

Анализ фемтоскопических корреляций пар тождественных пионов в эксперименте STAR

Выполнил студент 409 группы Ваганов Кирилл Романович
Научный руководитель: к. ф.-м. н. Апарин Алексей Андреевич

Физический факультет МГУ, кафедра физики элементарных частиц

Дубна
21 мая 2026

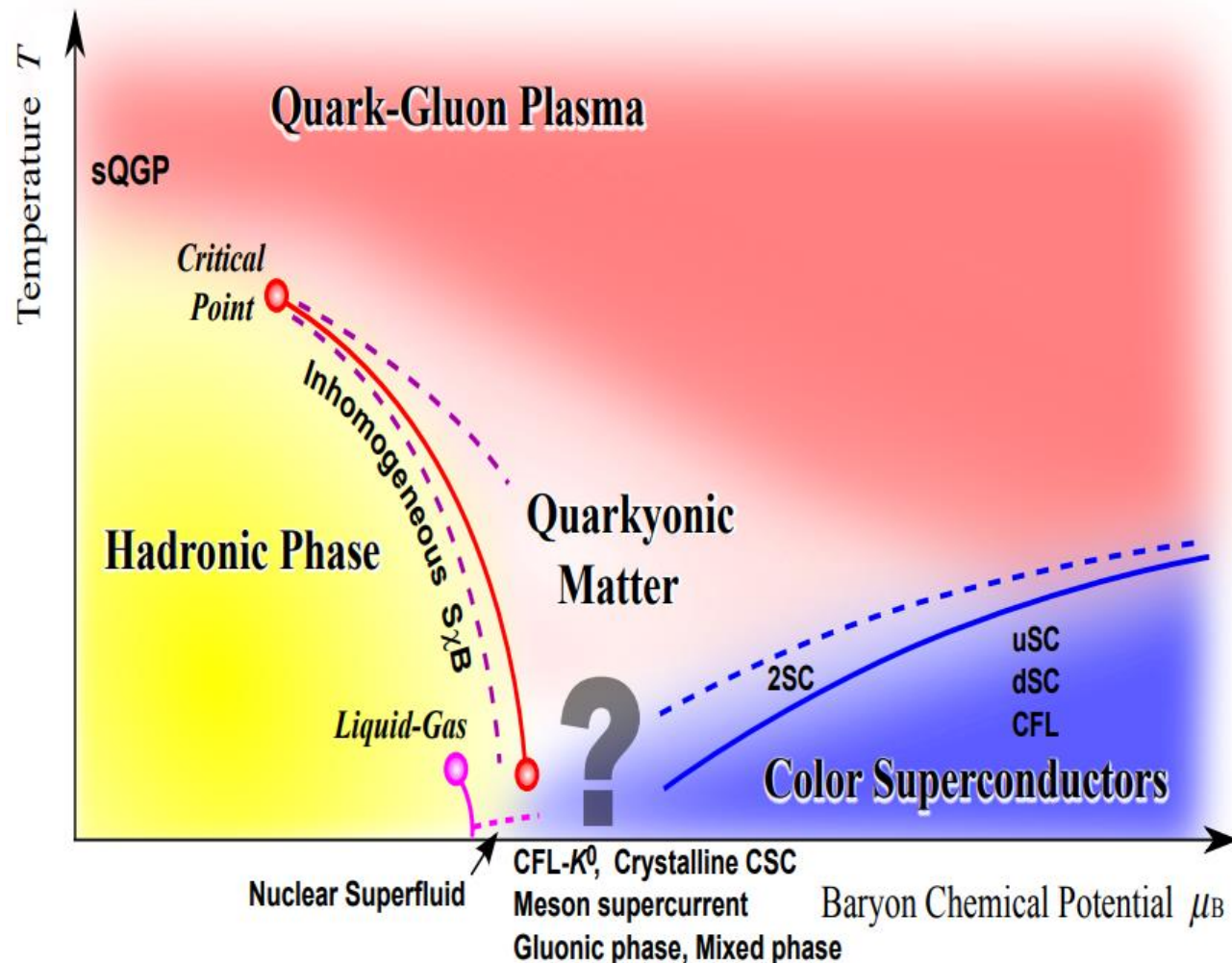
Газ свободных кварков и глюонов

Фазовый переход в КХД

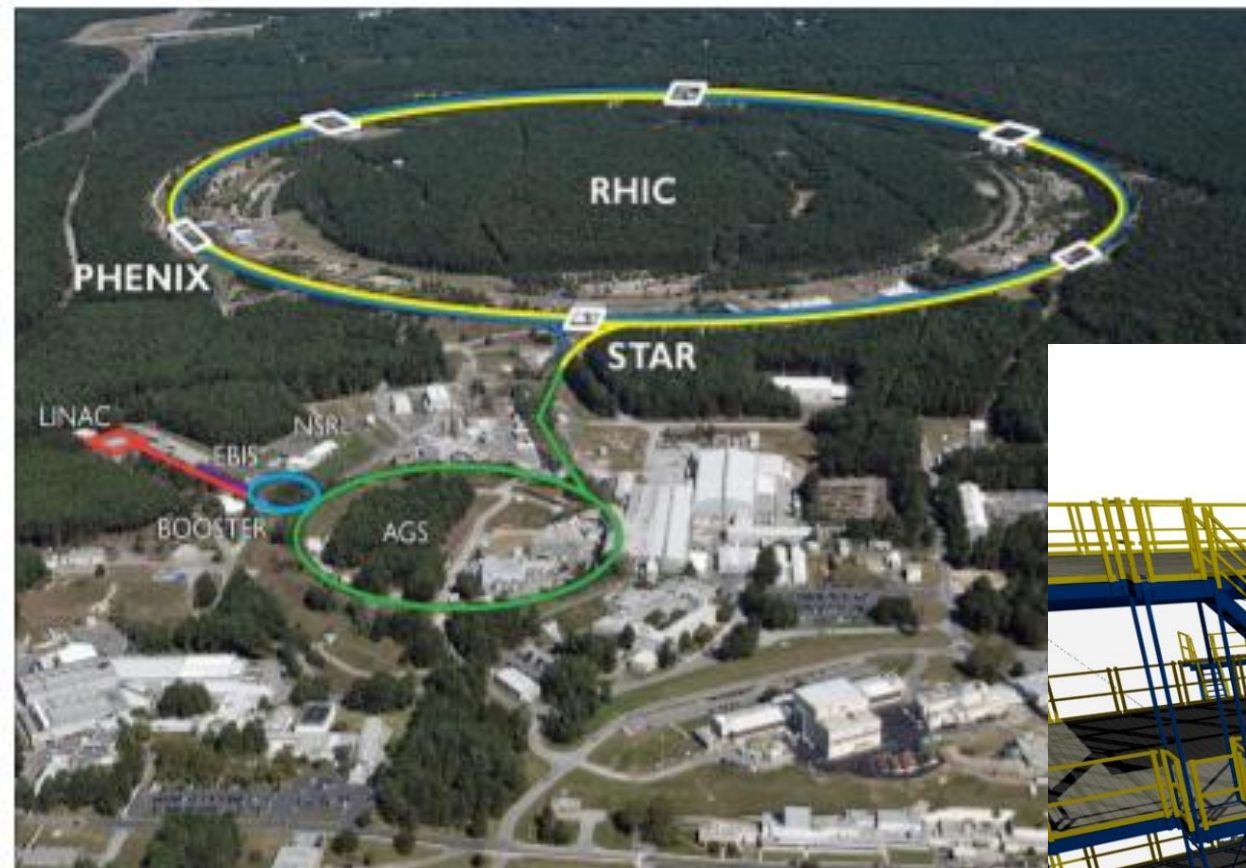
- Единственный сектор Стандартной Модели, коллективное поведение которой можно исследовать в лаборатории

Коллективное поведение:

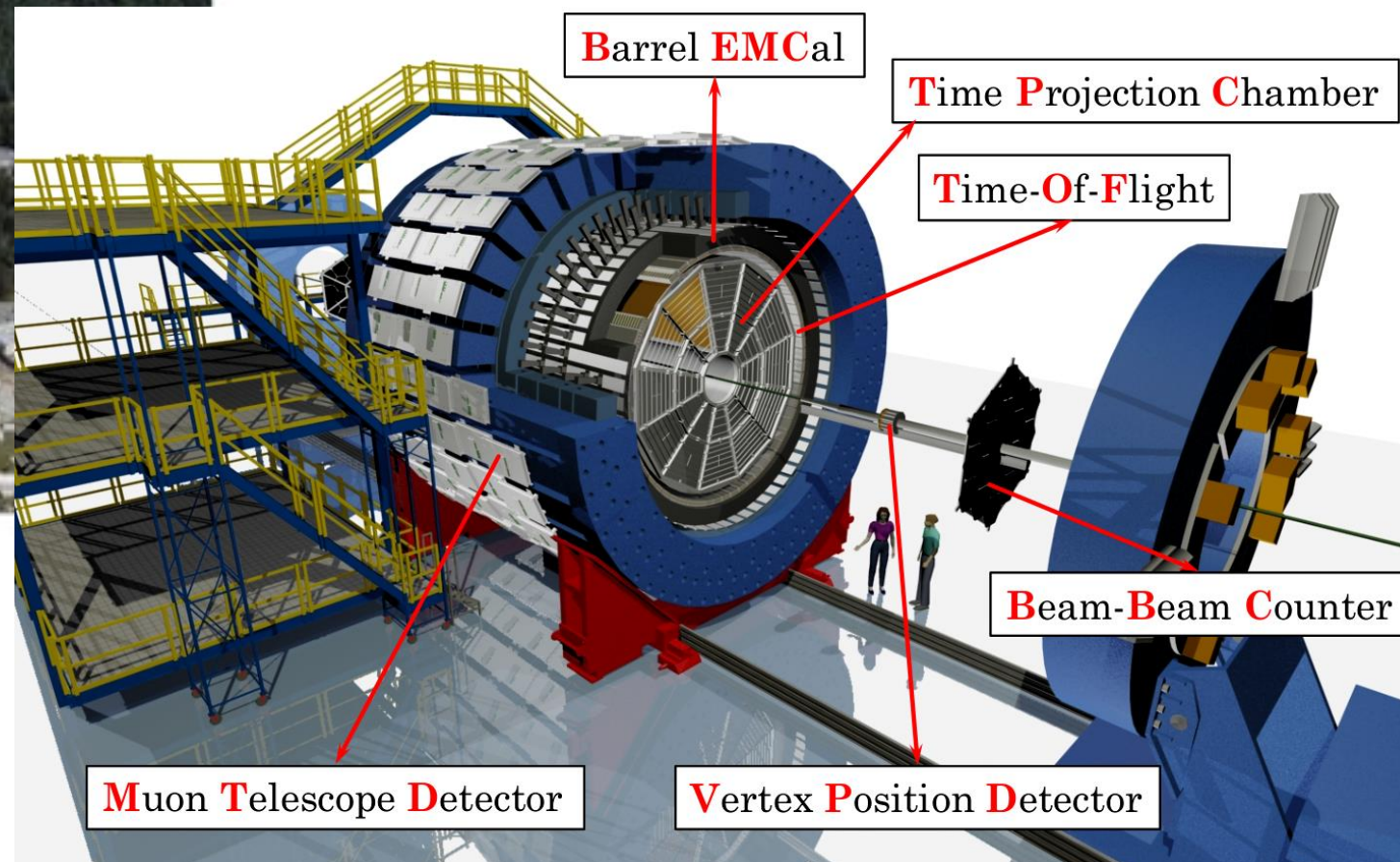
1. Фазовая диаграмма
2. Фазовые переходы



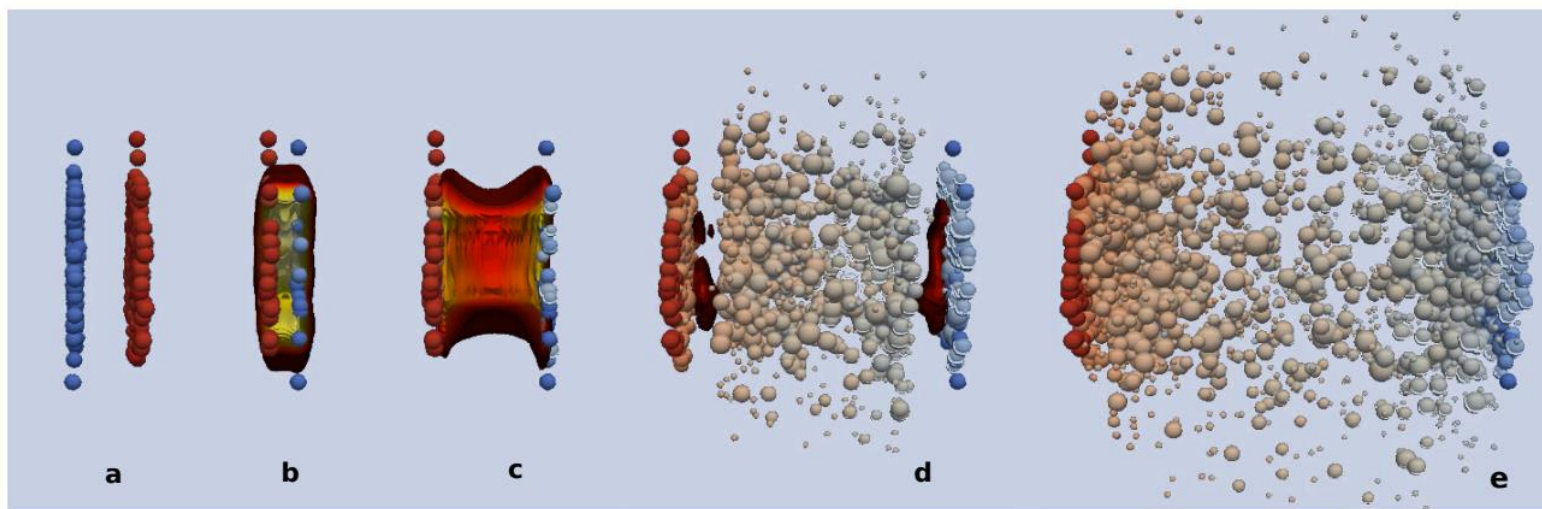
Коллайдерный эксперимент STAR



TPC (Time Projection Chamber) использовалась для регистрации и идентификации частиц



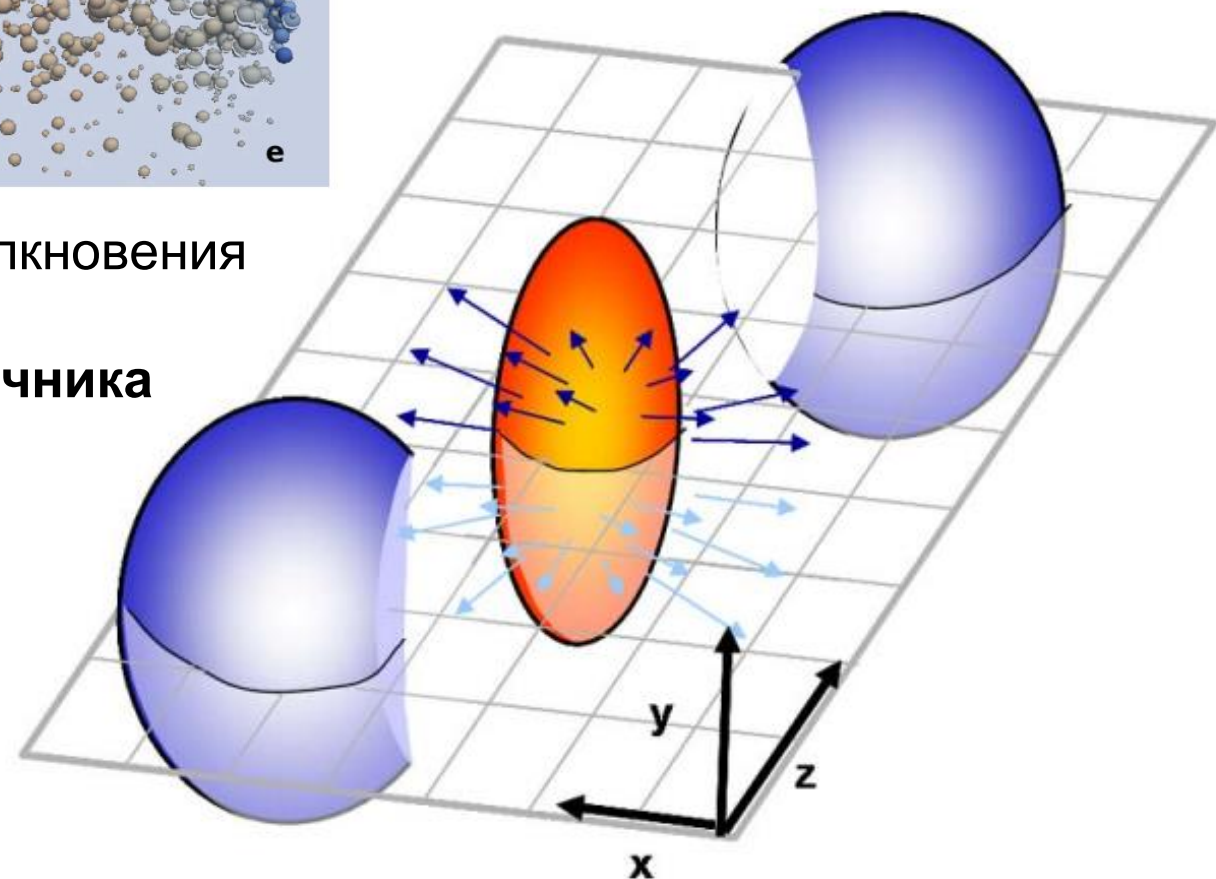
Столкновение ядер



Схематические изображения ядро-ядерного столкновения

- а) Подлет ядер
- б) Образование области горячей материи - **источника**
- в) Расширение и остывание
- г) Образуется газ адронов
- д) Распад на конечные адроны

Хотим измерить размеры этого источника



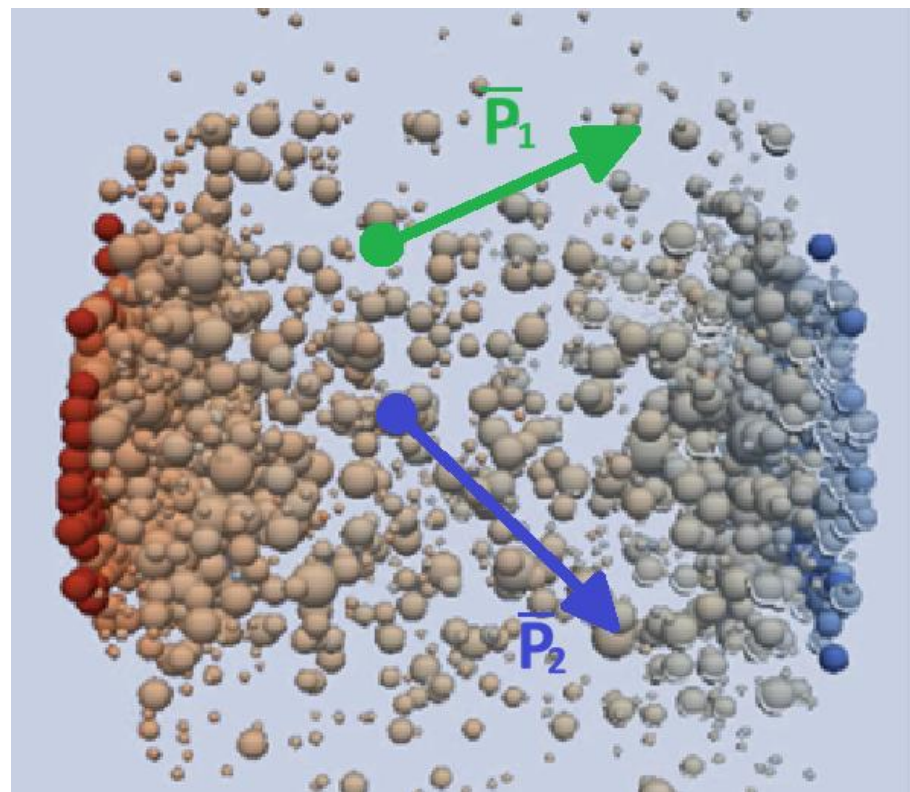
5 Корреляционная функция

$$C(\vec{p}_1, \vec{p}_2) = \frac{P(\vec{p}_1, \vec{p}_2)}{P(\vec{p}_1)P(\vec{p}_2)} = \frac{A(\vec{q}, \vec{k})}{B(\vec{q}, \vec{k})}, \text{ где:}$$

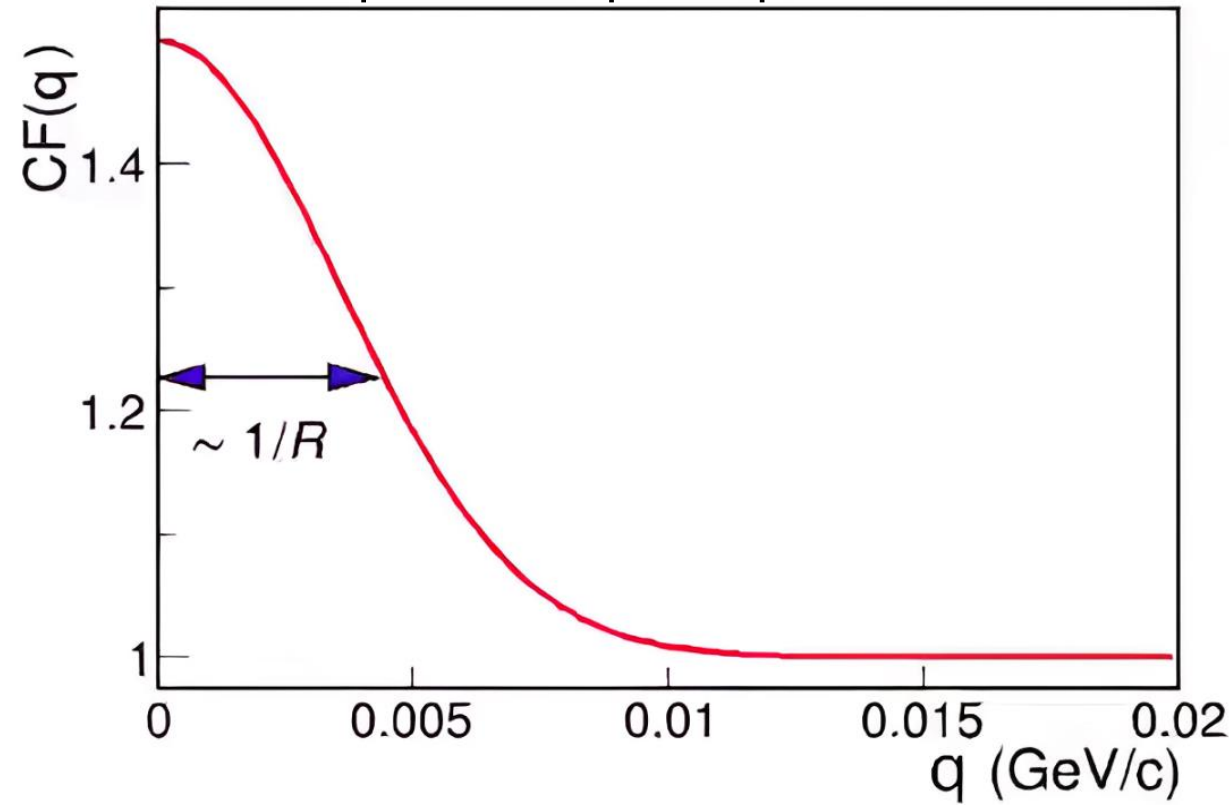
- $\vec{q} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$
- $\vec{k} = \frac{\vec{p}_2 + \vec{p}_1}{2}$

➤ $P(\vec{p}_1, \vec{p}_2)$ - вероятность для пары частиц иметь импульсы \vec{p}_1 и \vec{p}_2 **вместе**

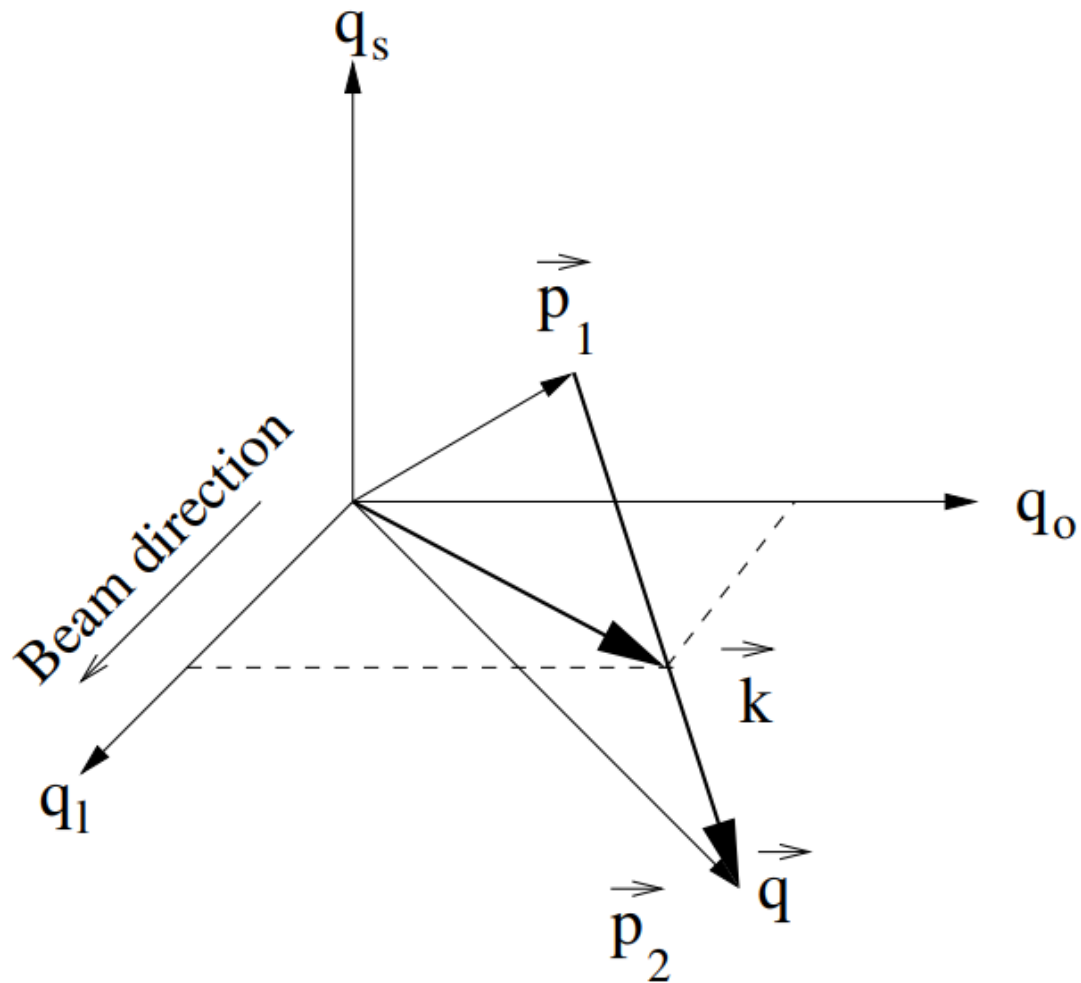
➤ $P(\vec{p}_1)P(\vec{p}_2)$ - произведение **одночастичных** вероятностей



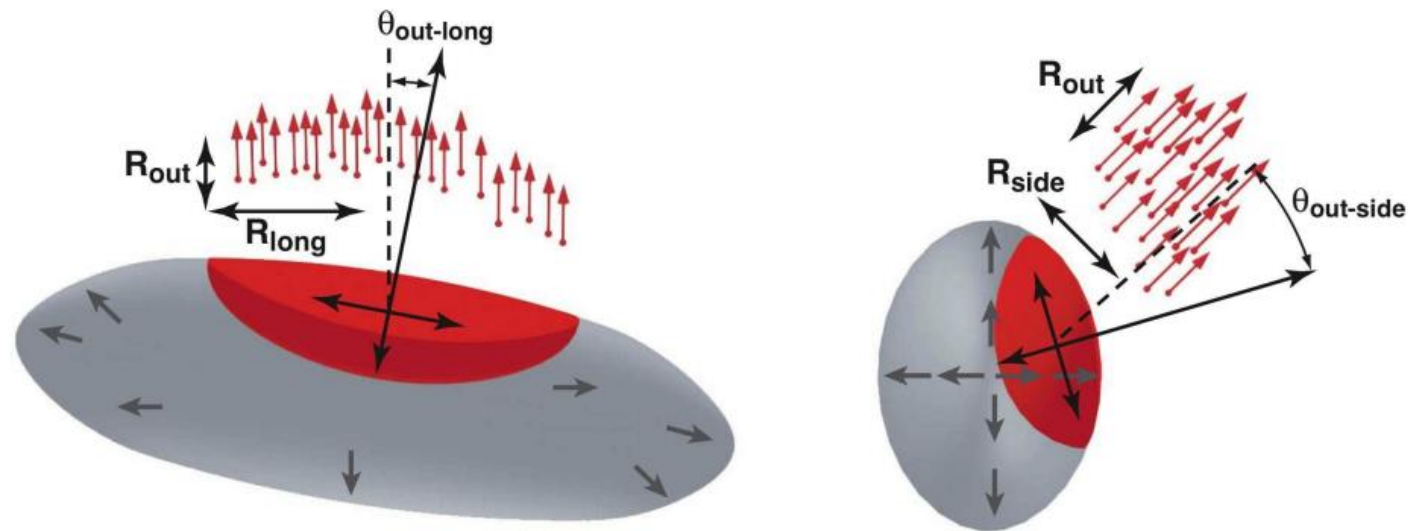
Измерение R - размера источника



6 Система координат – Out, Side, Long

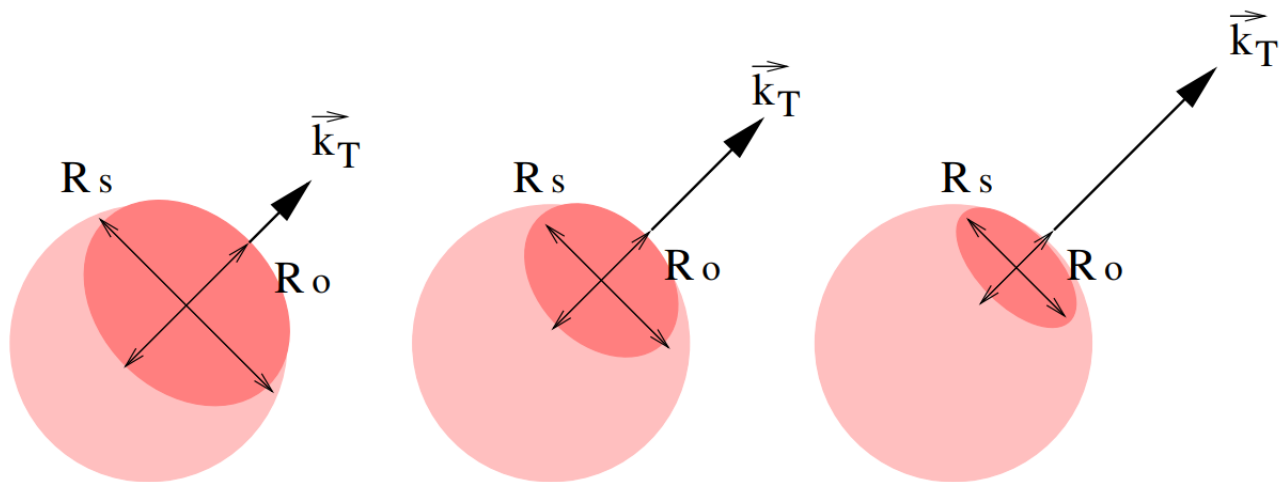


Область гомогенности и корреляционные радиусы



longitudinally comoving system (LCMS):

$$k_z = 0, k_{\perp} = |\vec{p}_{1T} + \vec{p}_{2T}|$$



Ось пучка на нас

➤ В системе **LCMS** и при азимутальной симметрии $q_s \rightarrow -q_s$:

Фитирование Гауссом 3D:

$$C(\vec{q}, \vec{k}) = N\{1 + \lambda(\vec{k}) \exp(-R_o^2(\vec{k})q_o^2 - R_s^2(\vec{k})q_s^2 - R_l^2(\vec{k})q_l^2)\}$$

Процедура Боулера-Синюкова 3D:

$$C(\vec{q}, \vec{k}) = N\{(1 - \lambda) + \lambda K_{coul}(q_{inv})(1 + \exp(-R_o^2 q_o^2 - R_s^2 q_s^2 - R_l^2 q_l^2))\}$$

➤ $K_{coul}(q_{inv})$ - поправка на кулоновское взаимодействие

Параметры фита:

- 1) N – нормировка
- 2) $\lambda(\vec{k})$ - поправка на частицы из распадов
- 3) $R_o \sim$ геометрический размер и время эмиссии
- 4) $R_s \sim$ геометрический размер
- 5) $R_l \sim$ время жизни источника

Обозначения:

- 1) $q_{inv} = \sqrt{-(p_1 - p_2)^2} = \sqrt{\vec{q}^2 - (q^0)^2}$
- 2) p_1, p_2 - 4-импульсы частиц
- 3) $\vec{q} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$
- 4) $q^0 = E_2 - E_1$

Данные

➤ Данные с эксперимента STAR 2011 года Au-Au $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$

Отбор эвентов:

- 1) Радиально положение вершины столкновения: $V_r < 2 \text{ cm}$
- 2) Z-положение вершины столкновения: $|V_z| < 30 \text{ cm}$

Отбор пи-мезонов:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1) Число хитов в TPC, использованных для реконструкции: $N_{\text{hits}}^{\text{fit}} \geq 15$ | 7) $ \ln\sigma(\pi) < 3$ |
| 2) Первичный трек (трек, выходящий из вершины столкновения) | 8) $ \ln\sigma(e) > 2$ |
| 3) Дистанция ближайшего приближения (DCA): $ DCA < 3 \text{ cm}$ | 9) $ \ln\sigma(K) > 2$ |
| 4) Поперечный импульс первичного трека: $0.15 < p_T^{\text{prim}} < 0.80 \text{ GeV}/c$ | 10) $ \ln\sigma(p) > 2$ |
| 5) Псевдобыстрота: $ \eta_{\text{prim}} < 1.0$ | |
| 6) Быстрота: $ y < 0.5$ | |

Перемешивание событий:

- 1) Положение вершины V_z (cm):
 $[-30;-25], [-25;-20], [-20;-15], [-15;-10], [-10;-5], [-5;0], [0;5], [5;10], [10;15], [15;20], [20;25], [25;30]$
- 2) Центральности:
 0-5%, 5-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, 60-70%, 70-80%

Условия слипания хитов в TPC:

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| Внутренняя часть TPC: | Внешняя часть TPC: |
| 1) $du < 0.8 \text{ cm}$ | 1) $du < 1.4 \text{ cm}$ |
| 2) $dz < 3.0 \text{ cm}$ | 2) $dz < 3.2 \text{ cm}$ |

Двухчастичные эффекты:

- 1) $SL < 0.6$
- 2) $FMR < 0.1$

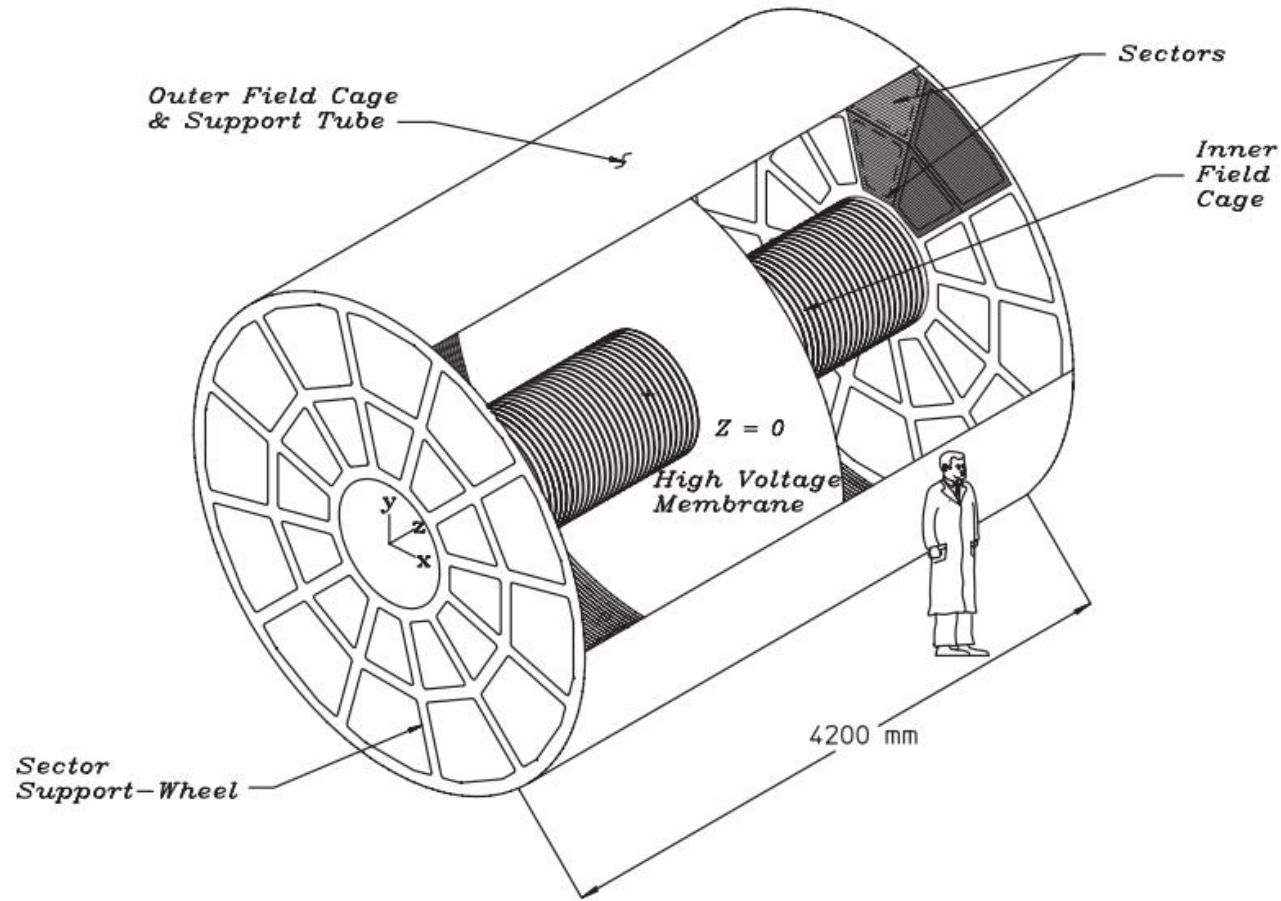
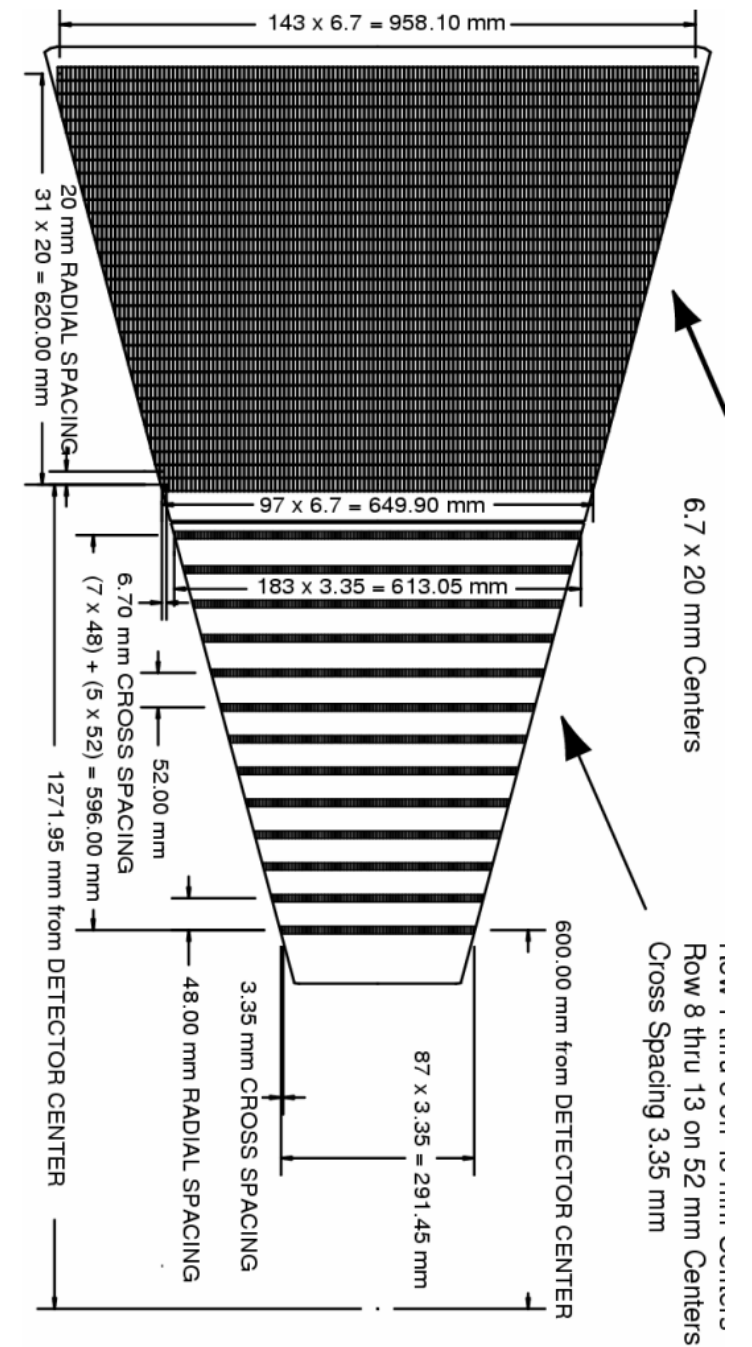


Fig. 1. The STAR TPC surrounds a beam-beam interaction region at RHIC. The collisions take place near the center of the TPC.



Двухчастичные детекторные эффекты

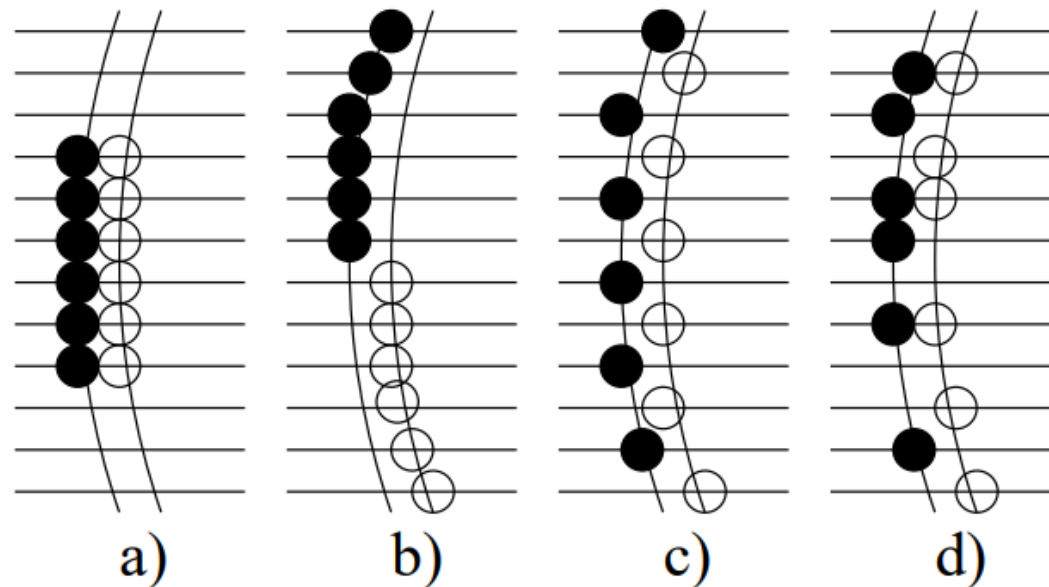
➤ Split Tracks

Splitting Level (SL) – число для оценки раздвоенных треков

- Два хита в одном ряду – нет раздвоения
- Один хит – вероятное раздвоение

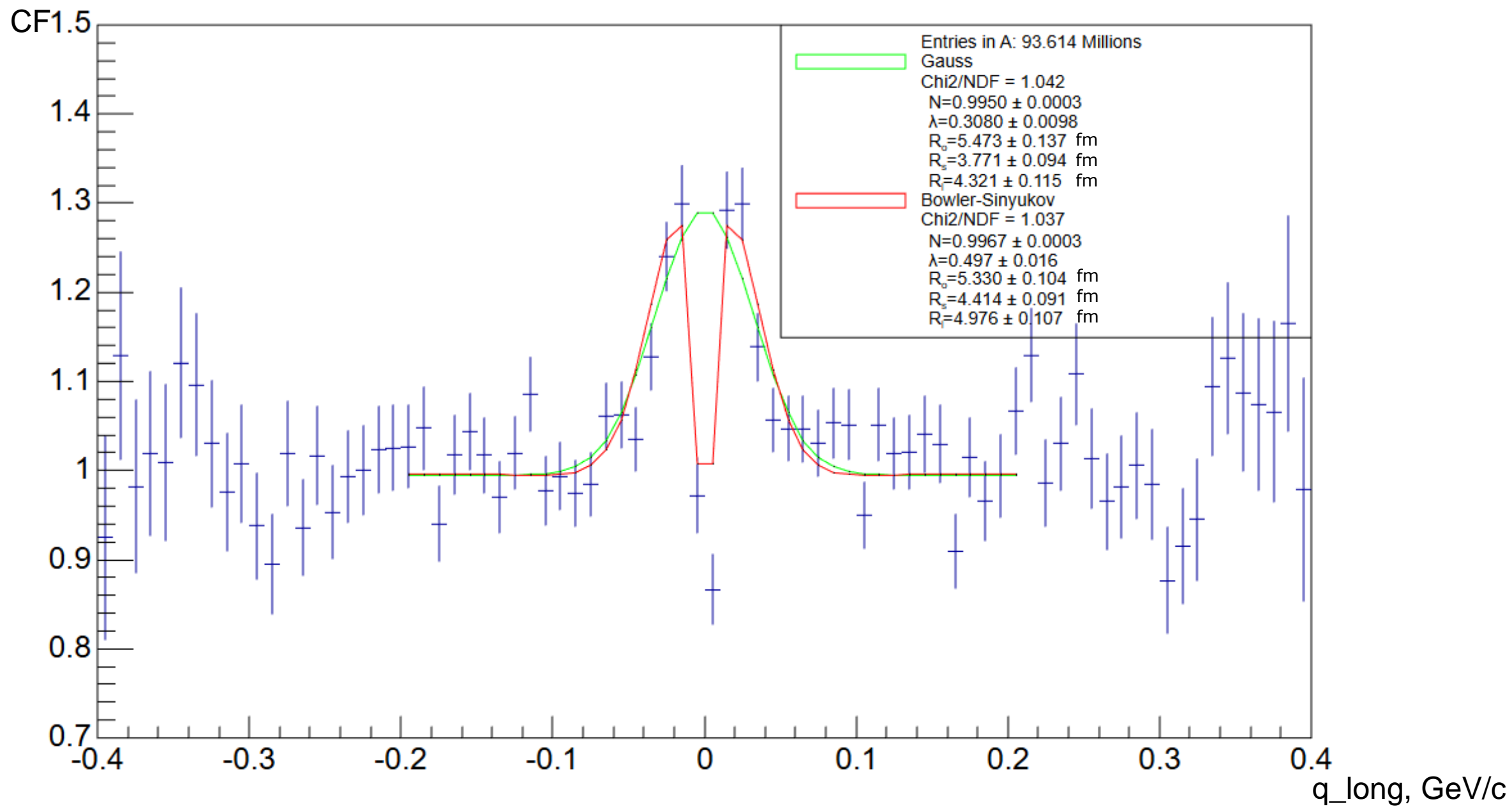
На рисунке:

- 1) Горизонтальные линии – считывающие линии в TPC
- 2) Две кривые – два восстановленных трека
- 3) Черные и белые круги – хиты в TPC



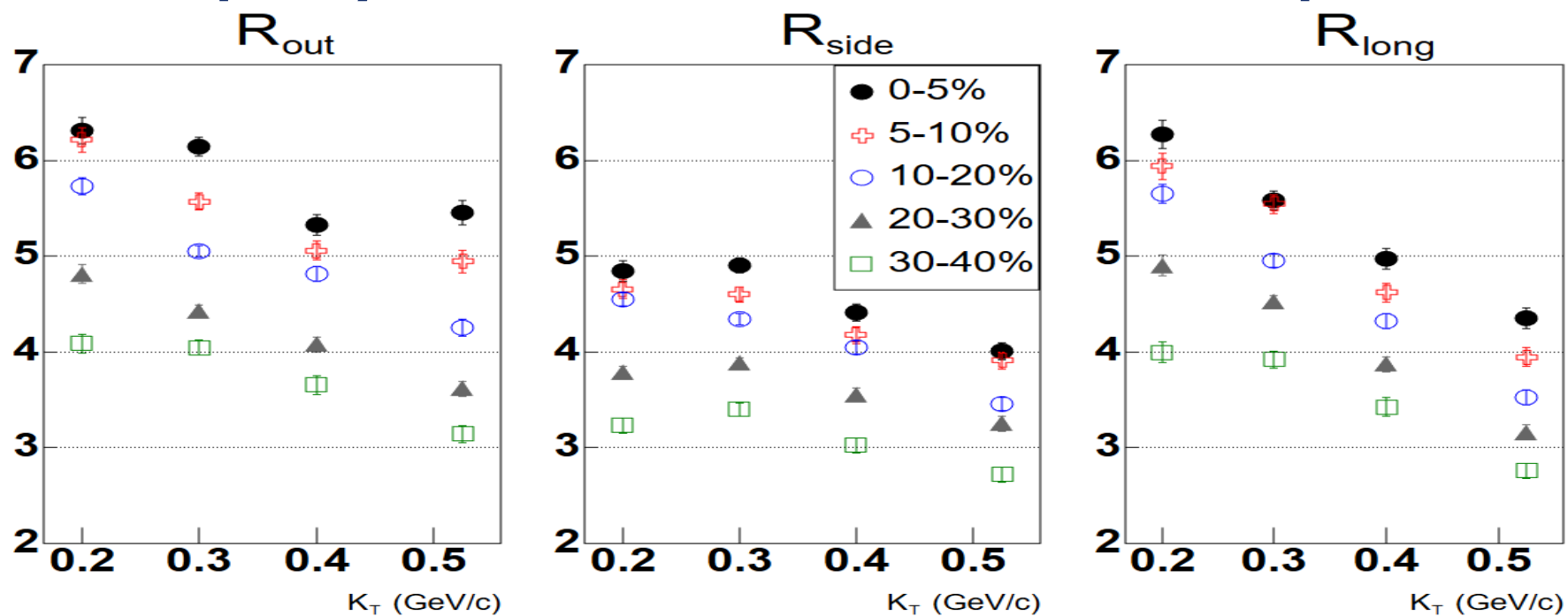
Проекция трёхмерной корреляционной функции на out, side, long

P_i+P_i+ , Centr: 0-5%, Kt: [0.35, 0.45], long projection

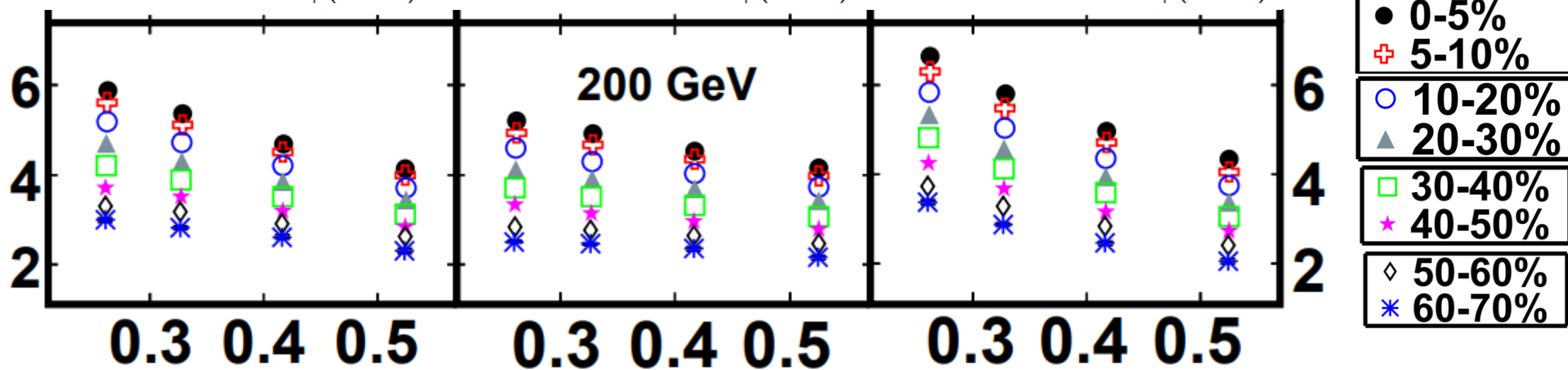


Корреляционные радиусы в зависимости от K_T по центральностям для $Pi+Pi+$

Полученные значения ->

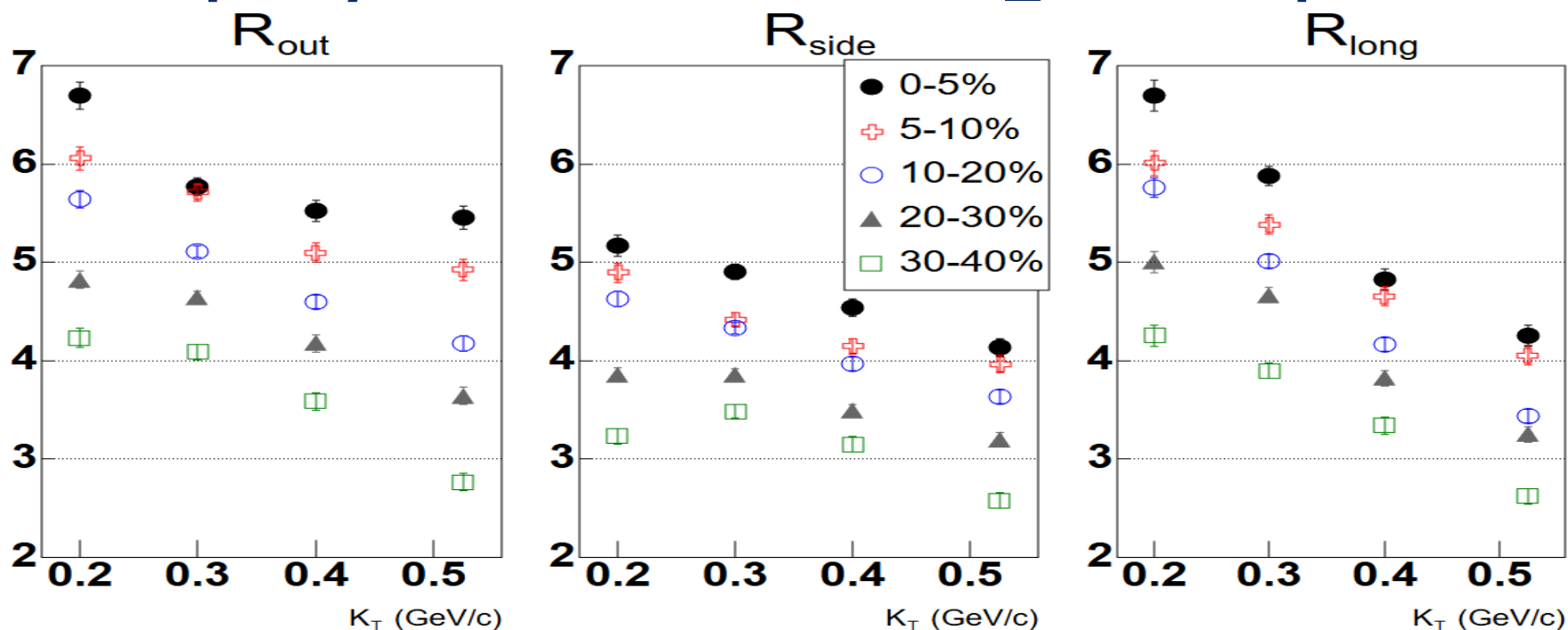


Из статьи ->

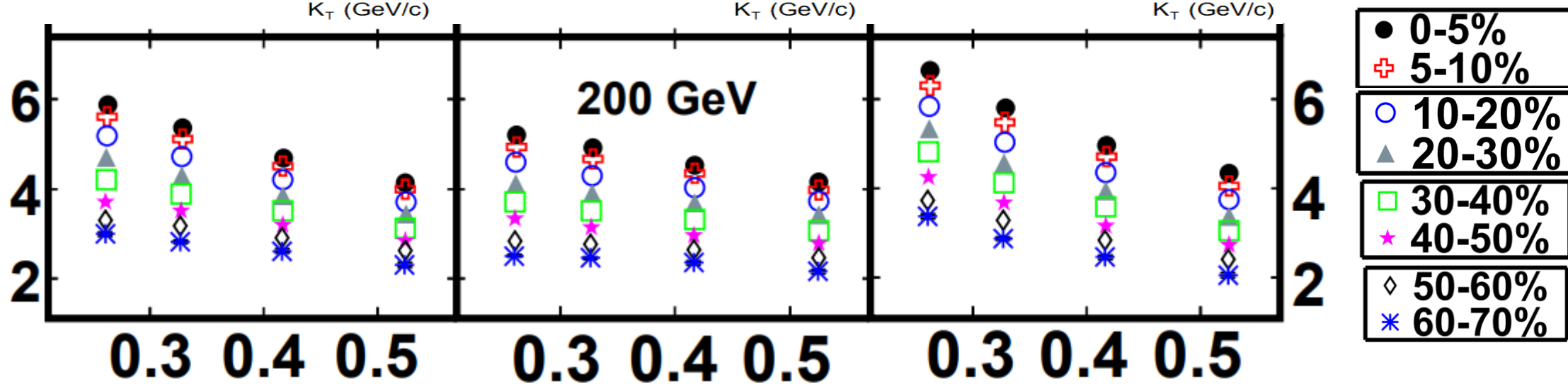


Корреляционные радиусы в зависимости от K_T по центральностям для $Pi-Pi$

Полученные значения ->



Из статьи ->



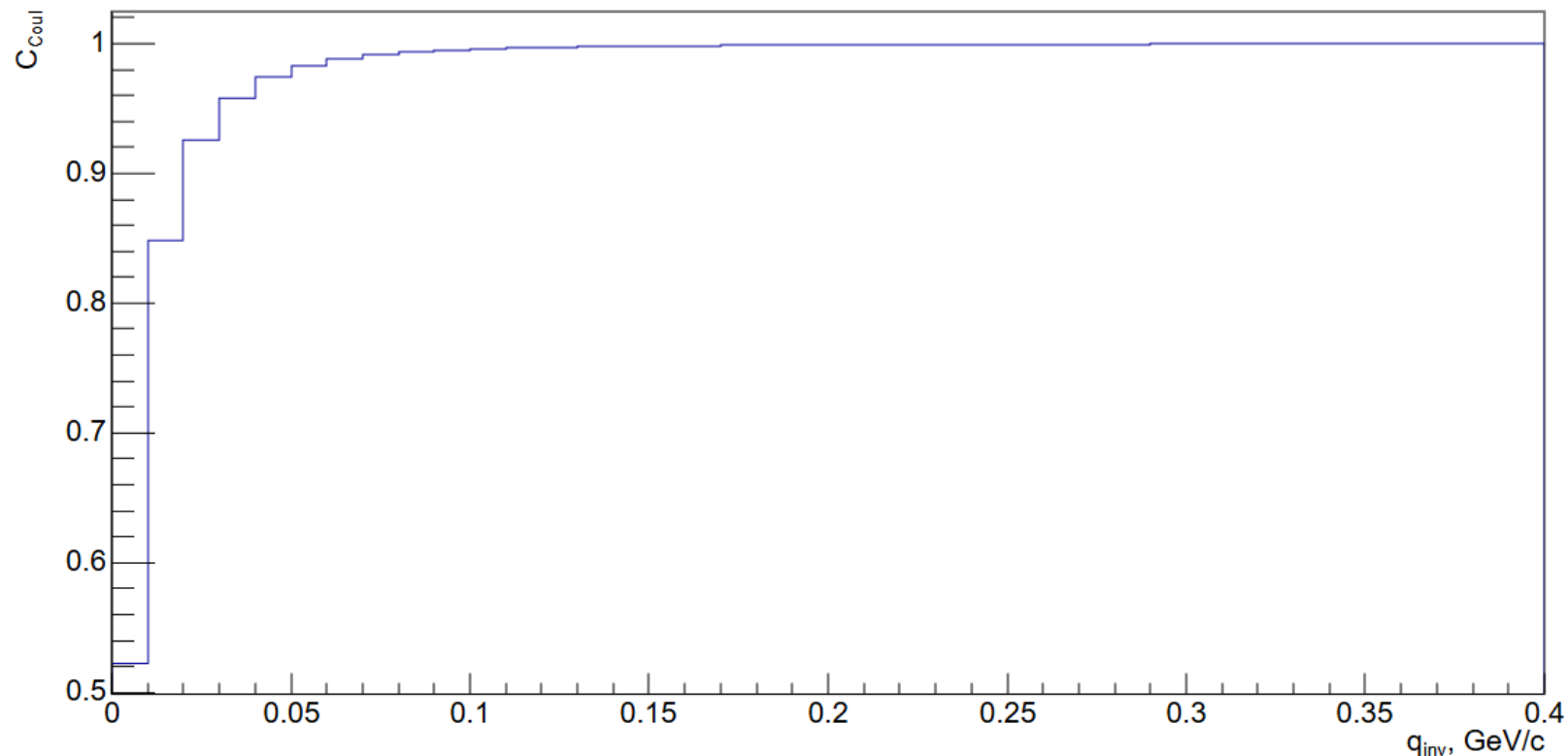
Итоги работы:

- 1) Построены 3D корреляционные функции пи-мезонов с учетом двухчастичных эффектов
- 2) Профитированы функциями Гаусса и Боулера-Синюкова
- 3) Получены корреляционные радиусы $R_{out}, R_{side}, R_{long}$
- 4) Проанализированы зависимости радиусов от k_T для 9 классов центральностей:
 - С увеличением центральности радиусы увеличиваются
 - С увеличением k_T радиусы уменьшаются

Процедура Боулера-Синюкова

$$C(\vec{q}, \vec{k}) = N\{(1 - \lambda) + \lambda K_{coul}(q_{inv})(1 + \exp(-R_o^2 q_o^2 - R_s^2 q_s^2 - R_l^2 q_l^2))\}$$

$K_{coul}(q_{inv})$ - поправка на кулоновское взаимодействие, одномерная корреляционная функция без квантовой статистики



q_{inv} находим по заранее составленной карте: $(q_o, q_s, q_l) \rightarrow q_{inv}$

$C_{\pi^+\pi}$ 