

СЗУ.1н

С-655

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

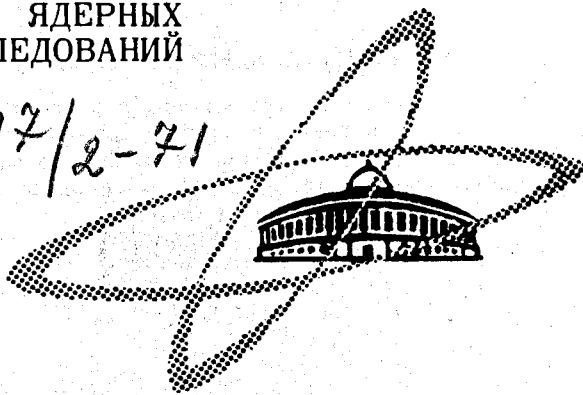
Дубна

3197/2-71

4

13/9-71

P13 - 5896



Л.М. Сороко

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ТЕЛЕСКОПА
ИЗ МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ
ЧАСТИЦ

1971

P13 - 5896

Л.М. Сороко

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ТЕЛЕСКОПА
ИЗ МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ
ЧАСТИЦ**

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

SUMMARY

The particle telescope consisting of two multiplex Hadamard-transform scintillation counters is described. Each scintillator is set up of many element-scintillators which are surrounded by the light-guides and four **photomultipliers**. Four coincidence circuits are registering the four groups of events. The coincidence countings define the intensity of the angular correlation events from the two-particle ones. And the angular discrimination of the events to be measured is equal to the angle which subtends the only one element-scintillator of the multiplex scintillation counter.

Fig. 3 shows the particle telescope with multiplex Hadamard-transform scintillation counters. Fig. 4 shows the coincidence circuits. The algorithm of the processing of the coincidence countings is given by relations (12) and (13).

Such a particle telescope allows to solve some unusual problems, for example, it can be used in the experiments with intersecting beams to restrict the volume from which the particles of the binary channels are moving and this can be done without the additional defining counters (Fig. 5).

В работах /1,2/ даны описания устройства и принципа работы мультиплексного сцинтилляционного счетчика и мультиплексной мишени. В работе /3/ приведены основные свойства псевдослучайных последовательностей, используемых в мультиплексных системах регистрации частиц, и метод построения псевдослучайных последовательностей с помощью матриц Адамара. В данном сообщении описывается телескоп, состоящий из двух мультиплексных сцинтилляционных счетчиков.

Традиционный телескоп, предназначенный для регистрации проникающих частиц /4/, состоит из двух или более сцинтилляционных счетчиков, электрические импульсы с которых подаются на схему совпадений или антисовпадений. Логика включения сигналов в схему совпадений телескопа обычно такова, что импульс на выходе схемы совпадений появляется тогда, когда световые вспышки в обоих сцинтилляторах возникают одновременно, т.е. в пределах разрешающего времени схемы совпадений. Существует огромное многообразие схем включения счетчиков, например, сочетание логики совпадений с логикой антисовпадений, а также схемы задержанных совпадений.

Рассмотрим телескоп из двух сцинтилляционных счетчиков, выходы с которых включены в схему совпадений (рис. 1). Такой телескоп регистрирует процессы, вызываемые в мишени М частицами пучка П, когда одна из вторичных частиц испущена под углом θ , а другая - под углом $(180^\circ - \theta)$ к оси пучка. Для того, чтобы зарегистрировать двухчастичные процессы в широком интервале углов θ , от θ_1 до θ_2 , поступают следующим образом. Выбирают достаточно малую мишень и достаточно малый угловой захват телескопа, чтобы ширина пика кривой

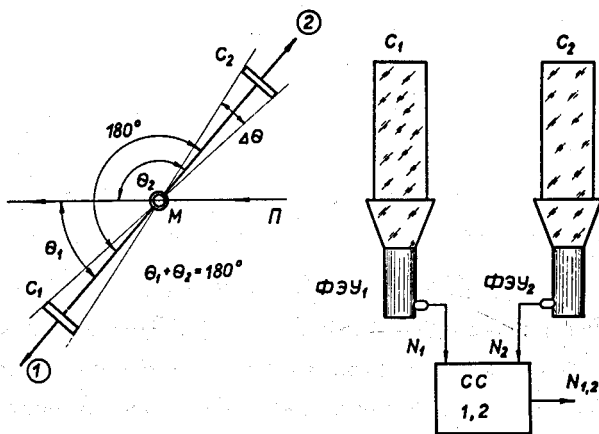


Рис. 1. Схема традиционного телескопа из двух сцинтилляционных счётчиков. П - лучок, М - мишень, C_1 и C_2 - сцинтилляторы счётчиков, $CC_{1,2}$ - схема совпадений. На рисунке дан случай, когда угол корреляции между двумя наблюдаемыми частицами равен 180° .

угловых корреляций имела требуемую полуширину $\Delta \theta$ (рис. 2). В реальных условиях пик расположен на пьедестале, обусловленном фоновыми событиями. Повторяя измерения под несколькими углами θ_i , проходят весь интервал углов от θ_1 до θ_2 , а результаты суммируют.

Если увеличить размер каждого сцинтиллятора в традиционном телескопе либо приблизить счётчики к мишени, то угол захвата телескопа $\Delta \theta$ возрастет. Это будет сопровождаться ухудшением формы пика угловых корреляций. Он станет более широким, а высота пьедестала от фона при этом возрастет. Дискриминация по углу корреляции между двумя частицами ухудшится.

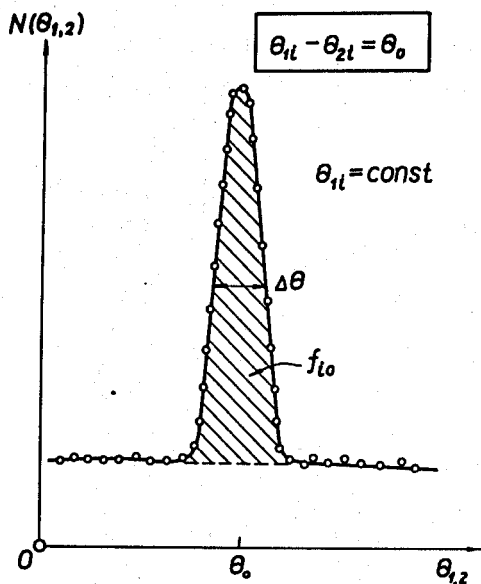


Рис. 2. Кривая разлета, зарегистрированная с помощью традиционного телескопа при неизменном положении первого счётчика. Кривая разлета состоит из корреляционного пика, ширина которого равна $\Delta\theta$, и фона, образующего равномерный пьедестал.

82

Между тем имеется возможность захватить одновременно все коррелированные события в интервале углов от θ_1 до θ_2 с сохранением исходной дискриминации по углу корреляции для частиц бинарных реакций, равной $\Delta\theta$, и эффективно исключить многочастичные события. Правда, предполагается, что схема, которая рассматривается ниже, эффективно работает, если фон от многочастичных каналов не имеет особенностей. Это предположение обычно выполняется, если диапазон углов от θ_1 до θ_2 не очень велик. В противном случае его необходимо разбить на несколько интервалов, пока это условие не будет выполнено.

Телескоп, обладающий такими свойствами, устроен следующим образом. Однородные сцинтилляторы в обоих счётчиках заменены на гетерогенные мультиплексные сцинтилляторы /1/. Каждый такой сцинтиллятор состоит из нескольких элементарных сцинтилляторов (рис. 3). Последние окружены

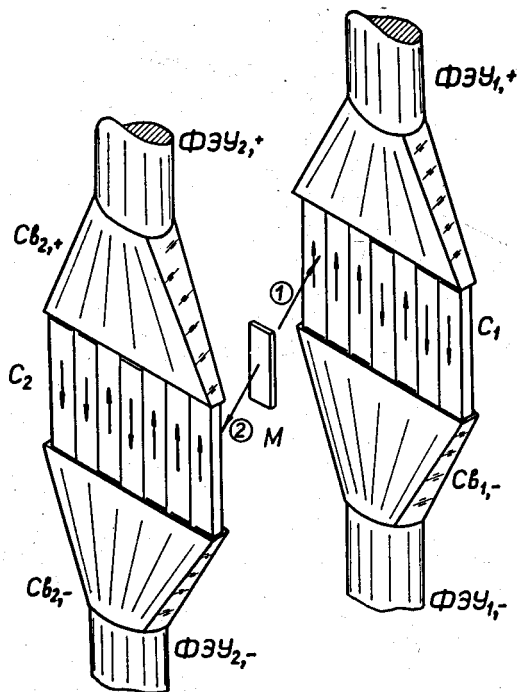


Рис. 3. Общий вид телескопа из двух мультиплексных сцинтилляционных счётчиков. М - мишень, С₁ и С₂ - сцинтилляторы счётчиков, Св - четыре световода, 1 и 2 - траектории частиц, вылетающих из мишени. Картины чередования направлений выхода света в двух сцинтилляторах являются зеркальными отражениями друг от друга.

с торцов двумя световодами и двумя фотоумножителями. Свет от сцинтилляций, вызванных заряженной частицей, в каждом элементарном сцинтилляторе может выйти только в один из двух световодов и не может перейти в соседние элементарные сцинтилляторы. Направления выхода света из элементарных сцинтилляторов чередуются от одного к другому по закону псевдослучайного кодирования. Для случая семи элементарных сцинтилляторов ($M = 7$) чередование выхода света описывается правилом /1,3/

↑ ↑ ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ для первого счётчика
и "зеркальным" правилом

↓ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ для второго счётчика.

Импульсы с фотоумножителей подаются на четыре схемы совпадений (рис. 4), с помощью которых отмечаются четыре группы событий: N_{++} , N_{--} , N_{+-} и N_{-+} . Эти наблюдаемые величины, как будет показано ниже, полностью определяют число искоемых коррелированных событий. При этом дискриминация по углу отбора 180-градусных угловых корреляций остается равной углу, который стягивается одним элементарным сцинтиллятором (при очень малых размерах мишени). Искомое число 180-градусных корреляций равно

$$N_{\text{коррел.}} = (N_{++} + N_{--}) - \frac{M^2 + 1}{M^2 - 1} (N_{+-} + N_{-+}). \quad (1)$$

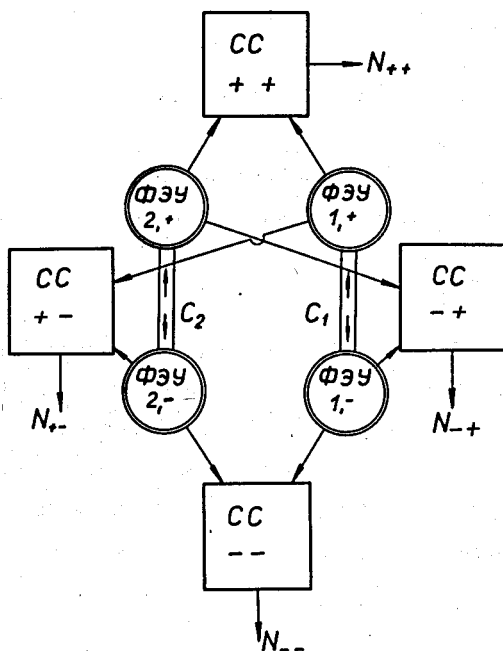


Рис. 4. Схема включения импульсов с фотоумножителей телескопа, состоящего из двух мультиплексных сцинтилляционных счётчиков, на совпадения. Всего имеется четыре схемы совпадений: CC_{++} , CC_{+-} , CC_{--} и C_{-+} , дающие четыре отсчёта: N_{++} , N_{+-} , N_{--} и N_{-+} , соответственно.

Для того чтобы доказать это соотношение, найдем распределение сигнала полезных событий (угол корреляции равен $180^\circ + \Delta\theta$), а затем фоновых событий (угол корреляции больше $180^\circ + \Delta\theta$ и меньше $180^\circ - \Delta\theta$) по всем четырем каналам совпадений: N_{++} , N_{--} , N_{+-} и N_{-+} . Обозначим через $f(i)$ угловое распределение частиц, образующих 180° -градусные угловые корреляции. Через $g(i)$ обозначим закон псевдослучайного кодирования, определяющий структуру мультиплексного счётчика. При этом картина чередования в первом счётчике является зеркальным отображением картины чередования во втором. Рассмотрим полезные корреляции (180°). Эти события вызывают только N_{++} и N_{--} совпадения и не могут вызвать N_{+-} и N_{-+} совпадений. Общее число полезных корреляций равно

$$(N_{++} + N_{--})_{\text{полезн.}} = \sum_i^M f(i) g(i) g(i) = \sum_i^M f(i). \quad (2)$$

Здесь учтено то, что $g(i)$ принимает значения $+1$ и (-1) , а поэтому $[g(i)]^2 = 1$.

Далее из свойств функции псевдослучайного кодирования $g(i)$ и условия зеркальности картин кодирования в двух счётчиках находим, что

$$(N_{+-})_{\text{полезн.}} = (N_{-+})_{\text{полезн.}} = 0. \quad (3)$$

Перейдем теперь к фоновым корреляциям, когда угол корреляции отличен от 180° . Обозначим через $h(k, m)$ вероятность того, что одна из двух частиц попадет в k -ый элементарный сцинтиллятор первого счётчика, а вторая частица - в m -ый элементарный сцинтиллятор. Функция $h(k, m)$ описывает двухмерный массив, образованный фоновыми событиями.

Если фон является равномерным, то функция

$$h(k, m) = n_\phi \quad (4)$$

не зависит от индексов k и m .

Фоновые события дают вклад в счёт совпадений всех четырех видов: N_{++} , N_{--} , N_{+-} и N_{-+} . Таким образом, совпадения N_{+-} и N_{-+} образованы только фоновыми совпадениями, и для нахождения алгоритма обработки данных необходимо только указать, сколько фоновых событий содержится в счёте совпадений N_{++} и N_{--} .

Элементарные рассуждения показывают, что

$$(N_{+-})_{\text{фон}} + (N_{-+})_{\text{фон}} = \frac{1}{2} (M-1) (M+1) n_{\phi} . \quad (5)$$

Здесь M - число элементарных сцинтилляторов в каждом счётчике. Аналогично доказывается, что

$$\begin{aligned} (N_{++})_{\text{фон}} &= \frac{1}{4} (M-1) (M+1) n_{\phi} , \\ (N_{--})_{\text{фон}} &= \frac{1}{4} (M-1) (M-3) n_{\phi} . \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда получаем:

$$\begin{aligned} N_{++} &= (N_{++})_{\text{полезн.}} + (N_{++})_{\text{фон}} = \sum_{(+)} f(i) + \frac{1}{4} (M-1) (M+1) n_{\phi} , \\ N_{--} &= (N_{--})_{\text{полезн.}} + (N_{--})_{\text{фон.}} = \sum_{(-)} f(i) + \frac{1}{4} (M-1) (M-3) n_{\phi} , \\ N_{+-} &= (N_{+-})_{\text{фон}} = \frac{1}{4} (M-1) (M+1) n_{\phi} , \\ N_{-+} &= (N_{-+})_{\text{фон}} = \frac{1}{4} (M-1) (M+1) n_{\phi} . \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь знаки $/ + /$ и $/ - /$ под символами суммирования указывают, что суммирование ведется только по тем значениям i , для которых функция $g(i)$ принимает положительные и, соответственно, отрицательные значения.

Соотношение (7) запишем иначе:

$$\begin{aligned} N_{++} + N_{--} &= \sum_i^M f(i) + \frac{1}{2} (M-1)^2 n_{\phi} , \\ N_{+-} + N_{-+} &= \frac{1}{2} (M-1) (M+1) n_{\phi} . \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, сумма полезных событий равна

$$\sum_i^M f(i) = N_{++} + N_{--} - \frac{M-1}{M+1} (N_{+-} + N_{-+}), \quad (9)$$

а плотность фоновых -

$$n_{\phi} = 2 \frac{(N_{+-} + N_{-+})}{(M-1)(M+1)}. \quad (10)$$

Как правило, фоновые события делают вклад и при угле корреляции, равном 180° . Тогда окончательно для суммы полезных событий находим

$$\sum_i^M f_0(i) = (N_{++} + N_{--}) - \frac{M^2+1}{M^2-1} (N_{+-} + N_{-+}). \quad (11)$$

Поскольку $M^2 \gg 1$, то последнее соотношение можно представить приближенными выражениями:

$$\begin{aligned} \sum_i^M f_0(i) &\approx (N_{++} + N_{--}) - \left(1 + \frac{2}{M^2}\right) (N_{+-} + N_{-+}) \rightarrow \\ &\rightarrow (N_{++} + N_{--}) - (N_{+-} + N_{-+}). \end{aligned} \quad (12)$$

84

До сих пор полезными событиями назывались такие, для которых угол корреляции равен 180° . Легко видеть, что все вышесказанное справедливо и для любого другого угла корреляции. Переход к общему случаю осуществляется перемещением плеч телескопа в требуемое положение точно так же, как это делают при работе с традиционным телескопом. Однако изменение угла корреляции в телескопе, состоящем из мультиплексных счётчиков, достигается не только поворотом плеч телескопа вокруг центра, совпадающего с мишенью, но также путем сдвига картины кода в одном из двух сцинтилляционных счётчиков на требуемое число шагов (рис. 5).

Телескоп из мультиплексных сцинтилляционных счётчиков, описанный выше, позволяет решать весьма необычные задачи.

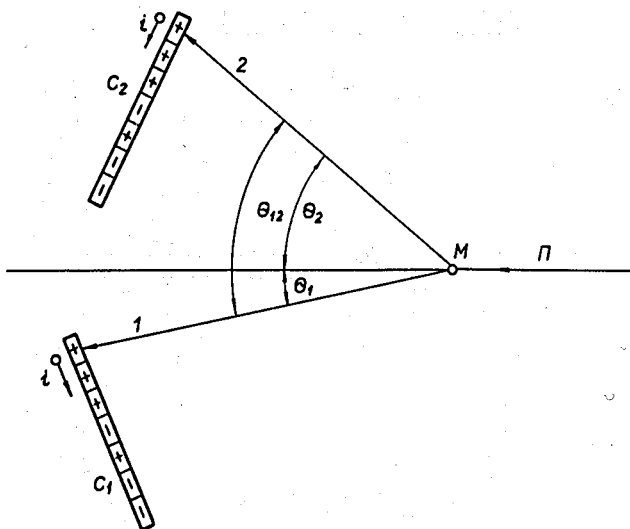


Рис. 5. Измерение угла корреляции в телескопе, состоящем из двух мультиплексных счётчиков. Конфигурация, полученная путем поворота плеч телескопа вокруг центра, совпадающего с мишенью.

В частности, телескоп из мультиплексных счётчиков в некоторых опытах может выполнять функцию определяющих счётчиков. Наиболее ярко это можно продемонстрировать на примере экспериментов со встречными пучками. На рис. 6 показана схема такого эксперимента. Из области встречи пучков А и Б, ограниченной цилиндрической поверхностью S , вылетают частицы от разных процессов. Вероятность возникновения процесса равномерно распределена вдоль оси пучков. Телескоп, состоящий из двух мультиплексных сцинтилляторов, C_1 и C_2 , настроен на регистрацию бинарной реакции, происходящей в участке области встречи пучков, который обозначен индексом $K = 0$. Участки, лежащие слева, имеют $K < 0$, а участки, лежащие справа, имеют $K > 0$. Индекс i указывает номер элементарного сцинтиллятора в обоих счётчиках.

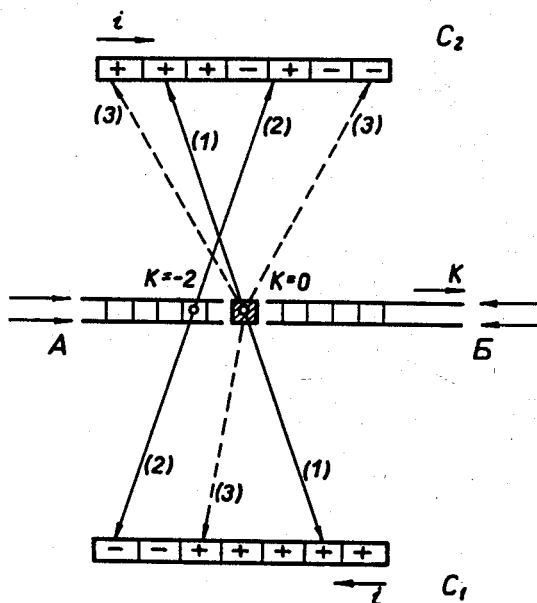


Рис. 6. Схема эксперимента на встречных пучках А и Б: C_1 и C_2 - мультиплексные счётчики телескопа. Событие 1 - 1 - бинарная реакция, произошедшая в элементе области встречных пучков с индексом $K=0$. Событие 2 - 2 - такой же процесс в элементе области $K=-2$. Событие 3 - 3 - вылет трех частиц из элемента области взаимодействия частиц с индексом $K=0$.

Поскольку в опытах на встречных пучках лабораторная система координат совпадает с системой центра масс сталкивающихся частиц, то частицы бинарного канала образуют показанную на рис. 6 прямую линию. Телескоп настроен на регистрацию всех бинарных реакций, происходящих в центральном участке $K=0$, с углом вылета от θ_1 до θ_2 .

В группу фоновых процессов входят следующие процессы. Прежде всего - это бинарные реакции, возникшие в участках области встречи пучков с индексом $K \neq 0$. Мультиплексными счётчиками эти процессы будут восприниматься как процессы, дающие угловые корреляции, отличные от

180°. Выше было показано, что алгоритмы (11) и (12) обработки наблюдаемых величин N_{++} , N_{--} , N_{+-} и N_{-+} приводят к вычитанию такого фона.

Однако при высоких энергиях в опытах на встречных пучках реализуются многочастичные каналы, когда все частицы являются проникающими и все попадают в счётчик. Полностью отсутствует эффект сдувания частиц при переходе от системы центра масс к лабораторной системе, возникающий в условиях, когда энергия частицы в системе центра масс достаточно мала. Поэтому необходимо проверить, обеспечивают ли алгоритмы (11) и (12) вычитание фона в случае многочастичных реакций.

Для этого рассмотрим процесс, происходящий в участке с индексом $K = 0$, когда в счётчики C_1 и C_2 попадают три частицы. Возможные конфигурации появления импульсов в четырех фотоумножителях приведены на рис. 7. При этом в случае срабатывания одноименных элементарных сцинтилляторов в одном из счётчиков возникает один отсчёт в соответствующей схеме совпадения. Если же они разноименные, то регистрируются оба совпадения. Всего возникает четыре группы комбинаций. Вероятности их появления, отнесенные к одному событию, равны:

$$N_{++} = \frac{M+1}{2} \frac{1}{3} \left(\frac{M+1}{2} + \frac{M+1}{2} \right) = \frac{1}{6} (M+1)^2, \\ N_{--} = \frac{M-1}{2} \frac{1}{3} \left(\frac{M-1}{2} + \frac{M-1}{2} \right) = \frac{1}{6} (M-1)^2, \quad (13)$$

$$N_{+-} = \frac{M+1}{2} \frac{1}{3} \left(\frac{M-1}{2} + \frac{M-1}{2} \right) = \frac{1}{6} (M^2 - 1),$$

$$N_{-+} = \frac{M-1}{2} \frac{1}{3} \left(\frac{M+1}{2} + \frac{M+1}{2} \right) = \frac{1}{6} (M^2 - 1);$$

$$N_{++} + N_{--} = \frac{M^2 + 1}{3}, \quad (14)$$

$$N_{+-} + N_{-+} = \frac{M^2 - 1}{3}.$$

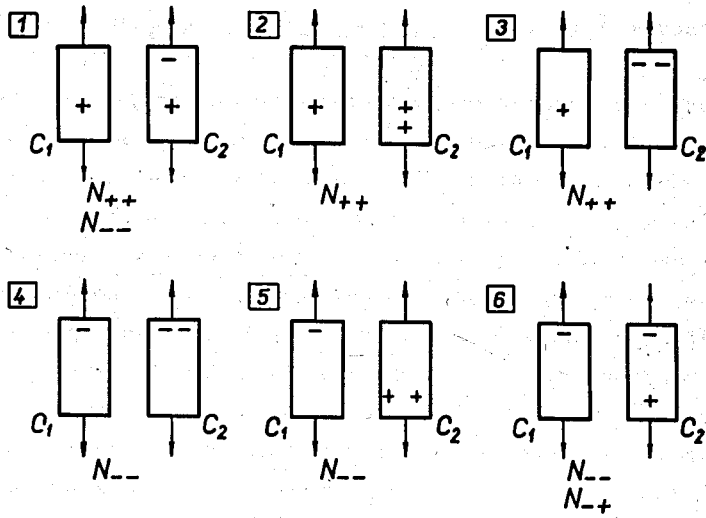


Рис. 7. Эксперимент на встречных пучках. Возможные конфигурации импульсов в четырех фотоумножителях от трехчастичной реакции. Если две частицы, попавшие в один из счётчиков телескопа, поджигают элементарные сцинтилляторы одноименного знака, то схемы совпадений дают один отсчёт. Если же две частицы в одном и том же счётчике поджигают элементарные сцинтилляторы разноименного знака, то сосчитываются два импульса. Например, для первой конфигурации: N_{++} и N_{+-} .

Остается проверить, дает ли применение алгоритма (11) к этим событиям нулевой вклад в $\sum_i^M f(i)$. Действительно, это так:

$$\begin{aligned}
 & (N_{+++} + N_{---}) - \frac{M^2 + 1}{M^2 - 1} (N_{+-} + N_{-+}) = \\
 & = \frac{M^2 + 1}{3} - \frac{M^2 + 1}{M^2 - 1} \frac{M^2 - 1}{3} = 0.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Легко убедиться в том, что принятое выше ограничение участка индексом $K = 0$ никак не сказывается на проведенных выкладках. Поэтому в каком бы участке встречи пучков не произошел процесс с вылетом трех частиц, он всегда дает вклад в $\sum_i^M f(i)$, равный нулю.

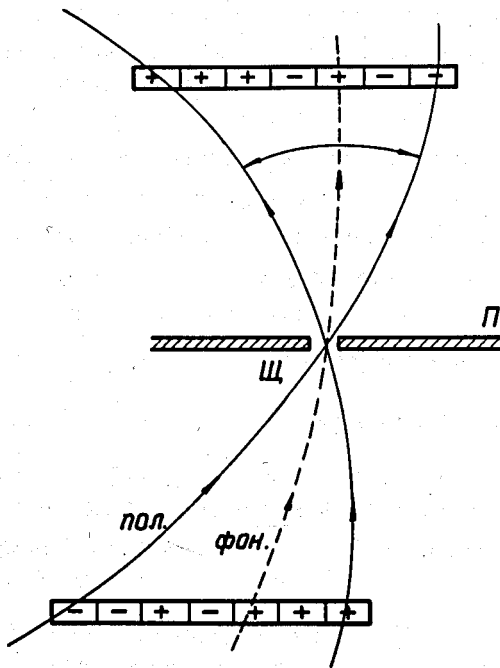


Рис. 8. Схема использования телескопа из мультиплексных счётчиков для отбора одиночных частиц, прошедших через щель Ш, и имеющих заданную кривизну траектории, в широком интервале углов, которые частицы образуют с центральной плоскостью П.

Наконец, следует заметить, что всё это верно также в случае любого многочастичного процесса. Единственное, что необходимо, — это то, чтобы отсутствовали какие-либо взаимные угловые корреляции между частицами.

Если это условие нарушается, то интервал захватываемых углов $\theta_1 \mp \theta_2$ придется разбить на несколько самостоятельных интервалов.

85

В заключение перечислим еще несколько типичных задач, которые можно решить с помощью телескопа, состоящего из двух мультиплексных сцинтилляционных счётчиков:

1. Выделение событий, когда через счётчики проходят одиночные частицы, ограниченные одной щелью, траектория которых искривлена магнитным полем в области между счётчиками. Телескоп регистрирует только частицы с заданной кривизной траектории в условиях фона частиц с другой кривизной (рис. 8).

2. Вырезание рабочего объема в опытах с газовой мишенью без помощи коллимирующих входных щелевых окон или определяющих счётчиков.

3. Выделение событий в мишени M , которая помещена в магнитное поле, когда эти события характеризуются определенным сочетанием кривизны траектории частиц и угловой корреляции между ними. Например, задана кривизна $\frac{1}{R}$ и угол между частицами α .

Литература

1. Л.М. Сороко. Сцинтилляционный счётчик с использованием преобразования Адамара. Сообщение ОИЯИ, P13-5696, Дубна, 1971.
2. Л.М. Сороко. Мультиплексная мишень. Сообщение ОИЯИ, P13-5699, Дубна, 1971.
3. Л.М. Сороко. Псевдошумовые последовательности и применение их для мультиплексных систем регистрации частиц. Сообщение ОИЯИ, P13-5722, Дубна, 1971.
4. Д. Ритсон. Экспериментальные методы в физике высоких энергий, Наука, 1964, стр. 325-347.

Рукопись поступила в издательский отдел

28 июня 1971 года.