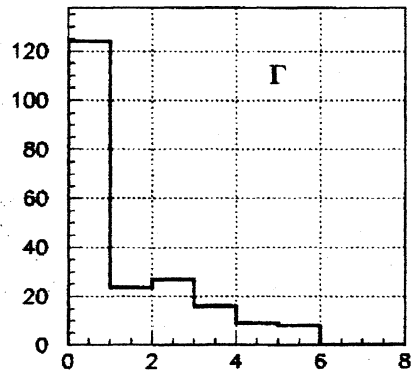
Размер кластера в камере 5Y



Размер кластера в камере 15Y



Размер кластера в камере 5Y



Размер кластера в камере 5Y

Рисунок 3 Распределение событий по размеру кластера. 3а и 3б - распределения с большими углами вылета частиц для камер 5Y и 15Y. 3в - распределение для пучковых частиц, летящих вперед без взаимодействия для камеры 5Y. 3г - распределение для случайных пробоев в камере 5Y.

некоторых случаях в камерах между соседними проволочками может возникнуть электромагнитная связь, создающая наводки с одной проволочки на другую ("cross talk"). Характерным признаком "cross talk" является значительно большее количество трехкластерных событий, чем двухкластерных, так как срабатывание одной проволочки приводит к срабатыванию еще двух: справа и слева от нее.

Чтобы выделить случайные срабатывания была проведена группа экспозиций, в которых при отсутствии пучка заряженных частиц мастер на считывание информации с проволочек задавался от сигналов с генератора. Соответственно к таким же случайным пробоям характеризуют фоновые шумы пропорциональных камер и системы считывания. Распределение по размеру кластеров для случайных пробоев для характерной камеры приведено на рис. 3г. Для всех камер трехкластерных событий больше чем двух-кластерных, что говорит о присутствии "cross talk". В экспозициях с пучковым мастером вклад "cross talk" незаметен.

На рис. 4 приведены распределения событий по номерам сработавших проволочек в камерах 8У и 16У. Для каждой камеры показаны: общее распределение сработавших проволочек; распределение событий по проволочкам, включая вклад в треки; распределение для случайных срабатываний. Распределения нормированы на общее число мастеров.

Для 60% мастеров удалось провести треки. Остальные частицы не участвовали в восстановлении трека. Это может быть связано с недостаточной эффективностью отдельных камер, с фоновыми мастерами, с возможностью вылета частицы за пределы камеры (например, при больших углах вылета частица ходит через передние камеры, но не попадает в задние). В камере 8У 44% пробоев участвовали в проведении треков, а в камере 16У – 34%. Видно, что в камерах почти не участвуют в проведении треков, в них преобладают фоновые пробои от частиц, летящих не из мишени, пробои от частиц не вошедшие в камеру и просто случайные срабатывания камер.

Случайные пробои камер были получены, когда мастером служил сигнал от генератора. При этом суммарное число мастеров было таким же, как и для реального случая. Для камеры 8У, работающей при небольшом напряжении, случайные пробои малы и распределены равномерно. В камере 16У, работающей при повышенном напряжении, случайные пробои неравномерны и дают заметный вклад в проволочках вне пучка.

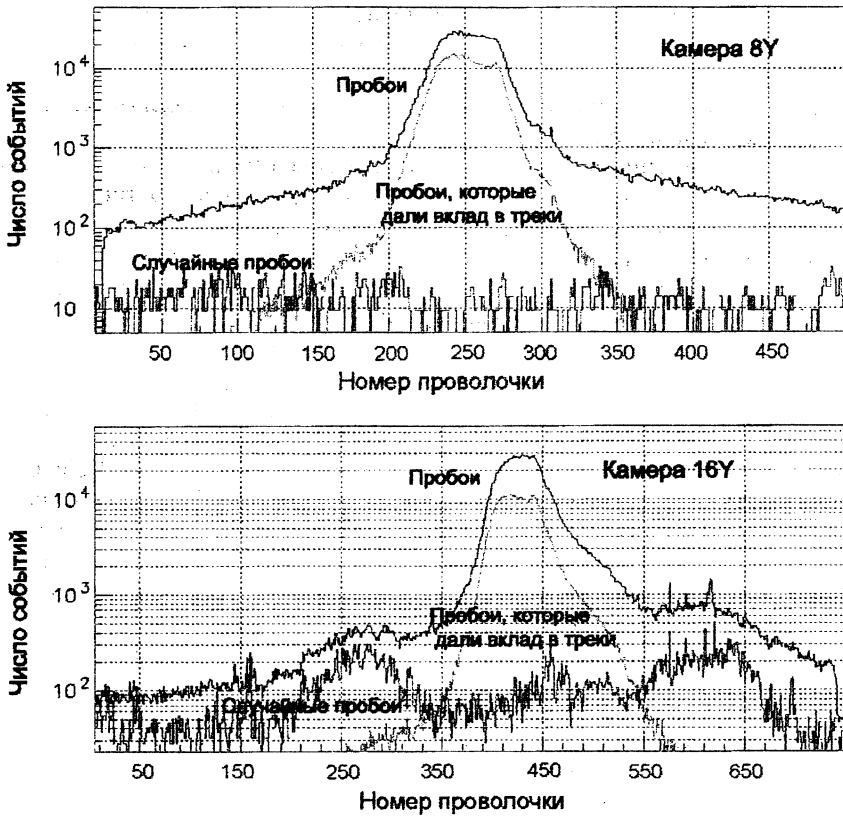


Рисунок 4 Распределение событий по номерам сработавших проволоочек в камерах 8Y и 16 Y. Приведено полное число сработываний данной проволоочки камеры, пробои, давшие вклад в треки. Также приведено распределение для случайных сработываний от генератора).

## 7. Проведение треков по данным с пропорциональных камер

В большинстве экспозиций работали четыре Y камеры и четыре Z камеры ю магнита, пять Y и пять Z камер после магнита, а также по одной камере с наклонным расположением проволоочек до и за магнитом. Рассмотрим процедуру проведения треков и определения эффективности камер.

Адресная информация системы считывания преобразуется в информацию о координатах сработавших проволоочек. При двух- и многокластерных событиях координатой сработывания проволоочки считается середина кластера.

еется программная возможность восстанавливать пропущенную информацию, если разрыв между кластерами, возникающий из-за несрабатывания дан-ного канала, составляет одну проволочку. Слишком длинные кластеры отбра-вываются. При стандартной процедуре проведения треков максимальный раз-мер кластера равен шести.

Обработка событий включает в себя пространственное восстановление треков в блоках камер до и после магнита, связь траекторий частиц в магнит-ном поле спектрометра, определение импульса частиц.

Пространственное восстановление прямых начинается с нахождения про-мых треков в плоскостях XY и XZ (y- и z- проекции трека) отдельно до и за магнитом. Для этого каждый пробой первой камеры связывался прямой с каж-дым пробоем последней Y- или Z- камеры соответственно. Вдоль этой прямой на расстояниях заданного небольшого расстояния от неё ищутся пробои в проме-жуточных Y- или Z- камерах – пробои внутри дорожки. Ширина дорожки и ма-ксимальное число сработавших камер отдельно в y- и z- проекциях задаются перед обработкой. Обычно ширина дорожки задавалась равной 1 см. Небольшое изменение ширины дорожки слабо влияет на отбор треков. Уменьшение шири-ны дорожки приводит к небольшому уменьшению числа треков, но треки ста-нут более чистыми от случайных пробоев. Так задание ширины дорожки рав-ным 0.4 см приводит к уменьшению количества треков менее чем на 10%.

Если внутри дорожки вдоль какого-то направления сработало меньше ка-мер, чем задано, такая дорожка исключается из дальнейшего рассмотрения. Аналогичным образом связываются пробои 1-ой и предпоследней камер, 2-ой и предпоследней и. т. д.

Совпадающие дорожки учитываются только один раз. В оставшихся до-рожках по проволочкам методом наименьших квадратов строятся треки в про-екциях. Треки с большими  $\chi^2$  отбрасываются.

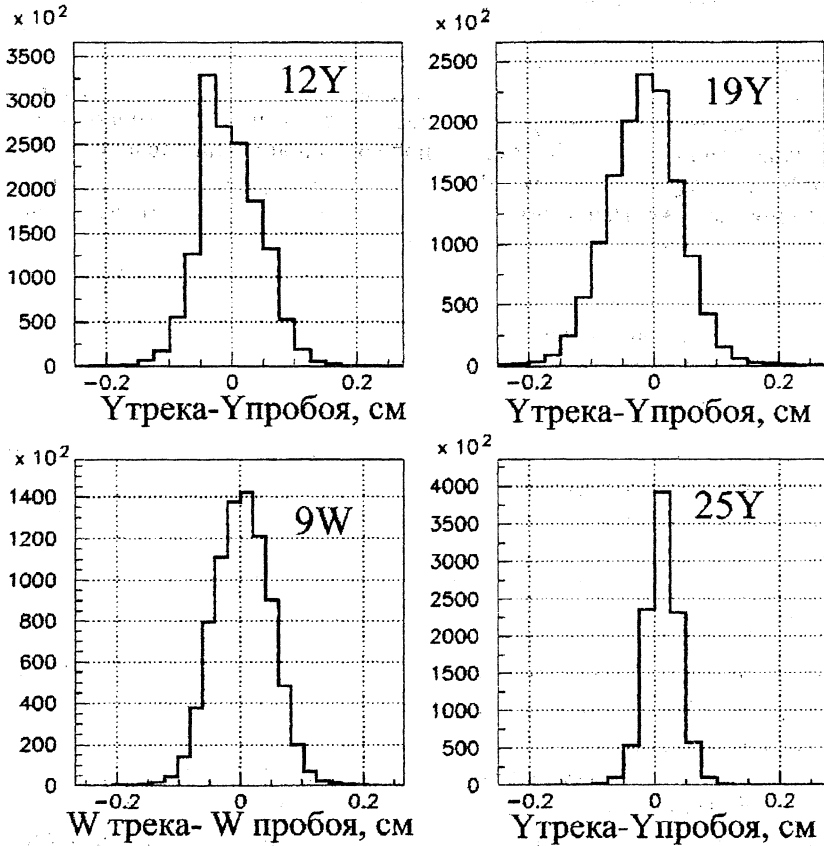
Затем происходит пространственное восстановление треков по y- и z- про-екциям. Пространственное восстановление двух- и многотрековых событий осуществляется с помощью информации с камер с наклонными проволочками. Восстановленные в пространстве треки до и за магнитом связываются друг с другом в линию. Для этого пространственный трек до магнита и трек за маг-нитом продолжают до пересечения с плоскостью YZ в середине магнита ( $\theta=0$ ). Если расстояние между этими треками в данной плоскости меньше заданного, треки принадлежат одной частице. Отобранные таким образом треки методом Рунге-Кутты проводятся через магнит в соответствии с картой маг-нитного поля, измеренного с точностью  $0.5 \cdot 10^{-3}$  Т, параметры трека подгоня-ются методом наименьших квадратов. В результате получаем значение им-пульса частицы, знак заряда и параметры прямого трека до магнита (координаты, z в плоскости мишени и углы наклона  $\theta$  и  $\phi$  относительно оси спектро-метра).

Ширина распределения разности координат, проведенных через магнит треков частиц и пробоев, вошедших в трек является мерой координатного разрешения камер. На рис. 5 приведены такие распределения для камер 12Y и 9V (камера с наклонным расположением проволочек) до магнита и для камер 19Y и 25Y за магнитом. Например, для камеры 19Y среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  равняется 0.056 см, а полная ширина на половине высот ( $FWHM=2.355*\sigma$ ) - 1.35мм. Для большинства других камер ширина распределения такая же. Напомним, что для пропорциональной камеры с большим числом проволочек  $\sigma$  стремится к 0.072 см для шага проволочек 2.5 мм. Для первых и последних камер в каждой проекции распределение уже. Для камеры 25Y (последняя Y камера в данном сеансе)  $\sigma=0.026$  см. Такая малая ширина распределения в первых и последних камерах, а также небольшое уменьшение ширины для большинства других камер, определяется особенностью алгоритма восстановления треков.

На рис. 6а приведено распределение расстояний между независимо проведенными пространственными треками до и за магнитом в середине магнит при  $X=0$ . Видно, что большинство треков пересекаются с хорошей точностью и количество случайно найденных треков мало. При стандартной обработке треки считаются связанными в линию, если расстояние между ними меньше 2 см.

Точность проведения треков через спектрометр характеризуется распределением  $\chi^2$  величины расстояния между треком и пробоями, по которым этот трек был восстановлен. На рис. 6 б приводится распределение  $\chi^2$ , деленное на число степеней свободы (в данном случае определяемое как разность между числом сработавших проволочек и числом параметров в задании прямых). Среднее значение  $\chi^2$  составило 1.06, что говорит о правильности алгоритма проведения треков.

Для восстановления треков частиц в проекциях обычно требовалось срабатывание трех Y- и трех Z- камер до магнита и трех Y- и трех Z- камер за магнитом. Чтобы правильно восстановить многотрековые события (2 и более треков), необходимо использовать информацию с проволочек наклонных камер (W и U).



сунок 5 Разность между координатами восстановленных треков частиц, прошедших без камеры 12Y, 19Y, 9W и 25Y и координатами сработавших проволочек.

## 8. Эффективность камер

Эффективность отдельной камеры вычисляется как отношение числа треков, зарегистрированных в этой камере, к числу треков, прошедших через нее (суммарное число треков, прошедших по данным остальных камер). Аналогично вычисляется и эффективность отдельных областей камер.



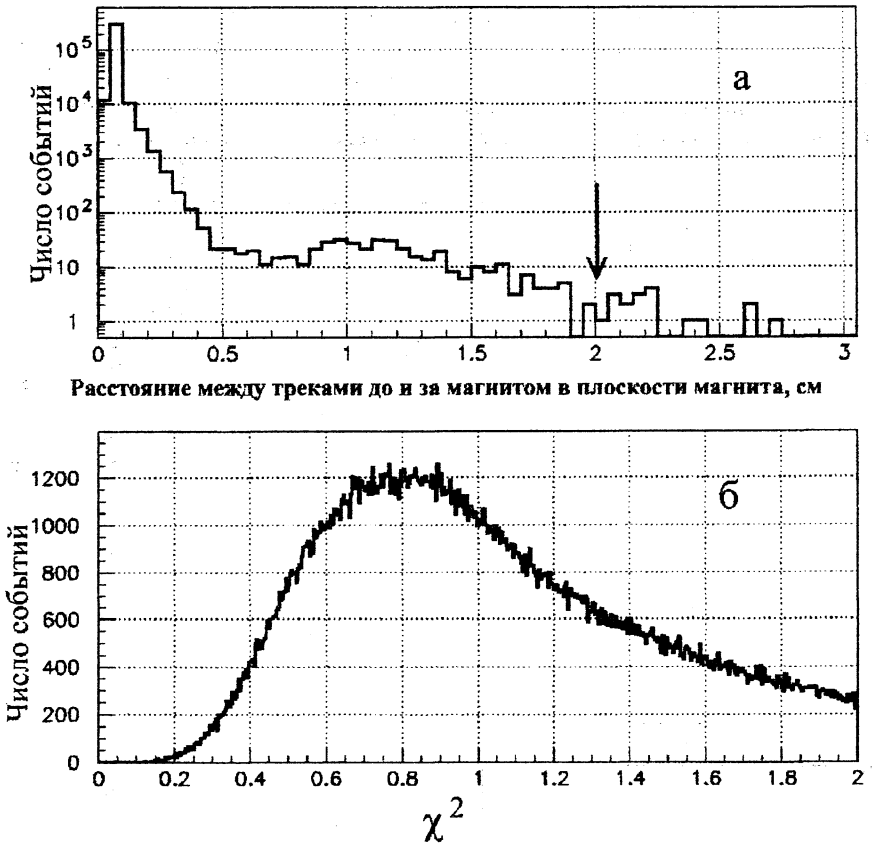


Рисунок 6. а - распределение расстояния между независимо проведенными треками и за магнитом в середине магнита. б - распределение  $\chi^2$  расстояния между треком пробоями, по которым этот трек был восстановлен, приведенное к числу степеней свободы. Стрелкой отмечена граница обрезания событий по расстоянию между треками

Доля одотрековых событий вычисляется как отношение числа восстановленных треков событий, в которых в спектрометре проведен трек только от одной заряженной частицы, к полному числу мастеров. Доля одотрековых событий сильно зависит от логики отбора мастеров и фоновых условий эксперимента. Так, если мы отбираем пучковые частицы, летящие без взаимодействия с большой долей вероятности найдется трек, проходящий через передние задние камеры. Если поставить на пути пучка мишень, а напротив мишени перпендикулярно к пучку прибор, регистрирующий гамма-кванты, вылета

шие из мишени, и потребовать наличие гамма-кванта в мастерном включени. (отбор неупругих процессов), то количество найденных треков изменится. ] данном случае налетающий протон может рассеяться в мишени на большой угол и не зарегистрироваться задним блоком камер за магнитом. Также ухудшаются и фоновые условия. В результате число однотрековых событий падает до 5%.

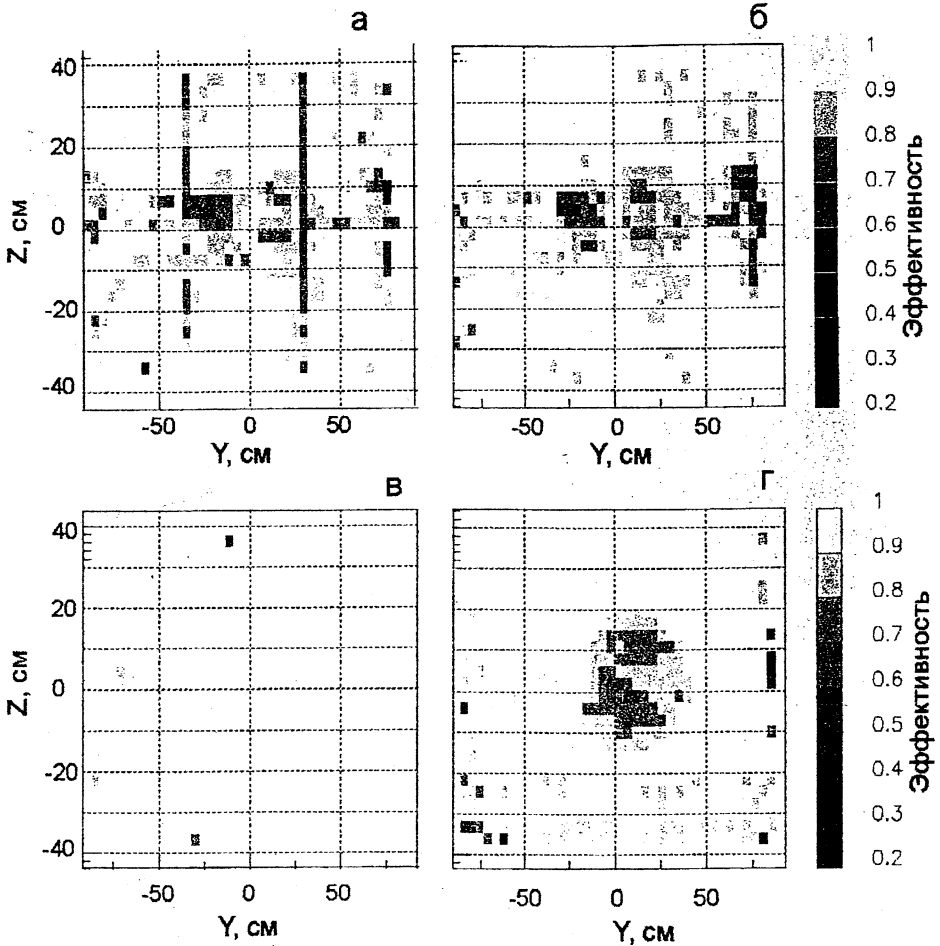


Рисунок 7 Эффективность в различных областях камер. а – камера 18Z при отсутствии напряжения на провода поддержки, б – камера 18Z при подаче напряжения на провода поддержки, в – камера 15Y, г – камера 21Z. Более темный цвет соответствует меньшей эффективности.

Так как разные серии измерений проводились при разных мастерах, важным является не абсолютное значение числа одноканальных событий, а его изменение в данных группах измерений. Заметим, что при этом эффективности отдельных камер напрямую не зависят от логики отбора событий. Косвенным образом изменение логики отбора событий может сказаться на изменении фоновых условий, что может привести к изменению эффективности отдельных камер.

Эффективность камер зависит от загрузки, режима по напряжению, атмосферного давления и некоторых других факторов. Для разных областей камер эффективность неодинакова. На рис. 7 приведено распределение эффективности по площади камер для камер 18Z, 15Y и 21Z. В связи с малым числом треков по краям камер, не во всех точках на краю камер удалось определить эффективность (в этих точках приравняем эффективность к 1). Рис. 7 а соответствует отсутствию напряжения на проводах поддержки на камере 18Z. Рис. 7 б - подаче напряжения 1.8 кВ. В узкой области вблизи провода поддержки на рис 7а имеется провал эффективности, в остальном рис. 7а и 7б близки друг к другу. Эффективность всех камер вне области пучка больше 90%, отличие камер проявляется в области с большой загрузкой. Существуют камеры, например 15Y, у которых при рабочем напряжении эффективность в области пучка не падает. У большинства камер при рабочих значениях напряжения имеется небольшое уменьшение эффективности в центре. При увеличении напряжения подаваемого на камеры, провал в области пучка уменьшается, но подъем напряжений сдерживается ростом темновых токов.

При неизменных других параметрах, была изучена зависимость эффективности от порогового напряжения  $U_{\text{пор}}$  в схеме регистрации сигнала.  $U_{\text{пор}}$  задается одинаковым для всех камер. Зависимость эффективности отдельных камер от порогового напряжения приведена на рис. 8. С ростом порогового напряжения эффективность всех камер уменьшается. Характер этой зависимости зависит от режима работы камеры, причем у камер которые работают с большими темновыми токами и недостаточной эффективностью падение эффективности более быстрое. Рабочее пороговое напряжение составляет 32 мВ. Отметим, что при больших значениях порогового напряжения несколько ухудшается координатное разрешение камер.

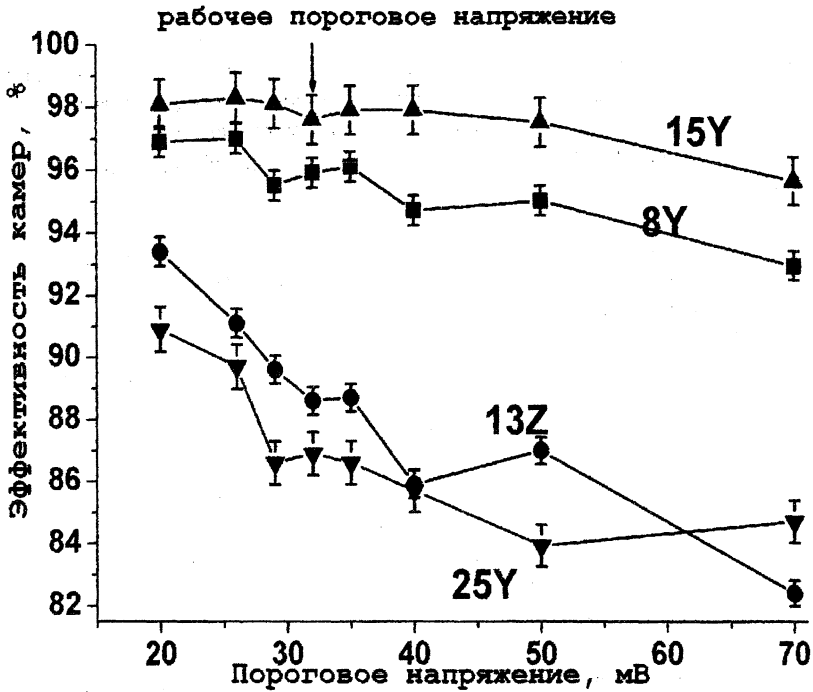


Рисунок 8 Зависимость эффективности камер 8Y, 13Z, 15Y и 25Y от порогового напряжения.

Зависимость эффективности некоторых камер в одном из сеансов измерений от подаваемого на них напряжения представлена на рис. 9. Для каждой камеры зависимость имеет свой вид. Кроме того, зависимость для одной камеры может менять свой вид от сеанса к сеансу. В любом случае имеется область резкого роста эффективности и область выхода на плато. Хорошо работающая камера 15Y выходит на уровень более 95% уже при напряжении 3.65 кВ. При напряжении 3.85 кВ у камеры резко возрастают шумовые токи. Вследствии того, у камеры появляются случайные пробои. Ширина рабочего плато камеры 15Y составляет 200 В. Камера 21Z приближается к эффективности 95% при напряжении большем 3.75 кВ. У этой камеры ширина рабочего плато немного меньше 200 В. Камера 13Z на плато имеет эффективность порядка 90%.

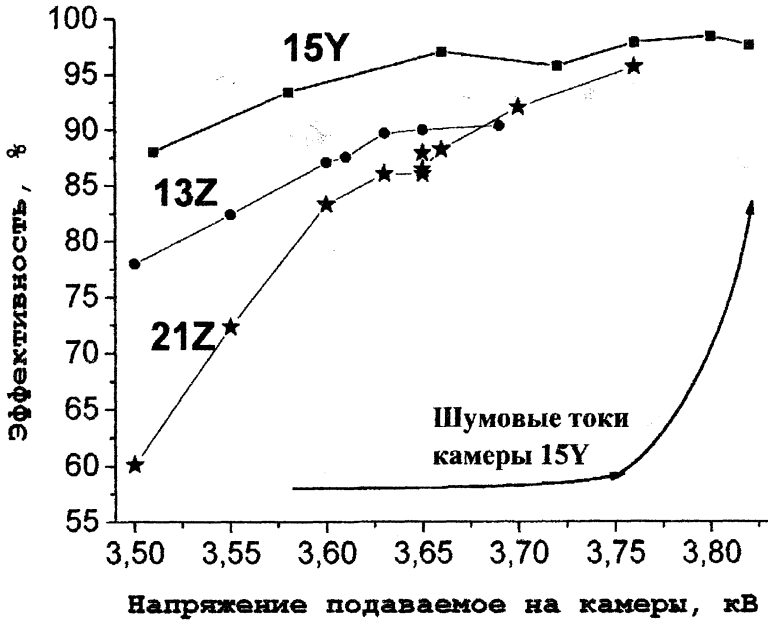
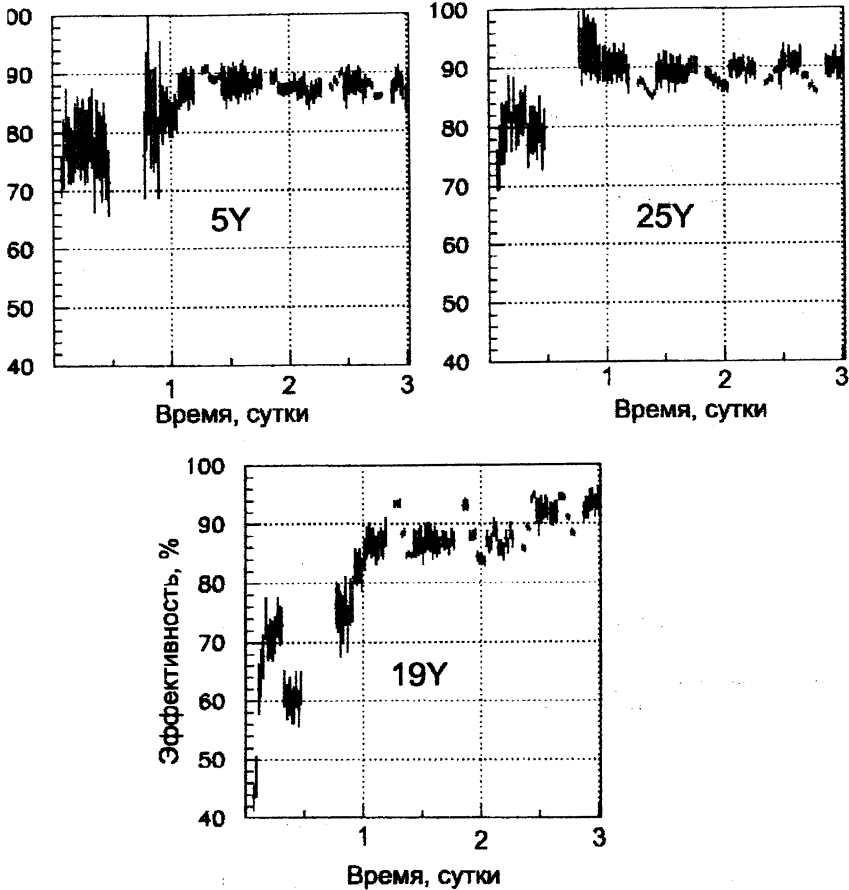


Рисунок 9 Зависимость эффективности камер 15Y, 13Z и 21Z от подаваемого на них напряжения. Для камеры 15Y приведены шумовые токи.

### 9. Факторы, влияющие на работу камер

После длительного перерыва в работе при включении на камерах возникают повышенные темновые токи (возможно из-за попадания частиц пыли), что не позволяет подать на них рабочее напряжение, обеспечивающее хорошую эффективность. Со временем темновые токи уменьшаются и напряжение удается поднять до рабочего. На рис. 11 приведены зависимости эффективности от времени для камер 5Y и 25Y и 19Y. Видно, что камеры 5Y и 25Y вошли в нормальный режим работы примерно через сутки. Затем на них было поднято напряжение и увеличена эффективность. Для входа в режим камере 19Y потребовалось двое суток.



унок 10 Зависимость эффективности камер 5Y, 25Y и 19Y от времени.

Во время измерений камеры работали при разной интенсивности пучка, которая контролировалась пучковым монитором из 4-х сцинтилляционных счетчиков, стоящих на пучке перед камерами. Два счетчика имеют размер 4×4 см, других 20×20 см. Два маленьких счетчика практически и определяют морный счет. Настройка магнитного тракта позволяла сформировать пучок, вшую часть пучка в пределах 4×4 см так, что мониторный счет (четверные падения счетчиков) составлял 55%-75% полной интенсивности пучка (зйные совпадения больших счетчиков). Ускоритель У-10 обеспечивал сброс дые 4 секунды, при этом длительность сброса составляла порядка 1 секун-

ды. Рабочая интенсивность по пучковому монитору держалась от 100 тысяч до 600 тысяч частиц в секунду. Загрузка камер определяется полной интенсивностью пучка и, кроме того, зависит от условий эксперимента. В измерениях с мишенью, расположенной за пучковым монитором перед камерами, загрузка передних камер резко возрастает. Доля одноканальных событий уменьшается с ростом интенсивности пучка. Это может быть связано с ухудшением фоновых условий эксперимента, с увеличением случайных мастерских запусков, а также с уменьшением эффективности отдельных камер с ростом загрузки, особенно в области пучка. На рис. 11 показана зависимость доли одноканальных событий от интенсивности пучковых частиц, измеренной по показаниям пучкового монитора. Приведены данные для экспериментов по измерению импульса частиц пучка.

Отметим, что импульсное разрешение спектрометра почти не зависит от интенсивности и лишь немного (на несколько процентов) ухудшается при максимальном числе частиц.

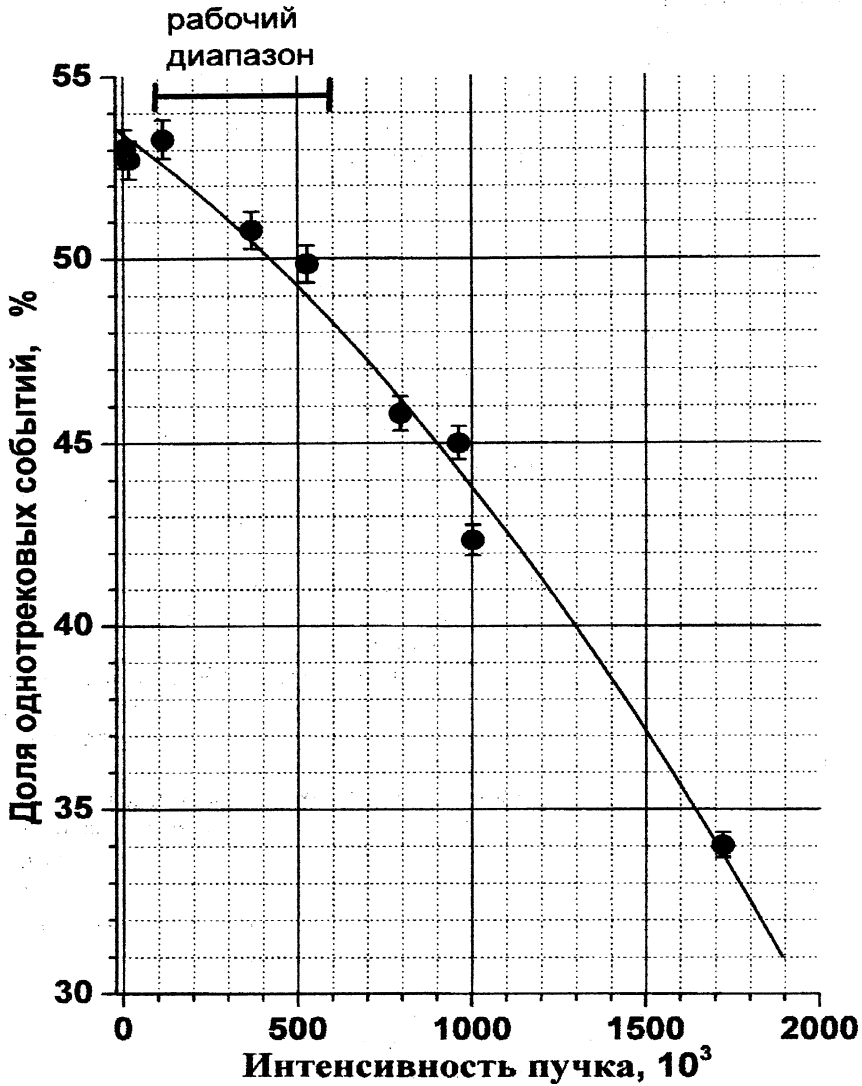
Несмотря на равенство основных технических характеристик камер (межэлектродный зазор, расстояние между проволочками, использованные при изготовлении материалы и др.), их рабочие режимы различаются. Это может быть связано как с некоторыми конструктивными особенностями камер, так и с условиями работы на пучке: передние камеры обычно загружены сильнее задних. Увеличение загрузки приводит к уменьшению эффективности и, как следствие к необходимости поднимать напряжение на камерах.

На рис. 12 приведены средние эффективности и рабочие напряжения для Y- и Z- камер спектрометра, расположенных перед и за магнитом (малые и большие камеры) для большой группы экспозиций в одном из сеансов измерений на пучке с мишенью. Отметим, что от сеанса к сеансу рабочие напряжения могут меняться (например, из-за измерения атмосферного давления, логики срабатывания мастера и интенсивности пучка), но относительный характер поведения камер остается прежним.

Имеется большая группа камер, работающих хорошо и имеющих эффективность больше 95%. К этой группе относятся находящиеся в одном блоке камеры 15Y, 16Y, 17Z и 18Z, камеры до магнита 8Y, 12Y, 13Z и за магнитом 19Y и 26Y. Немного хуже работают камеры 10Z, 21Z, 25Y, 28Y и 29Y. Их эффективность составляет немного больше 90%. Пониженная эффективность камеры 29Y объясняется тем, что в связи с ее малым размером не все частицы регистрируются в ней.

Камеры 5Y, 7Z, 22Y и 24Z характеризуются пониженной эффективностью. Снижение эффективности камер 5Y и 7Z объясняется их близостью к мишени. Частицы еще не успевают разлететься на заметное расстояние, и центр камер работает при большой интенсивности, что приводит к просчету частиц и снижению эффективности. Причиной снижения эффективности камер 22Y и 24Z

ются их конструктивные особенности. При увеличении напряжения на  $x$  камере резко возрастает вероятность пробоа.



унок 11. Зависимость эффективности проведения треков от интенсивности пучка пучковому монитору.



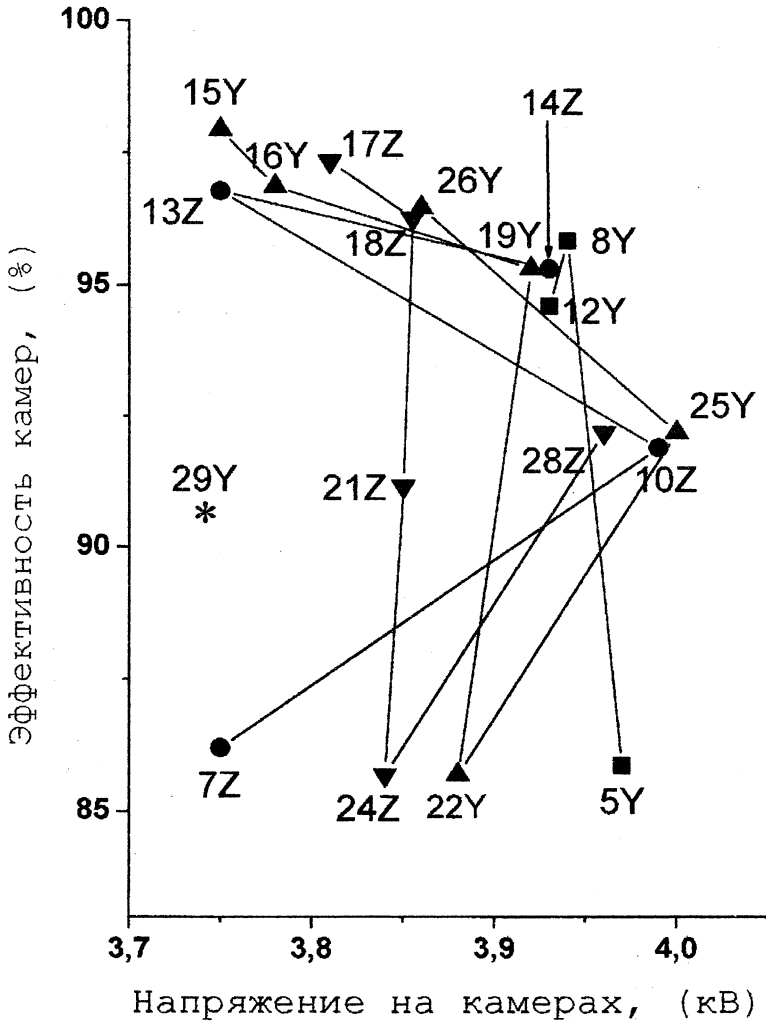


Рисунок 12 Зависимость эффективности от напряжения для различных камер. Квадраты — передние Y камеры, точки — передние Z камеры, треугольники — задние Y камеры, перевернутые треугольники задние Z камеры. Прямыми соединены соответствующие группы камер.

## 10. Эффект старения пропорциональных камер

При длительной эксплуатации пропорциональных камер в интенсивных пучках частиц наблюдается уменьшение их эффективности. Такой эффект называется старением. Эффект старения проявляется также в виде сокращения анодного счетной характеристики в связи с возрастанием самоподдерживающихся темновых токов и, в конечном счете, может привести к разрыву проволочек. Эффект старения возникает из-за осаждения и полимеризации органических соединений на поверхности электродов в камере. Обзор причин, вызывающих старение камер, а также факторов провоцирующих и замедляющих старение, приведен в [16].

Эффект старения наблюдается и для пропорциональных камер детектора АГ. На рисунке 13 приведены зависимости рабочих напряжений на камерах от номера сеанса измерений. Номера сеансов можно сопоставить с продолжительностью работы камер и с числом частиц попавших на проволочки и катод (с учетом коэффициента газового усиления). Приведенные сеансы охватывают период времени с 1995 по 2003 годы с суммарным числом частиц прошедшим через камеры порядка  $2 \cdot 10^{12}$ , при этом загрузка на единицу площади центральной области камер составила примерно  $4 \cdot 10^{11}$  частиц/см<sup>2</sup>. Для вывода камер в рабочий режим напряжение на ней постепенно поднимали, чтобы получить высокую эффективность. Процесс ограничен резким увеличением темновых (темных) токов с дальнейшим увеличением напряжения. Таким образом, рабочее напряжение является характеристикой камеры. В каждом сеансе настройка камер немного менялась, так как менялись конкретные условия измерений (интенсивность пучка, наличие или отсутствие мишени, атмосферное давление). Тем не менее видно, что характер поведения различных камер имеет определенную тенденцию. Четко прослеживается тенденция увеличения рабочего напряжения. За время наблюдения среднее рабочее напряжение камер росло на 300 В. Это связано с необходимостью компенсировать уменьшение коэффициента газового усиления из-за полимеризации покрытия проволочек. Если бы мы не поднимали напряжение, то коэффициент газового усиления к следующему сеансу уменьшился бы в 4 раза по сравнению с начальным. Это привело бы к значительному уменьшению эффективности. В отдельных случаях процесс разрушения проволочки заканчивается ее обрывом. Полимеризация поверхности катода проявляется в виде увеличения темновых токов.

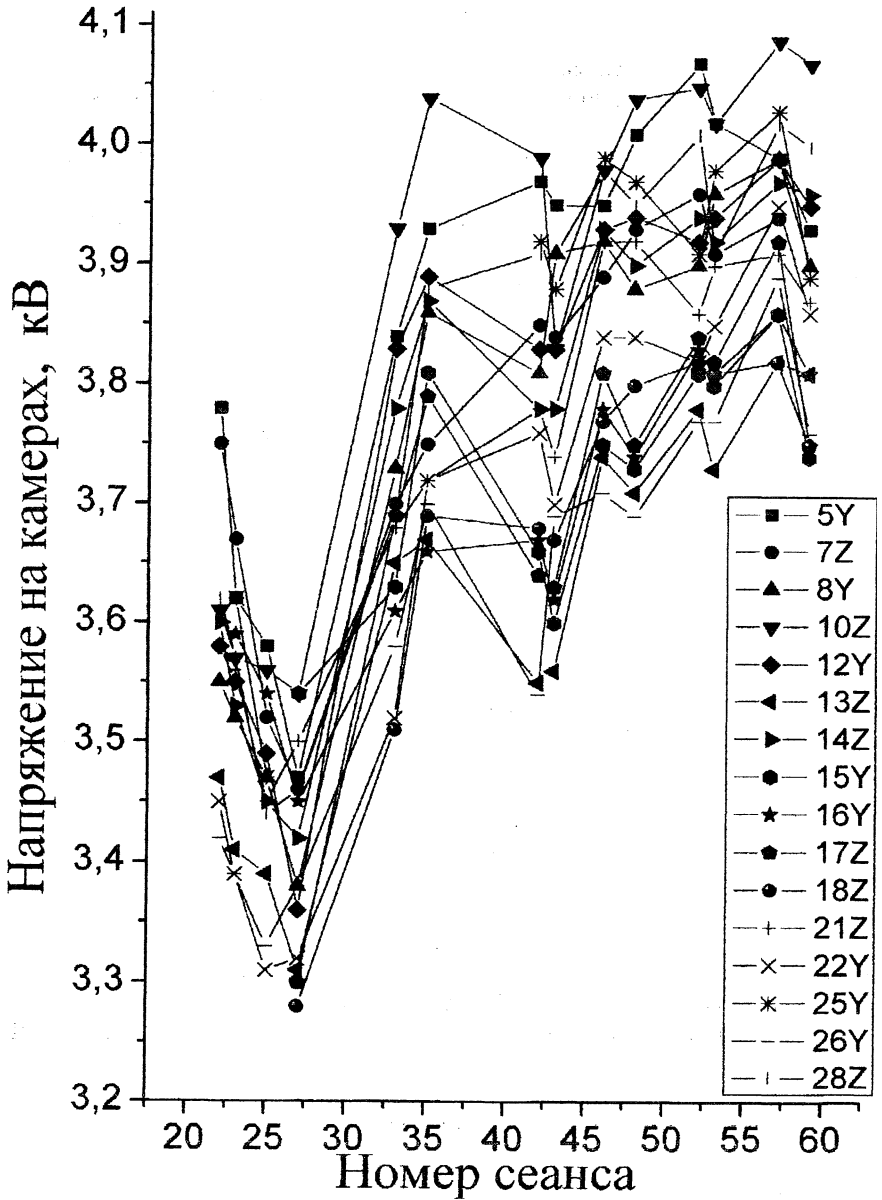


Рисунок 13 Рабочие напряжения для различных камер в разных экспозициях. Данные для каждой из камер соединены прямыми.

## 11. Заключение

анализирована работа многопроволочных пропорциональных камер спектрометра МАГ, содержащих 25 координатных плоскостей с общим числом волочек около 10 тысяч.

в результате 7 лет эксплуатации МПК накоплен большой объем материалов по работе многопроволочных пропорциональных камер.

прослежен путь сигнала возникающего в камере при прохождении заряженной частицы до выхода схем усиления.

более вероятно срабатывание одной проволочки. Число многокластерных событий зависит от режима работы камеры и логики мастера.

координатное разрешение камер FWHM составляет 1.35мм.

наличие поддержки с напряжением 1.8 кВ является необходимым условием работы камер.

исследовалась зависимость эффективности камер от подаваемого напряжения. Для большинства камер удается получить эффективность большую 95% в реальных условиях работы. Ограничение по темновым токам не позволяет приблизиться к 100% эффективности камер.

в некоторых камерах эффективность уменьшается в области пучка.

при высоком уровне загрузки эффективность камер уменьшается.

после прохождения  $2 \cdot 10^{12}$  заряженных частиц наблюдаются эффекты старения камер, приводящие к уменьшению амплитуды сигнала и необходимости увеличивать напряжения на камерах для компенсации потерь.

для дальнейшей эксплуатации многопроволочных пропорциональных камер спектрометра МАГ необходимо переходить на газовую смесь с метилалем.

авторы приносят глубокую благодарность Н.Д. Галаниной, В.С. Демидову, А.В. Павлову, Н.А. Халдеевой и В.Ш. Эпштейну за ценные замечания и обсуждения работы.

Эксперимент выполнен в рамках целевой научно-технической программы Российской Федерации "Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники гражданского назначения" подпрограмма "Фундаментальная ядерная физика" и программы поддержки ведущих научных школ России (проект НШ-7.2003,2).

## Литература

М.П.Безуглов, Е.Т.Богданов, Е.В.Быстрицкая и др. Спектрометр МАГ для исследования адрон-ядерных взаимодействий с идентификацией конечных состояний ядра, ПТЭ 1, 13, 2002.

- [2] В.С.Демидов, Физика атомного ядра и элементарных частиц, Материалы XXXV зимней школы ПИЯФ, Санкт-Петербург, 2001, с 30.
- [3] Charpak G., R. Bouclier, T. Bressani et.ct. NIM 62, 235. 1968.
- [4] F.Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber: in: Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics, T.Ferbel ed., World Scientific, 1991.
- [5] 8th Vienna Wire Chamber Conference (WCC 98): Wire Chambers: Recent Trends And Alternative Techniques 23-27 Feb 1998, Vienna, Austria, Nucl. Instrum Methods A419 (1998) 189-769.
- [6] Palma M.De., C. Favuzzi, G. Maggi e. a. NIM 217, 135, 1983.
- [7] Зломанчук Ю., Наврот А., Никитин В.А. и др. ПТЭ 5, 53, 1982.
- [8] А.Н.Алексеев, Е.Т.Богданов, М.Е.Вишневецкий и др. Многопроволочные пропорциональные камеры для широкоапертурного спектрометра. Препринт ИТЭФ 86 - 193, 1986.
- [9] Charpak G., Fisher H.G., Gruhn C.R. and others Time Degeneracy of multiwire proportiona chambers. NIM 99, 279, 1972.
- [10] F.Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber: CERN 77-09, 1977.
- [11] Sharma A., F. Sauli, First Townsend coefficient measures in argon base mixtures at high fields CERS-PPE/93-50, 1993.
- [12] Auriemma G., Fidanza D., Pirozzi G. And Satriano, arXiv:physics/0307073 v 15 Jul 2003, accepted to NIM A. Experimental determination of the Townsend coefficient for Argon-CO<sub>2</sub> gas mixtures at high fields.
- [13] Е.Т.Богданов, Р.А.Меньшиков, А.А.Недосекин и др. Электроника для приема и запоминания информации с больших многопроволочных пропорциональных камер. Препринт ИТЭФ 86 - 192, 1986.
- [14] Р.А. Меньшиков, А.А.Недосекин, А.Б.Рожков. Препринт ИТЭФ 87-171 1987. Система считывания информации с многопроволочных пропорциональных камер.
- [15] Группен К. *Детекторы элементарных частиц*. Сибирский Хронограф Новосибирск. 1999. с43.
- [16] John A. Kadyk, Wire chamber aging, NIM A 300 436, 1991.

Подписано к печати 10.12.03  
Усл. печ. л. 2.0 Уч.-изд. л. 1.4

Формат 60x90  
Тираж 100 экз  
Индекс 3649

1/16  
Заказ 20

**Индекс 3649**

**Препринт 20 – 03, ИТЭФ, 2003**