

Дипломная работа

Алахвердянца Александра Владимировича

**Изучение рождения
резонанса $K^{*\pm}(892)$
во взаимодействии d -Au
при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$**

**Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
Кечечян Армен Оганесович**

Оглавление

□ Введение

- ❖ Рождение странных частиц при энергиях RHIC
- ❖ Эксперимент STAR
- ❖ TPC

□ Обработка экспериментальных данных

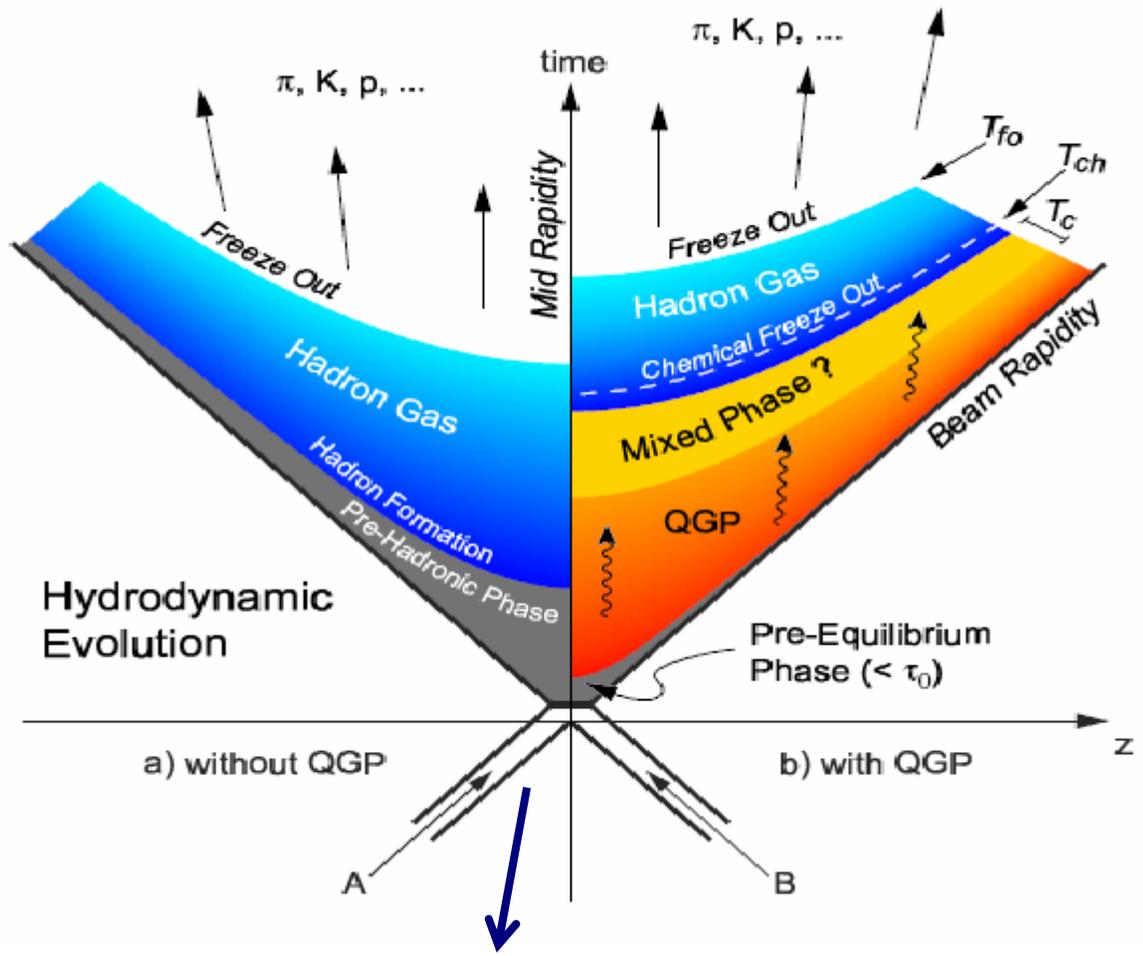
- ❖ Стандартные методы обработки экспериментальных данных, используемые в STAR
- ❖ Метод кинематического фита

□ Результаты

- ❖ Тестирование программы кинематического фита
- ❖ Результаты обработки экспериментальных данных

□ Выводы

Почему интересно изучать взаимодействие тяжелых ионов?

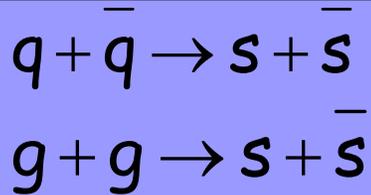


Предсказывается образование нового состояния материи - кварк-глюонной плазмы

Рождение странных частиц

Теория предсказывает увеличение выхода странных частиц и модификацию резонансов при образовании кварк-глюонной плазмы ($T > 150-200 \text{ MeV}$)

QGP

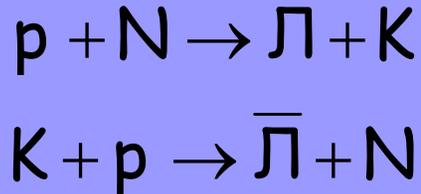


$$E_{\text{порог}} \approx 2m_s \approx 300 \text{ MeV}$$



$$\gamma(ss\bar{)}_{\text{QGP}} > \gamma(ss\bar{)}_{\text{HG}}$$

Адронный газ



$$E_{\text{порог}} \approx 530 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{порог}} \approx 1420 \text{ MeV}$$

Особенный интерес представляют исследования мульти-странных барионов

$$\Lambda = (uds) \rightarrow p p^- \text{ (64\%)}$$

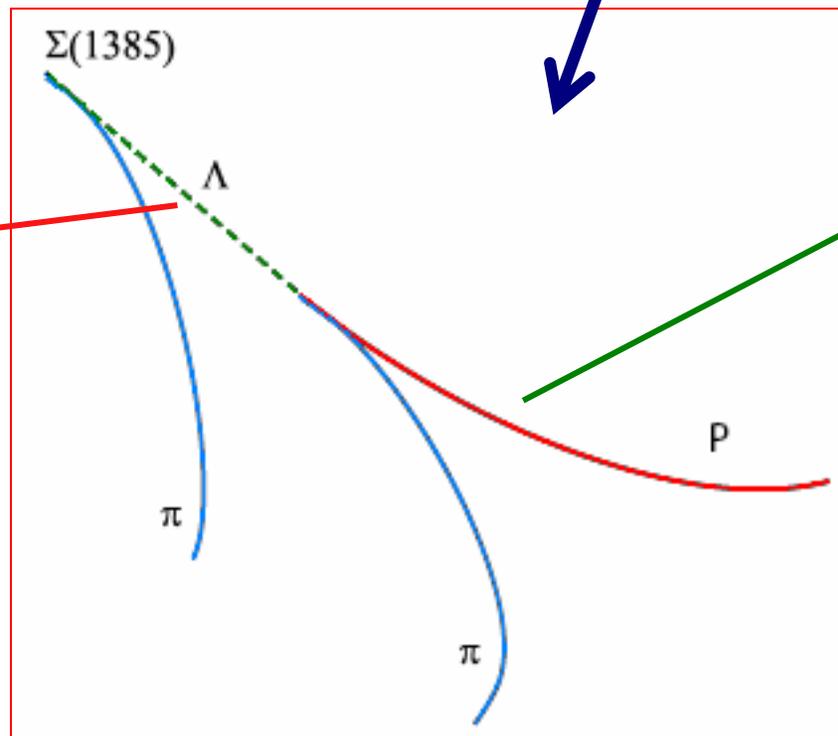
$$O^- = (dss) \rightarrow \Lambda p^- \text{ (100\%)}$$

$$\Xi^- = (sss) \rightarrow \Lambda K^- \text{ (68\%)}$$

Рождение странных частиц

Для изучения распадов мульти-странных барионов необходимо уметь восстанавливать кинематические параметры нейтральных Λ -гиперонов по кинематическим параметрам дочерних заряженных частиц

Т.к. траектория нейтральной частицы не искривляется магнитным полем, мы не можем измерить ее импульс



Импульс заряженной частицы измеряется по искривлению ее траектории магнитным полем

Эксперимент STAR

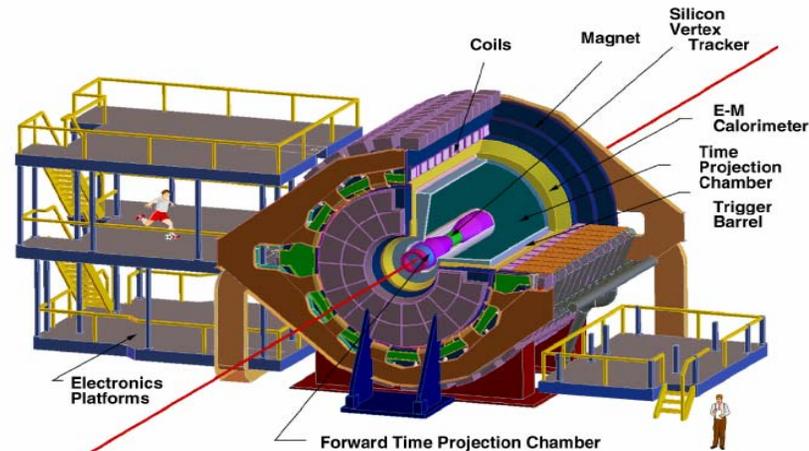
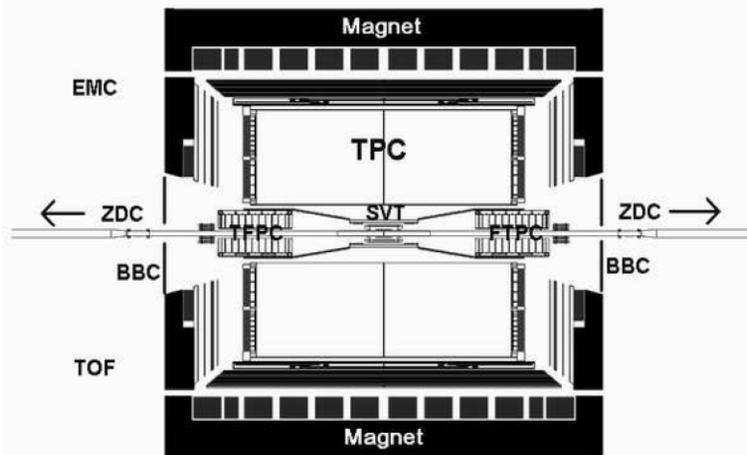
Эксперименты по исследованию взаимодействия тяжелых релятивистских ионов проводятся в Брукхейвенской национальной лаборатории на ускорителе RHIC

Возможности ускорителя

- ✓ Ускоряет ионы одного или разных сортов с зарядом от 1 (протон) до 79 (ионы золота)
- ✓ Энергия в системе центра масс от 19 GeV на нуклон до 200 GeV на нуклон для (Au-Au) и 500 GeV для (p-p)
- ✓ Может ускорять пучки продольно и поперечно поляризованных протонов

STAR - Solenoidal Tracker at RHIC

Экспериментальная установка для поиска
нового состояния материи

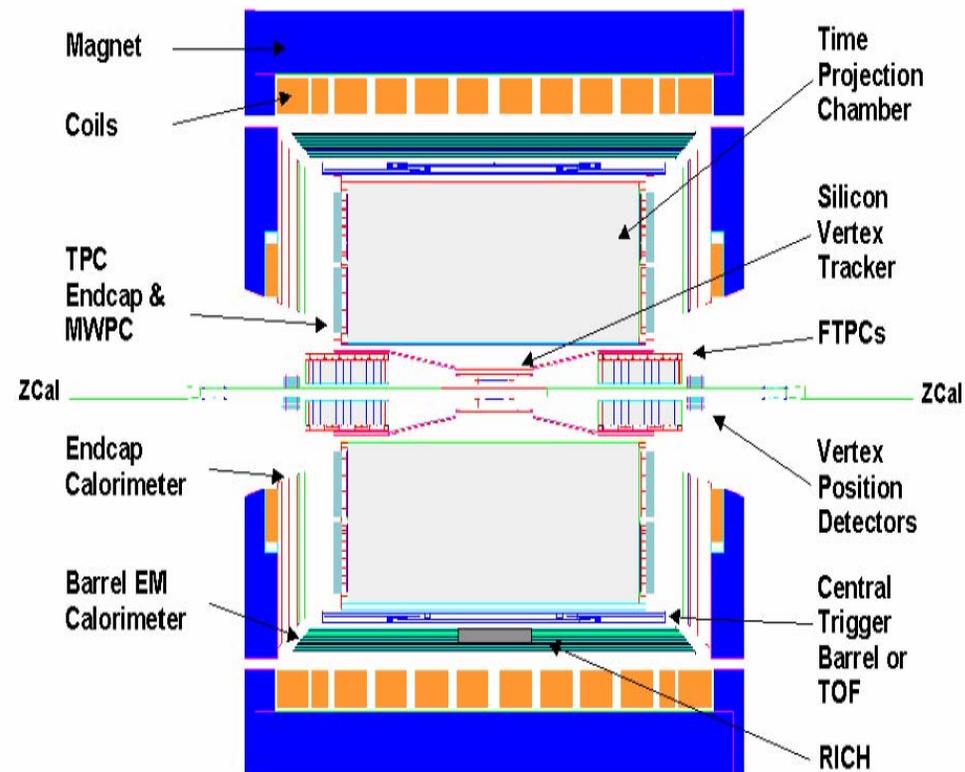


Главная задача - измерение
большого числа наблюдаемых
переменных

Входит в число самых
больших из действующих
экспериментальных
установок в мире

Эксперимент STAR

Схема экспериментальной установки.



✓ TPC - Время - проекционная камера

✓ SVT - Кремниевый вершинный детектор

✓ FTPC - TPC для вперед рассеиваемых частиц

✓ TOF - детектор измерения времени пролета частицы

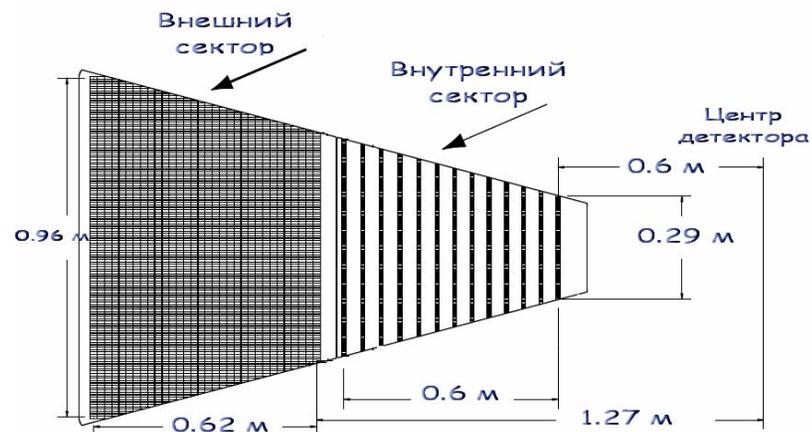
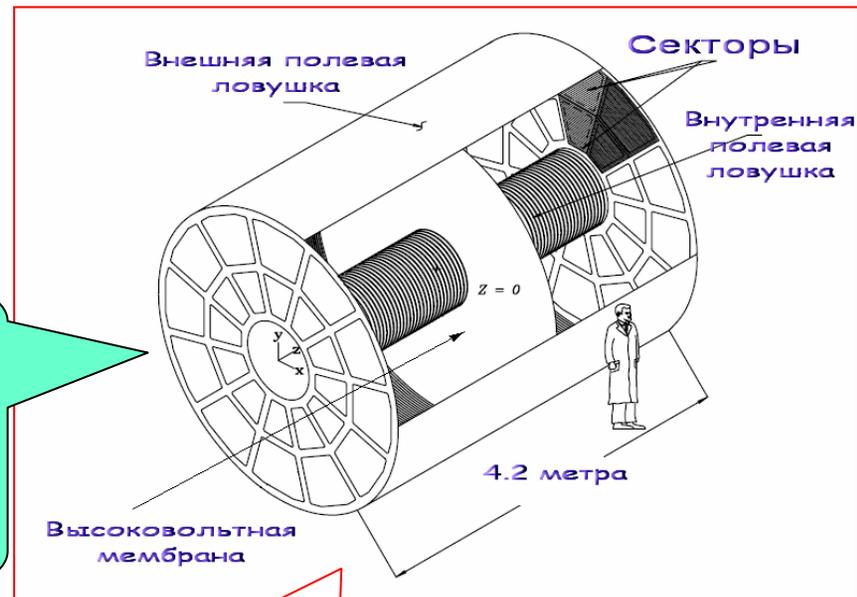
✓ EMC - электромагнитный калориметр

✓ ZDC - калориметры нулевого угла

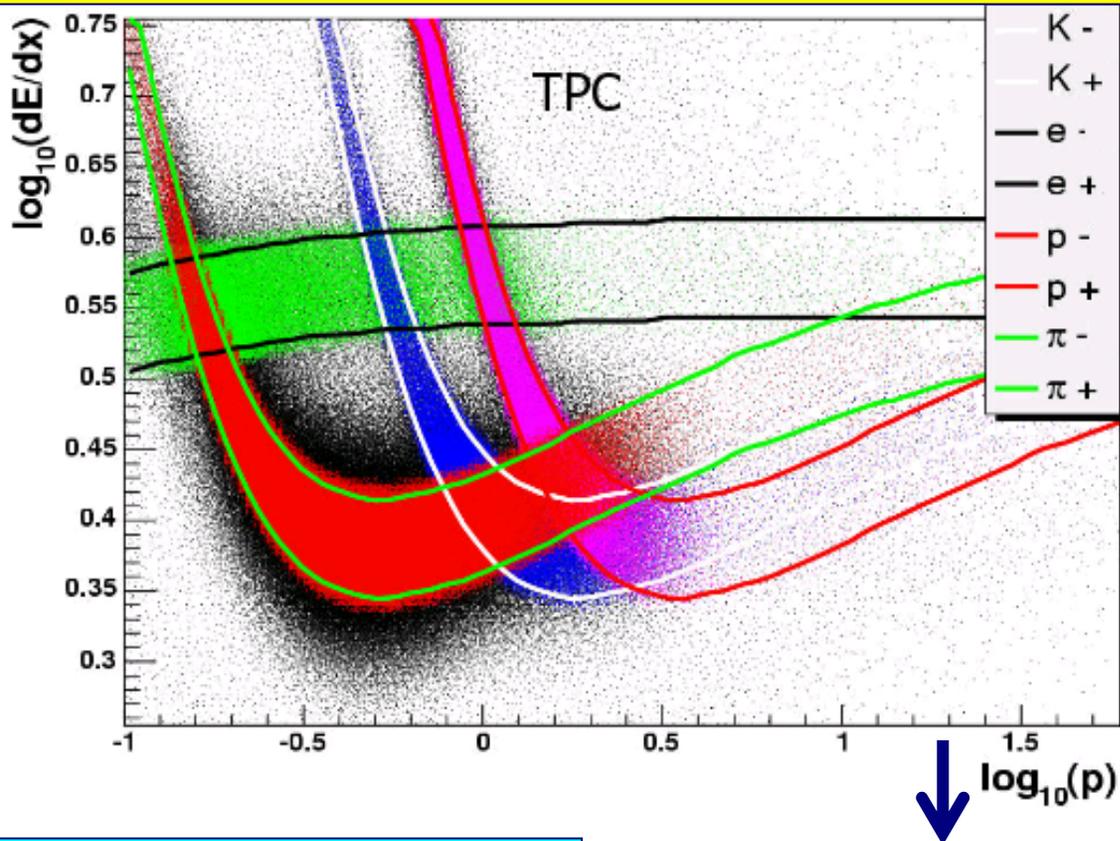
Основные параметры TPC

- ✓ Радиус малого цилиндра - 0.5 м
- ✓ Радиус большого цилиндра - 2 м
- ✓ 4.2 метра в длину
- ✓ Разделен на 12 секторов
- ✓ Камера заполнена газом: 90% - аргон, 10% - метан

- ✓ Каждый сектор разбит на внешний и внутренний
- ✓ Пространственное разрешение треков во внутреннем секторе выше, чем во внешнем
- ✓ Может быть зарегистрировано до 45-ти хитов для каждого трека



Разделение заряженных частиц по ионизационным потерям



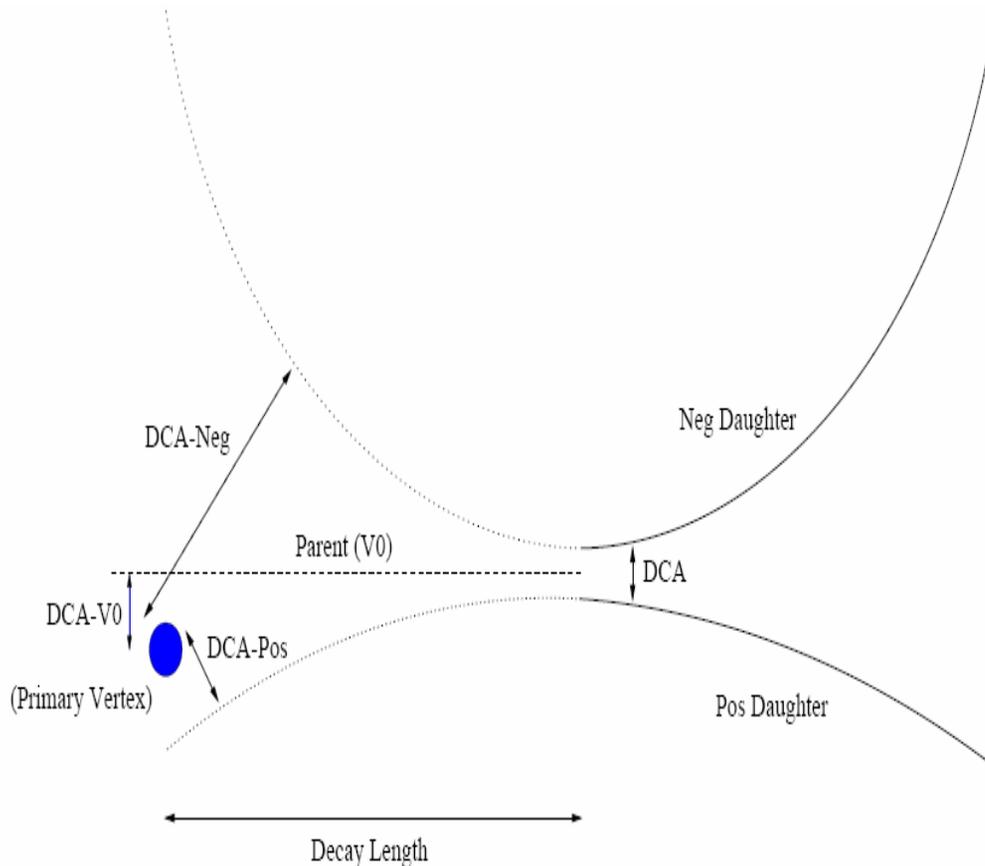
Формула Бете-Блоха для ионизационных потерь заряженных частиц в газе.

Ионизационные потери зависят от заряда и отношения импульса к массе частицы: $v\gamma = p/mc$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^2 (Ze)^2 n_e}{4\pi\epsilon_0^2 m_e c^2 \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

Стандартные методы обработки экспериментальных данных, используемые в STAR

Отбор кандидатов в V0 частицы



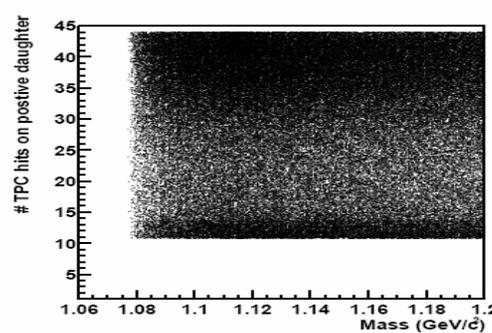
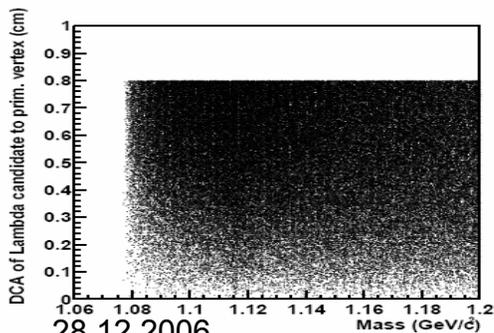
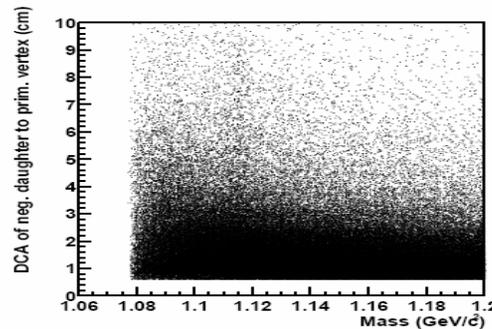
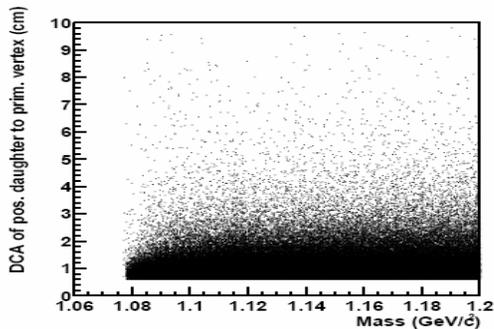
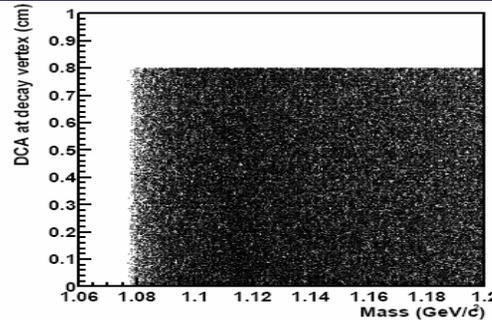
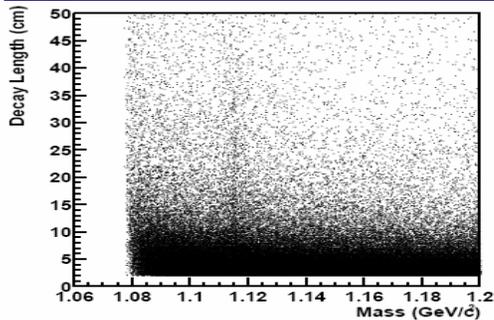
Параметры для отбора

- ✓(PV)- Первичная вершина
- ✓(DV)- Распадная вершина
- ✓Decay Length - длина пролета
- ✓DCA(*) между V0 и PV
- ✓DCA между Pos и PV
- ✓DCA между Neg и PV
- ✓DCA между Pos и Neg

(*) DCA (Distance of Closest Approach) - кратчайшее расстояние до объекта

Стандартные методы обработки экспериментальных данных, используемые в STAR

Критерии отбора событий при обработке данных, применяемые в эксперименте STAR



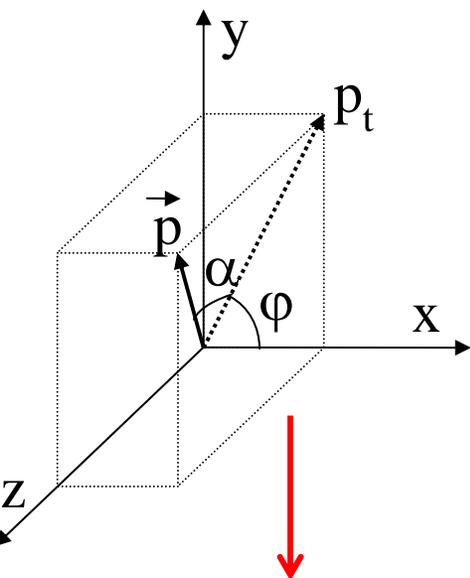
Пример критериев отбора

Topology Cuts for Λ		
Λp_T (GeV/c)	< 2.0	≥ 2.0
DCA of proton to primary vertex (cm)	≥ 0.5	≥ 0
DCA of π^- to primary vertex (cm)	≥ 1.5	≥ 0
DCA of Λ to primary vertex (cm)	≤ 5.0	≤ 5.0
DCA of proton to π^- (cm)	≤ 1.0	≤ 1.0
Decay Length (cm)	≥ 3.0	≥ 6.0

Недостатки метода

- ✓ Большая потеря статистики
- ✓ Произвол в определении критериев отбора
- ✓ Ошибки кинематических параметров вилки определяются ошибками измерений для дочерних треков

Метод кинематического фита для идентификации VO



Измеряемые величины

$x_1 = 1/p_{t0}$, $x_4 = \varphi_0$, $x_7 = \tan(\alpha_0)$ для VO
 $x_2 = 1/p_{t1}$, $x_5 = \varphi_1$, $x_8 = \tan(\alpha_1)$ для положительного трека
 $x_3 = 1/p_{t2}$, $x_6 = \varphi_2$, $x_9 = \tan(\alpha_2)$ для отрицательного трека
 x_{mi} — экспериментальные значения величин x_i
 δx_i — ошибки измерения величин x_{mi}

Отрицательно
заряженная частица

VO

Положительно
заряженная частица

Законы сохранения

$$\begin{cases} p_{xi} = p_{ti} \cos(\varphi_i) \\ p_{yi} = p_{ti} \sin(\varphi_i) \\ p_{zi} = p_{ti} \tan(\alpha_i) \\ E_i = \sqrt{m_i^2 + p_{ti}^2 (1 + \tan^2(\alpha_i))} \end{cases}$$

$i = 0, 1, 2$

Пусть n случайных величин x_i распределены нормально и имеют средние значения \bar{x}_i и дисперсию σ_i^2 тогда сумма $\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^2}$ распределена по закону χ^2 с n степенями свободы и имеет плотность распределения

$$f(x) = \frac{1}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} x^{(n-2)/2} e^{-x/2}$$

$$\begin{cases} p_{x0} = p_{x1} + p_{x2} \\ p_{y0} = p_{y1} + p_{y2} \\ p_{z0} = p_{z1} + p_{z2} \\ E_0 = E_1 + E_2 \end{cases}$$

Если величины x_i связаны k соотношениями, тогда число степеней свободы равно $n-k-1$

$$\begin{aligned} \overline{\chi^2} &= n \\ D(\chi^2(n)) &= 2n \end{aligned}$$

Метод кинематического фита для идентификации VO

Задача восстановления кинематических параметров вилки сводится к нахождению условного минимума χ^2 : $\chi^2 = \min \sum_{i=1}^8 \frac{(x_i - x_{mi})^2}{\delta x_i^2}$ при

условии:

$$\begin{aligned} P_1 = p_{0x} - p_{1x} - p_{2x} = 0 & \quad P_2 = p_{0y} - p_{1y} - p_{2y} = 0 \\ P_3 = p_{0z} - p_{1z} - p_{2z} = 0 & \quad P_4 = E_0 - E_1 - E_2 = 0 \end{aligned}$$

Минимизируем χ^2 методом коэффициентов Лагранжа

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^8 \frac{(x_i - x_{mi})^2}{\delta x_i^2} + \sum_{j=1}^4 \lambda_j P_j, \quad \bar{x} = x_0, \dots, x_{12}$$

$$\begin{aligned} x_9 = \lambda_1, x_{10} = \lambda_2 \\ x_{11} = \lambda_3, x_{12} = \lambda_4 \end{aligned}$$

Приходим к системе нелинейных уравнений

$$\frac{\partial F(\bar{x})}{\partial x_i} = 0, \quad i = 0, \dots, 12$$

Решим полученную систему уравнений методом Ньютона

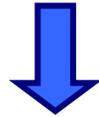
$$\sum_{j=0}^{12} \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_i \partial x_j} \bigg|_{\bar{x}=\bar{x}^k} \Delta x_j = -F(\bar{x}^k),$$
$$\Delta x_j = x_j^{k+1} - x_j^k, \quad k - \text{номер шага итерации}$$

Метод кинематического фита для идентификации V0

Реализация алгоритма

Для решения задачи минимизации χ^2 была написана программа на языке C++, выполняющая минимизацию. Программа была интегрирована в библиотеку программ STAR.

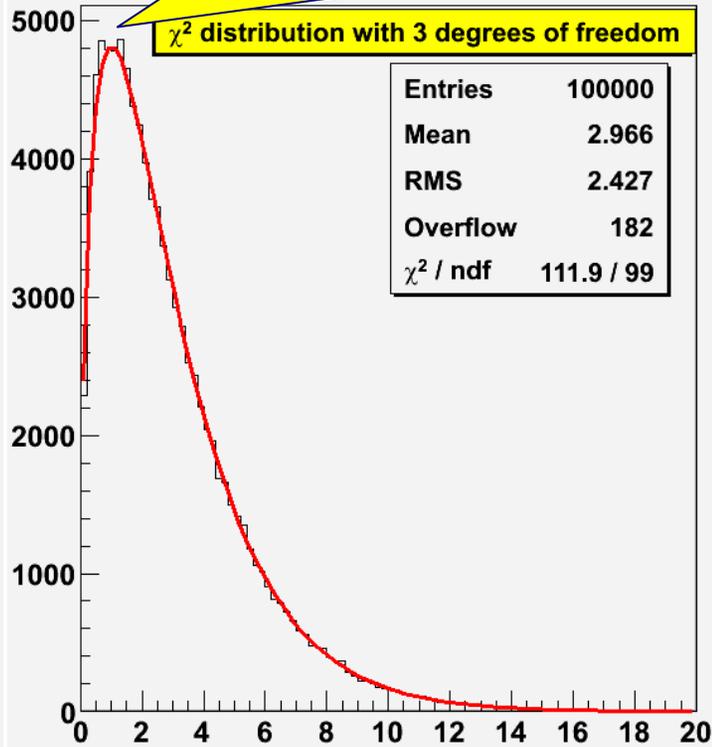
Проверка работы программы осуществлялась на смоделированных данных



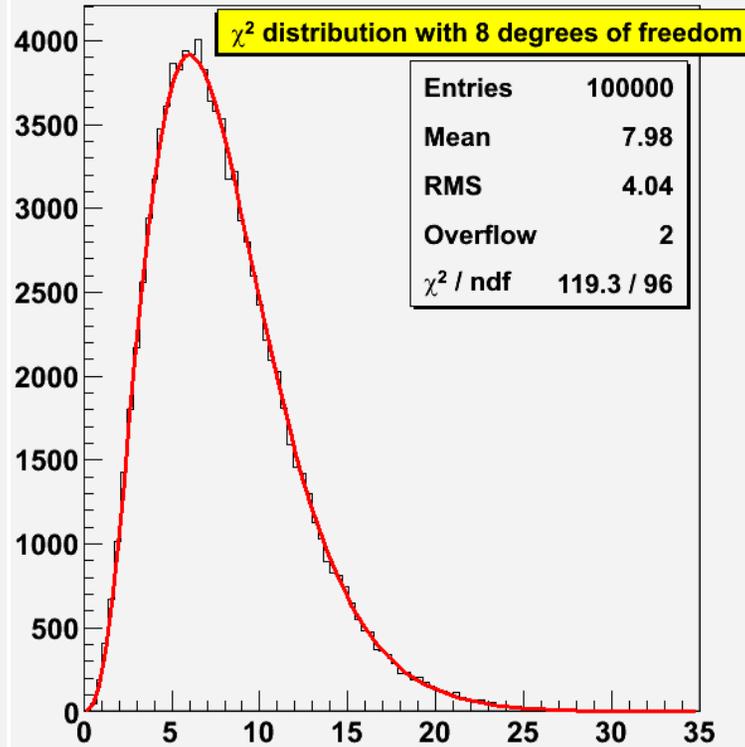
- ✓ Генерировались нейтральные странные частицы с экспоненциальным распределением по поперечной массе, полученным из эксперимента.
- ✓ Генерировались распады: $\Lambda^0 \rightarrow p^+ p^-$ и $K_s^0 \rightarrow p^+ p^-$
- ✓ Ошибки измерения разыгрывались по Гауссу.
- ✓ Кинематическое моделирование осуществлялось в среде ROOT на языке C++ при помощи генератора FOWL.

Тестирование программы

После минимизации получаем распределение χ^2 с тремя степенями свободы хорошо согласующееся с теоретическим



После минимизации



До минимизации

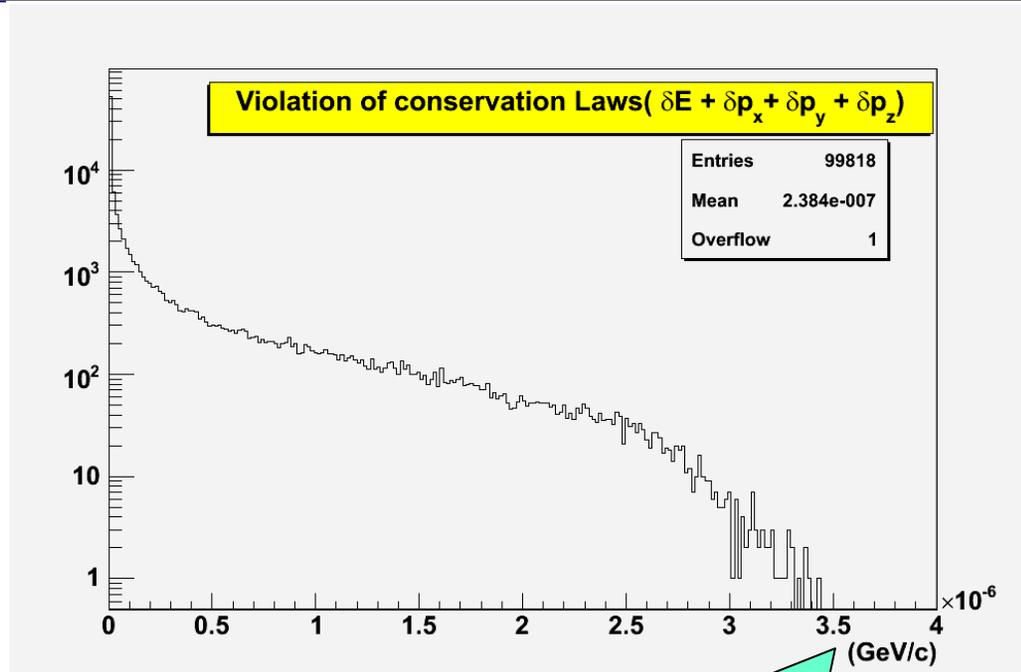
Распределение χ^2 с тремя степенями свободы. Значения среднего и дисперсии.

$$\varphi_{\chi^2(3)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{x} e^{-x/2}$$



$$\begin{aligned} \overline{\chi^2(3)} &= 3 \\ \sigma(\chi^2(3)) &= 2.45 \end{aligned}$$

Точность выполнения законов сохранения



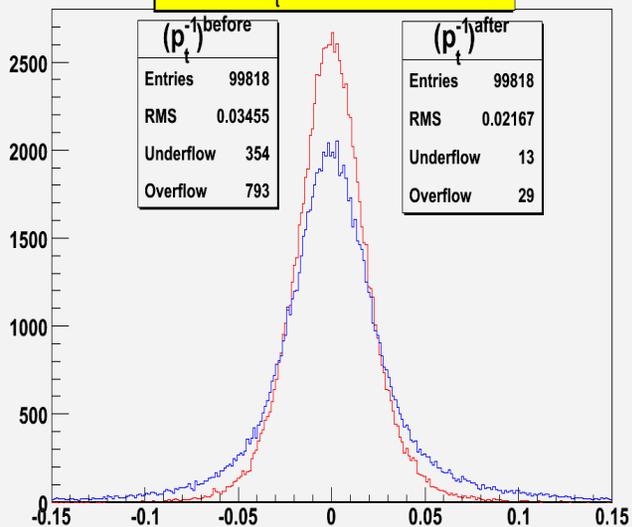
Требуемая точность выполнения законов сохранения была 10^{-6} GeV

При нахождении минимума χ^2 кинематические параметры подбираются таким образом, чтобы хорошо выполнялся закон сохранения энергии-импульса

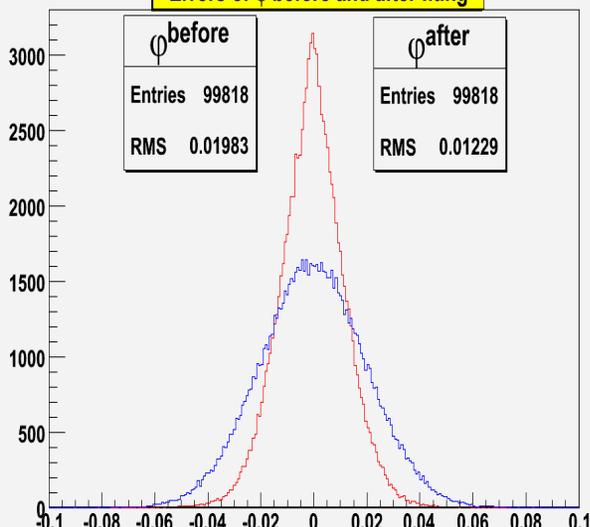
Тестирование программы

Уточнение значений кинематических параметров в результате применения кинематического фита к распаду $K_s^0 \rightarrow p^+ p^-$

Errors of p_t^{-1} before and after fitting



Errors of φ before and after fitting



Errors of $\tan(\alpha)$ before and after fitting

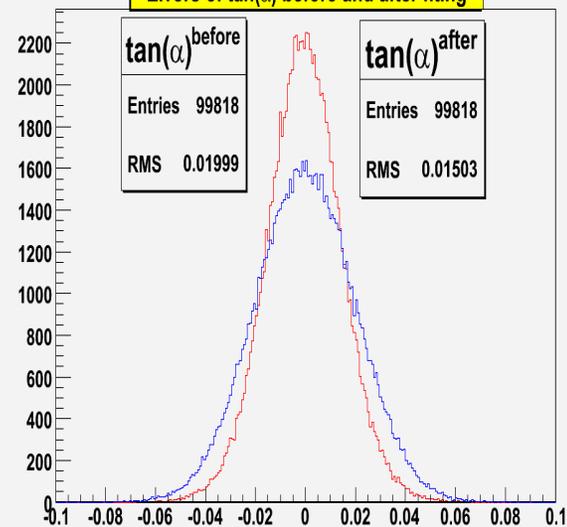


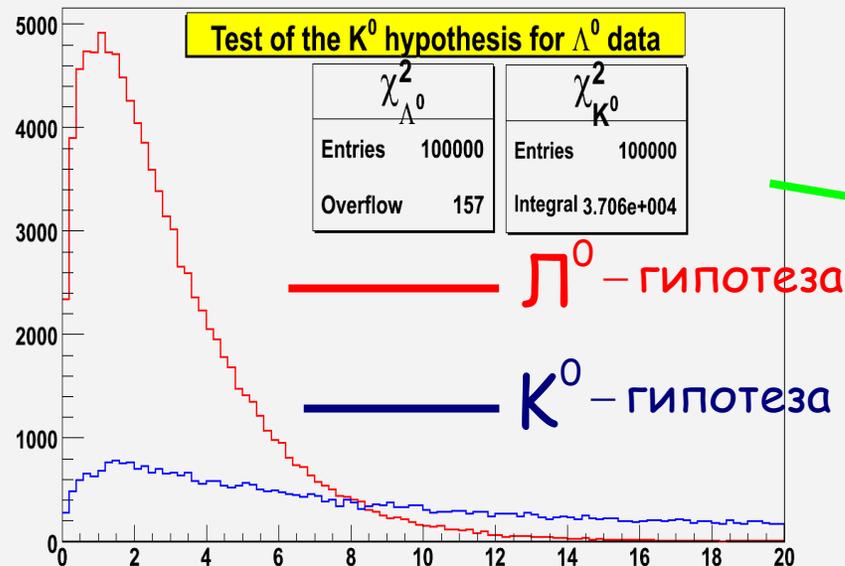
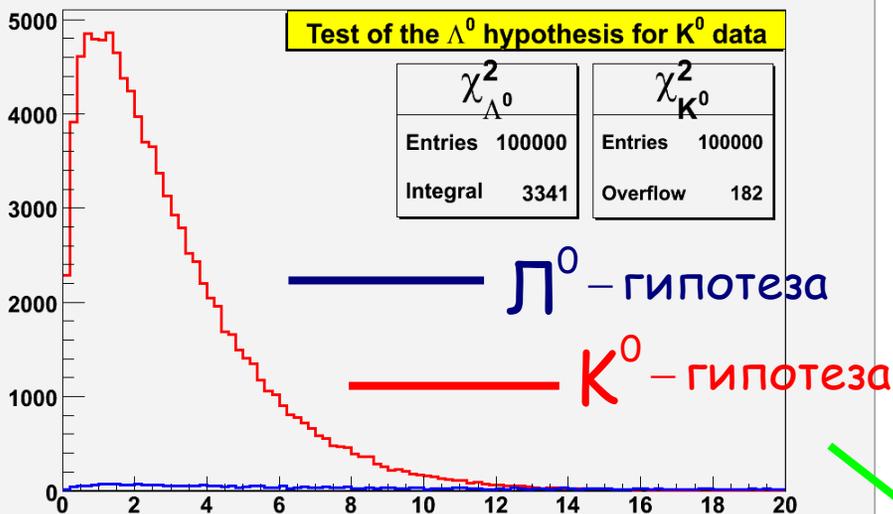
Таблица ошибок кинематических параметров частицы K_s^0 до и после кинематического фита

	p_t^{-1}	φ	$\tan(\alpha)$
before	0.03455	0.01983	0.01999
after	0.02167	0.01229	0.01503

Тестирование программы

Разделение гипотез

Фитирование кинематических параметров распадов $\Lambda^0 \rightarrow p^+ p^-$ и $K_s^0 \rightarrow p^+ p^-$ для двух гипотез: K_s^0, Λ^0



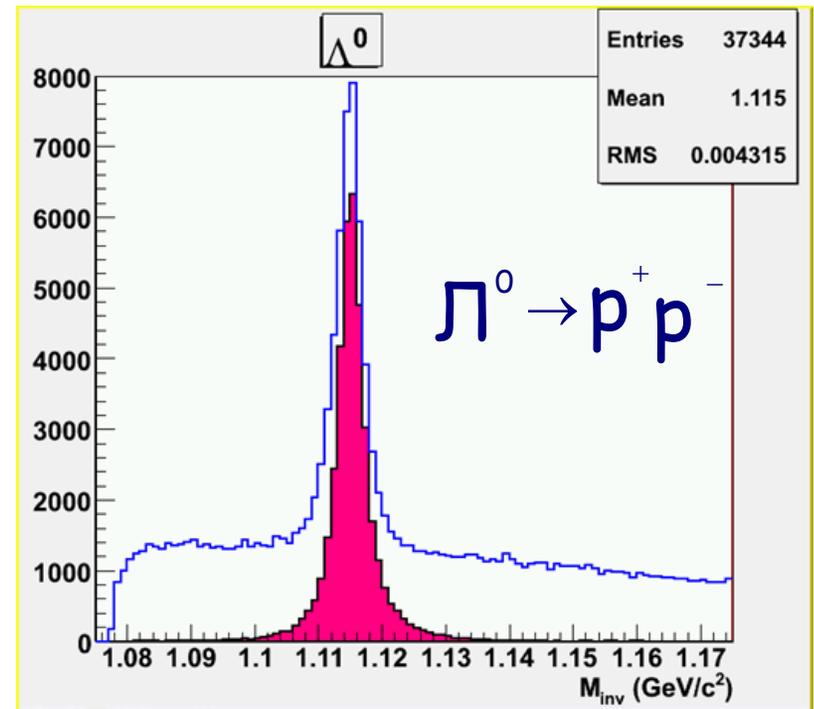
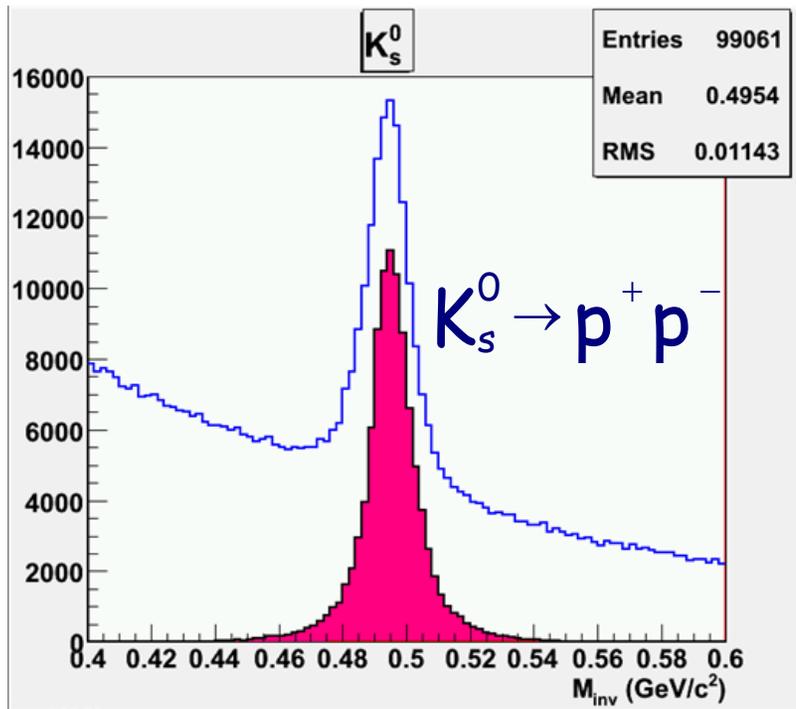
Примесь Λ^0 в распаде K_s^0 при критерии отбора ($\chi^2 < 10$) равна 2.3% (*)

Примесь K_s^0 в распаде Λ^0 при критерии отбора ($\chi^2 < 10$) равна 26.4%

(*) Предполагалось что мы не обладаем какой-либо информацией о треках, кроме их кинематических параметров. В реальном эксперименте мы можем определить тип частиц по ионизационным потерям и гораздо лучше разделить гипотезы.

Обработка экспериментальных данных

Данные STAR для взаимодействия (d - Au) при $\sqrt{S_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



Стандартный метод
обработки данных на STARe

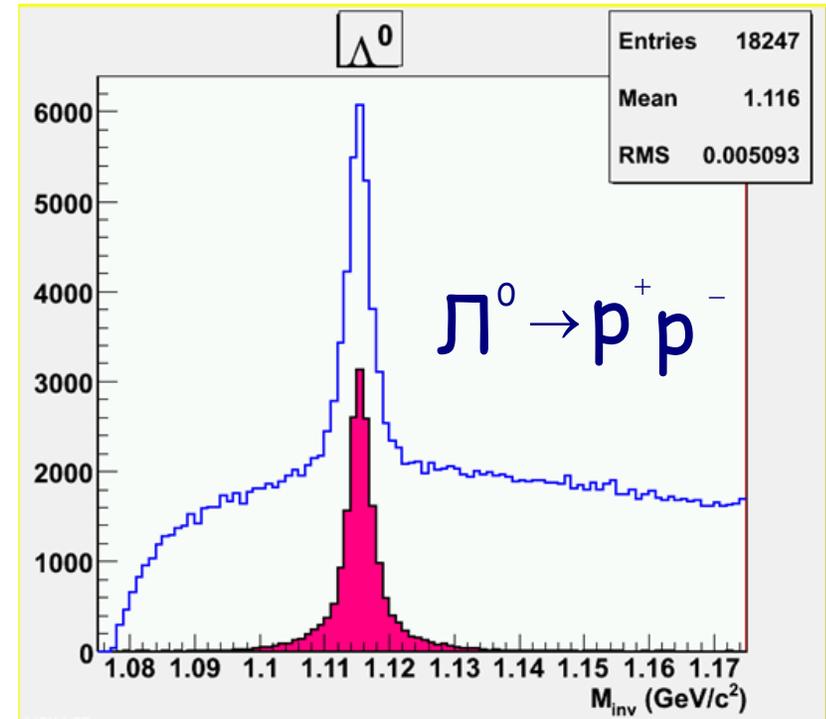
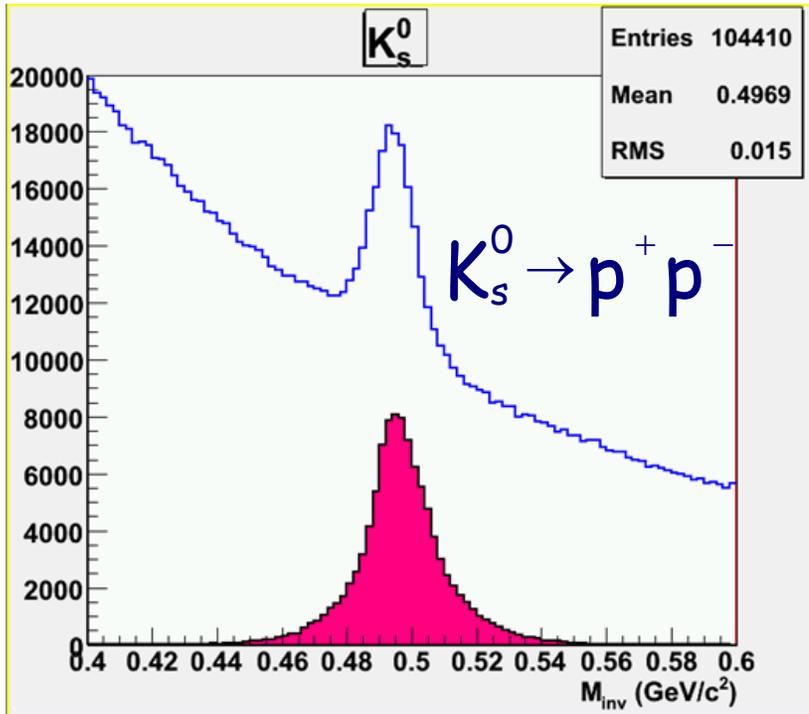
Метод кинематического фита
при критерии отбора: $\chi^2 < 10$

Сильное подавление
фона без потери
статистики при
использовании метода
кинематического фита



Обработка экспериментальных данных

Данные STAR для взаимодействия (Au - Au) при $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



Стандартный метод
обработки данных на STARe

Метод кинематического фита
при критерии отбора: $\chi^2 < 10$

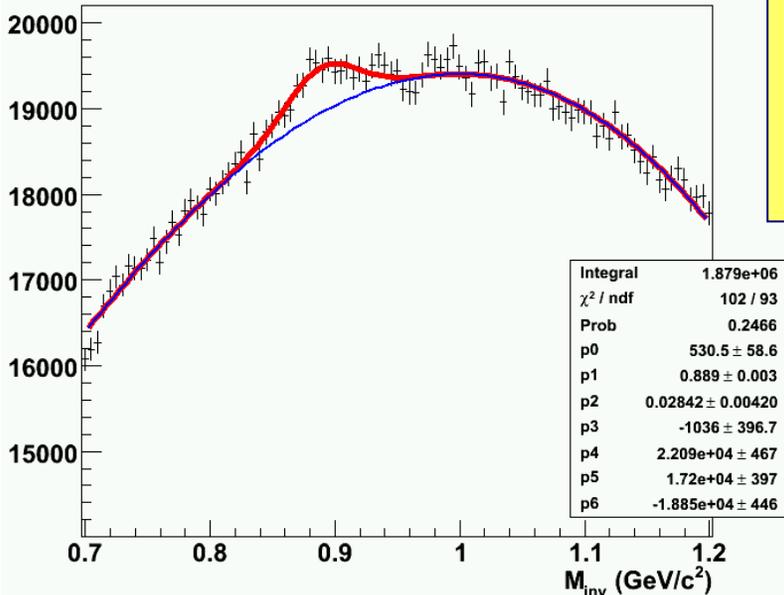
Сильное подавление
фона без потери
статистики при
использовании метода
кинематического фита

Обработка экспериментальных данных

Основная мода распада $K^{*\pm}$
 $K^{*\pm} \rightarrow K_s^0 p^\pm \sim 100\%$

Поиск $K^{*\pm}$

$K_s^0 \pi$ d+Au 200 GeV



Кривая фитировалась формулой:

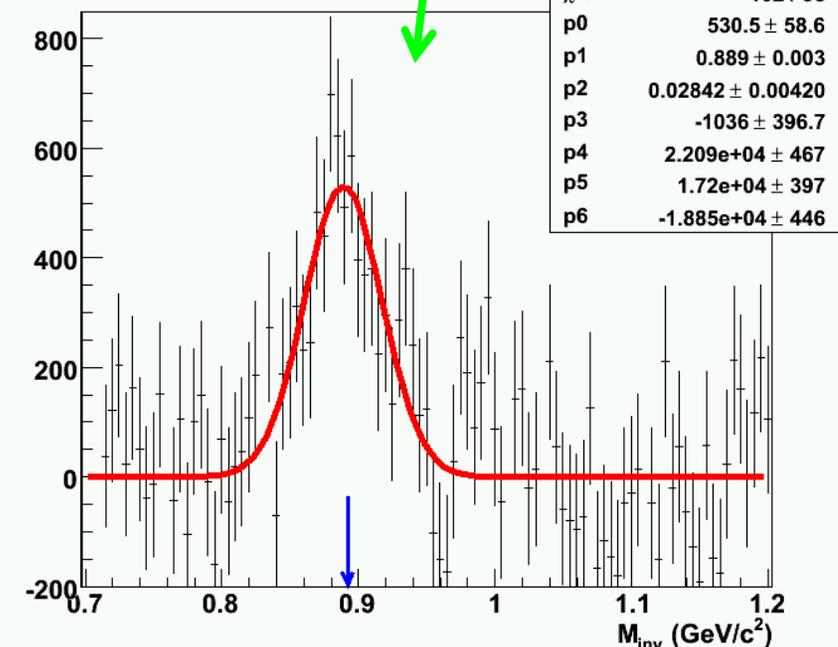
$$f(x) = \frac{P_0}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-p_1)^2}{2p_2^2}} + p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6$$

Фон фитировался формулой:

$$f(x) = p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6$$

Распределение для $K^{*\pm}$ после вычитания фона

$K_s^0 \pi$ d+Au 200 GeV



Табличные значения для $K^{*\pm}$

mass $m = 891.66 \pm 0.26 \text{ MeV}$
 full width $\Gamma = 50.8 \pm 0.9 \text{ MeV}$

Экспериментальные значения

$m = 889 \pm 3 \text{ MeV}$

$\Gamma = 56.84 \pm 8.40 \text{ MeV}$

Выводы

1. Был освоен метод кинематического фита для обработки экспериментальных данных.
2. Была написана программа для обработки данных методом кинематического фита.
3. Программа была протестирована на смоделированных данных.
4. После этого программа была применена для фита кинематических параметров распадов $K_s^0 \rightarrow p^+ p^-$ и $\Lambda^0 \rightarrow p^+ p^-$, полученных на установке STAR.
5. Для отобранных таким образом K_s^0 было построено распределение по инвариантной массе $M_{inv}(K_s^0 p)$ и получен резонанс $K^{*\pm}$.
6. Сдвига массы и изменения ширины для резонанса $K^{*\pm}$ обнаружено не было!

Дальнейшие планы

1. Увеличение статистики для взаимодействия d-Au.
2. Изучение рождения $K^{*\pm}$ в Au-Au взаимодействиях для сравнения с d-Au.
3. Развитие метода до двухвершинного фита, для фитирования распадов O^- и Ψ^-