

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА АДРОННАЯ МАТЕРИЯ - СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩАЯ КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА

Выполнил: Тимофеев Артем Александрович

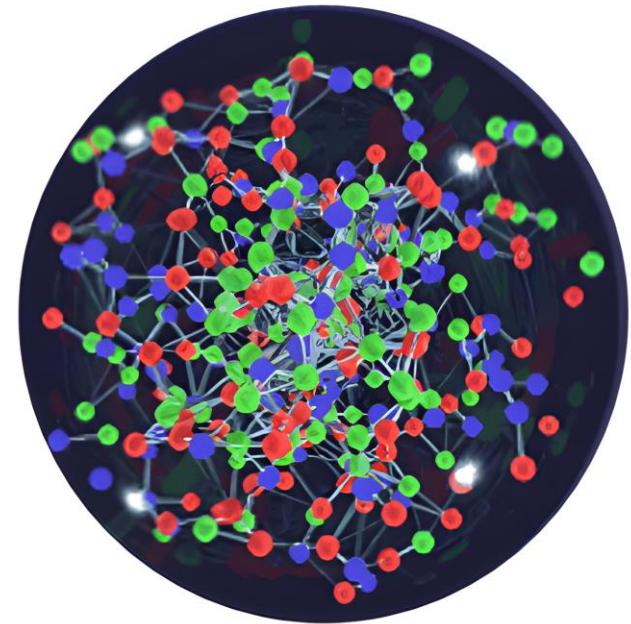
Научный руководитель: к. ф.-м. н. Апарин А. А.

Кварк-глюонная плазма

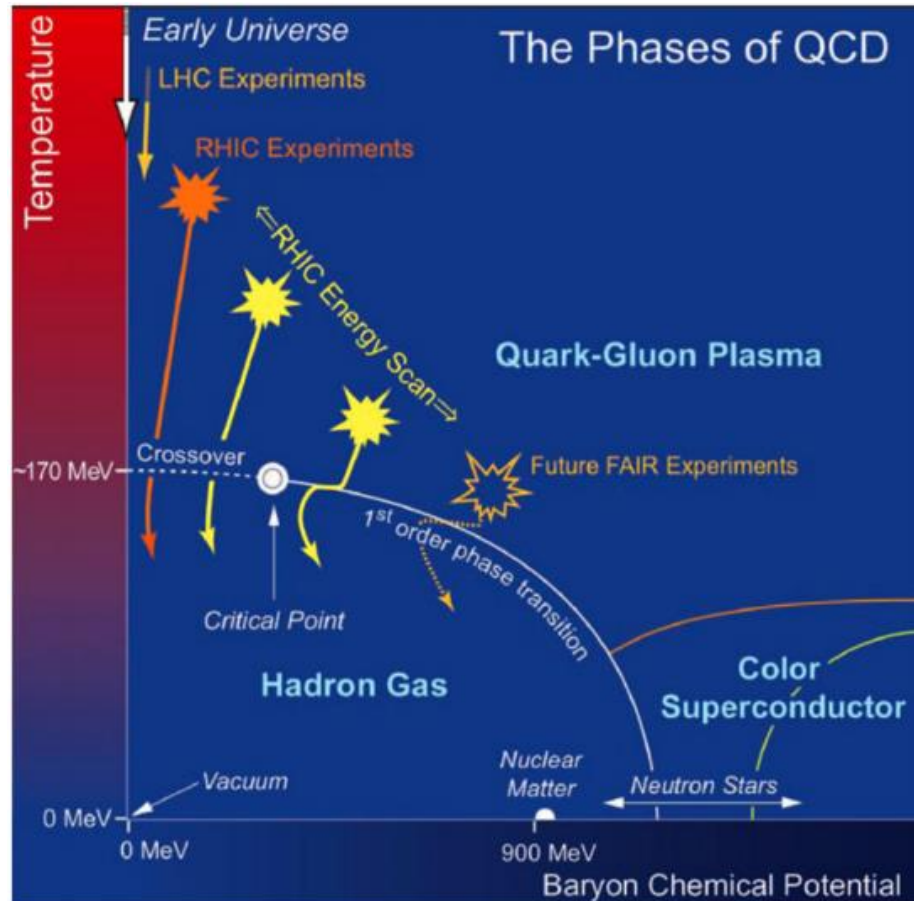
Особенности КХД:

- Конфайнмент
- Асимптотическая свобода

При $\varepsilon \sim 1 \frac{\text{ГэВ}}{\text{Фм}^3}$ образуется КГП



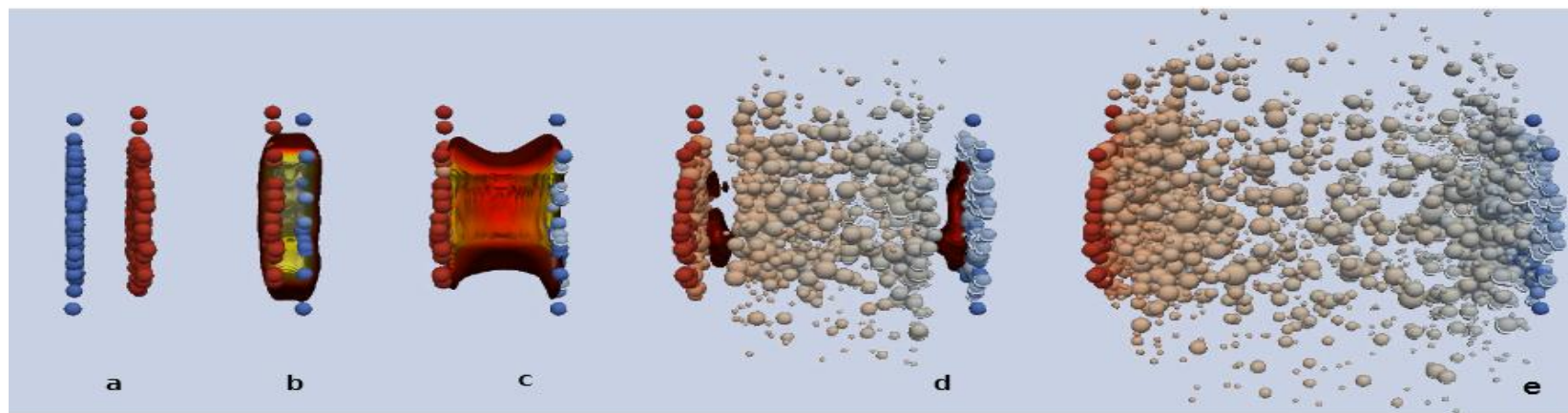
Фазовая диаграмма КХД



Интересные точки:

- Кроссовер, $T_{pc} \sim 150 \div 200$ МэВ
- Фазовый переход первого рода
- Критическая точка, $T_c = 154 \pm 9$ МэВ

ЭВОЛЮЦИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

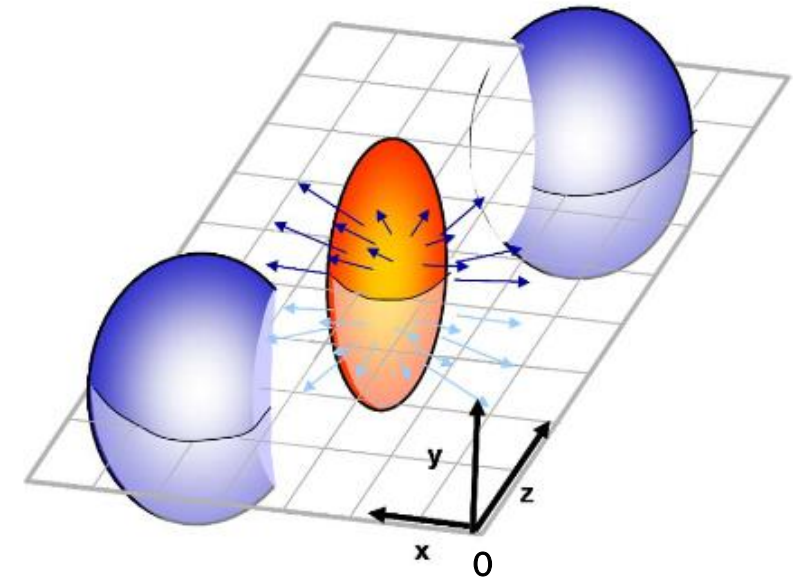


Файербол существует во времени $\sim 10^{-23}$ с

- a) Подлет ядер друг к другу
- b) Образование возбужденной материи
- c) Расширение и остывание горячей материи
- d) Адронный газ
- e) Конечные адроны

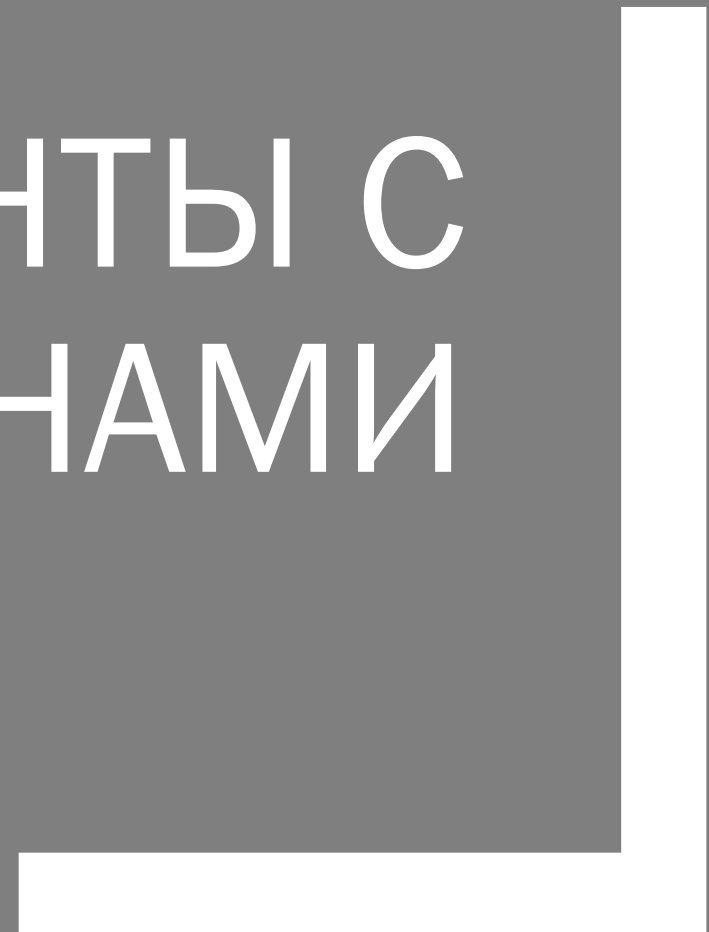
Некоторые параметры

- Энергия столкновения $S = E_A + E_B$ (в СЦИ);
для симметричных столкновений $\sqrt{S_{NN}} \cong \frac{2E}{A}$
- Прицельный параметр b – расстояние между центрами сталкивающихся ядер
- Быстрота $\theta = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} = \frac{1}{2} \ln \frac{E+p}{E-p}$
- Псевдобыстрота $\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{E+p_{\parallel}}{E-p_{\parallel}}$



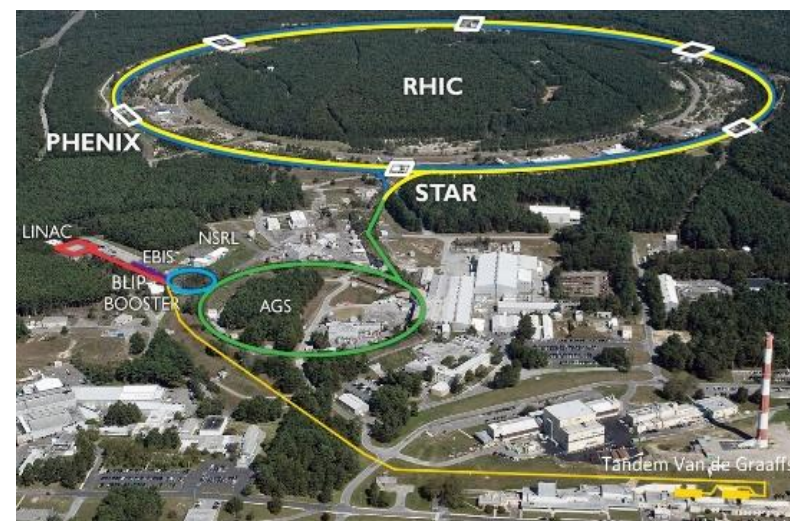
Плоскость реакции – плоскость, в которой лежит ось столкновения и вектор прицельного параметра (плоскость XOZ)

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ





LHC,
Энергия столкновения до 5 ТэВ

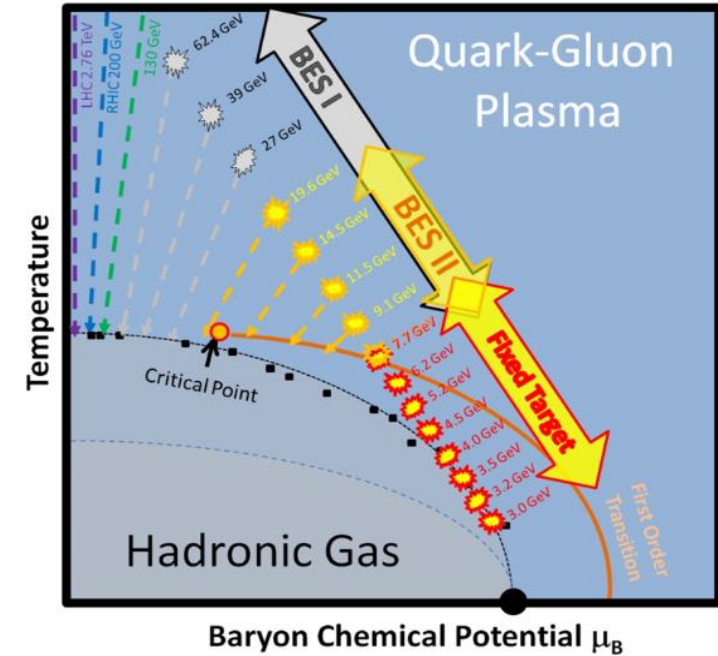


BNL,
Энергия столкновения до 200 ГэВ

Beam Energy Scan Program

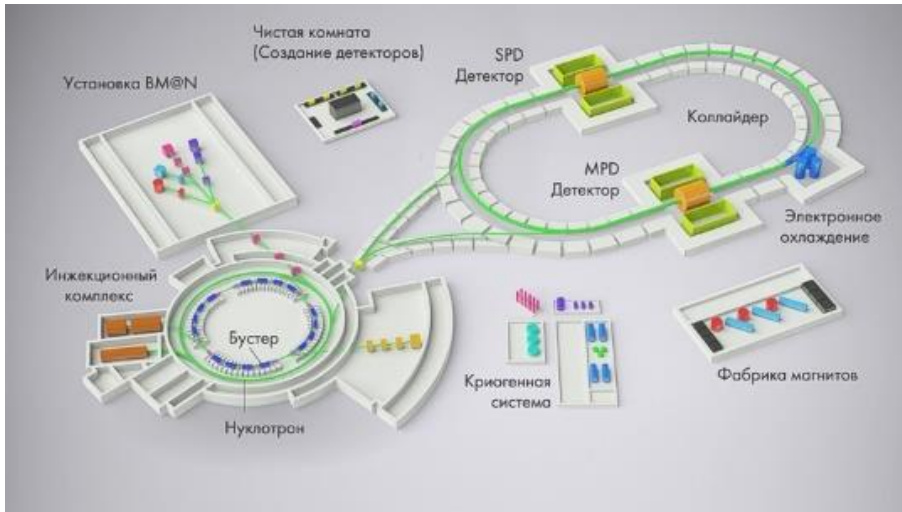
■ Результаты:

- Обнаружена КГП при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ
- Критическая точка и фазовый переход первого рода при $\sqrt{s_{NN}} < 20$ ГэВ

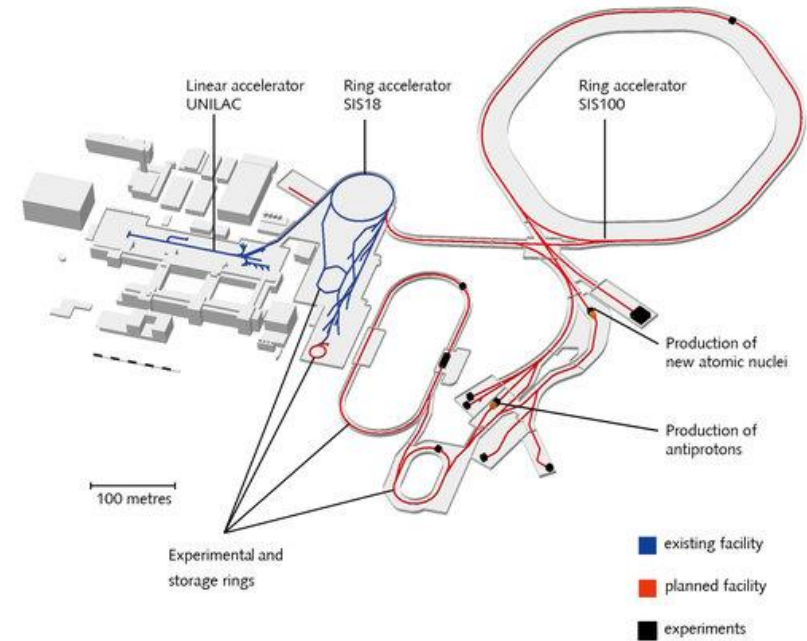


Beam Energy (in GeV)	Baryon Chemical Potential (in MeV)	Year of Data Taking	Event Statistics (Millions)	Beam Time (Weeks)
200	20	2010	350	11
62.4	70	2010	67	1.5
39	115	2010	130	2.0
27	155	2011	70	1.0
19.6	205	2011	36	1.5
14.5	260	2014	20	3.0
11.5	315	2010	12	2.0
7.7	420	2010	4	4.0

Готовящиеся эксперименты

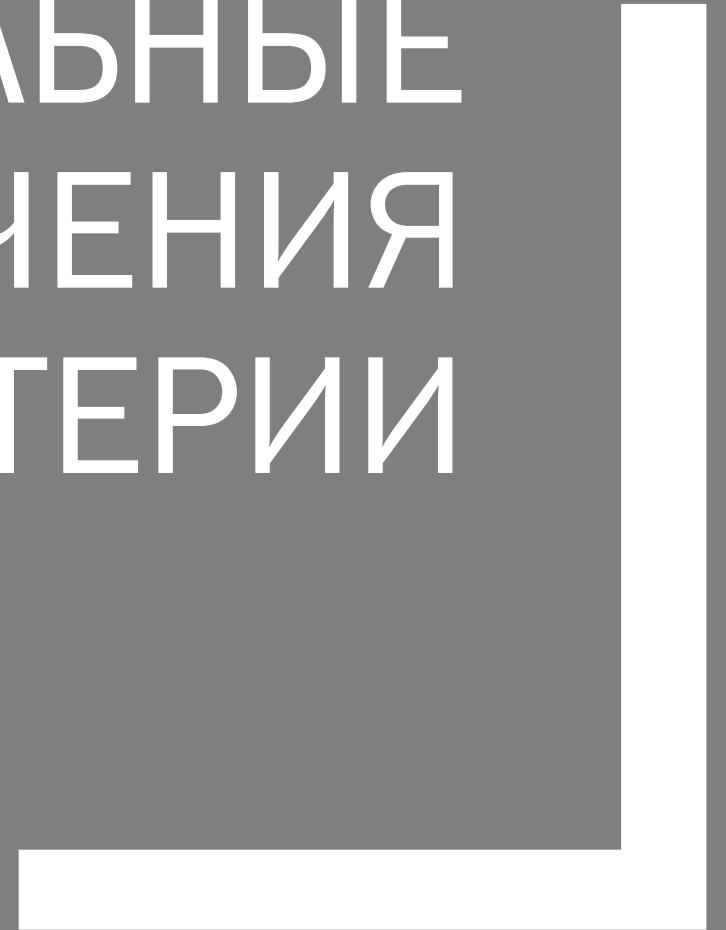


NICA, эксперименты BM@N, SPD, MPD
Энергия столкновения 4-11 ГэВ/нуклон



FAIR (GSI), эксперимент CBM
Энергия столкновения до 5.5 ГэВ/нуклон

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ МАТЕРИИ

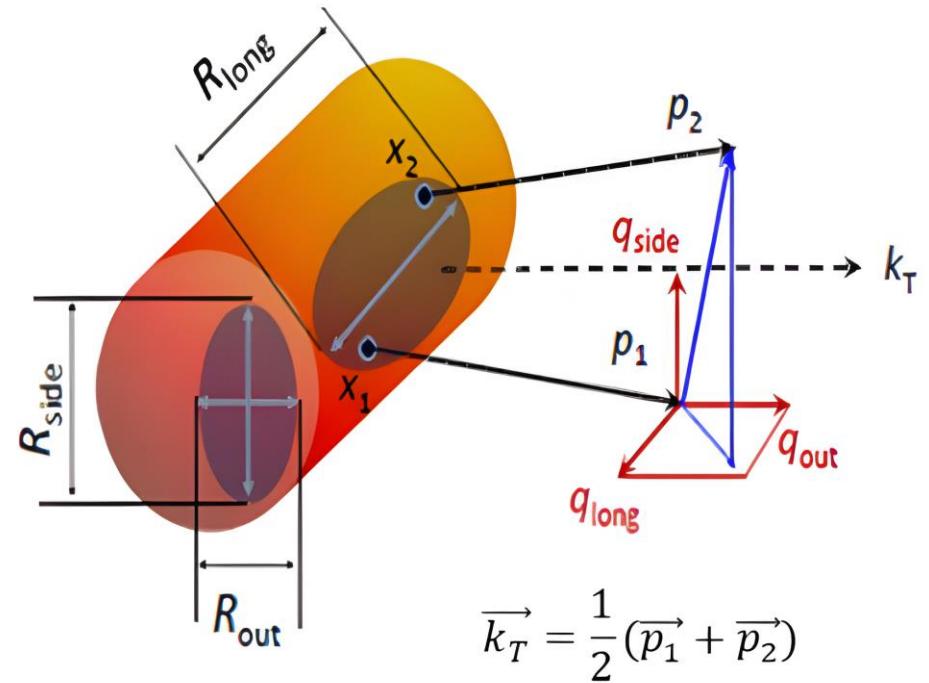


Фемтоскопия

Фемтоскопия позволяет непосредственно измерять пространственно-временную протяженность источника адронов и параметры рассеяния.

В LCMS для простого случая азимутальной симметрии корреляционная функция представляется в виде:

$$C(q, K) = 1 \pm \exp[-R_s^2 q_s^2 - R_o^2 q_o^2 - R_l^2 q_l^2 - 2R_{ol}^2 q_o q_l]$$



q_{long} – направление пучка

q_{out} – направление полного поперечного импульса

Коллективные потоки

Коллективные потоки – корреляции между координатами рождения адронов и их импульсами

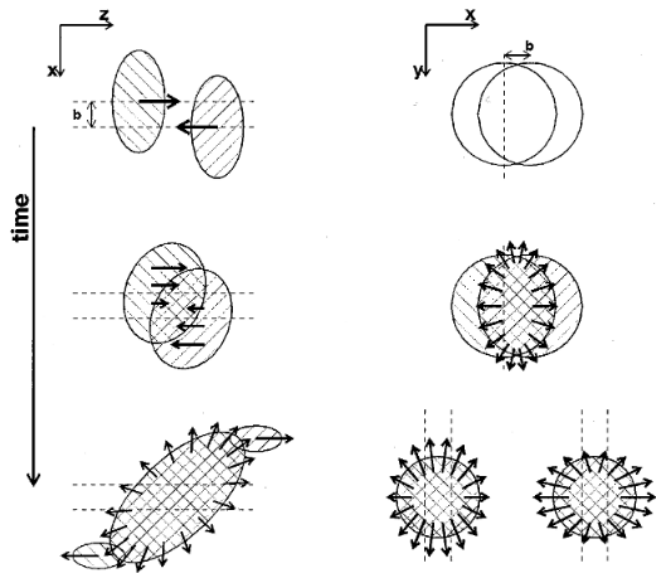
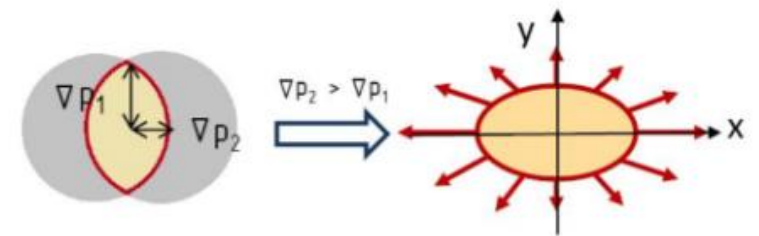
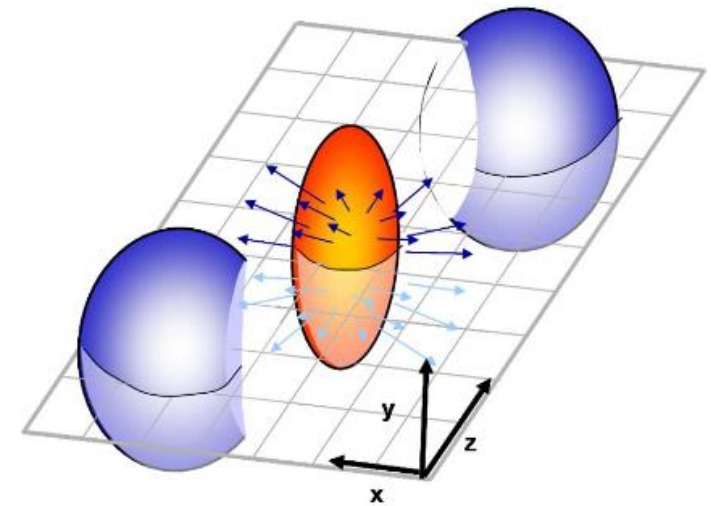
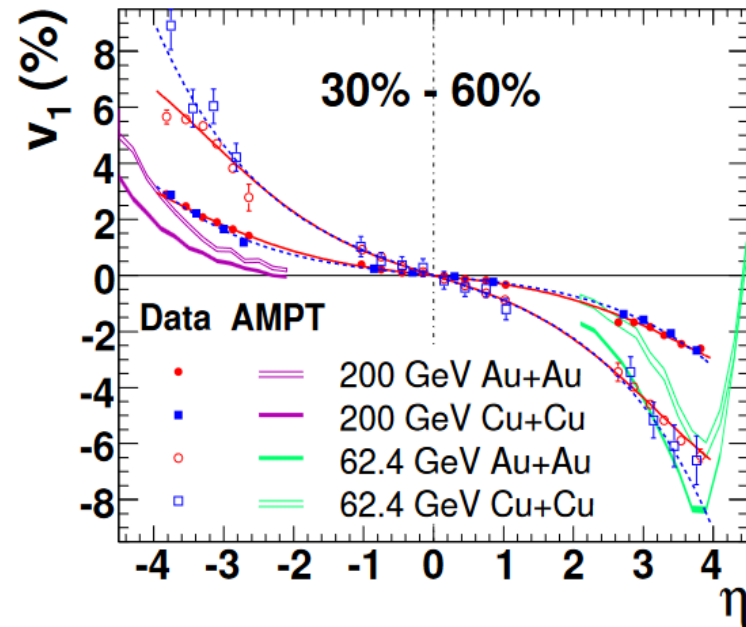


Схема эволюции столкновения тяжелых ионов и развития полей коллективных скоростей

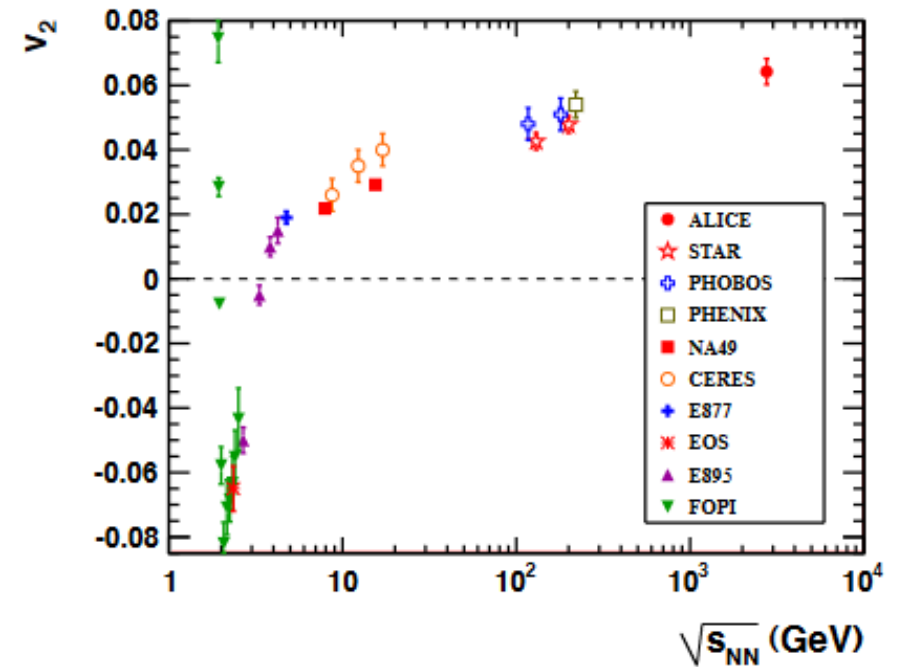


Распределение выхода конечных частиц удобно разложить в ряд Фурье

$$E \frac{d^3N}{d^3p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2N}{dy_T dp_T} \left[1 + \sum (2v_n \cos(n(\phi - \Psi_{RP}))) \right]$$



Направленный поток при центральных быстротах

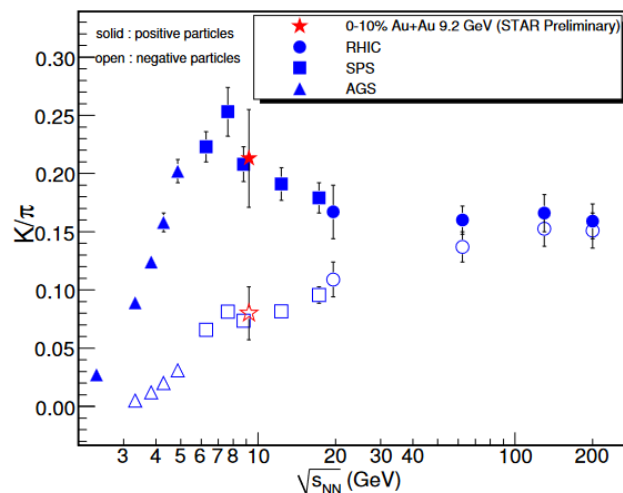


Эллиптический поток в зависимости от энергии

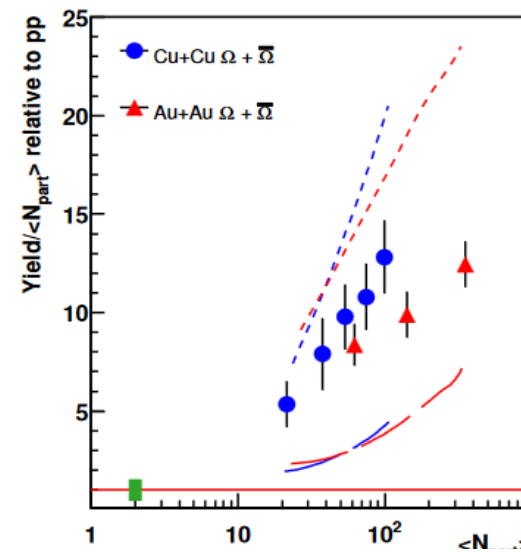
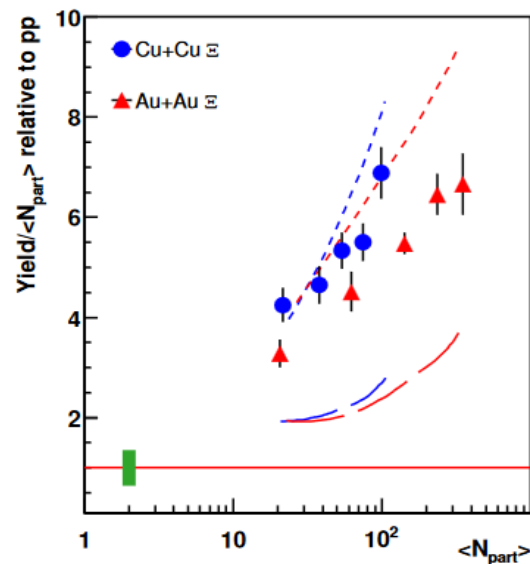
Повышенный выход странных частиц

Для создания пары странного и антистранного кварков:

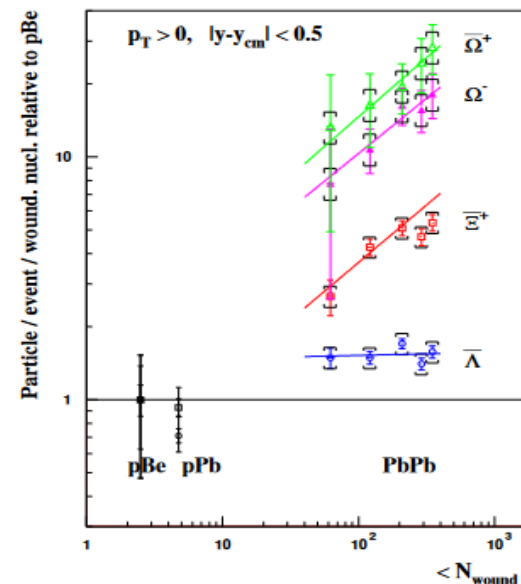
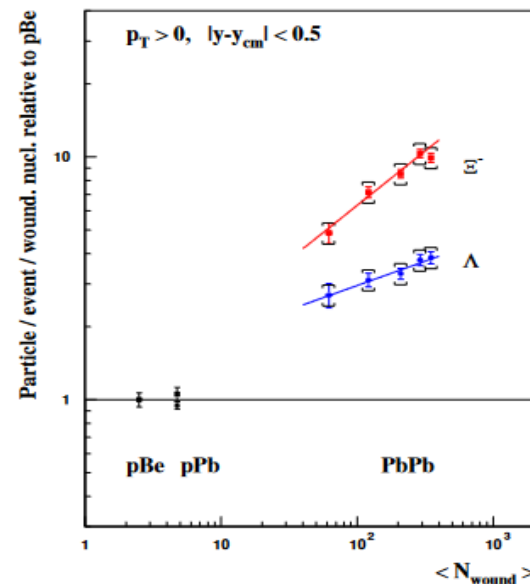
- В КГП: $2 \cdot m_S \sim 200$ МэВ
- В адронном газе: $2 \cdot m_K \sim 1000$ МэВ



Сплошные символы – столкновения тяжелых ионов, пустые – протонов при той же энергии



Эксперимент
STAR (RHIC)
 $\sqrt{s_{NN}} \cong 200$ ГэВ



Эксперимент NA57
(SPS, CERN)
энергия 158 А ГэВ
(в ЛСО)

Основные итоги

- Рассмотрена материя КХД, ее фазовая диаграмма, условия возникновения КГП
- Рассмотрены существующие эксперименты, дающие подтверждение существования КГП, и перспективы готовящихся экспериментов.
- Дан краткий обзор некоторых экспериментальных методов изучения горячей материи.

Спасибо за внимание!