

НИЦ «Курчатовский институт» - Институт Физики Высоких Энергий ,
Протвино, Московская обл., пл. Науки 1, 142281, Россия

Сессия-конференция Секции Ядерной физики ОФН РАН, Новосибирск, 10-13 марта 2026 г.

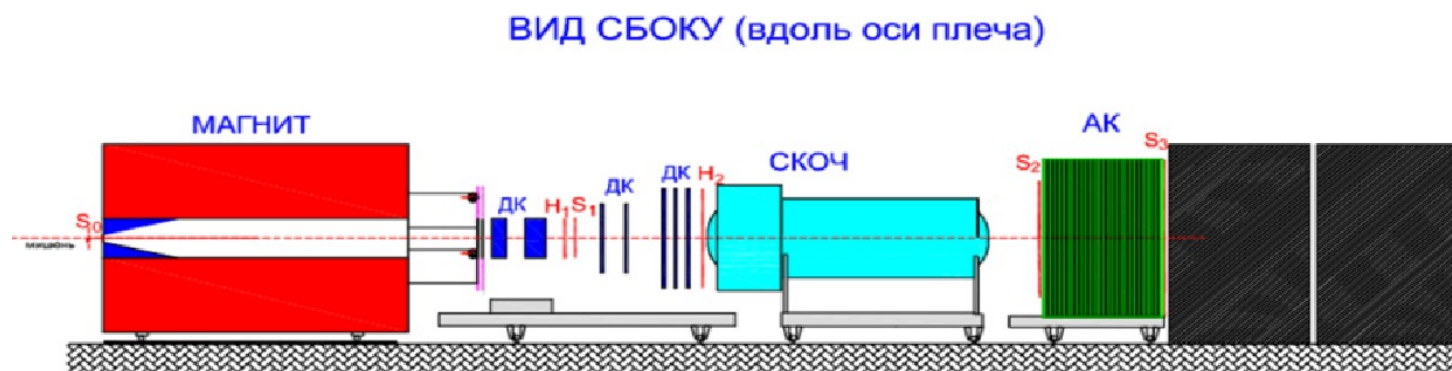
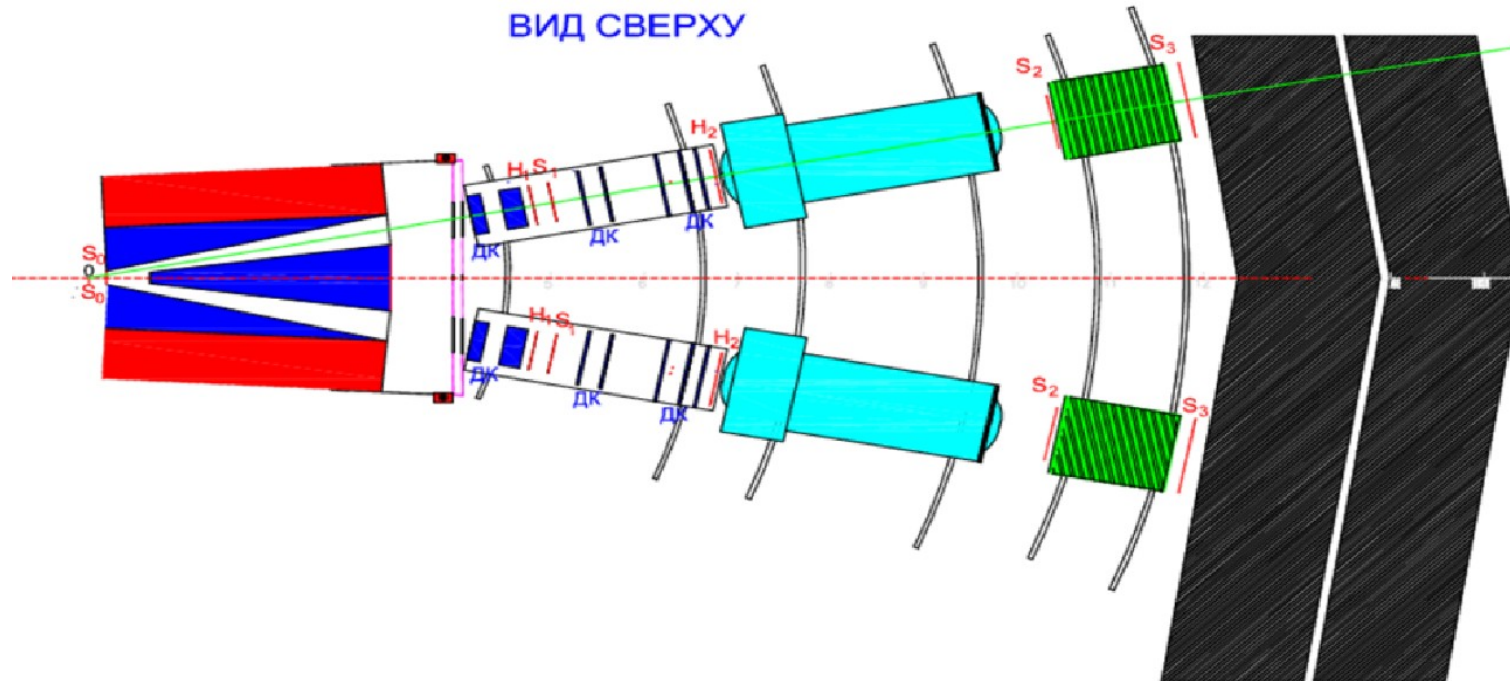
М.Ю. Боголюбский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов, А.А. Иванилов,
А.Н. Криницын, Н.В. Кулагин, А. А. Минаенко, Д.И. Паталаха, В.В. Скворцов

Калибровка спектрометра Колец Черенковского
излучения по физическим событиям на установке
ФОДС ускорительного комплекса У-70

Рассмотрена 4-х этапная процедура калибровки Спектрометра Колец Черенковского излучения (СКОЧ) с коническим отражателем света и сферическим зеркалом по физическим событиям на установке ФОДС ускорительного комплекса У-70 НИЦ Курчатовский институт - ИФВЭ. Использовались данные рА-взаимодействий при импульсе пучка 50 ГэВ/с. Метод построен на анализе больших данных с помощью квадратичного функционала, зависящего от множества переменных, в число которых входят набор временных сигналов СКОЧ, геометрические параметры траектории частицы и ее импульс, координаты ее попадания на основание конического отражателя, ориентация сработавших каналов СКОЧ относительно друг-друга и относительно трека частицы. Продемонстрировано чистое разделение в отобранных для калибровки событиях π^\pm - , K^\pm -мезонов и протонов в принятом интервале их импульсов (6-15) ГэВ/с . Излагаемый метод калибровки, в принципе, применим для любого измерительного устройства, где априори известны результаты на некотором множестве опорных точек.

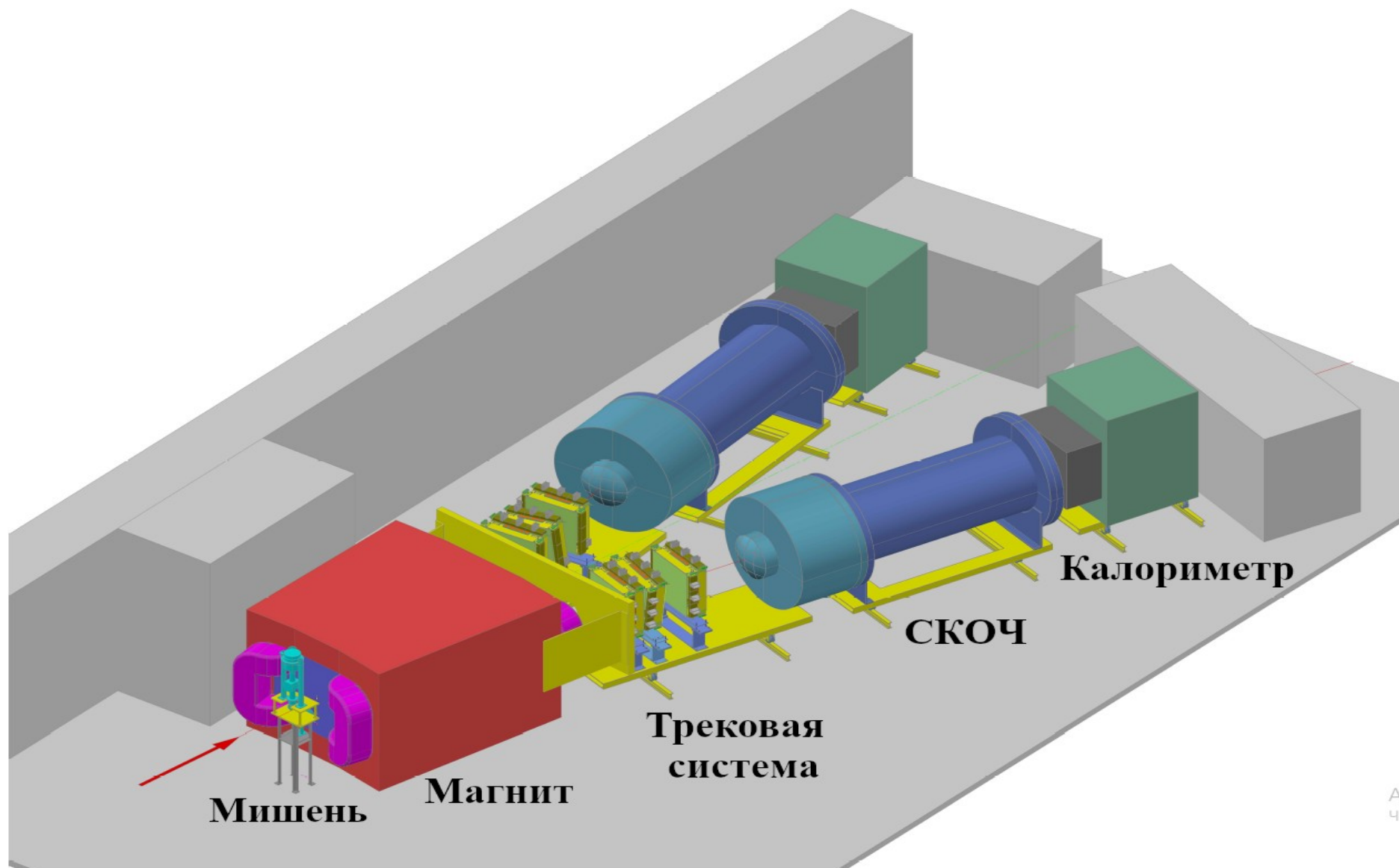
Спектрометр ФОДС

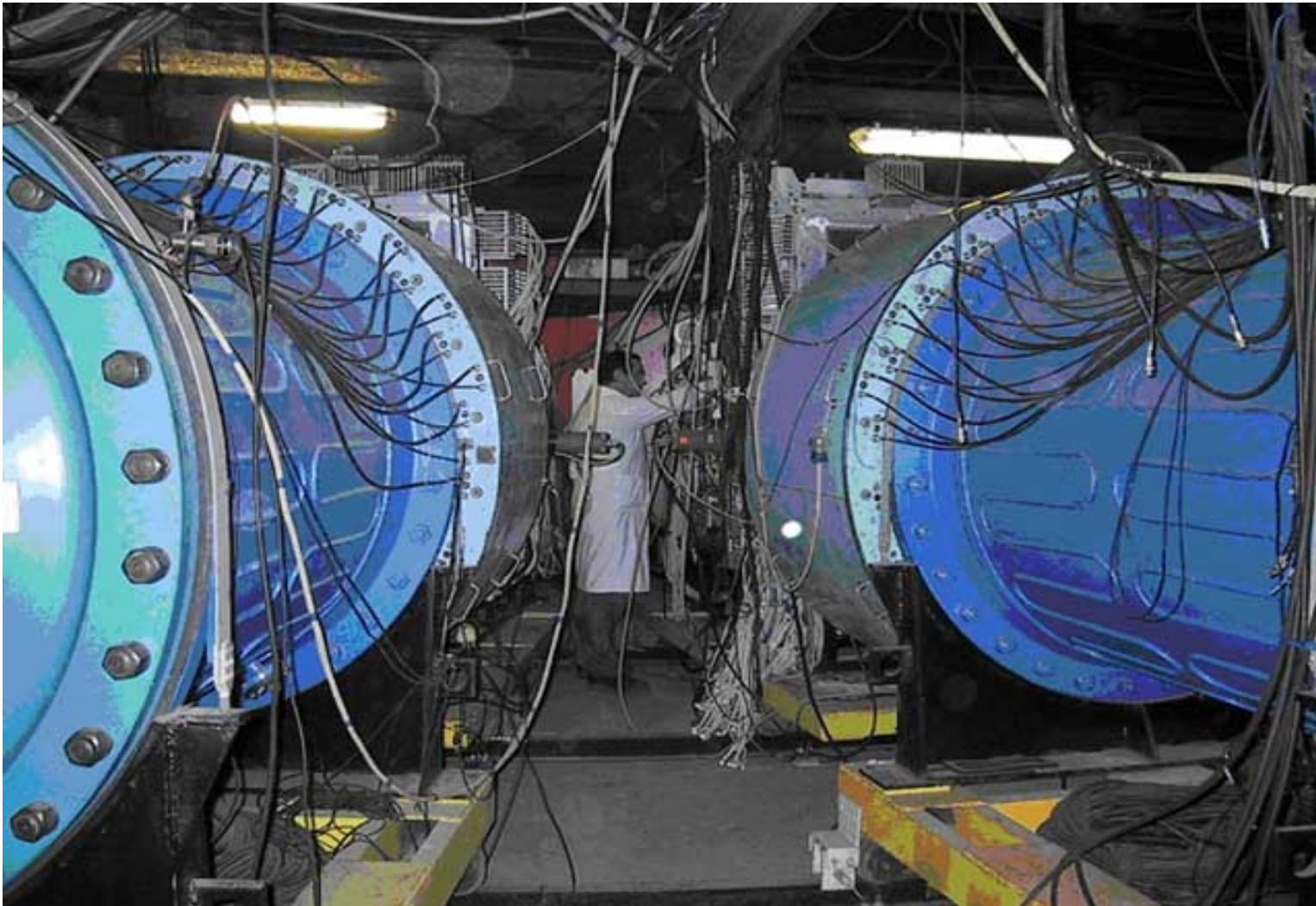
\check{C}_i - черенковские пороговые счётчики, S_i – сцинтилляционные счётчики, СКОЧ – спектрометр колец черенковского излучения, ДК — дрейфовые детекторы, АК – адронный калориметр.



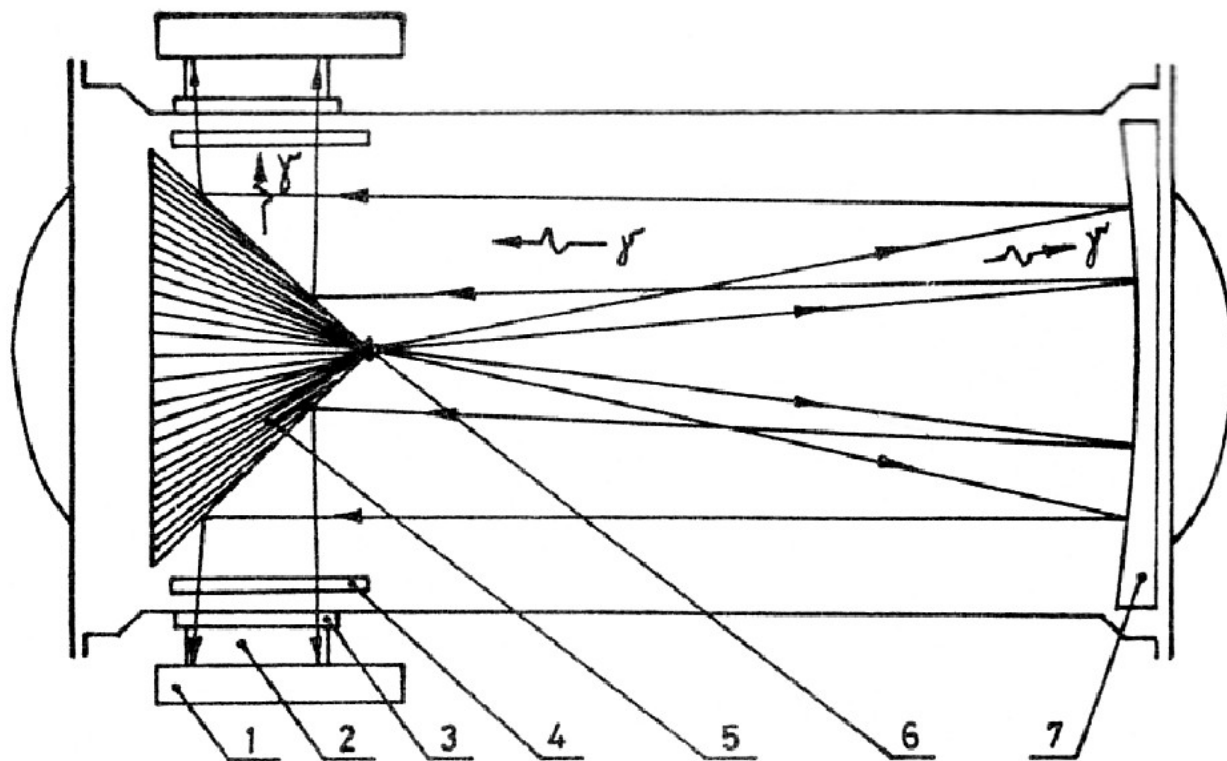
Спектрометр ФОДС

общий вид





Фотография СКОЧ



1 – ГФЭУ (длина фотокатода 24 см), 2 – световод, 3 – окно из оргстекла, 4 – цилиндрическая линза, 5 – пирамидальный отражатель, 6 – газовый радиатор, 7 – сферическое зеркало (фокусное расстояние 250 см). Стрелками показано направление движения фотонов для двух углов черенковского излучения.

Системы координат и геометрические параметры треков

Используется правая декартовая система координат XYZ , где ось Y направлена вертикально вверх, ось Z совпадает с продольной осью плеча установки. Кроме того, при анализе сигналов с данного ГФЭУ используется связанная с ним система координат, получаемая из исходной системы XYZ поворотом вокруг оси Z так, чтобы новая ось X смотрела на данный ГФЭУ. В этой повернутой системе координат параметризация прямолинейной после спектрометрического магнита ФОДС траектории частицы имеет вид

$$x = a + k_x * z$$

$$y = b + k_y * z$$

Коэффициенты a , b , k_x , k_y найдены в программе геометрической реконструкции события, Ниже встретятся углы трека $\Theta_x = \arctan(k_x)$ и $\Theta_y = \arctan(k_y)$ с осями X и Y , соответственно, в плоскостях XZ и YZ .

Формулы Черенковского излучения

Основополагающей для наших целей является известная формула для угла Черенковского излучения θ

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

где n – показатель преломления света в газовом радиаторе спектрометра, $\beta = p/E$ – скорость частицы, p и E – импульс и полная энергия частицы.

Из формулы (1) следует, что квадрат массы m регистрируемой частицы выражается через угол θ как

$$m^2 = p^2 \cdot \Omega(\theta), \quad (2)$$

где функция

$$\Omega(\theta) = n^2 \cos^2 \theta - 1. \quad (3)$$

Нам понадобится еще следующее из (2) выражение для θ , используемое при фите данных для определения показателя преломления n

$$\theta = \arcsin(\sqrt{n^2 - 1 - m^2/p^2} / n). \quad (4)$$

- 1) На 1-ом рассматривается перевод временных измерений в каналах СКОЧ в углы. Для этого анализируются планарные события, в которых данный ГФЭУ, трек частицы и продольная ось плеча установки находятся в одной плоскости.
- 2) 2-ой этап состоит из анализа, так называемых, парных с обитий. Под последними подразумеваются планарные события с двумя противоположно расположенными сработавшими ГФЭУ. Для таких событий оценка угла Черенковского излучения как полусуммы углов, измеренных в каждом из двух ГФЭУ пары, свободна от погрешностей в геодезической привязки оси СКОЧ к оси плеча и также не зависит от угла распространения частицы. Определяемая зависимость так найденного угла Черенковского излучения от импульса частицы позволяет найти коэффициент преломления рабочего газа СКОЧ.
- 3) На 3-ем этапе определяется первое приближение калибровочных коэффициентов как отношение теоретического значения угла Черенковского излучения, вычисленного при данном импульсе частицы с учетом уже найденного коэффициента преломления, к его оценке по результатам временных измерений в данном ГФЭУ.
- 4) И, наконец, на 4-ом этапе итерационно находятся окончательные значения калибровочных коэффициентов. Каждая итерация соответствует запуску задания для обсчета выбранной части статистики на компьютерном кластере. Применяемый здесь метод построен на анализе больших данных с помощью квадратичного функционала М.Н.К., зависящего от множества переменных таких как измеренные времена в ГФЭУ, геометрические параметры траектории частицы и ее импульс, координаты ее попадания на основание конического отражателя, ориентация сработавших каналов СКОЧ относительно друг-друга и относительно трека частицы. Для вычисления калибровочных коэффициентов принимались лишь каналы, чьи временные измерения ложатся на конус Черенковского излучения.

Функционал М.Н.К. (4-й этап)

Квадрат массы m регистрируемой частицы выражается через угол θ как

$$m^2 = p^2 \cdot \Omega(\theta) , \quad (1)$$

где функция

$$\Omega(\theta) = n^2 \cos^2 \theta - 1 . \quad (2)$$

Для определения массы частицы в соответствии с формулой (2) через функцию $\Omega(\theta)$ будем записывать последнюю в виде некоторого выражение через измеряемые в эксперименте величины в виде другой функции F

$$\Omega(\theta) = F(\Theta, k_x, k_y, x, y) , \quad (3)$$

где Θ - оценка угла Черенковского излучения по временным измерению в данном канале, k_x, k_y - угловые параметры траектории частицы, x, y - координаты точки попадания трека на основание конического отражателя. Для функции F будем использовать разложения в степенной ряд с точностью до квадратичных членов включительно по переменным Θ, k_x, k_y, x, y . Для удобства работы с записью разложения введем вектор Q (его первая компонента фиксирована и равна единице)

$$Q = (1, \Theta, k_x, k_y, x, y, \Theta^2, \Theta k_x, \Theta k_y, \Theta x, \Theta y, k_x^2, k_x k_y, k_x x, k_x y, k_y^2, k_y x, k_y y, x^2, xy, y^2) . \quad (4)$$

Тогда указанное разложение примет вид

$$F(\Theta, k_x, k_y, x, y) = \sum_{i=1}^{21} C_i \cdot Q_i , \quad (5)$$

где C_i - коэффициенты разложения. Их определение сводится к минимизации функционала м.н.к.

$$\chi^2 = \sum_n (\Omega_n - F_n)^2 , \quad (6)$$

здесь n - номер события, Ω_n - значение функции (2) в в данном событии, соответствующее табличной массе M выделяемой в калибровочной процедуре частицы, p - ее импульс, F_n - вычисленное значение функции (5) по измеренным данным для переменных Θ, k_x, k_y, x, y .

Дифференцируя функционал χ^2 по коэффициентам C_i и приравнивая нулю производные, получаем систему линейных уравнений для их определения

$$\sum_{j=1}^{21} \langle Q_i \cdot Q_j \rangle \cdot C_j = \langle Q_i \cdot M^2/p^2 \rangle , \quad (7)$$

где индексы i и j пробегают значения от 1 до 21 включительно, а $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по событиям. Решение системы (7) находилось методом из пакета ЦЕРН-root.

Отбор событий для калибровки

Использовались данные рА-взаимодействий при импульсе пучка 50 ГэВ/с, при этом учитывались лишь события с одним выделенным адронным треком в конечном состоянии с углом падения на СКОЧ не более 20 мрад.

Сигналы с ГФЭУ принимались лишь в том случае, если кратность срабатывания канала равнялась $N_h = 1$ при полном количестве сработавших ГФЭУ $N_s \geq 6$.

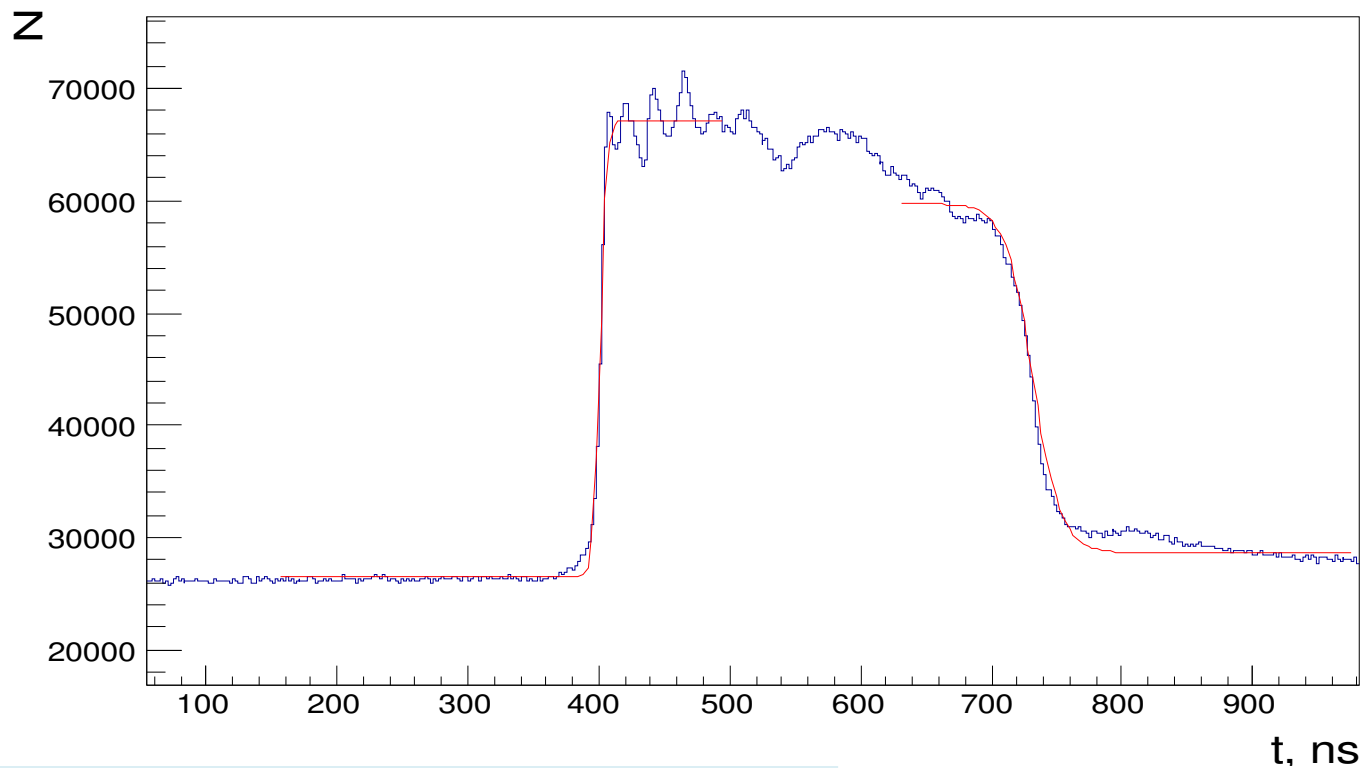
Была принята область импульсов вторичных частиц $6 < P < 15$ ГэВ/с, в котором полностью светятся π^\pm -, K^\pm -мезоны, а протоны - при $P > 12$ ГэВ/с.

Будем использовать не измеренное время t , а эквивалентную переменную Θ_t (с размерностью угла), которая является линейным преобразованием времени t , сводящимся, в сущности, в сдвигу и изменению масштаба:

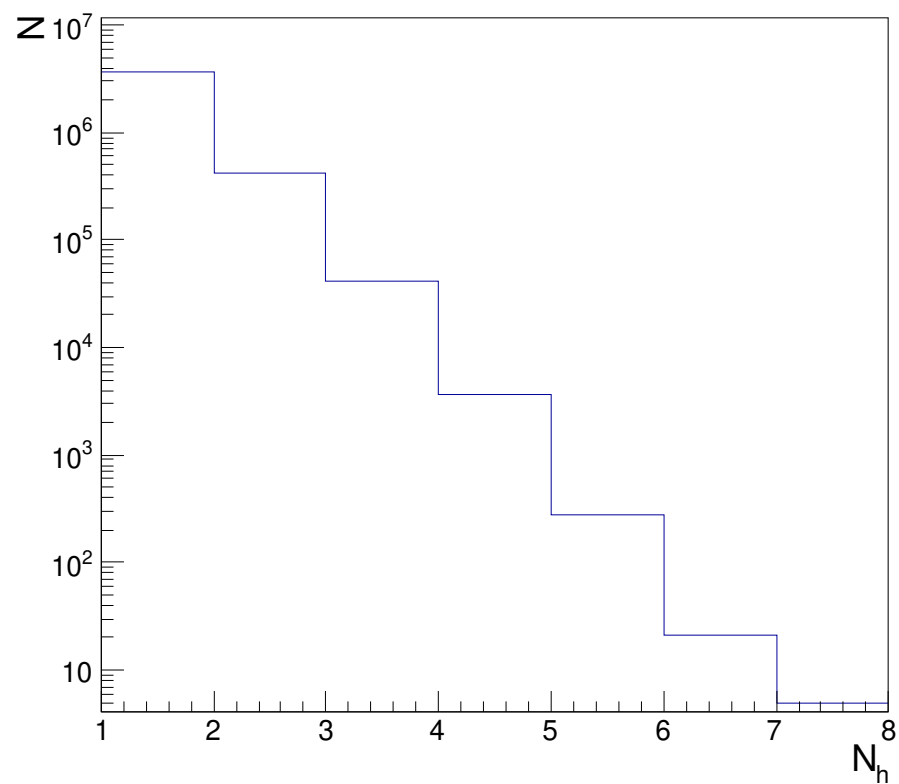
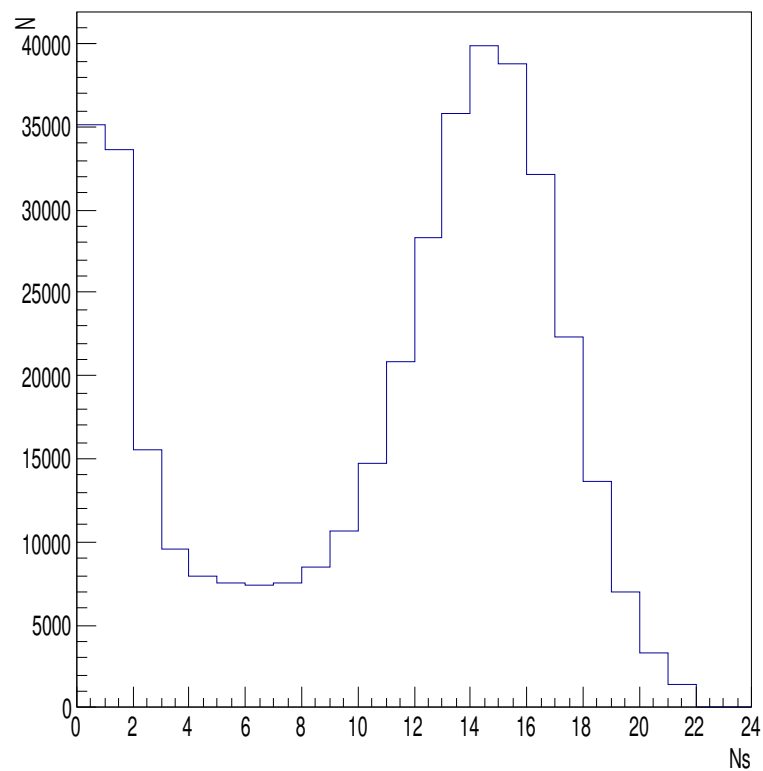
$$\Theta_t = c + v \cdot (t - T_1) .$$

Параметры c , v являются фиксированными и одинаковыми для всех ГФЭУ. Было выбрано: $c = 0.04$ рад, что соответствует по техническому описанию конструкции СКОЧ минимальному регистрируемому углу в нем, а $v = d / (\langle T \rangle \cdot F_m)$, где d - длина фотокатода, F_m - фокусное расстояние зеркала, $\langle T \rangle$ - среднее для каналов ГФЭУ значение полного времени дрейфа. Данное преобразование сохраняет всю временную информацию о сигнале и не влияет на окончательный результат.

Сплошные линии - фиты переднего и заднего фронта распределения функцией Ферми, которые позволяет найти начало временной полочки T_1 и ее конец T_2 , а также разность $T = T_2 - T_1$, т. е. полное время дрейфа.



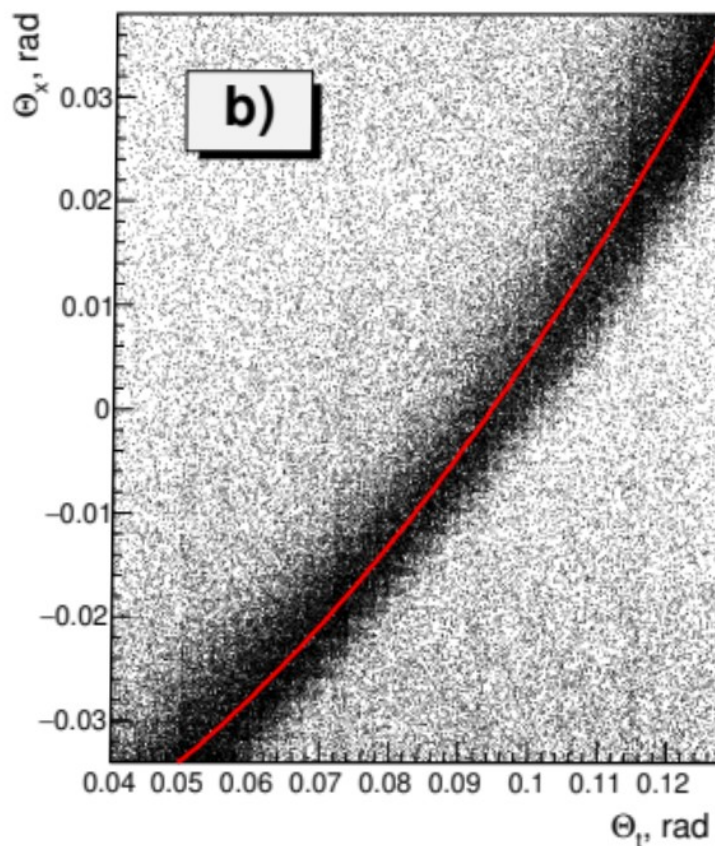
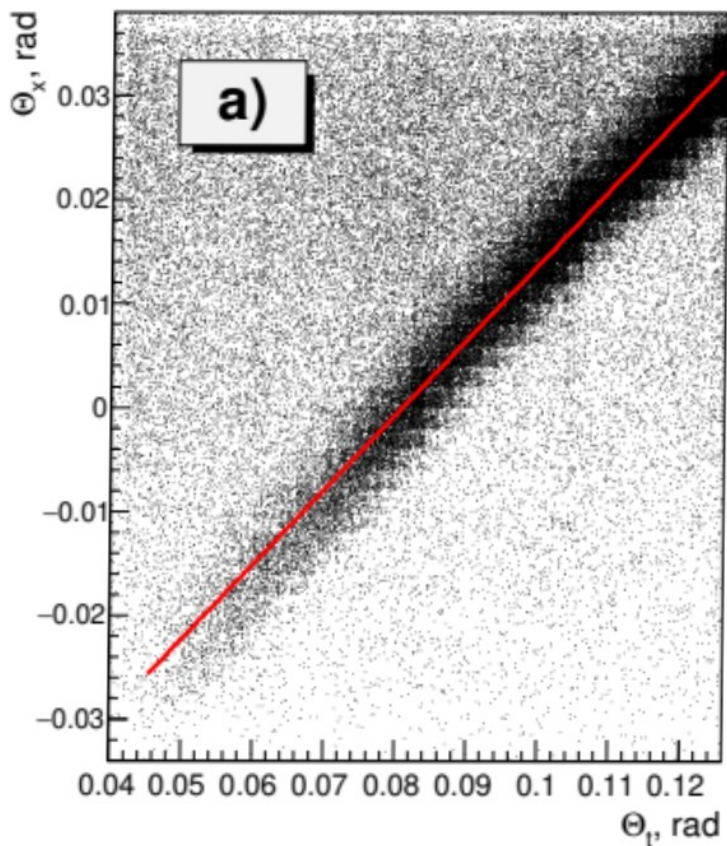
Множественности срабатывания N_s каналов СКОЧ (слева) и число хитов N_h в ГФЭУ (справа)



Рассмотрим углы трека Θ_x и Θ_y соответственно в плоскостях XZ и YZ в упомянутой выше повернутой системе координат, в которой ось X смотрит на данный ГФЭУ.

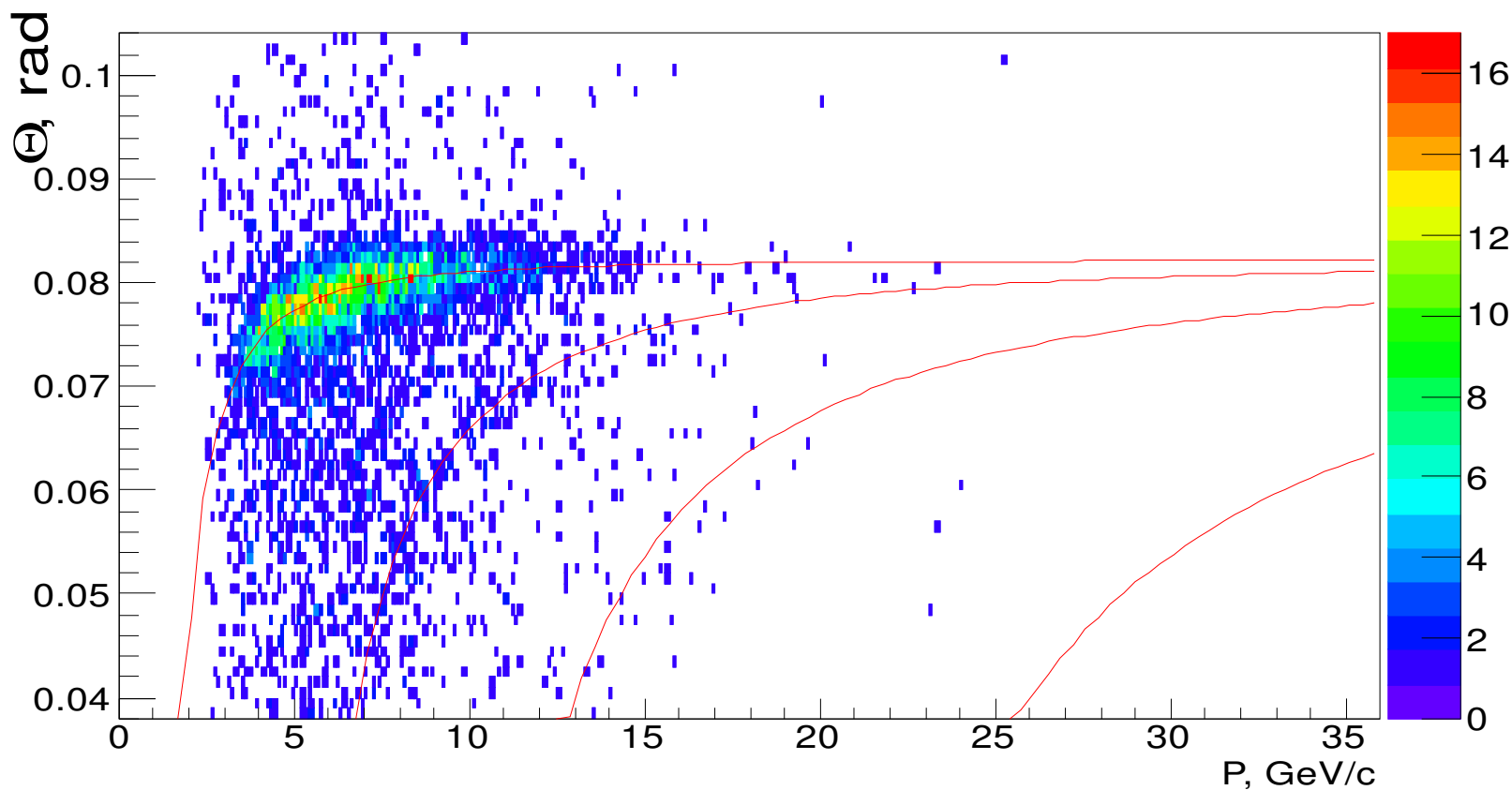
Планарные события отбирались требованием малости по модулю угла $|\Theta_y| < 10$ мрад.

На следующих рис. показаны 2Д-графики для двух ГФЭУ с характерными зависимостями угла Θ_x от величины Θ_t . Для первого из них зависимость практически линейная, для второго заметны явные нелинейности. Сплошные линии - фит данных полиномом второго порядка (пакет CERN-root). Представленный анализ осуществлялся для всех ГФЭУ СКОЧ. Результаты фита позволяют перевести в каждом канале временные измерения Θ_t в шкалу реальных углов с учетом нелинейности ГФЭУ.

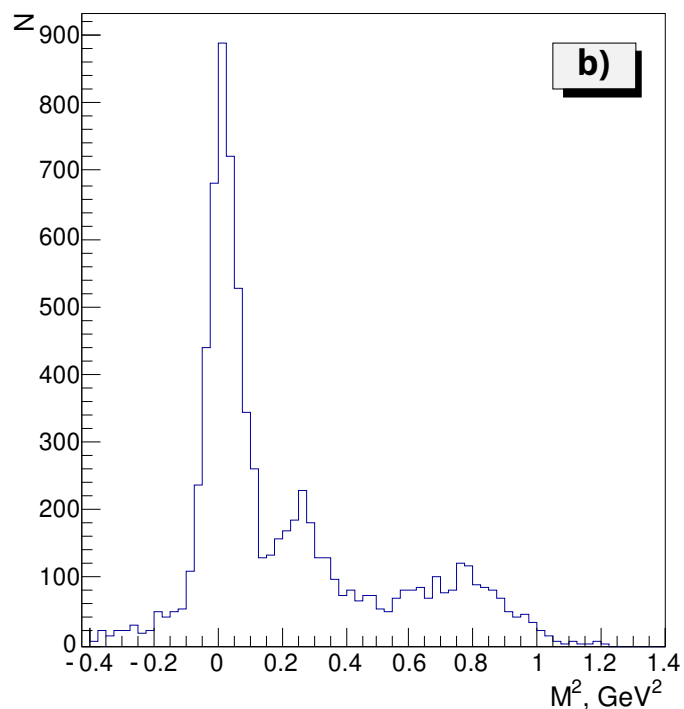
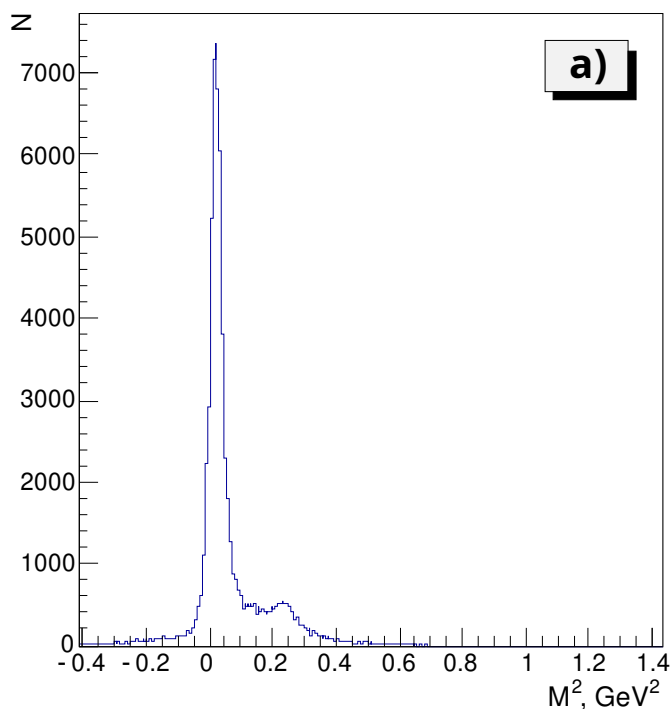


Под парными событиями подразумеваются планарные события с двумя противоположно расположенными сработавшими ГФЭУ. Для таких событий оценка угла Черенковского излучения Θ определяется как полусумма углов, измеренных в каждом из двух ГФЭУ пары.

2Д-график зависимости угла Черенковского излучения Θ от импульса частицы. Сплошными линиями показаны теоретические зависимости для π^\pm -, K^\pm -мезонов, протонов и дейтронов (сверху вниз). Данные для π^\pm -мезонов использовались для фита (пакет CERN-root) и определения коэффициента преломления рабочего газа СКОЧ в соответствии с формулой зависимости Θ от импульса P и от n как параметра. Перед процедурой фита предварительно выделялась дорожка, соответствующая π^\pm -мезонам, при $0.066 < \Theta < 0.085$ рад с отбрасыванием данных для более тяжелых частиц. Ширина дорожки определялась требованием, чтобы значение 2Д-графика при данных Θ и P превышала $0.15 \cdot Zm$, где Zm - максимум 2Д-графика при рассматриваемом значении P .



Спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) в двух характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с (a) и 12-15 ГэВ/с (b), выбранных для калибровки. Наблюдаемые пики соответствуют π^\pm -, K^\pm -мезонам и протонам.



Выше рассматривались планарные и парные события. Снимем указанные ограничения и перейдем далее ко всем событиям.

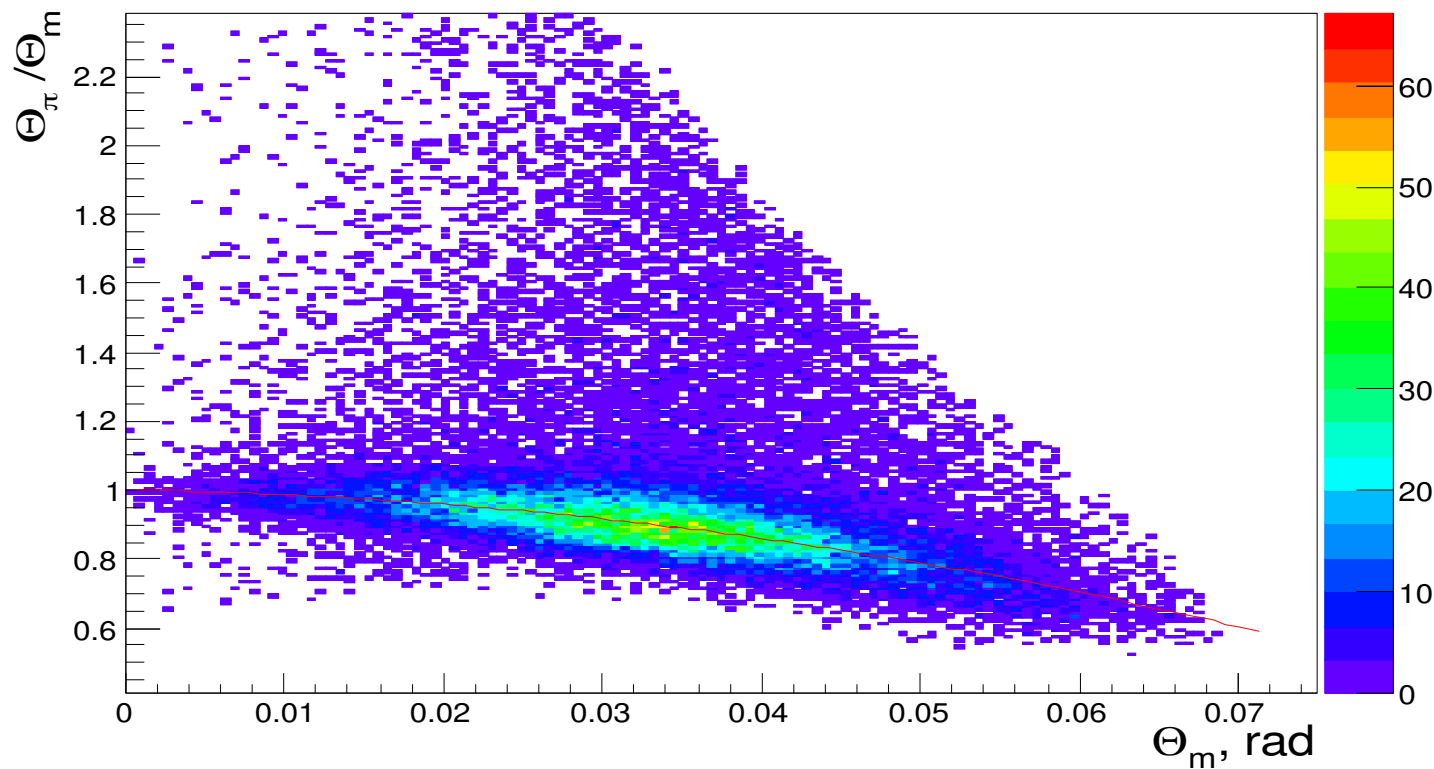
Для них введем величину Θ_m , которую будем рассматривать в качестве оценки угла Черенковского излучения в данном канале (ГФЭУ)

$$\Theta_m = ((\Theta_i - \Theta_x)^2 + \Theta_y^2)^{1/2} ,$$

где Θ_i - значение угла, найденного в данном i -ом канале СКОЧ как это было показано выше при анализе зависимостей Θ_x vs Θ_t (2Д-графики).

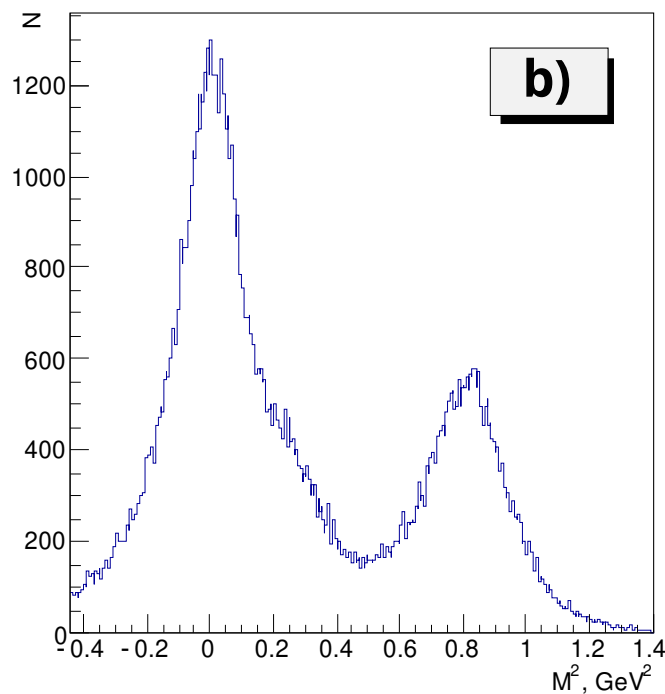
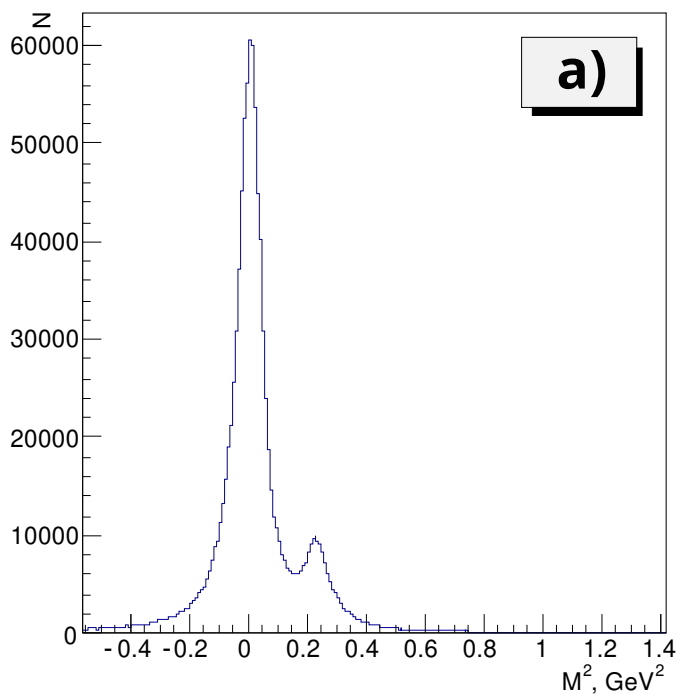
Все события : 1-ое приближение калибровочных коэффициентов как квадратичной функции от Θ_m

Для учета aberrаций в оптической системе СКОЧ и погрешностей совмещения продольных осей СКОЧ и плеча ФОДС калибровочные коэффициенты определялись индивидуально для набора возможных областей, каждая из которых характеризовалась тремя индексами i, j, k . Здесь $i=1,2, \dots, 24$ - номер рассматриваемого ГФЭУ, $j=1,2, \dots, 24$ - номер ГФЭУ, на который смотрит трек частицы в поперечной плоскости, $k=1,2$ ($k=1$ - если угол трека в плоскости XZ в системе координат данного канала $\Theta_x > 0$ и $k=2$ - в противном случае). Сплошная линия — фит полиномом 2-го порядка (пакет ЦЕРН-root) отношения Θ_π / Θ_m для одной из комбинаций i, j, k , где Θ_π - теоретическое значение угла Черенковского излучения.



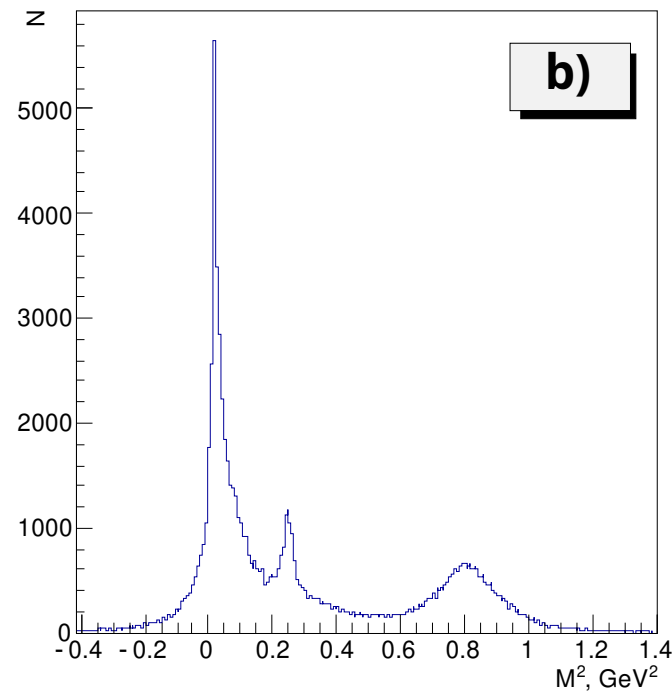
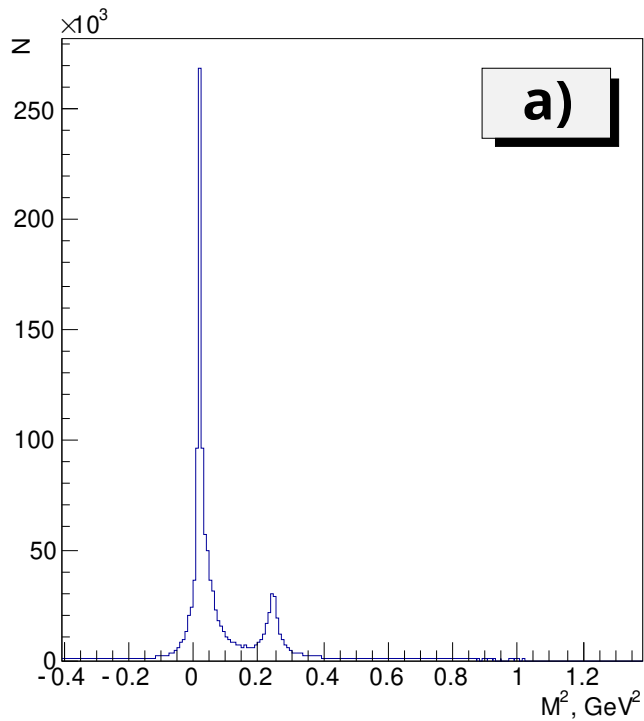
Все события: 1-ое приближение калибровочных коэффициентов (спектр квадратов масс по каналам СКОЧ)

Спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) в двух характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с (a) и 12-15 ГэВ/с (b), выбранных для калибровки. Наблюдаемые пики соответствуют π^\pm , K^\pm -мезонам и протонам.



Все события: Окончательное определение калибровочных коэффициентов (спектр квадратов масс по каналам СКОЧ)

Спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) в двух характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с (a) и 12-15 ГэВ/с (b), выбранных для калибровки. Наблюдаемые пики соответствуют π^\pm -, K^\pm -мезонам и протонам.



Сигналы с ГФЭУ после процедуры калибровки дают набор значений углов, образующих кластер, в котором подсчитывается среднее значение угла $\langle \Theta \rangle$ и дисперсия σ распределения по углам. Все точки кластера проходят браковки в цикле программных итераций, где для них рассматриваются отклонения

$$d = \Theta - \langle \Theta \rangle .$$

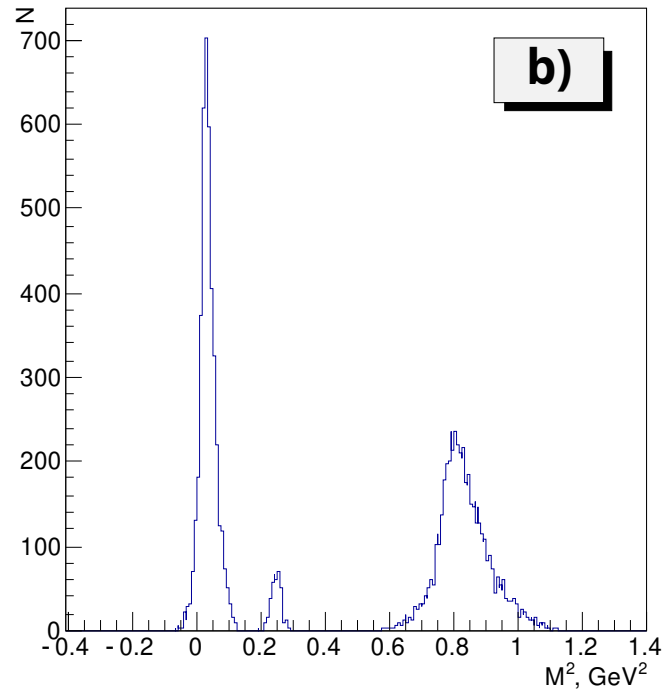
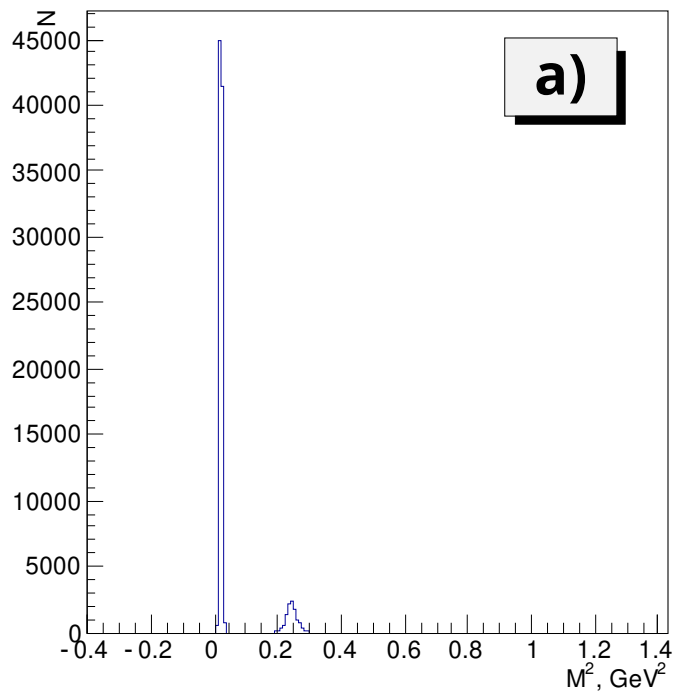
На каждой итерации бракуется одна точка с наибольшим отклонением по модулю $|d|$, при условии, что

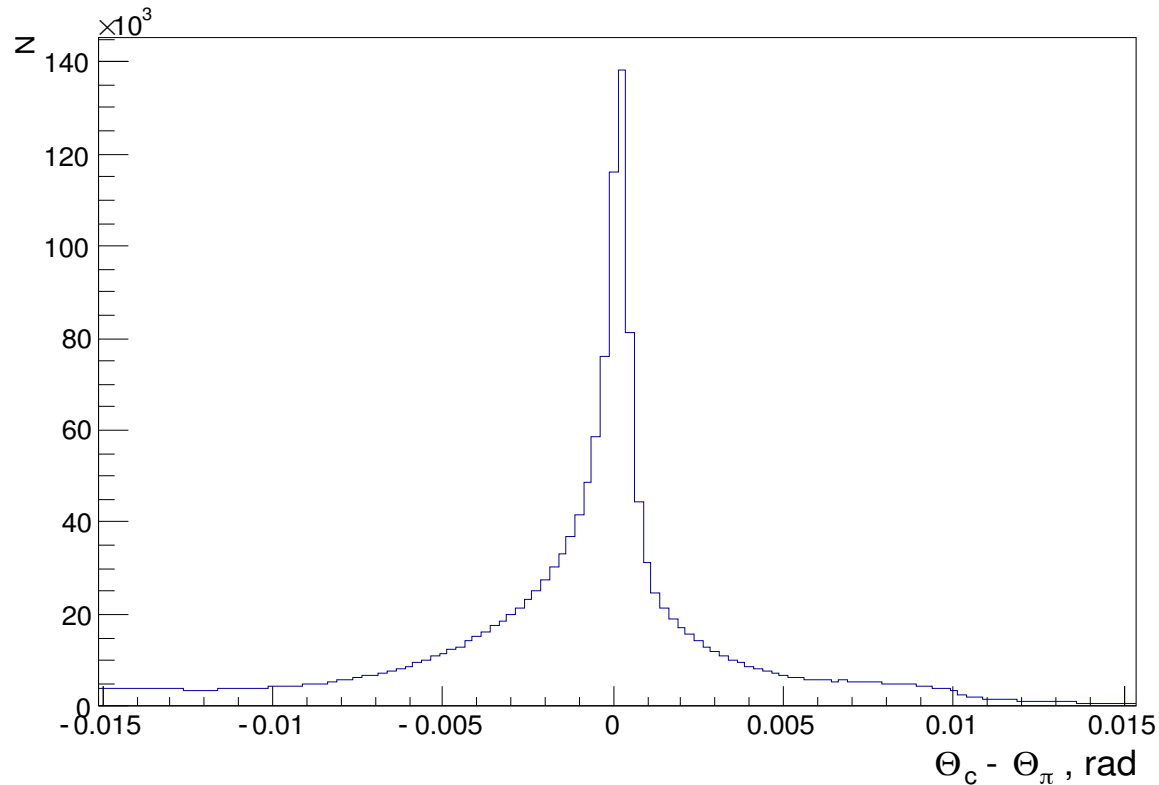
$$(|d| > 2.5 * \sigma \text{ и } |d| > 1 \text{ мрад}) \text{ или } \sigma > 2 \text{ мрад} .$$

Если есть забракованная точка, то итерационный цикл продолжается для проверки следующих точек.

Угол конуса Черенковского излучение определяется как средняя величина $\langle \Theta \rangle$ после выхода из цикла программных итераций браковки точек. Но при этом событие с малым числом отобранных точек $N_s < 6$ отбрасывается целиком.

Спектр найденных квадратов масс в каналах СКОЧ (ГФЭУ) в двух характерных областях импульсов 6 - 11 ГэВ/с (a) и 12-15 ГэВ/с (b), выбранных для калибровки. Наблюдаемые пики соответствуют π^\pm -, K^\pm -мезонам и протонам.





На рис. показана гистограмма разности $\Theta_c - \Theta_\pi$ всех каналов СКОЧ для событий с выделенным π^\pm -мезоном, где Θ_c - оценка угла Черенковского излучения в данном канале с учетом калибровки, Θ_π - теоретическое значение этого же угла. Видно, что полуширина центрального пика составляет величину около 1 мрад. Отметим, что точки, попадающие на хвосты данного распределения, отбрасываются процедурой выделения конуса излучения.

Проведена 4-х этапная калибровка Спектрометра Колец Черенковского излучения (СКОЧ) по физическим событиям. Использовались данные рА-взаимодействий при импульсе пучка 50 ГэВ/с. При последовательном улучшении на каждом этапе разрешения по массе достигается чистое разделение в отбираемых калибровочной процедурой событиях заряженных π -, K - мезонов и протонов в выбранном интервале их импульсов (6-15) ГэВ/с. Реализованный метод построен на анализе больших данных с помощью квадратичного функционала, зависящего от множества переменных, в число которых входят набор временных сигналов СКОЧ, геометрические параметры траектории частицы и ее импульс, координаты ее попадания на основание конического отражателя света, ориентация сработавших каналов СКОЧ относительно друг-друга и относительно трека частицы. Излагаемый метод калибровки, в принципе, применим для любого измерительного устройства, где априори известны результаты на некотором множестве опорных точек.

Back up

Газовая смесь

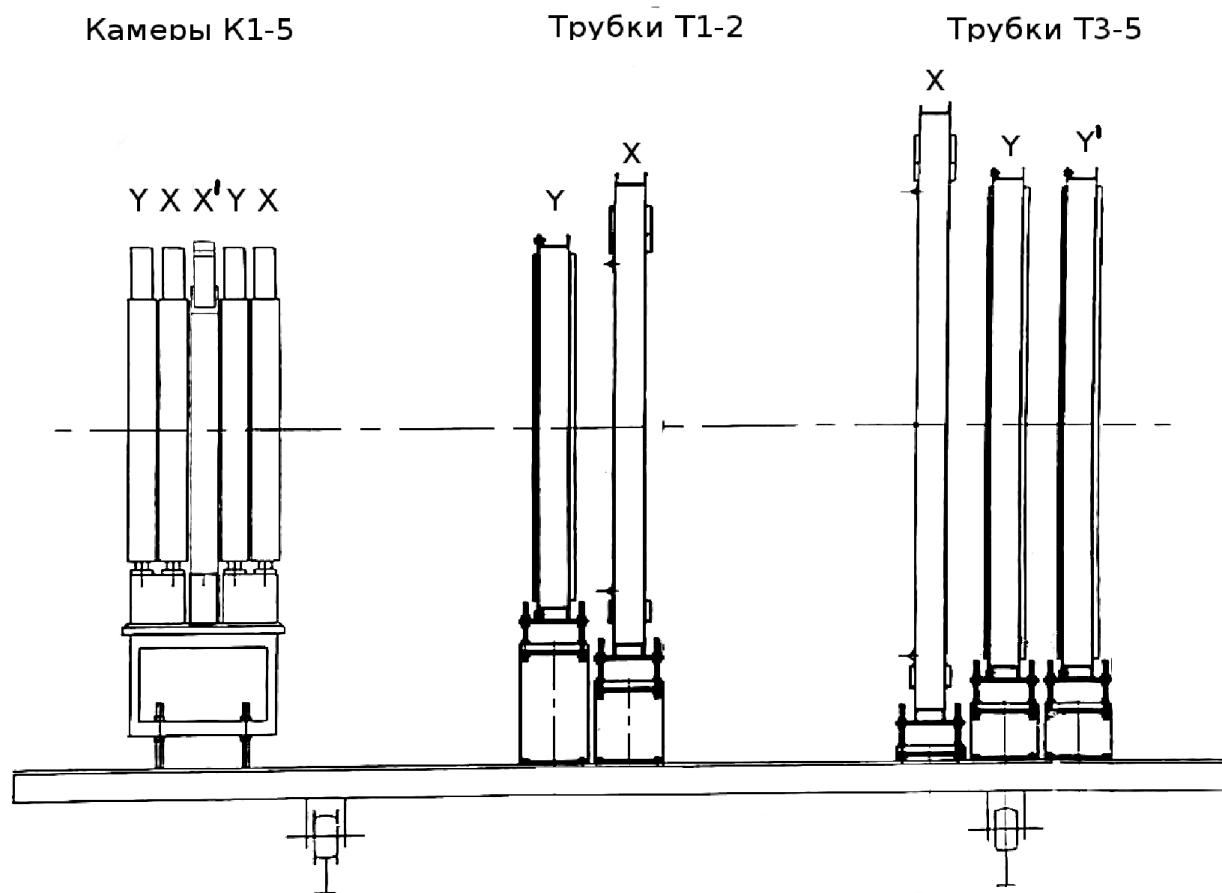
Используемый газ - хладон 218 (чистый). Давление $P=3.25$ атм.
 $n - 1 = 0.0034$

Зависимость коэффициента n от давления P (формула Лоренца-Лоренца)

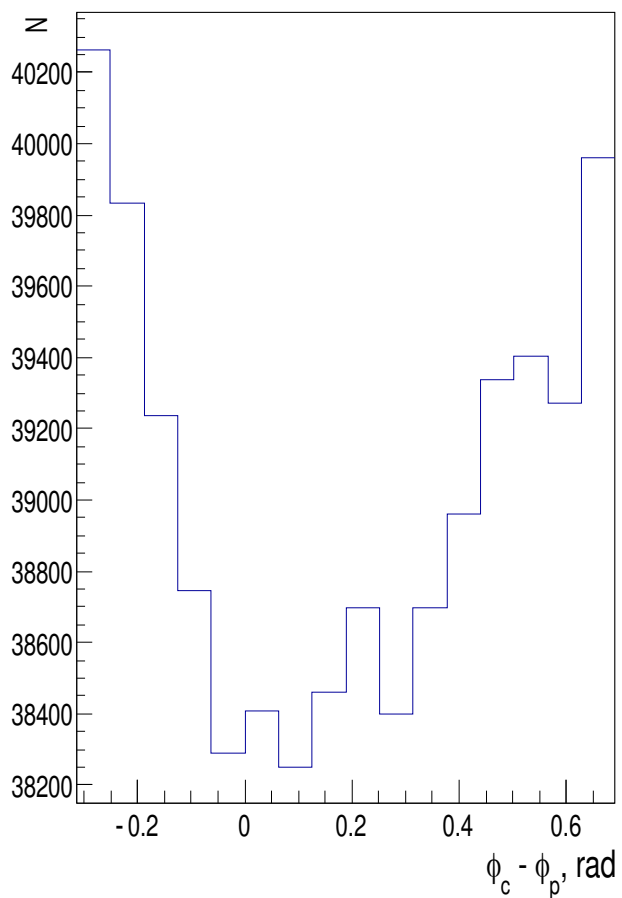
$$(n^2 - 1)/(n^2 + 2)/P = \text{const}$$

Если $n-1 \ll 1$ (газы), то $n-1 = K \cdot P$, где K - некоторая константа.

СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ПЛЕЧАХ УСТАНОВКИ



**K1 – 5 дрейфовые камеры, T1 – 2 и T3 – 5 камеры из дрейфовых трубок,
Символы X, Y указывают измеряемую координату,
X' и Y' соответствуют наклонным плоскостям.**



Гистограмма разности азимутальных углов сработавших каналов СКОЧ и азимутального угла трека

The end