

Определение термодинамических параметров среды, образующейся в столкновениях тяжелых ионов

Недорезов Е.В. (ОИЯИ), Апарин А.А. (ОИЯИ), Парван А.С. (ОИЯИ, IFIN-HH)

Работа была поддержана РФФ (грант №22-72-10028)

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН

05.04.2024

1 Введение

- Фазовая диаграмма КХД
- Эволюция кварк-глюонной плазмы
- Эксперимент STAR
- Программа Beam Energy Scan на RHIC

2 Используемая модель

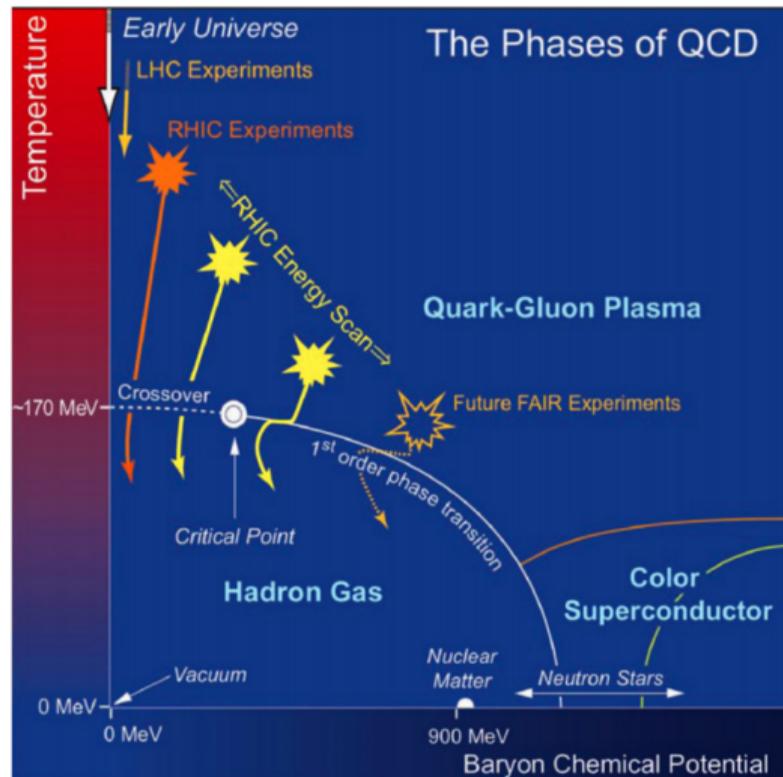
3 Фит для лёгких мезонов (K^\pm, π^\pm)

4 Выводы

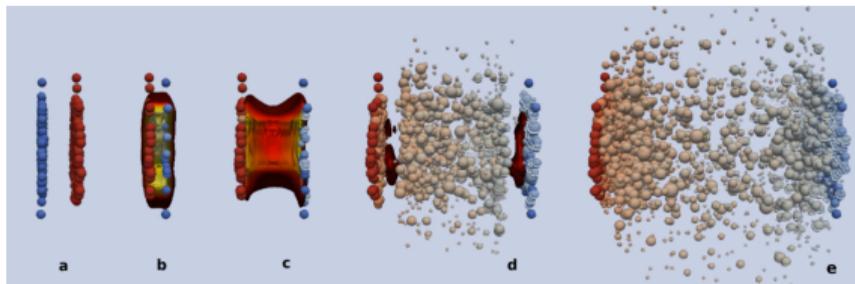
Фазовая диаграмма КХД

Параметры:

- ▶ Температура T
- ▶ Барийонный химический потенциал μ

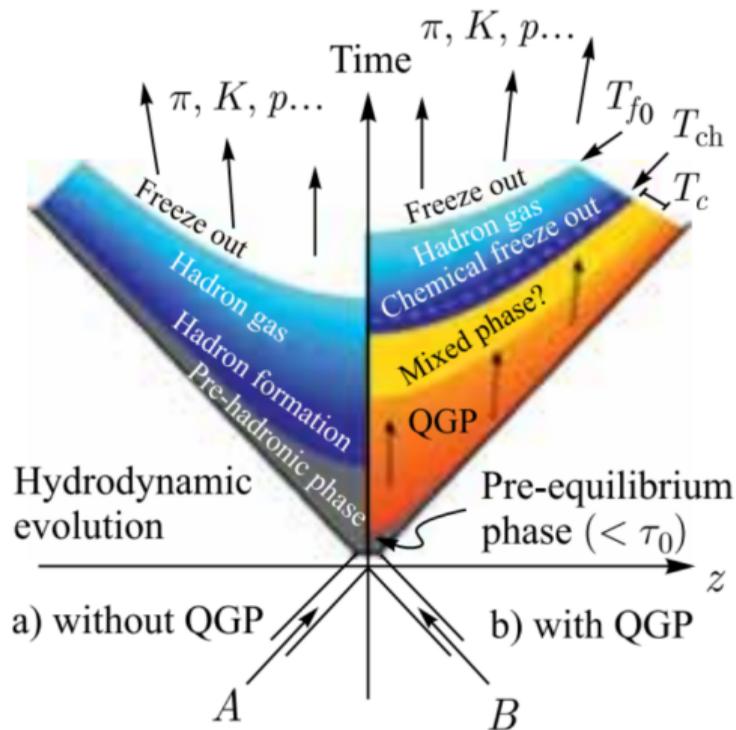


Эволюция кварк-глюонной плазмы



Этапы столкновения ядер :

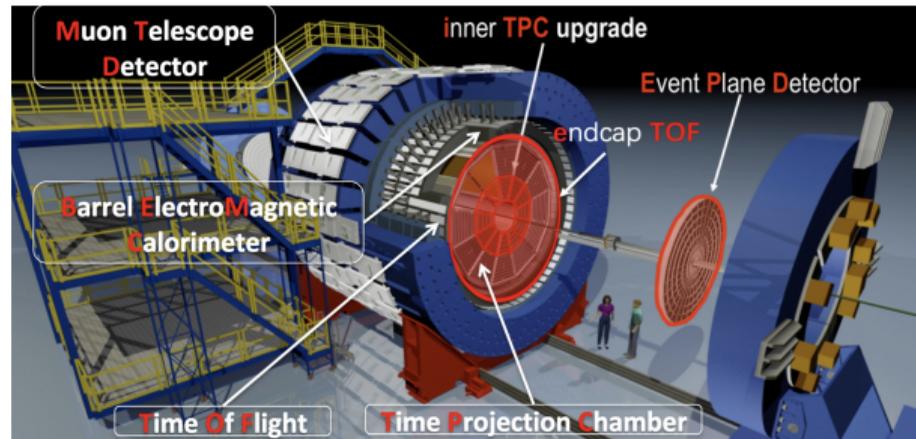
- Прохождение ядер сквозь друг друга
- Образование горячей материи
- Расширение и остывание
- Адронный газ
- Выход конечных частиц



Эксперимент STAR

TPC (Time Projection Chamber)

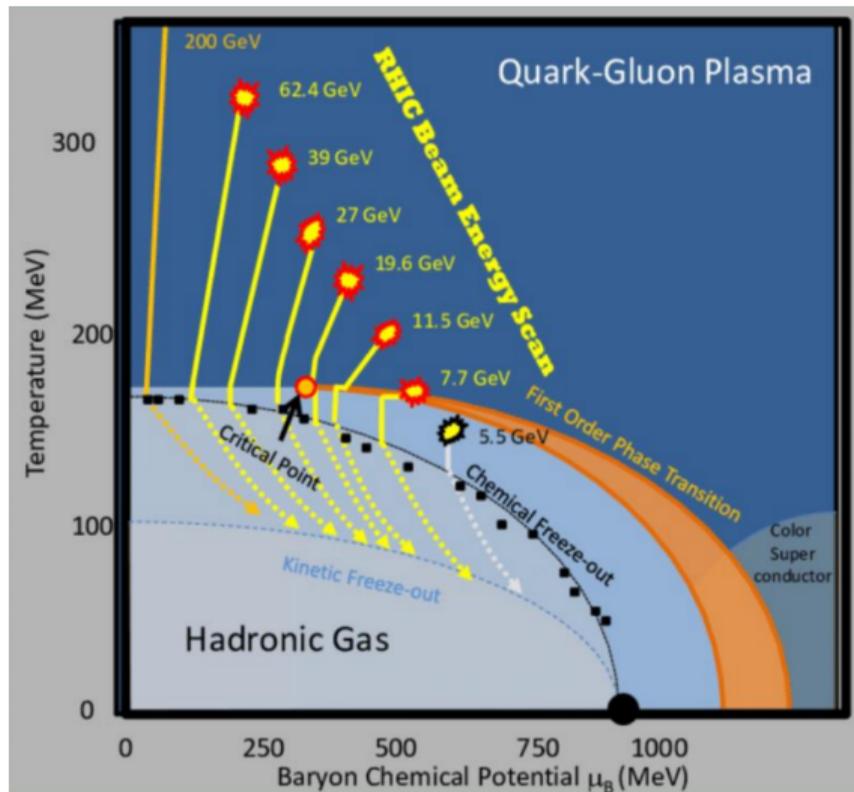
- ▶ используется для трекинга и идентификации
- ▶ длина 4.2 м, диаметр 4 м (1 м)
- ▶ азимутальный угол 2π
- ▶ диапазон по псевдобыстроте $|\eta| < 1$
- ▶ в магнитном поле 0.5 Тесла



Программа Beam Energy Scan на RHIC

Используемые данные:

- ▶ RHIC BES-I, 2010-2011
- ▶ $Au + Au \sqrt{S_{NN}} = 7.7 - 27 \text{ GeV}$.
- ▶ спектры по поперечному импульсу $f(p_T) = \frac{d^2 N}{2\pi p_T dp_T dy}$
- ▶ Phys.Rev.C 96 , 044904 (2017), Phys.Rev.C 101, 024905 (2020)



1 Введение

2 Используемая модель

- Обзор существующих моделей
- Статистика Цаллис-3
- Приближение нулевого члена

3 Фит для лёгких мезонов (K^\pm, π^\pm)

4 Выводы

Обзор существующих моделей

- ▶ Модель Blast-Wave:
(Phys.Rev. C 48, 2462 (1993))

$$\frac{dN}{p_T dp_T} \propto \int_0^R r dr K_1 \left(\frac{m_T \cosh \rho}{T} \right) I_0 \left(\frac{m_T \sinh \rho}{T} \right)$$

- ▶ Функция Леви:
(Phys.Rev. C 75, 064901 (2007))

$$\frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} = \frac{dN}{dy} \frac{(n-1)(n-2)}{nC(nC + m_0(n-2))} \left(1 + \frac{m_T - m_0}{mC} \right)^{-n}$$

- ▶ Феноменологическое распределение Цаллиса:
(J.Phys.G:Nucl.Part.Phys. 39, 025006 (2012))

$$\frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} = \frac{gV}{(2\pi)^2} m_T \cosh y \left(1 + (q-1) \frac{m_T \cosh y - \mu}{T} \right)^{\frac{-q}{q-1}}$$

Статистика Цаллис-3

- ▶ Энтропия Цаллиса:

$$S = \sum_i \frac{p_i^q - p_i}{1 - q}, \quad \sum_i p_i = 1,$$

где p_i - вероятность i -го микроскопического состояния системы, $q \in [0, \infty]$.

- ▶ В гиббсовском пределе $q \rightarrow 1$ выражение переходит в классическую энтропию Больцмана-Гиббса:

$$S = \sum_i p_i \ln p_i$$

Статистика Цаллис-3

- ▶ В макроканоническом ансамбле термодинамический потенциал Ω имеет вид:

$$\Omega = \langle H \rangle - TS - \mu \langle N \rangle, \text{ где}$$

$$\langle H \rangle = \frac{1}{\theta} \sum_i p_i^q E_i, \quad \langle N \rangle = \frac{1}{\theta} \sum_i p_i^q N_i, \quad \theta = \sum_i p_i^q.$$

- ▶ Из условия термодинамического равновесия (принцип минимума энтропии) следуют нормировочные выражения для параметров $\Lambda = -\theta TS + \langle H \rangle - \mu \langle N \rangle$ и θ :

$$\sum_i \left(1 + (1 - q) \frac{\Lambda - E_i + \mu N_i}{T\theta^2} \right)^{\frac{1}{1-q}} = 1,$$

$$\sum_i \left(1 + (1 - q) \frac{\Lambda - E_i + \mu N_i}{T\theta^2} \right)^{\frac{q}{1-q}} = \theta$$

Статистика Цаллис-3

- ▶ Рассмотрим релятивистский идеальный газ в макроканоническом ансамбле. Тогда, переходя к интегральному представлению $x^{-y} = \frac{1}{\Gamma(y)} \int_0^\infty t^{y-1} e^{-tx} dt$, получим нормировочные выражения в виде:

$$1 = \sum_{n=0}^{n_0} \frac{\omega^n}{n! \Gamma\left(\frac{1}{q-1}\right)} \int_0^\infty t^{\frac{2-q}{q-1}-n} e^{-t+\beta'(\Lambda+\mu n)} (\text{K}_2(\beta' m))^n dt,$$

$$\theta = \sum_{n=0}^{n_0} \frac{\omega^n}{n! \Gamma\left(\frac{q}{q-1}\right)} \int_0^\infty t^{\frac{1}{q-1}-n} e^{-t+\beta'(\Lambda+\mu n)} (\text{K}_2(\beta' m))^n dt,$$

где $\omega = \frac{gV}{2\pi^2} \frac{m^2 T \theta^2}{q-1}$, $\beta' = \frac{-t(1-q)}{T\theta^2}$, n_0 — количество учитываемых членов

Статистика Цаллис-3

- ▶ Выражение для спектра по поперечному импульсу в диапазоне по быстроте $y \in [y_{min}, y_{max}]$ имеет вид:

$$\frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \Big|_{y_{min}}^{y_{max}} = \frac{gV}{(2\pi)^2} m_T \int_{y_{min}}^{y_{max}} dy \cosh y \times$$
$$\times \frac{1}{\theta} \sum_{n=0}^{n_0} \frac{\omega^n}{n! \Gamma(\frac{q}{q-1})} \int_0^\infty t^{\frac{1}{q-1}-n} e^{-t+\beta'(\Lambda - m_T \cosh y + \mu(n+1))} (K_2(\beta' m))^n dt$$

- ▶ В этой работе: $n_0 = 1$, $\mu = 0$.

Приближение нулевого члена

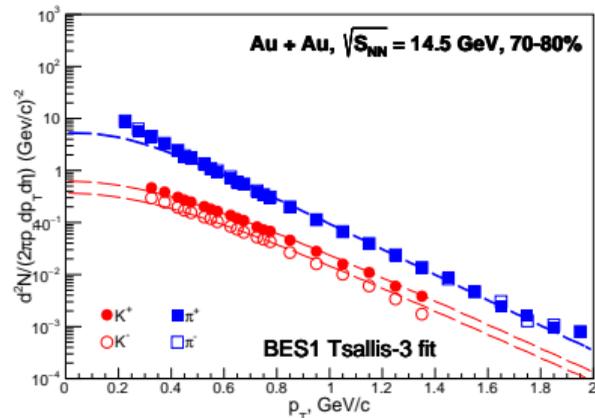
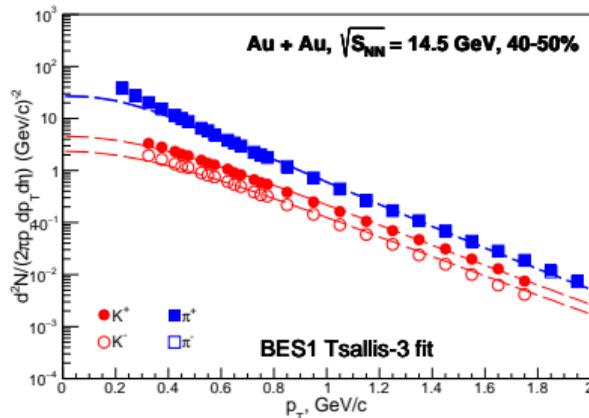
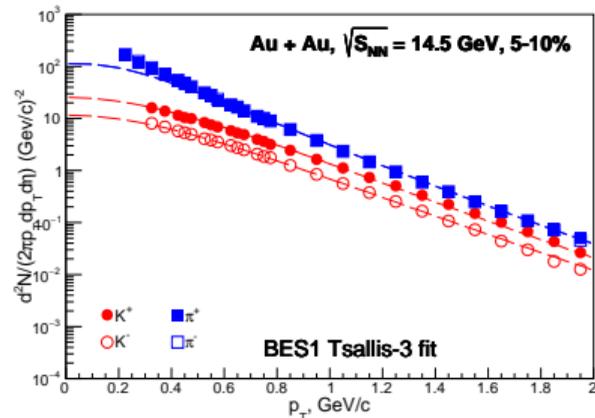
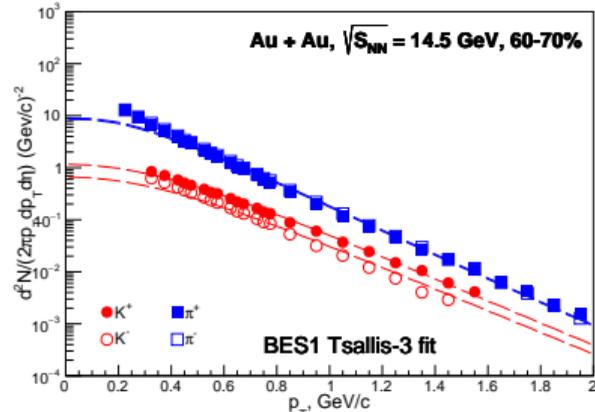
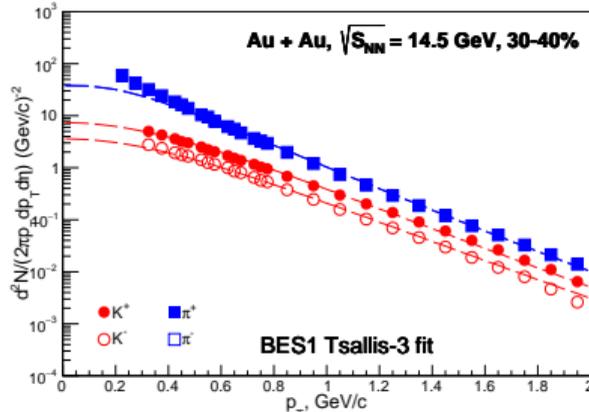
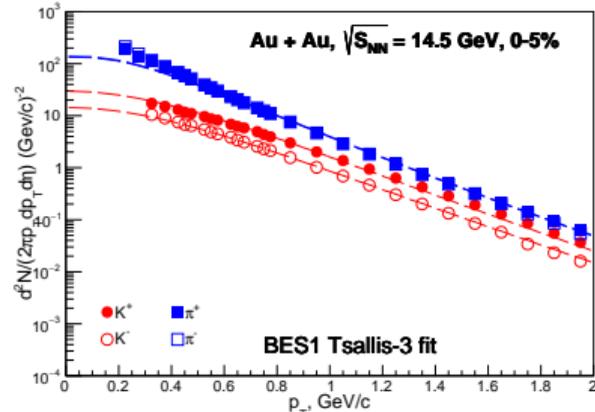
- ▶ При $n_0 = 0$ система нормировочных уравнений разрешима аналитически: $\Lambda = 0$, $\theta = 1$. Тогда выражение для спектра в приближении нулевого члена имеет вид:

$$\frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \Big|_{y_{min}}^{y_{max}} = \frac{gV}{(2\pi)^2} \int_{y_{min}}^{y_{max}} dy m_T \cosh y \left(1 - (1 - q) \frac{m_T \cosh y - \mu}{T} \right)^{\frac{q}{1-q}}$$

- ▶ Это выражение совпадает с феноменологическим распределением Цаллиса.

- 1 Введение
- 2 Используемая модель
- 3 Фит для лёгких мезонов (K^\pm, π^\pm)**
 - $\sqrt{S_{NN}} = 14.5$ ГэВ
 - Энергетическая зависимость
- 4 Выводы

$$\sqrt{S_{NN}} = 14.5 \text{ ГэВ}$$



$$\sqrt{S_{NN}} = 14.5 \text{ ГэВ}$$

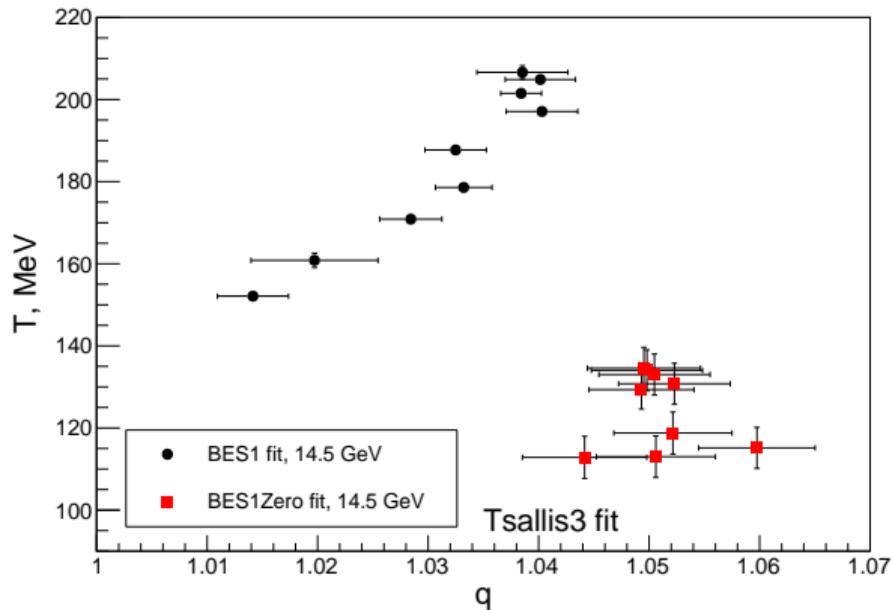
Центр.	T , МэВ	q	χ^2/NDF
0-5%:	206.6 ± 1.6	1.039 ± 0.004	54.6/88 (0.62)
5-10%:	204.9 ± 1.2	1.040 ± 0.003	30.9/88 (0.35)
10-20%:	201.5 ± 1.0	1.038 ± 0.002	53.7/88 (0.61)
20-30%:	197.1 ± 1.0	1.040 ± 0.003	38.4/88 (0.44)
30-40%:	187.7 ± 0.9	1.032 ± 0.003	58.9/88 (0.67)
40-50%:	178.6 ± 1.0	1.033 ± 0.003	65.5/84 (0.78)
50-60%:	170.9 ± 1.1	1.028 ± 0.003	90.5/82 (1.10)
60-70%:	160.8 ± 1.8	1.012 ± 0.006	124.4/79 (1.57)
70-80%:	152.1 ± 1.1	1.014 ± 0.003	85.2/76 (1.12)

$$\sqrt{S_{NN}} = 14.5 \text{ ГэВ}$$

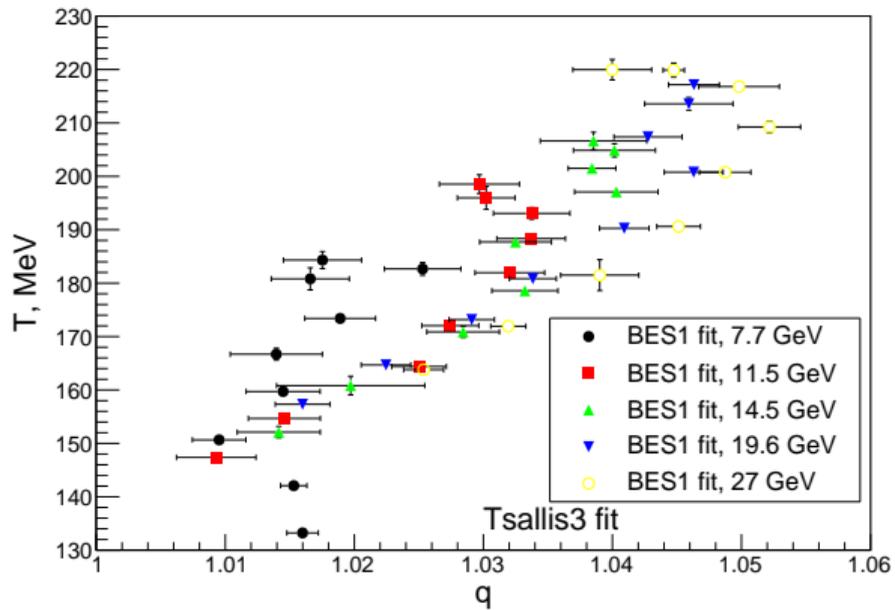
Центр.	R_{π^+} , фм	R_{π^-} , фм	R_{K^+} , фм	R_{K^-} , фм
0-5%	18.4 ± 0.9	18.2 ± 0.9	16.3 ± 0.8	12.4 ± 0.5
5-10%	17.3 ± 0.7	17.3 ± 0.7	15.8 ± 0.6	11.6 ± 0.4
10-20%	15.8 ± 0.4	15.6 ± 0.4	13.8 ± 0.3	10.7 ± 0.2
20-30%	14.2 ± 0.6	14.3 ± 0.6	12.3 ± 0.5	9.2 ± 0.3
30-40%	11.9 ± 0.4	11.9 ± 0.4	10.1 ± 0.3	7.7 ± 0.2
40-50%	10.7 ± 0.4	10.8 ± 0.4	8.9 ± 0.3	6.9 ± 0.2
50-60%	8.8 ± 0.3	8.9 ± 0.3	6.7 ± 0.2	5.4 ± 0.1
60-70%	7.2 ± 0.5	7.4 ± 0.5	5.5 ± 0.3	4.5 ± 0.2
70-80%	6.2 ± 0.2	6.2 ± 0.2	4.5 ± 0.1	3.7 ± 0.1

$$\sqrt{S_{NN}} = 14.5 \text{ ГэВ}$$

Сравнение с приближением нулевого члена

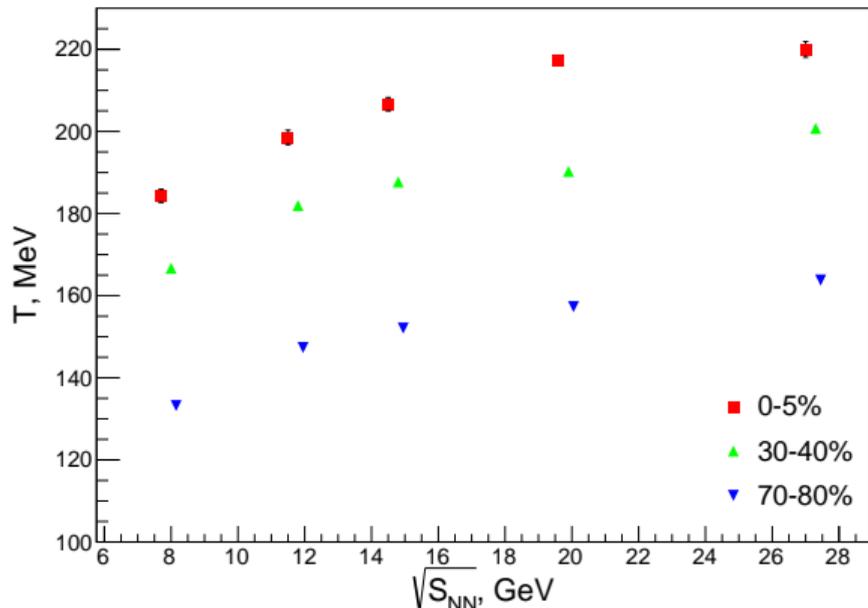


Сравнение с другими энергиями

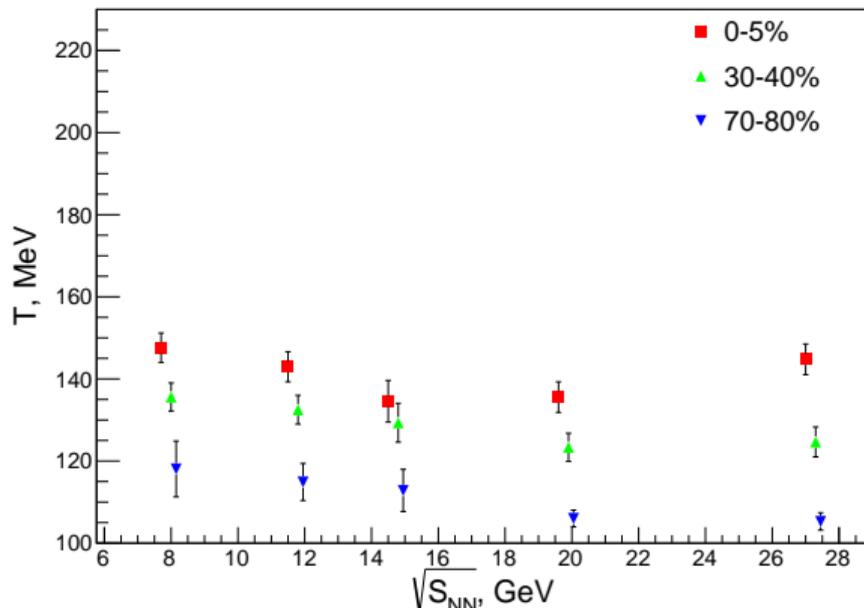


Энергетическая зависимость

Цаллис-3

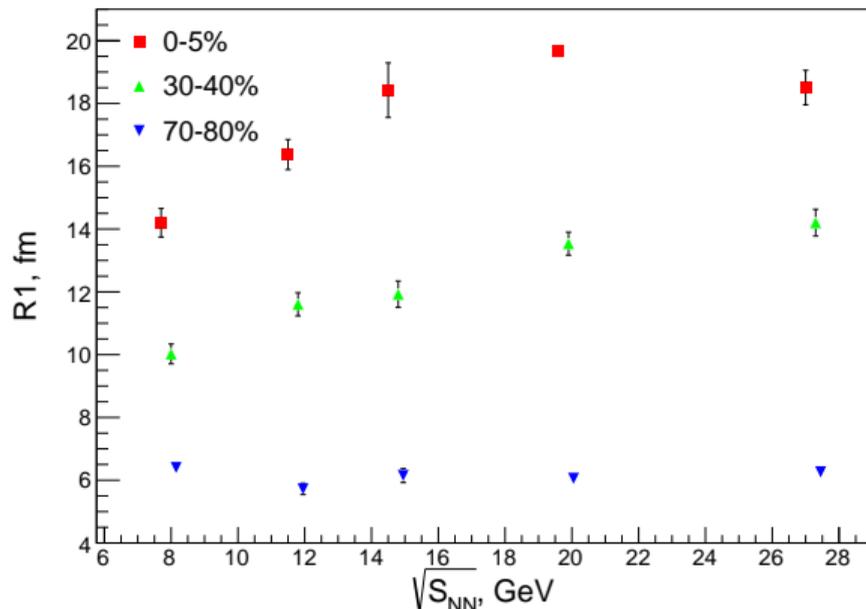


Приближение нулевого члена

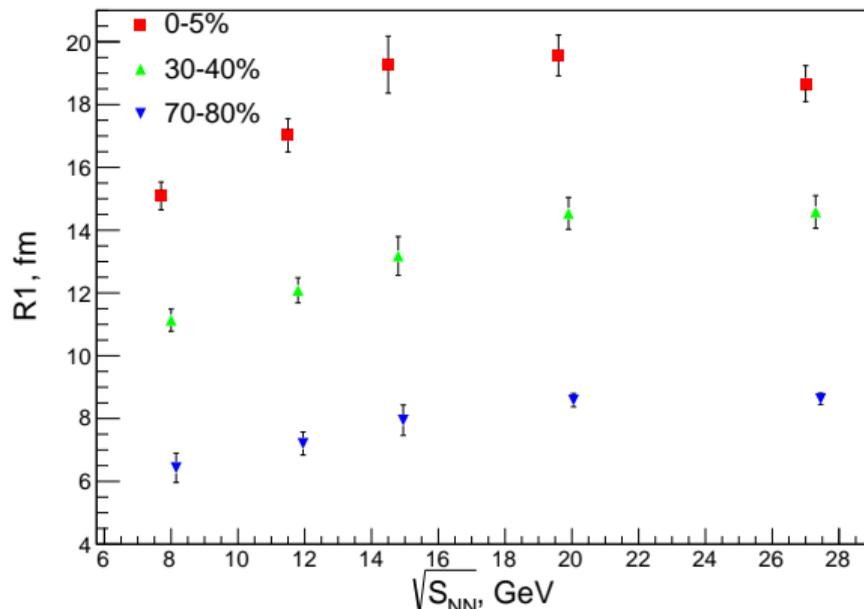


Энергетическая зависимость

Цаллис-3

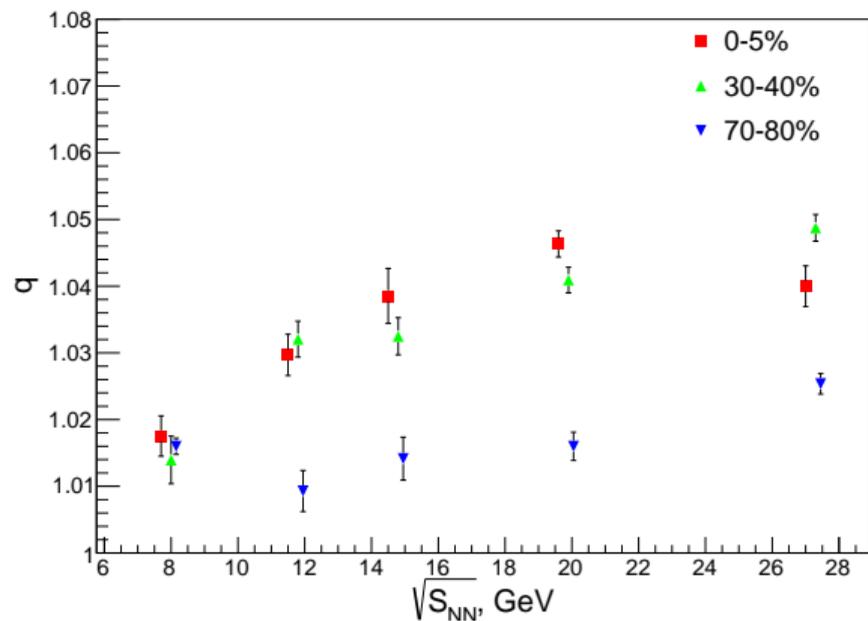


Приближение нулевого члена

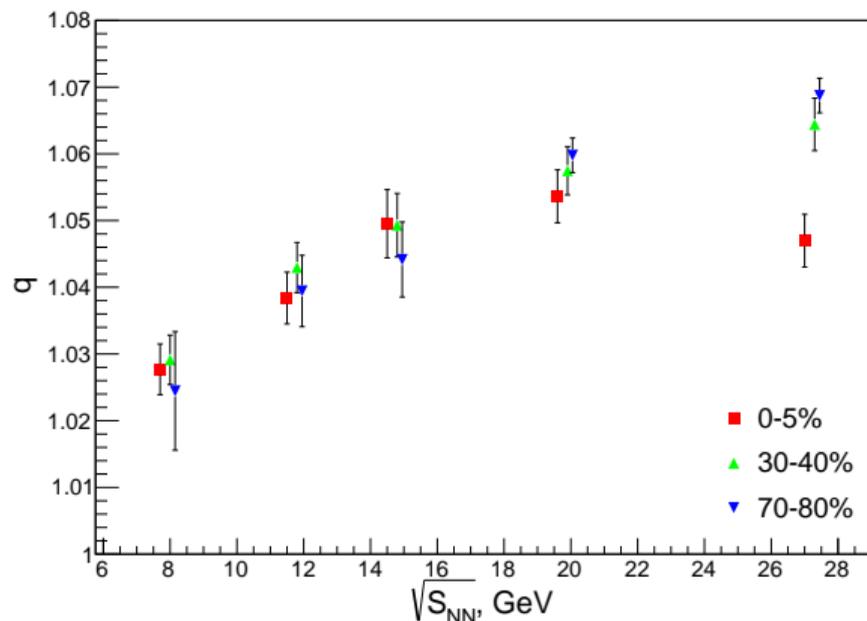


Энергетическая зависимость

Цаллис-3



Приближение нулевого члена



- 1 Введение
- 2 Используемая модель
- 3 Фит для лёгких мезонов (K^\pm, π^\pm)
- 4 Выводы**

Выводы

- ▶ С помощью нового подхода, статистики Цаллис-3, были измерены термодинамические параметры среды, образующейся в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов.
- ▶ Установлено, что температура T монотонно увеличивается с ростом центральности, что говорит о том, что в центральных столкновениях материя более горячая, чем в периферических.
- ▶ Было измерено отклонение системы от классического равновесия.
- ▶ Радиус системы R увеличивается с ростом центральности, что свидетельствует о том, что в центральных столкновениях размер системы больше, чем в периферических.
- ▶ Было показано, что значения термодинамических параметров слабо зависят от энергии столкновения.
- ▶ Широко применяемая феноменологическая статистика Цаллиса является частным случаем статистики Цаллис-3 в приближении нулевого члена.
- ▶ Показано, что учет дополнительных членов в разложении сильно меняет значения параметров: температура T увеличивается, в то время как параметр q уменьшается.

Дальнейшая работа

- ▶ Учесть вклад распадов резонансов в спектры частиц по поперечному импульсу.
- ▶ Включить в фит другие типы частиц (протоны и странные барионы).
- ▶ Расширить диапазон по энергии.
- ▶ Учесть химический потенциал, с помощью него восстановить множественность частиц на основе экспериментальных данных и Монте-Карло симуляции.

Спасибо за внимание!