Министерство образования и науки Российской Федерации.
Московский физико-технический институт.
Государственный Университет

Выпускная квалификационная работа на степень магистра

"Идентификация заряженных частиц черенковским счётчиком установки ВЕС"

Студент 124 гр. Маковский М.А.
Научный руководитель: к.ф-м.н. Хохлов Ю.А.
Рецензент: д.ф-м.н. Молчанов В.В.

Москва, 2007г.

Содержание

1 Введение

Данная работа посвящена обработке данных с большого черенковского счётчика C28 на установке ВЕС (ВЕршинный Спектрометр). Установка ВЕС является магнитным спектрометром для изучения процессов

$$\pi^- N \to n\pi^\pm m K^\pm k\gamma N'$$

Для получения полной информации о частице необходимо измерить её 4-импульс. По отклонению в магнитном поле можно измерить импульс заряженной частицы. На установке ВЕС использован дипольный магнит, создающий поле с интегралом 2.2 Т·м. в зазоре между полюсами. Расстояние между полюсами 1м. Трековая система позволяет с высокой точностью восстанавливать координаты частицы. Для измерения скоростей частиц используется большой черенковский счётчик.

Принцип работы счётчика заключается в следующем: при прохождении через прибор релятивистской частицы излучается черенковский свет, который собирается оптической системой на окно фотоумножителя. Сигнал с фотоумножителя попадает в систему сбора данных. По амплитуде сигнала можно судить о скорости частицы, предварительно откалибровав прибор.

Черенковское излучение создаётся частицей при движении в среде со скоростью, большей чем фазовая скорость света в этой среде. Угол, под которым излучаются фотоны, и их количество определяются скоростью частицы и коэффициентом преломления среды.

На установке ВЕС большой черенковский счётчик используется для идентификации π и K мезонов.

В работе описаны методы калибровки и принципы обработки данных.

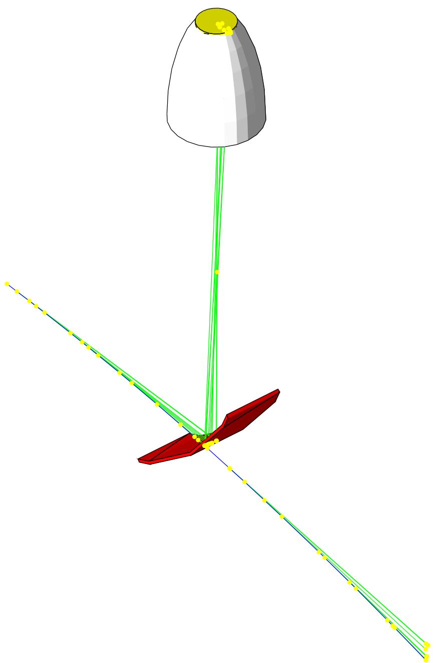

Рис. 1: принцип работы

2 Описание работы счётчика

C28 состоит из герметичного корпуса, оптической системы и 28ми фотоумножителей. Дюралевый корпус заполняется рабочим газом фреоном–22. Этот газ прозрачен в диапазоне приблизительно от 200нм. Показатель преломления измеряется 2х плечевым интерферометром ЛИР–1. Оптическая система – это 28 вогнутых зеркал, фокусирующих свет от частиц, летящих в разных направлениях и светосборники. В корпусах фотоумножителей находятся усилители сигнала. Зеркала стоят вблизи задней стенки и направляют свет от частиц на фотоумножители, расположенные сверху и снизу, вне апертуры прибора. Так как свет излучается не в одной точке, а вдоль всего трека частицы, зеркала не могут сфокусировать весь свет в окно фотоумножителя. Вогнутое сферическое зеркало работает аналогично собирающей линзе, но не надо забывать, что это справедливо для лучей входящих под малыми углами к оптической оси, а зеркало стоящее под углом 45 градусов будет вести себя сложнее. В частности, такое зеркало соберёт пучок параллельных лучей в полосу на экране, стоящем расстоянии R/2 (фокусное расстояние) от центра. Светосборники должны повысить эффективность оптической системы. В переднюю стенку вмонтировано 28 светодиодов для пробной засветки.

Рассмотрим работу счётчика более детально, предположив, что через него пролетает релятивистская частица. Формула для угла, под которым излучается фотон:

$$\sqrt{\epsilon}\frac{v}{c}\cos\theta_c = 1$$

В области прозрачности диэлектрическая проницаемость - действительная величина, поэтому при $v < \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ частица не излучает. Показатель преломления подбирается таким образом, чтобы в большом диапазоне энергий излучали только π мезоны, а K мезоны находились ниже порога.

Количество фотонов в единичном интервале частот, испущенных релятивистской частицей на единице пройденной длины, описывается формулой

$$\frac{dn}{d\omega} = \frac{\alpha}{c}\sin^2\theta$$

Где $\sin^2\theta = 1 - 1/(\beta^2\epsilon)$ Предполагаем далее, что эти фотоны соберутся оптической системой на окне одного фотоумножителя. На рис. 1 показана эта ситуация, смоделированная при помощи GEANT4. В С28 используется 2 типа ФЭУ: ФЭУ–110 и ФЭУ–125. Оба типа имеют по 12 динодов, рабочие диаметры фотокатодов 63 мм и 150 мм соответственно. Квантовая эффективность фотокатода используемых ФЭУ 110 и ФЭУ 125 составляет около 10%. Это значение взято из описания, так как измерение квантовой эффективности представляет собой сложную задачу. Из фотокатода ФЭУ вылетит несколько фотоэлектронов. После прохождения системы динодов сигнал попадает на усилитель и после – в АЦП. Усилители применены для того, чтобы сигналы с С28 можно было оцифровывать при помощи таких же АЦП какие используются для оцифровки сигналов с электромагнитного калориметра, сигналы с которого существенно больше, а также из-за затухания и наводок в длинном кабеле. В связи с этим возникает неоднозначность при выборе коэффициентов усиления ФЭУ и усилителя. Коэффициент усиления ФЭУ можно регулировать напряжением питания, однако получить необходимую величину сигнала без применения усилителя не получается. Подав на ФЭУ достаточно большое напряжение питания, можно увидеть существенное изменение его работы. Величина напряжения зависит от конкретного образца. При засветке, после основного импульса, с задержкой 200-300 нс видны дополнительные импульсы, причиной которых наиболее вероятно является так называемая ионная обратная связь. Это явление состоит в том, что электрон между динодами ионизует молекулу газа, которая, разгоняясь электрическим полем, может выбить электрон из динода. Такой электрон, усиливаясь в динодной системе, создаст послеимпульс. Задержка возникает из-за того, что ион значительно тяжелее электрона и следовательно будет лететь к диноду медленнее. Наличие послеимпульсов нежелательно. Наряду с этим явлением, заметно возрастает уровень шумов и вероятность испортить фотоумножитель. Подаваемое напряжение питания должно обеспечивать максимально возможный коэффициент усиления, оставляя ФЭУ в нормальном режиме работы.

Все элементы, начиная с ФЭУ и заканчивая АЦП имеют заметный разброс параметров. То есть коэффициент преобразования “фотоны” – “отсчёты АЦП” оказывается разным для каждого из 28 каналов. На каждый фотоумножитель подаётся подобранное для него высокое напряжение, чтобы как-то скомпенсировать разброс усиления. Фотоумножители находятся в довольно сильном магнитном поле. Чтобы уменьшить его воздействие они помещаются в экраны, применяются катушки, компенсирующие магнитное поле. Усилители находятся непосредственно за фотоумножителями.

Ситуация осложняется тем, что от одной частицы получается очень мало света, причём по частоте свет частично лежит в УФ области, а фотокатоды чувствительны в области 350-850нм (ФЭУ-125) и 300-900нм (ФЭУ-110); Для повышения эффективности перед фотокатодом расположен переизлучатель – плёнка на внешней стороне стекла, которая смещает спектр излучения в длинноволновую область. Наличие переизлучателя смещает коротковолновый порог чувствительности ФЭУ до 280 нм. см. [3, 4].

3 Основные идеи и алгоритм идентификации

Наиболее простой способ интерпретации данных – работа в пороговом режиме. Идея этого метода состоит в том, что частицы одного сорта в большей части импульсного спектра находятся над порогом черенковского излучения, а частицы другого сорта – под порогом; таким образом, фиксируя только наличие или отсутствие света можно определять сорт частицы. Для 2-х разных гипотез оценивается ожидаемое количество света при помощи модели, и строится вероятность наблюдаемого отклика прибора при условии обеих гипотез. Далее, можно вычислить интересующую нас вероятность того, что данный трек был образован частицей определённого сорта, и строить какие-либо критерии разделения событий. Выбор обрезаний зависит от конкретной задачи и находится отдельно. Основной сложностью является регистрация очень слабых вспышек света и, следовательно, принцип по которому принимается решение был ли сигнал.

В случае регистрации света фотоэлектронным умножителем и последующей оцифровкой основным источником ошибок являются статистическая флуктуация фотоэлектронов и нестабильность аналого-цифрового преобразователя.

Этот метод просто формулируется только для пучковых счётчиков, когда есть одна частица и один фотоприёмник. В нашем случае необходимо расширить его для работы с многотрековыми событиями и множеством фотоприёмников. Один из возможных вариантов (нечто похожее использовалось в предыдущей версии идентификатора, см[1]) предполагает хорошее пространственное разделение треков. Тогда можно было бы использовать критерий Неймана-Пирсона для каждого трека в отдельности (он применим в случае 2-х гипотез). Но в таком случае возникают проблемы при перекрытии световых конусов от разных треков. Была сделана попытка построить алгоритм идентификации, который бы учитывал возможные перекрытия треков и погрешности работы оптической схемы. Нужно отметить, что пластиковые зеркала заметно покоробились и для удовлетворительной работы необходимо было уметь это учитывать. Эти соображения привели к необходимости создания достаточно детальной оптической модели счётчика. Пока не будем останавливаться на подробностях её работы, а ограничимся тем, что для произвольной конфигурации треков модель даёт средние ожидаемые числа фотоэлектронов в каждом из 28-ми каналов.

Необходимо отметить важность определения порога, то есть когда считать что свет был, а когда – не был. Проблема усугубляется наличием усилителей между ФЭУ и АЦП, некоторые из которых проявляют склонность к генерации. На данный момент порог подобран для каждого канала отдельно, исходя из ширины пьедестала, “на глаз”.

Теперь сформулируем алгоритм идентификации, использующий модель и пороговый режим. За основу были взяты следующие предположения:

- сигнал в каждом канале независим.

- вероятность наблюдения сигнала в данном канале определяется из распределения Пуассона со средним числом фотоэлектронов даваемых моделью и независимым от фотостатистики "шумовым" фактором.

Теперь, имея данные с АЦП черенковского счётчика и реконструированные треки нужно решить, какая гипотеза наиболее вероятно вызвала данный отклик. Для этого вычисляются ожидаемые по модели средние числа фотоэлектронов в каждом из 28 каналов для каждой гипотезы. Важным является то, что не происходит разделения света по трекам, и значит нет ограничения на их число и взаимное расположение. Рассмотрим зеркало в котором не было зарегистрировано сигнала. Вероятность этого события является произведением вероятности двух независимых (по нашему предположению) событий: отсутствие шума (вероятность $1-\epsilon$) и отсутствие сигнала от возможной засветки (вероятность e^{-n} где n число фотоэлектронов предсказываемых моделью) Соответственно вероятность наблюдения сигнала в зеркале оказывается равной

$$1-(1-\epsilon)e^{-n}$$

Интересующая нас вероятность – произведение описанных выше вероятностей по всем каналам с учётом сигналов с АЦП. То есть, вычисляется вероятность данного сигнала в АЦП при условии определённой гипотезы. см. [2] Чтобы уменьшить влияние шума, произведение берётся по каналам, в которых мог бы наблюдаться свет при гипотезе "электрон" для всех треков (то есть отбрасываются каналы в которые свет точно попасть не мог) Этот отбор влияет только на "нормировку" получаемых вероятностей так как при изменении гипотезы средние числа фотоэлектронов в таких каналах не могут поменяться (они равны 0) Вообще, можно на этом остановиться и строить отбор основываясь на этих данных. После вычисления вероятности для каждой гипотезы (их количество составляет число треков в степени числа сортов частиц) выбирается гипотеза с наибольшей вероятностью.

Все дальнейшие отборы проводились для 3-х трековых событий в упругом пике (сумма импульсов равна импульсу пучковой частицы).

Остаётся решить насколько достоверно определены сорта частиц в данной гипотезе. Для этого можно заметить, что в случае когда трек попадает в зону неэффективности, правильно описанную моделью, или находится под порогом для обеих гипотез, замена сорта частицы не будет приводить к изменению вероятности гипотезы. Основываясь на этом наблюдении, был предложен критерий оценки достоверности определения конечного состояния. Среди всех гипотез выбирается не только наилучшая, но и следующая за ней по вероятности. Если отношение вероятностей этих 2х лучших гипотез больше некоторой константы α (она определяется для обеспечения необходимой в конкретном случае эффективности отбора) то событие считается хорошо определённым. Результаты идентификации части данных 32-го сеанса таким способом для разных α приведены в приложении А.

После тестирования этого критерия на практике выяснился его существенный недостаток: он не учитывает наши "априорные" знания о том, сколько каких конечных состояний есть на самом деле. Например, можно было бы предполагать, что в случае когда есть примерно равная вероятность гипотезы 3π и какой–либо другой, считать что это 3π, так как мы знаем, что они составляют подавляющее большинство регистрируемых событий. Для учёта этих случаев, был предложен другой критерий. Его отличие от предыдущего состоит в том, что перед поиском наиболее вероятной гипотезы условные вероятности домножаются на "априорные" (взятые из результатов, полученных ранее), а выбор хорошо определённой гипотезы производится аналогично рассмотренному ранее способу, но с параметром α примерно равным единице (для отборов приведённых в приложении $\alpha = 1.005$) В результате, можно существенно повысить процент хорошо определённых событий, не ухудшая существенным образом чистоту отбора. Это достигается, во-первых, из-за того, что все "сомнительные" события начинают определяться как принадлежащие состоянию с наибольшей априорной вероятностью, и, во-вторых, в случае когда событие заведомо определяется как не 3π или другое с большой априорной вероятностью (то есть событие определяется как "редкое"), малая конкуренция среди оставшихся гипотез не приводит к его отбраковке. Например, если в случае π пучка событие имеет очень малую вероятность быть 3π, и доминирующие вероятности быть $KK\pi$ и $K\pi\pi$, отличающиеся меньше чем в 2 раза, то оно будет определено как $KK\pi$ критерием с априорными вероятностями. Это-же событие было-бы отброшено при обычном отборе с параметром 4.0, а отбор с параметром 1.05 привёл бы к большой примеси 3π.

Желательно теперь оценить количество событий, идентифицированных неправильно. В пороговом режиме это можно сделать сравнительно легко. Следующие рассуждения помогают понять способ оценки "протекания" одной гипотезы в другую. Для начала рассмотрим упрощённую ситуацию с двумя зеркалами и двумя треками. Введём обозначение: ξ – отклик АЦП. ξ может быть (0,0), (1,0), (0,1), (1,1). Допустим сначала что 2 трека попадают в 2 разных зеркала, и импульсы находятся под порогом для K и над порогом для π. При выделени состояния KK будут отбираться те события, в которых $\xi = (0, 0)$ (если хотя-бы в одном зеркале был сигнал, то событие не может быть названо KK описанной процедурой, так как вероятность 1 в случае π будет больше чем в случае K) Итак, в случае когда $\xi = (0, 0)$ событие идентифицируется как KK. Какова-же вероятность идентифицировать его как KK если на самом деле это $\pi\pi$? Понятно, что эта вероятность равна:

$$P(\xi = (0, 0)|\pi\pi) = (1 - \epsilon_1)e^{-n_{\pi_1}}(1 - \epsilon_2)e^{-n_{\pi_2}}$$

то есть произведение вероятностей нуля для ожидаемых средних чисел фотоэлектронов в гипотезе $\pi\pi$. Теперь нужно расширить этот метод.

Допустим теперь, что у нас есть ещё одно зеркало (третье) в которое ни один из двух треков не попадает. Тогда идентификация события как KK будет происходить как в случае когда $\xi = (0, 0, 0)$ так и (0,0,1) Если бы треки всегда были так хорошо разделены по зеркалам, можно было бы отбросить это третье зеркало и построить такую-же оценку для вероятности неправильной идентификации. Посмотрим что можно сделать в более общем случае. Заметим, что при сложении вероятностей $P(\xi = (0, 0, 0)|\pi\pi)$ и $P(\xi = (0, 0, 1)|\pi\pi)$ результат будет равен $P(\xi = (0, 0)|\pi\pi)$ Это ясно из того, что при вынесении за скобки первых двух сомножителей, оставшееся выражение в скобках будет равно 1 – вероятность нуля плюс вероятность не нуля:

$$P(0,0,0|\pi\pi) + P(0,0,1|\pi\pi) = \\ e^{-n_{\pi 1}}(1-\epsilon_1)e^{-n_{\pi 2}}(1-\epsilon_2)(e^{-n_{\pi 3}}(1-\epsilon_3) + 1 - e^{-n_{\pi 3}}(1-\epsilon_3)) \quad (1)$$

В общем случае, при идентификации какого-то состояния, необходимо найти все возможные отклики АЦП ξ_x при которых состояние x идентифицируется выбранным критерием, и для всех их просуммировать условные вероятности с состоянием y, примесь которого нас интересует.

$$P(y \to x) = \sum_{\xi_x} P(\xi_x|y) \quad (2)$$

Для ускорения процедуры разумно перебирать только те каналы, в которые может попасть свет, то есть те-же что и при построении вероятностей. Нужно отметить, что рассмотрению должны подвергаться все сбытия – как хорошо определёные всех сортов, так и плохо определённые, иначе получаемые числа будут вводить в заблуждение.

В итоге получится оценка на количество состояний y определённых как x, если бы все события состояли только из состояний x. В случае вычисления протекания гипотезы саму в себя, можно оценить правильность критерия. Если предположить, что π и K мезоны одинаково распределены по фазовому объёму, то вычисляя по всем событиям сумму

$$\sum_{all} P(x \to x)$$

получим количество событий x, которое могло бы быть идентифицированно. Понятно, что это число должно быть примерно равно полному числу всех идентифицированных состояний по реальным сигналам, но не больше его, так как вероятность идентификации в случае идеальной работы детектора не может быть больше 1. Различие же между этими числами характеризует эффективность работы детектора. В приложении А под эффективностью отбора понимается отношение

$$\frac{\sum_{all} P(x \to x)}{N_{all}} \quad (3)$$

Для оценки возможного числа неправильно зарегистрированных событий, нужно проделать следующие операции: вероятность ошибочной идентификации $P(y \to x)$ усреднить по всем обработанным событиям и помножить на число событий y. Для определения их количества можно предположить, что их доля среди всех событий такая-же как среди хорошо идентифицируемых. А именно, число событий сорта y, которые могли быть идентифицированы как x вычисляется так:

$$N_{y\to x} = \frac{\sum_{all} P(y \to x)}{N_{all}} \frac{N_{all}}{N_{good}} N_y \frac{N_{good}}{\sum_{all} P(y \to y)} = \frac{\sum_{all} P(y \to x)}{\sum_{all} P(y \to y)} N_y \qquad (4)$$

Для оценки чистоты и эффективности отбора приведёнными выше способами не используются сигналы с АЦП, а только треки. Для реакции с известным распределением конечных состояний по фазовому объёму не нужно использовать данные чтобы вычислить эффективность и чистоту.

Пороговый режим хорош из-за своей простоты, но он ограничивает импульсный спектр идентифицированных частиц. Кажется разумным желание использовать АЦП в полной мере, а не только для регистрации "выше порога" или "ниже порога". Предложенный метод идентификации легко расширить для разделения частиц в случае когда оба сорта находятся выше порога. Предлагаемый способ основывается на следующих предположениях:

- сигнал в каждом канале независим
- вероятность наблюдения сигнала данной амплитуды A определяется суммой: $\sum_{i=0}^{N} P_n(i) F_i(A)$

где $P_n(i)$ распределение Пуассона со средним n (среднее число фотоэлектронов предсказанных моделью в предположении данной гипотезы) а $F_i(A)$ i-кратная свёртка одноэлектронного спектра данного ФЭУ. В случае i=0 нужно взять функцию, описывающую спектр шума данного канала (аналог параметра ϵ). Число N выбирается из соображений разумности ($P_n(N) << 1$).

Нахождение одноэлектронных спектров проводится для каждого канала методом слабой засветки светодиодами или непосредственно по данным. При этом происходит калибровка всей принимающей электроники: от ФЭУ до АЦП. Квантовая эффективность фотокатода при этом не измеряется, но для неё можно получить оценку по данным.

Способ нахождения наилучшей гипотезы аналогичен рассмотренному для порогового режима. Различие состоит только в том, что при вычислении вероятности гипотезы перемножаются не вероятности нуля или не нуля, а плотности вероятности наблюдения данной амплитуды при предполагаемом среднем числе фотоэлектронов.

Оценка чистоты отбора в этом случае несколько усложняется, так как нахождение точного значения суммы по всем возможным откликам АЦП в пороговом режиме превращается в вычисление многомерного интеграла по множеству, точно найти которое – достаточно ресурсоёмкая задача. То есть, для нахождения оценки вероятности неправильной идентификаци нужно вычислить интеграл от плотности вероятности сигнала по всем влияющим на отбор каналам для состояния y, по тем участкам плотностей вероятности, для которых идентифицируется событие x. Предполагается использовать метод Монте-Карло для приближеного вычисления этого интеграла.

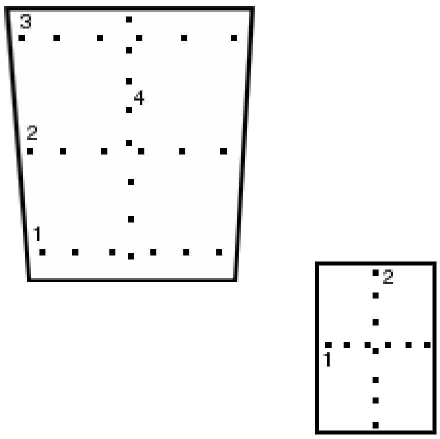

Рис. 2: Расположение точек измерения высоты зеркала координатно-измерительной машиной

4 Модель, настройка модели

Для точного описания работы оптической схемы прибора была создана её модель. Она описывает отражение световых лучей от зеркал, имеющих форму части эллиптического параболоида, и дальнейшее их распространение. Такая поверхность для моделирования формы зеркала была выбрана из-за простоты (задача пересечения прямой с этой поверхностью может быть решена явно) и достаточно хорошего соответствия с реальной формой зеркал (2 разных радиуса кривизны в 2–х перпендикулярных плоскостях)

Наиболее сложной задачей является приведение модели в соответствие с реальностью.

Радиусы кривизны зеркал были измерены при помощи координатно-измерительной машины. Зеркало располагалось на столе отражающей поверхностью вниз и измерялись z координаты 5–10 точек вдоль одной из плоскостей, перпендикулярных столу.

Процедура повторялась для перпендикулярной плоскости. В малых зеркалах измерялись радиусы по 2-м плоскостям, в больших зеркалах – по 4-м (одна плоскость вдоль и 3 поперёк на примерно одинаковых расстояниях, которые потом усреднялись) См рис. 2. Измерение обеспечивало повторяемость значения радиуса кривизны в пределах нескольких сантиметров.

Следующий этап – “размещение” 28 зеркал в пространстве. Из чертежей были извлечены приблизительные положения центров зеркал. Поскольку

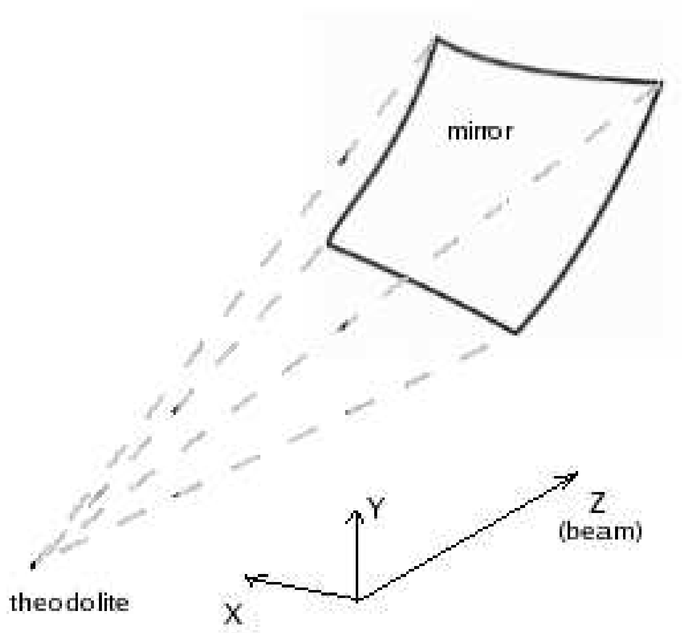

Рис. 3: Измерение угловых координат вершин зеркала

зеркала подогнаны вплотную “по месту”, этих данных было недостаточно для полного описания системы. Были проведены точные измерения положений вершин зеркал при помощи теодолита. Измерялись угловые координаты вершин, которые в сочетании с размерами, измеренными линейкой, и чертежами существенно уточняют модель. z координата центра каждого зеркала берётся из чертежей (она считается совпадающей с z координатой отверстия для фотоумножителя) x и y координаты зеркал вычисляются из предположения что зеркала стоят под углом 45 градусов и линейных размеров зеркал, измеренных линейкой. Уточнение координат по угловым измерениям происходит так: 4 угловые координаты вершин зеркала усредняются, получается угловая координата центра. По известной z координате вычисляются новые x и y координаты. Отклонения от взятых из чертежей координат усредняется и минимизируется по всем зеркалам изменением точки положения теодолита. Полученные значения находятся в разумном согласии с измеренными.

Всюду далее используются координаты центров зеркал, вычисленные по угловым координатам. Ошибка в определении положения центра зеркала не должна приводить к катастрофическим последствиям, так как она определяет положение “начала координат” эллиптического параболоида, а границы зеркала и углы поворота описываются отдельно. Декартовы

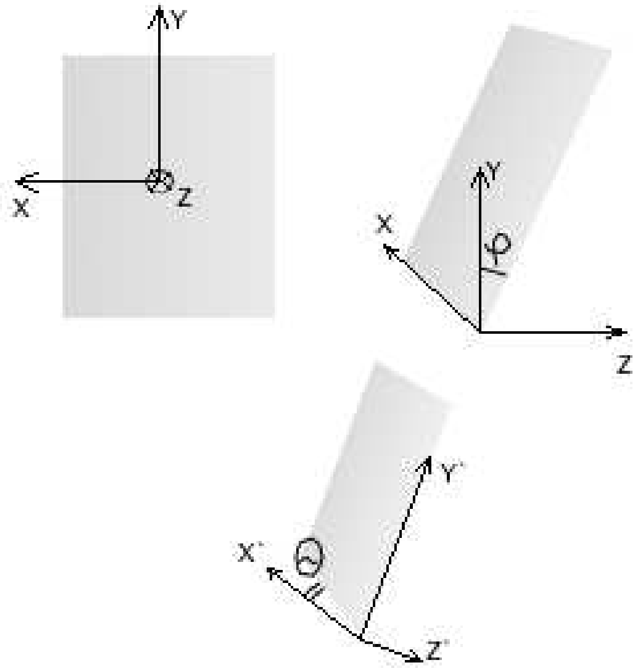

Рис. 4: Углы поворота зеркала

координаты границ зеркал находятся вычислением точки пересечения луча (из измерений теодолитом) с поверхностью, описывающей зеркало, см. рис. 3.

"Размеры" зеркал вычисленные таким образом совпадают с измеренными линейкой с точностью до милиметра.

Таким образом, каждое зеркало имеет следующие параметры: положение центра (xyz), координаты четырёх углов в собственной системе отсчёта, 2 радиуса кривизны, и 2 угла поворота (вокруг оси x и вокруг оси y в повёрнутой системе) см. рис. 4 Третий угол не был введён из-за своей малости.

Для измерения углов поворота зеркал были проделаны следующие действия. Измерялись угловые координаты луча, отражённого зеркалом в определённую точку с хорошо известными координатами. Это был центр фотокатода или центр входного отверстия светосборника (зависит от ориетнации последнего) Далее проводился подгон углов поворота зеркал в модели до совпадения точки пересечения отражённого луча в модели с измеренной. К сожалению, этот способ не дал необходимой точности, по-видимому из-за недоописания формы зеркал на краях. Способ измерения углов поворота зеркал по данным (описан далее) дал положительный результат.

После отражения луча от зеркала проверяется факт попадания его в светосборник – вычисляется отклонение луча от оси y при пересечении плоскости начала светосборника (то есть предполагается что светособирающий конус расположен точно над зеркалом)

Рассмотрим как происходит моделирование отклика прибора на прохождение заряженной частицы.

Поскольку радиатор расположен в области достаточно сильного магнитного поля (интеграл поля вдоль оси z в радиаторе составляет около 10% полного интеграла поля) треки внутри него "протягиваются" через магнитное поле. Через определённый интервал (на данный момент 3см) с трека испускается конус черенковского излучения (для частиц которые должны его испускать) в виде нескольких лучей (сейчас это 20 равномерно распределённых по конусу лучей со случайной общей фазой поворота вокруг оси) Угол отклонения от направления трека и "вес" каждого луча вычисляется в соответствии с импульсом и предполагаемой массой частицы. Далее, для каждого луча определяется зеркало, от которого его следует отразить: находится точка пересечения луча с четырёхугольником, параллельным системе координат зеркала и имеющим x и y координаты вершин, совпадающие с x и y координатами углов зеркала, а z усреднённую по 4-м вершинам. Если луч пересёк такой четырёхугольник, то он будет отражён от соответствующего ему зеркала. Если луч не попал ни в одно зеркало или попал в отверстие для пучка, то ничего не происходит. Если луч попал в зеркало, он отражается от него и происходит поиск светосборника, в который он попадёт: проверяется "свой" и 2 соседних. Если луч попадает в конус, то считается что он попадает и в фотокатод, в этом случае к счётчику, соответствующему данному каналу прибавляется "вес" луча.

После подсчёта ожидаемого числа фотонов черенковского излучения, необходимо вычислить число фотоэлектронов, выбитых ими с фотокатода. Число фотонов делится на константу, отдельно подбираемую для каждого канала. Обратная величина является аналогом квантовой эффективности фотокатода, но в неё также входят недоописание реальной геометрии, коэффициенты отражения зеркала и конуса, неточность в знании диапазона прозрачности рабочего газа и характеристик переизлучающей плёнки.

5 Настройка модели по данным

Для проверки и уточнения имеренных параметров модели, а также для измерения оставшихся, была предложена процедура подгона параметров по данным. Метод основан на том, что среди регистрируемых частиц преобладают π–мезоны.

Суть метода состоит в том, что имея достаточное количество треков проходящих через или в непосредственной близости зеркала, можно, сравнивая реальные сигналы с АЦП в пороговом режиме с ожидаемым числом фотонов, "проверить" закон распределения Пуассона. Чтобы найти приближенное к реальности положение зеркала и коэффициент пересчёта фотоны$\rightarrow$фотоэлектроны подбирается наилучшее соответствие наблюдаемого распределения при отсутствии сигнала в АЦП с распределением вероятности нуля. Более точно, при обработке данных, числа фотоэлектронов в интересующем зеркале складываются в 2 гистограммы: в одну независимо от сигнала (all) а в другую только при его отсутствии (nosingnal). После деления nosignal на all получается нормированная гистограмма, которая при изменении параметров зеркала становится в большей или меньшей степени похожа на e^{-n}. См. рис. 13 в приложении С. Однако при попытке придумать алгоритм нахождения наилучешй формы этого распределения были встречены трудности. Во-первых, при незначительном отклонении от наилучшей (по субъективным оценкам) формы, распределение фитируется экспонентой с таким-же χ^2. Во-вторых, при сильном отклонении (зеркало повёрнуто совсем не туда) распределение вырождается в один бин, который фитируется экспонентой наилучшим образом. Тем не менее, минимизируя средний по бинам хи-квадрат, при достаточно аккуратном задании начальных значений, удалось отфитировать несколько зеркал. Убедив в возможности подгона параметров по данным, данный метод не обеспечил стабильной работы. См. рис. 14

Следующее усовершенствование касалось построения функционала: за основу взяли метод максимального правдоподобия. Если перемножить условную вероятность гипотезы 3π по всем событиям, получается функционал зависящий от всех параметров модели. Опыт показывает, что при наличии 2.5 тысяч треков проходящих через зеркало, зависимость правдоподобия от незначительных (около 1 мрад) поворотов зеркала описывается гладкой функцией, и следовательно можно проводить подгон, используя стандартный минимизатор.

Рассмотрим эту процедуру подробнее. Среди параметров модели остаются свободными или известными с недостаточной точностью следующие: коэффициенты пересчёта фотоны$\rightarrow$электроны (28 штук), углы поворота зеркал (28×2 штук), положение счётчика в пространстве (x,y,z), шумовые коэффициенты ϵ (28 штук). Была проделана попытка включить и радиусы кривизны зеркал в свободные параметры. Фитирование осуществлялось по одному зеркалу (остальные параметры в это время были зафиксированы): сначала проводился подгон 2-х углов поворота и коэффициента фотоны→электроны, после они фиксировались и подгонялись радиусы. Отдельно фитировались шумовые коэффициенты ϵ. Положение в пространстве фитировалось несколько раз, так как от его точности могли зависеть остальные результаты. Наклон счётчика как целого не был введён в качестве ещё одного параметра, так как эта величина должна быть скоррелирована с одновременным поворотом всех зеркал.

Итак, свободные параметры предоставлены в распроряжение минимизирующей программе, и нужно вернуть число, характеризующее вероятность данной конфигурации. Это число представляет собой сумму:

$$L = \sum_{i=1}^{N_{ev}} \ln(P(\xi = \xi_i | \pi\pi\pi)) \tag{5}$$

где

$$P(\xi | \pi\pi\pi) = \prod_{j=1}^{28} P(\xi | n_j)$$

$$P(\xi | n_j) = \begin{cases} e^{-n_j}(1-\epsilon_j), & \text{если } \xi^j = 0, \\ 1 - e^{-n_j}(1-\epsilon_j), & \text{если } \xi^j = 1. \end{cases} \tag{6}$$

где n_j число фотоэлектронов предсказанных моделью в j-ом канале, ξ отклик АЦП всего счётчика, ξ^j отклик АЦП в j-ом канале (в пороговом режиме 0 или 1) ϵ_j шумовой коэффициент j-ого канала.

Вид функционала (умноженного на -1) приведён на рисунке 15 в приложении C. Понятно, что в этом случае минимум найдётся и при неточном задании начальных данных. Этот метод привёл к нахождению и уточнению всех интересующих нас параметров. Радиусы кривизны зеркал заметно влияют на поведение функционала лишь в том случае, если зеркало имеет слишком малый радиус кривизны (то есть плохо фокусирует). Полученные радиусы кривизны зеркал не противоречат прямым измерениям, но обладают меньшей точностью, поэтому результаты прямых измерений оставлены без изменений.

6 заключение

Предложен метод обработки данных с большого черенковского счётчика установки ВЕС. Продемонстрирована его работоспособность на данных 32-го сеанса в пороговом режиме.

Список литературы

[1] Kostyukhin V.V. “Data Reconstruction in the VES Facility. Study of the reaction Pi-Be–>K+K-Pi-Be”,2000

[2] A. Kozhevnikov, V. Kybarovsky, V. Molchanov, V. Rykalin, V. Solyanik “SPHINX phototube RICH detector for diffractive production experiments at Serpukhov accelerator” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A433 (1999) 164-167

[3] Гаврищук О.П., Семёнов В.К. Плёночные преобразователи ультрафиолетового излучения: Препринт ИФВЭ 84-66. Серпухов, 1984.

[4] Горин А.М., Какауридзе Г.Д., Пересыпкин А.И., Поляков В.А., Рыкалин В.И., Цхададзе Э.Г., Повышение эффективности регистрации светового излучения в детекторах частиц с помощью прозрачных плёночных смесителей спектра: Препринт ИФВЭ 84-100. Серпухов, 1984.

7 приложение А

Результаты обработки части данных 32-го сеанса. Приведены процентные отношения различных сосотояний, отобранных из 3-х трековых событий с обрезанием по упругому пику: сумма импульсов продуктов реакции лежит в диапазоне от 25 до 31 ГэВ. Число положительно заряженных треков 1, отрицательно заряженных – 2. Требуется чтобы вершина находилась в области мишени по z координате (от -226 до -219 см). Эффективность (последня колонка в таблице) – это отношение числа событий, которые могли бы быть отобраны данным критерием, к полному числу событий "all". Далее следует оценка числа неправильно идентифицированных событий. Порядок перечисления конечных состояний такой-же. По горизонтали отложены идентифицированные выбранным критерием конечные состояния, по вертикали – их "перетекания" в другие в событиях.

Критерий с вычислением отношения наибольшей вероятности к следующей за ней по убыванию. α – параметр с которым сравнивается это отношение при решении хорошо ли определено данное состояние.

$\alpha = 1.05$
3-track events processed: 2521211
good: 44.00 % of all
bad: 56.00 % of all

$\pi+\ \pi-\ \pi-$	602716 events or	54.33% of good,	estimated efficiency: 22.22%
$K+\pi-\ \pi-$	98228 events or	8.85% of good,	estimated efficiency: 23.48%
$\pi+\ K-\pi-$	118323 events or	10.67% of good,	estimated efficiency: 24.05%
$K+K-\pi-$	44552 events or	4.02% of good,	estimated efficiency: 25.57%
$\pi+\ \pi-\ K-$	140981 events or	12.71% of good,	estimated efficiency: 24.30%
$K+\pi-\ K-$	51058 events or	4.60% of good,	estimated efficiency: 26.06%
$\pi+\ K-K-$	27967 events or	2.52% of good,	estimated efficiency: 28.31%
$K+K-K-$	25476 events or	2.30% of good,	estimated efficiency: 30.34%

purity estimation

*****	13983.9	19521.2	614.6	22780.2	676.2	335.4	16.6
128306.0	*****	5574.3	7736.5	6411.1	8494.5	105.5	289.5
162448.9	5302.3	*****	6788.3	8991.2	266.5	3898.9	246.0
36868.9	25827.2	24718.9	*****	2320.4	3448.8	1163.8	3804.3
168121.7	5508.6	7973.6	251.2	*****	7595.3	3994.7	248.3
38427.5	26920.3	2092.5	3243.0	29733.8	*****	1219.8	3981.8
40661.5	1774.3	31331.4	2737.0	36001.5	2968.1	*****	4134.2
10859.3	6426.7	7304.1	11398.1	8395.7	12485.3	5762.6	*****

$\alpha = 4.0$
3-track events processed: 2521211

good: 13.89 % of all
bad: 86.11 % of all

$\pi+\ \pi-\ \pi-$	269044 events or	76.85% of good,	estimated efficiency: 9.94%
$K+\pi-\ \pi-$	12401 events or	3.54% of good,	estimated efficiency: 10.91%
$\pi+\ K-\pi-$	12467 events or	3.56% of good,	estimated efficiency: 10.38%
$K+K-\pi-$	14251 events or	4.07% of good,	estimated efficiency: 11.47%
$\pi+\ \pi-\ K-$	19017 events or	5.43% of good,	estimated efficiency: 10.35%
$K+\pi-\ K-$	15724 events or	4.49% of good,	estimated efficiency: 11.50%
$\pi+\ K-K-$	1363 events or	0.39% of good,	estimated efficiency: 12.21%
$K+K-K-$	5844 events or	1.67% of good,	estimated efficiency: 13.40%

purity estimation

*****	417.5	572.1	20.6	873.3	22.5	2.2	0.3
22202.8	*****	55.3	632.3	85.7	696.2	0.2	9.0
24691.4	43.8	*****	448.6	128.9	3.5	53.2	6.9
2077.3	1155.0	1048.4	*****	12.1	101.7	5.3	224.5
24294.3	44.9	84.0	3.2	*****	491.2	53.0	6.9
2061.6	1143.3	7.8	92.2	1600.0	*****	5.2	224.6
2396.5	4.8	1241.7	52.8	1920.5	56.4	*****	174.7
208.1	113.0	106.8	1428.9	163.8	1587.9	117.4	*****

$\alpha = 6.0$
3-track events processed: 2521211
good: 11.51 % of all
bad: 88.49 % of all

$\pi+\ \pi-\ \pi-$	234794 events or	80.94% of good,	estimated efficiency: 8.66%
$K+\pi-\ \pi-$	9230 events or	3.18% of good,	estimated efficiency: 9.30%
$\pi+\ K-\pi-$	7190 events or	2.48% of good,	estimated efficiency: 8.20%
$K+K-\pi-$	10888 events or	3.75% of good,	estimated efficiency: 8.64%
$\pi+\ \pi-\ K-$	11906 events or	4.10% of good,	estimated efficiency: 8.22%
$K+\pi-\ K-$	12053 events or	4.15% of good,	estimated efficiency: 8.75%
$\pi+\ K-K-$	654 events or	0.23% of good,	estimated efficiency: 8.75%
$K+K-K-$	3382 events or	1.17% of good,	estimated efficiency: 8.88%

purity estimation

*****	258.5	306.6	12.9	505.4	14.1	1.0	0.1
16236.1	*****	24.1	464.1	40.3	508.4	0.1	5.1
14622.2	18.2	*****	297.3	52.2	1.5	24.3	3.5
1016.6	570.8	497.2	*****	3.9	49.6	1.9	128.8
14553.9	18.9	32.0	1.5	*****	325.5	24.4	3.5

1016.4	573.1	2.3	46.0	824.2	*****	1.9	130.3
988.7	1.4	494.8	23.8	821.3	25.1	*****	93.3
68.9	38.0	34.2	735.1	56.6	808.1	44.9	*****

Критерий с априорными вероятностями. После умножения на них вероятности каждого состояния, проделывается такой-же поиск хорошо определённого состояния как и в предыдущем критерии, $\alpha = 1.005$.

3-track events processed: 2521211

good: 99.97 % of all

bad: 0.03 % of all

$\pi+\ \pi-\ \pi-$	2417609 events or	95.92% of good,	estimated efficiency: 98.80%
$K+\pi-\ \pi-$	953 events or	0.04% of good,	estimated efficiency: 1.39%
$\pi+\ K-\pi-$	3297 events or	0.13% of good,	estimated efficiency: 4.63%
$K+K-\pi-$	40143 events or	1.59% of good,	estimated efficiency: 28.13%
$\pi+\ \pi-\ K-$	9452 events or	0.38% of good,	estimated efficiency: 9.10%
$K+\pi-\ K-$	39153 events or	1.55% of good,	estimated efficiency: 26.31%
$\pi+\ K-K-$	212 events or	0.01% of good,	estimated efficiency: 4.28%
$K+K-K-$	9564 events or	0.38% of good,	estimated efficiency: 20.46%

purity estimation

*****	60350.7	63707.4	94248.3	90297.4	98154.8	3717.2	24054.3
751.8	*****	2.2	193.8	2.9	183.6	0.0	3.3
3155.5	16.6	*****	1221.6	101.0	30.3	172.4	336.9
8566.3	3176.0	3357.2	*****	200.8	3217.6	140.1	6167.7
7206.4	75.2	157.3	113.8	*****	4964.2	335.8	1120.3
8145.0	3816.6	121.1	3679.0	3008.4	*****	75.2	5278.8
181.0	0.2	135.3	8.7	180.6	8.1	*****	60.0
814.9	116.1	340.1	2761.7	466.6	2752.8	280.9	*****

С отбором пучковых K мезонов:

$\alpha = 4.0$

3-track events processed: 10590

good: 21.21 % of all

bad: 78.79 % of all

$\pi+\ \pi-\ \pi-$	125 events or	5.57% of good,	estimated efficiency: 14.26%
$K+\pi-\ \pi-$	9 events or	0.40% of good,	estimated efficiency: 15.31%
$\pi+\ K-\pi-$	856 events or	38.11% of good,	estimated efficiency: 14.72%
$K+K-\pi-$	60 events or	2.67% of good,	estimated efficiency: 15.98%
$\pi+\ \pi-\ K-$	876 events or	39.00% of good,	estimated efficiency: 14.63%
$K+\pi-\ K-$	50 events or	2.23% of good,	estimated efficiency: 16.03%
$\pi+\ K-K-$	92 events or	4.10% of good,	estimated efficiency: 16.51%

$K+K-K-$ 178 events or 7.93% of good, estimated efficiency: 18.08%

purity estimation

*****	0.3	40.9	0.1	40.5	0.1	0.2	0.0
9.2	*****	3.6	2.8	3.4	2.2	0.0	0.3
10.9	0.0	*****	1.8	5.1	0.0	3.8	0.2
0.8	0.8	64.4	*****	0.4	0.3	0.3	7.1
10.8	0.0	5.0	0.0	*****	1.5	3.9	0.2
0.8	0.8	0.5	0.3	66.8	*****	0.4	7.3
1.0	0.0	81.8	0.2	85.1	0.2	*****	5.2
0.1	0.1	6.5	5.8	6.7	4.9	7.2	*****

С априорными вероятностями, взятыми из таблицы выше:
3-track events processed: 10590
good: 99.82 % of all
bad: 0.18 % of all

$\pi+\ \pi-\ \pi-$	135 events or	1.28% of good, estimated efficiency: 16.45%
$K+\pi-\ \pi-$	2 events or	0.02% of good, estimated efficiency: 1.12%
$\pi+\ K-\pi-$	5136 events or	48.59% of good, estimated efficiency: 81.89%
$K+K-\pi-$	37 events or	0.35% of good, estimated efficiency: 16.89%
$\pi+\ \pi-\ K-$	4734 events or	44.78% of good, estimated efficiency: 81.31%
$K+\pi-\ K-$	26 events or	0.25% of good, estimated efficiency: 11.65%
$\pi+\ K-K-$	24 events or	0.23% of good, estimated efficiency: 7.46%
$K+K-K-$	477 events or	4.51% of good, estimated efficiency: 47.69%

purity estimation

*****	25.0	35.9	1.0	33.8	1.1	0.1	0.2
0.2	*****	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
327.9	53.9	*****	120.4	908.8	24.3	144.9	263.6
2.7	13.6	47.5	*****	2.6	2.3	0.2	10.8
345.4	59.6	924.1	22.1	*****	132.9	129.3	235.3
1.5	8.7	1.1	1.0	25.9	*****	0.1	6.4
0.2	0.0	23.3	0.0	21.9	0.0	*****	3.6
4.6	14.8	84.9	36.4	76.9	35.3	22.2	*****

---

8 Приложение В

Результаты подгона параметров модели по данным.

Углы поворота зеркал ϕ, θ (см. рис.4), коэффициент пересчёта фотоны $\rightarrow$ электроны, шумовой коэффициент ϵ (вероятность наблюдения сигнала выше порога при отсутствии света)

mirror	ϕ	θ	phot2el	ϵ
1	0.759	0.097	18.5	0.012
2	0.730	0.106	23.8	0.017
3	0.752	0.011	26.7	0.032
4	0.755	-0.030	25.6	0.037
5	0.758	-0.061	22.8	0.040
6	0.757	-0.103	32.0	0.016
7	0.764	-0.170	26.3	0.012
8	0.776	-0.209	18.4	0.023
9	-0.771	0.082	26.2	0.011
10	-0.740	0.075	24.5	0.024
11	-0.740	0.030	25.7	0.025
12	-0.751	-0.012	28.1	0.049
13	-0.756	-0.036	30.6	0.025
14	-0.759	-0.081	27.6	0.021
15	-0.768	-0.149	29.9	0.009
16	-0.781	-0.193	18.8	0.009
17	0.745	0.232	46.7	0.007
18	0.763	0.081	33.1	0.028
19	0.732	0.066	67.5	0.027
20	0.726	-0.05	37.6	0.041
21	0.746	-0.135	47.3	0.014
22	0.75	-0.26	321	0.005
23	-0.767	0.235	60.8	0.006
24	-0.765	0.117	58.5	0.010
25	-0.73	0.01	48.8	0.022
26	-0.755	-0.04	41.0	0.021
27	-0.768	-0.184	35.4	0.012
28	-0.71	-0.21	70.6	0.006

Радиусы кривизны зеркал (см рис.2) по прямым измерениям.

номер	r1	r2	r3	r4
1	1009.2	1009.4		
2	614.2	961.3		
3	705.5	876.4		
4	720.9	906.6		
5	772.9	868.2		
6	697.5	902.7		

7	605.2	988.3		
8	950.3	1003.7		
9	949.6	1161.2		
10	616.2	977.1		
11	608.5	1035.7		
12	665.2	983.1		
13	689.3	945.9		
14	690.9	924.6		
15	558.9	1084.4		
16	914.0	1125.6		
17	1701.3	1317.7	1666.0	2730.0
18	1722.2	988.1	1077.0	2627.0
19	1384.1	675.2	724.8	3440.7
20	1817.2	895.6	992.2	2650.3
21	699.2	587.7	763.1	4576.1
22	1332.3	892.8	1321.5	3498.8
23	928.7	623.4	714.8	3690.0
24	575.1	448.0	474.3	6691.2
25	601.1	520.6	622.5	4247.1
26	977.8	702.8	877.2	3617.9
27	575.6	470.0	519.4	6644.8
28	657.9	529.7	671.1	4599.9

9 приложение C

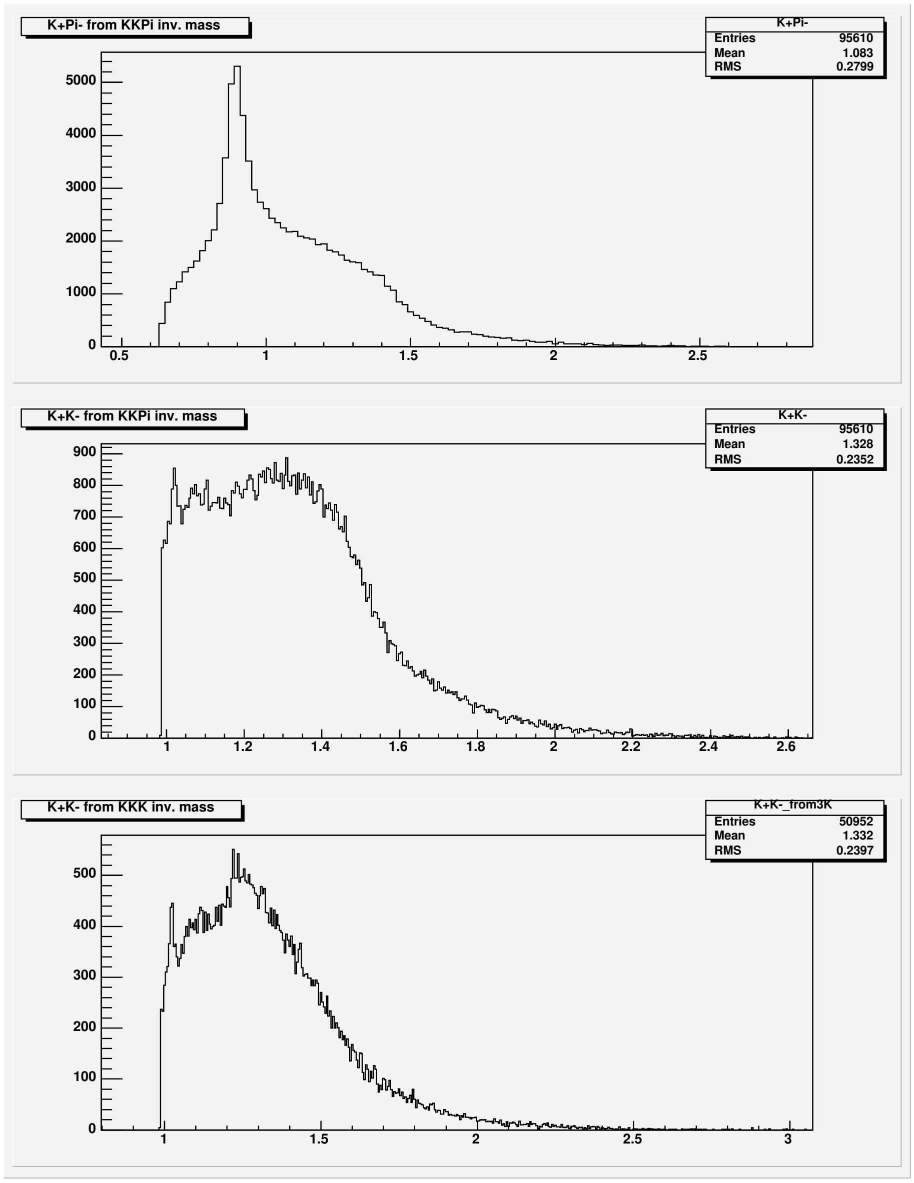

Рис. 5: критерий с $\alpha = 1.05$

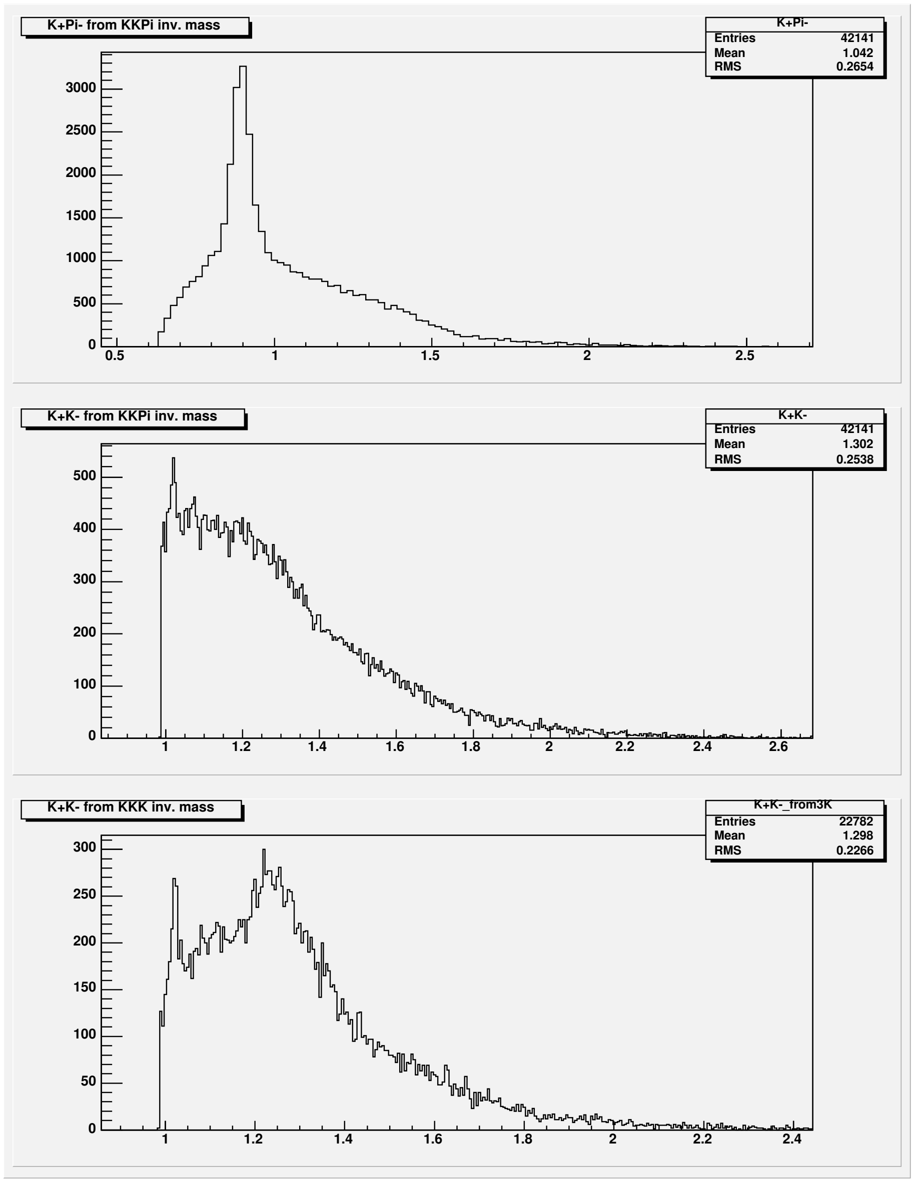

Рис. 6: критерий с $\alpha = 2.0$

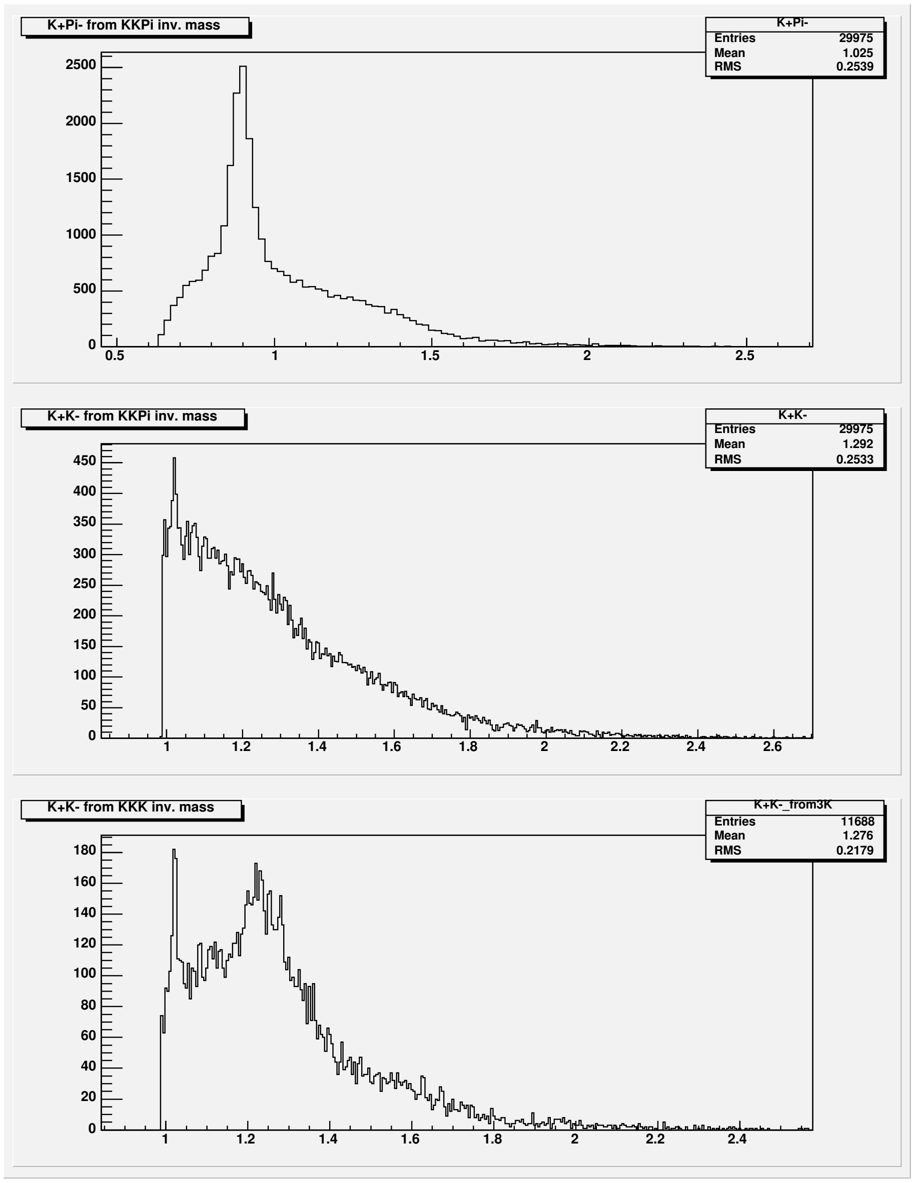

Рис. 7: критерий с $\alpha = 4.0$

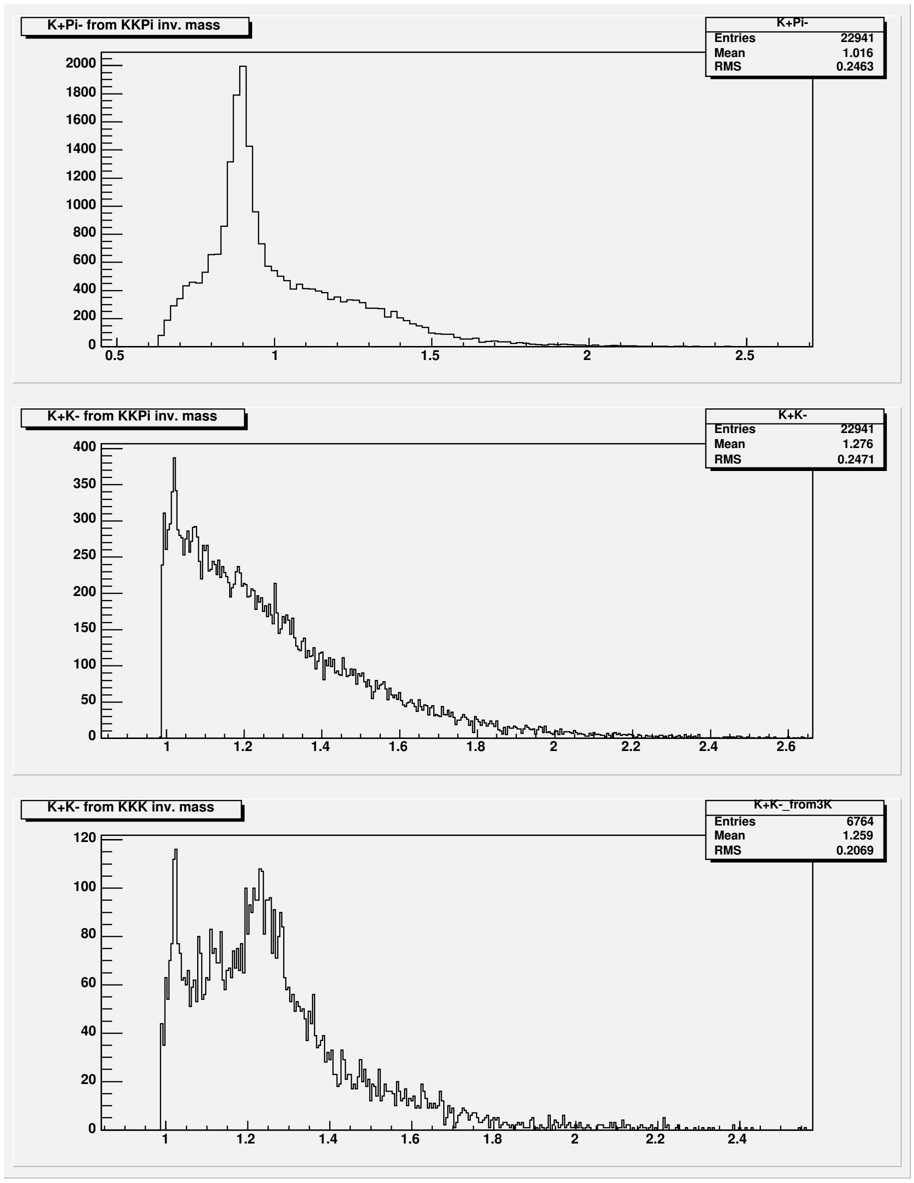

Рис. 8: критерий с $\alpha = 6.0$

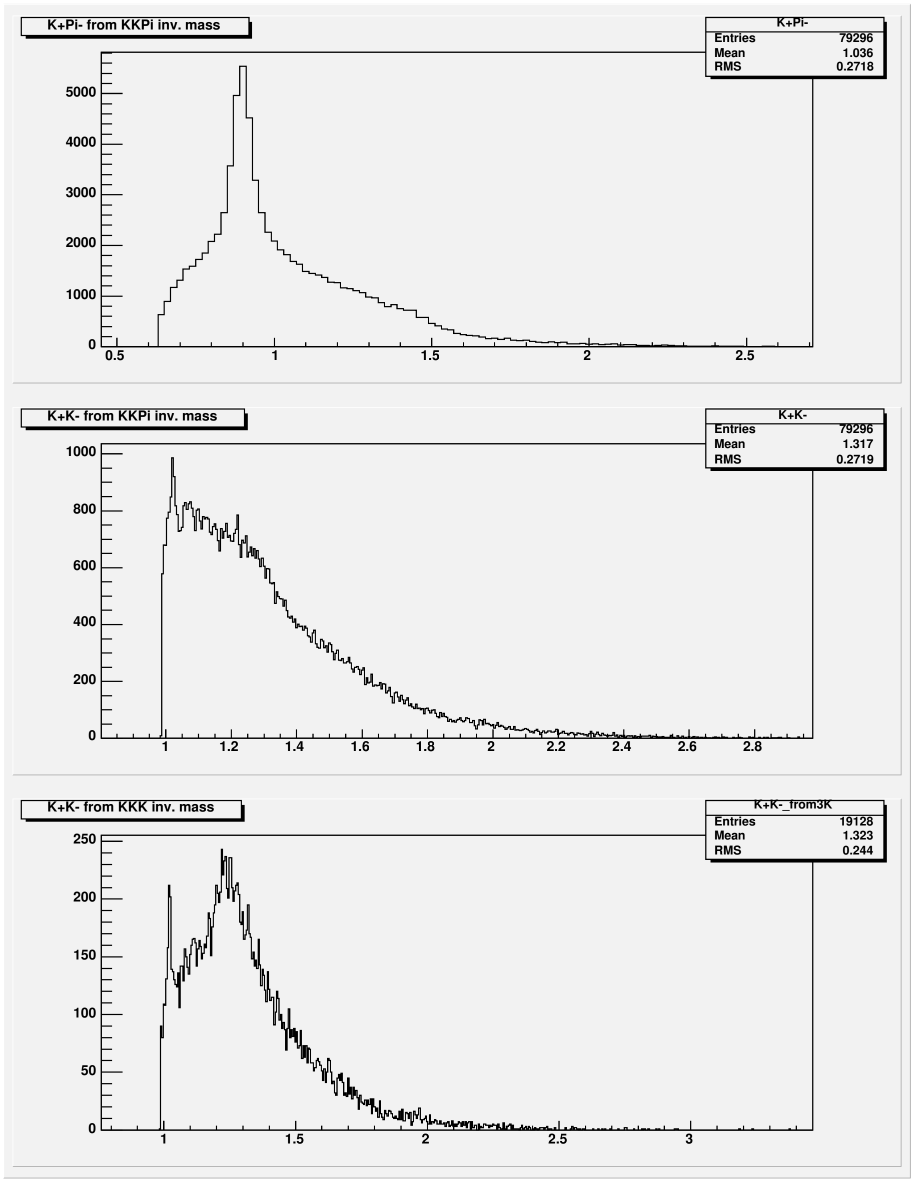

Рис. 9: критерий с априорными вероятностями

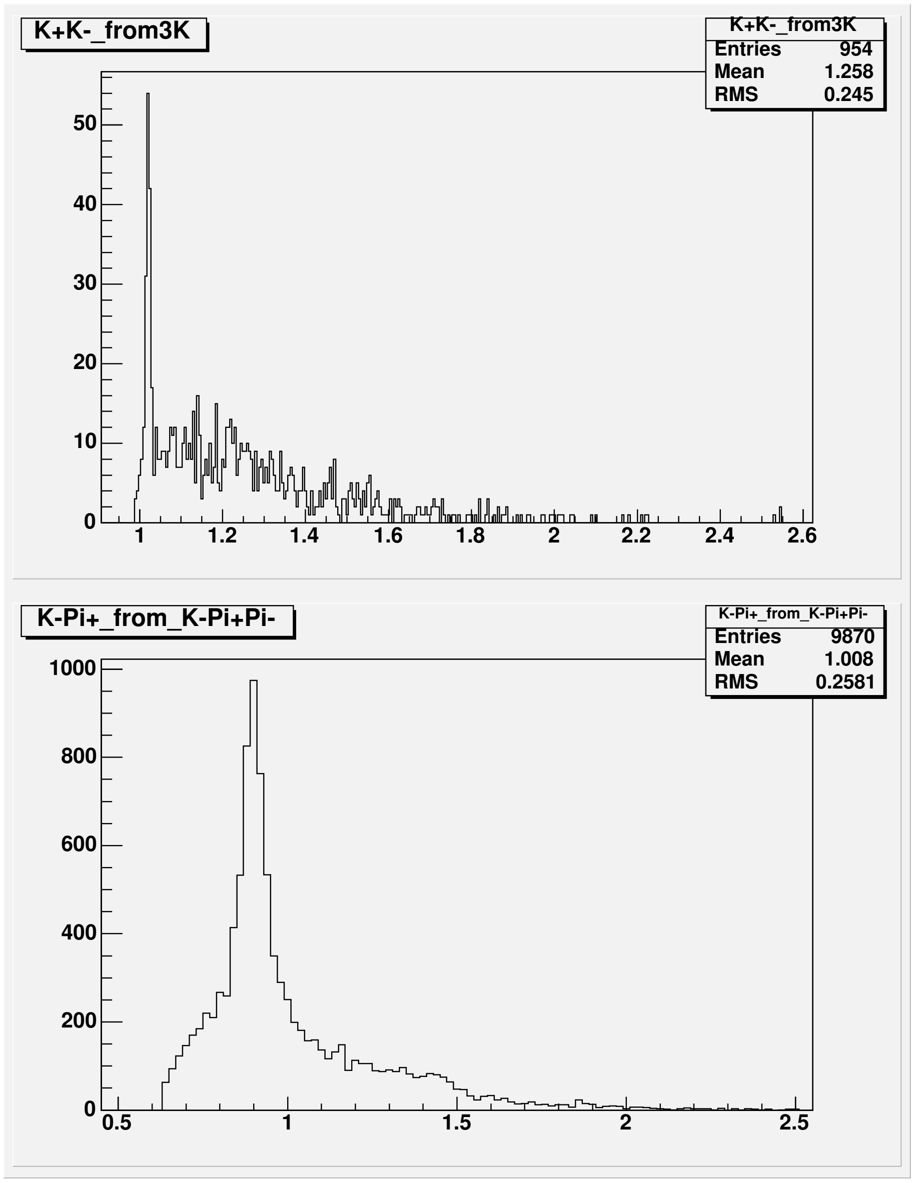

Рис. 10: K- в начальном состоянии

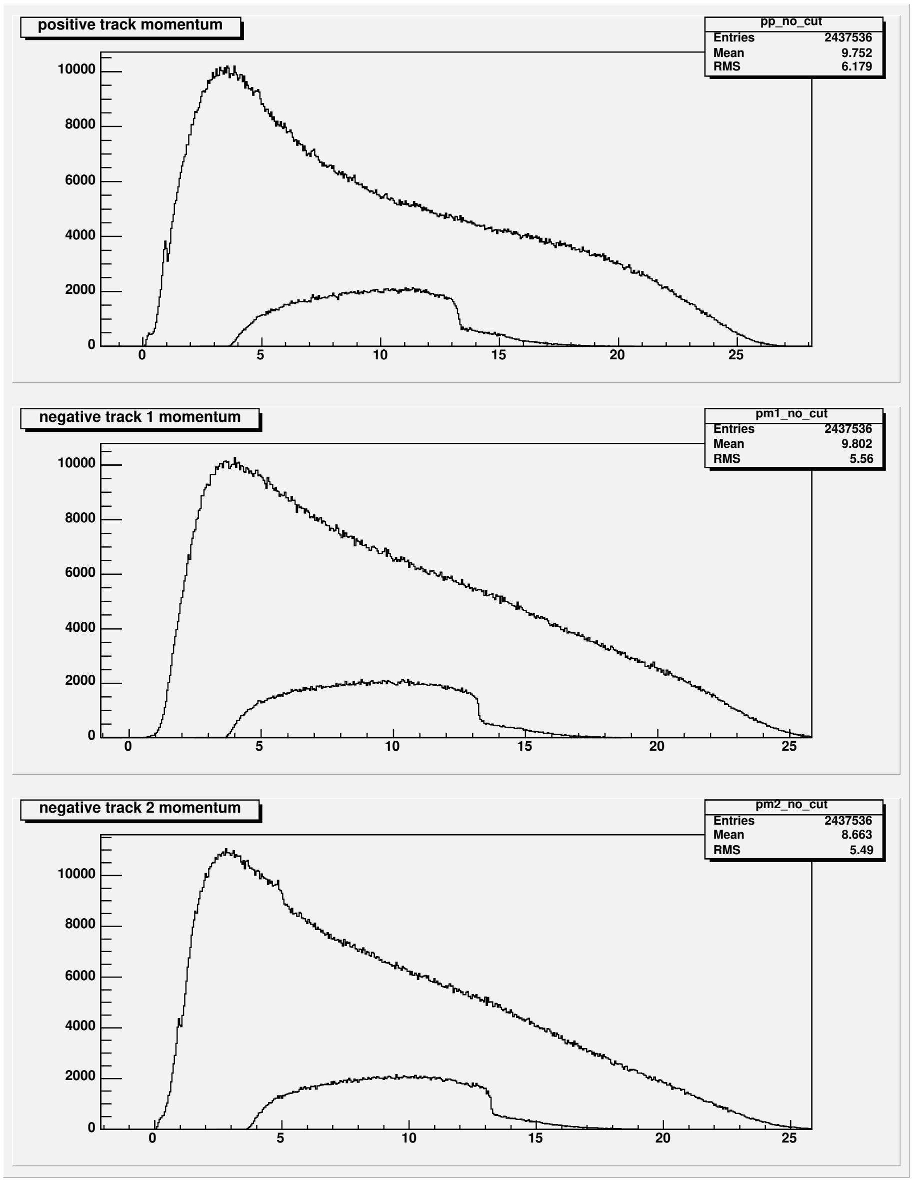

Рис. 11: импульсные спектры треков до идентификации и хорошо идентифицированных событий с $\alpha = 4.0$

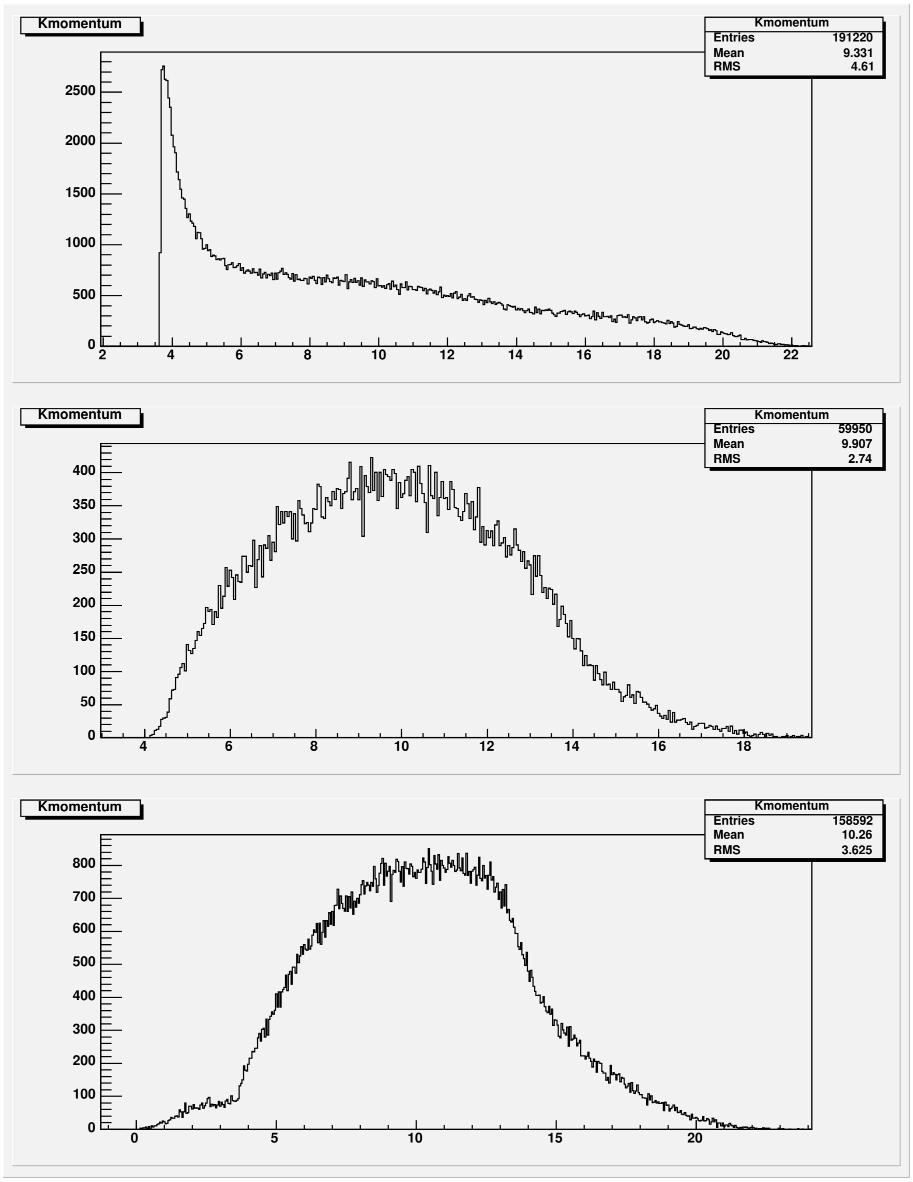

Рис. 12: импульсные спектры K из $KK\pi$ при $\alpha = 1.05$, $\alpha = 4.0$ и с априорными вероятностями

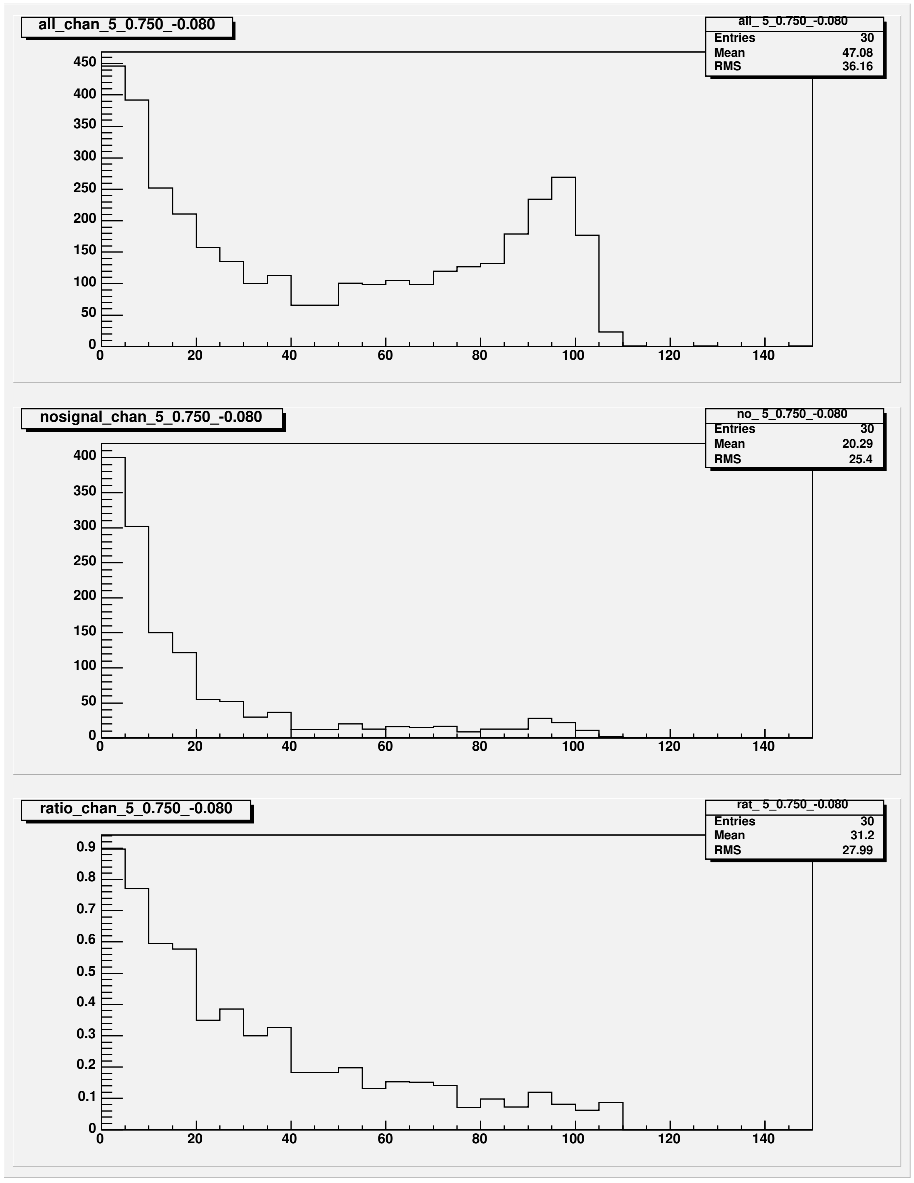

Рис. 13: “проверка” распределения Пуассона

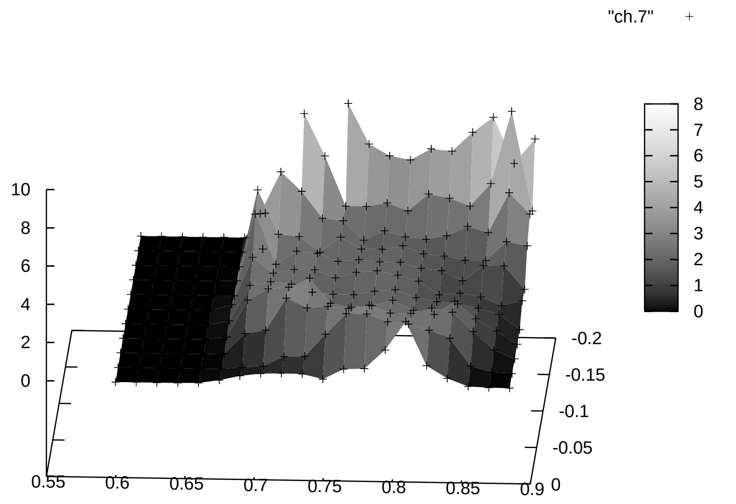

Рис. 14: Зависимость среднего χ^2 в зависимости от поворота зеркала

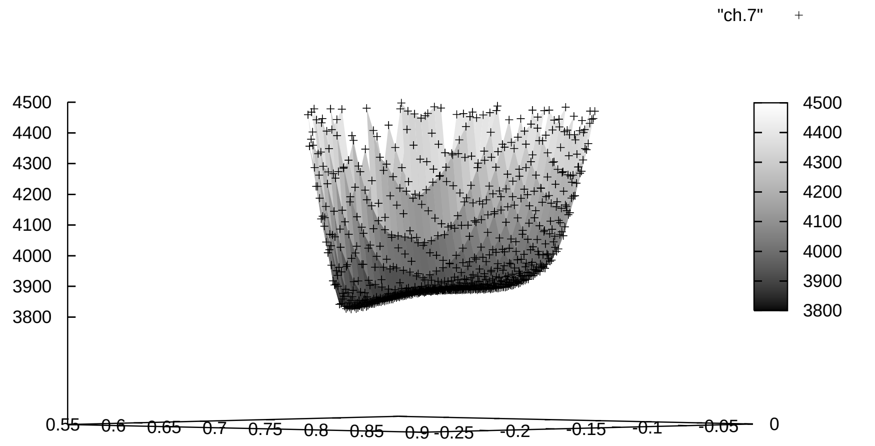

Рис. 15: Зависимость правдоподобия (умноженного на -1) в зависимости от поворота зеркала