

# Дипломная работа

## ПОИСК ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В РОЖДЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЗОЛОТО-ЗОЛОТО НА РЕЛЯТИВИСТСКОМ КОЛЛАЙДЕРЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

студента физического факультета  
МГУ им. М. В. Ломоносова  
Апарина Алексея Андреевича

научные руководители  
д.ф.-м.н., проф. Токарев М. В.  
к.ф.-м.н., с.н.с., Кечечян А.О.

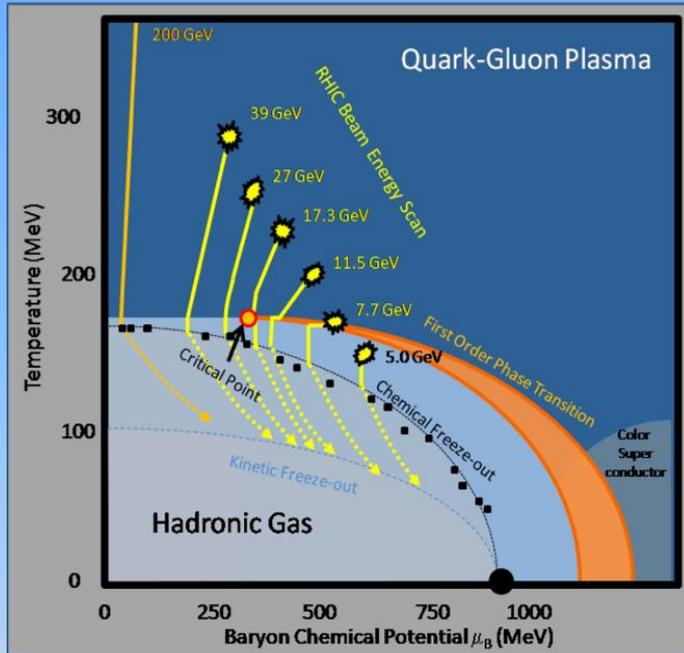
Дубна, 2011

# Содержание

- Введение
- Детектор STAR
- Монте-Карло модель UrQMD
- Результаты моделирования AuAu событий при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  ГэВ
- Сравнение с экспериментальными данными
- Оценка потерь энергии
- Выводы

# Введение

## Фазовая диаграмма ядерной материи



Цель программ по физике тяжелых релятивистских ионов на RHIC, SPS:

- Исследование свойств высоковозбужденной ядерной материи и поиск фазовых переходов
- Энергетическое сканирование в диапазоне  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7-39$  ГэВ для поиска критической точки

Цель работы:

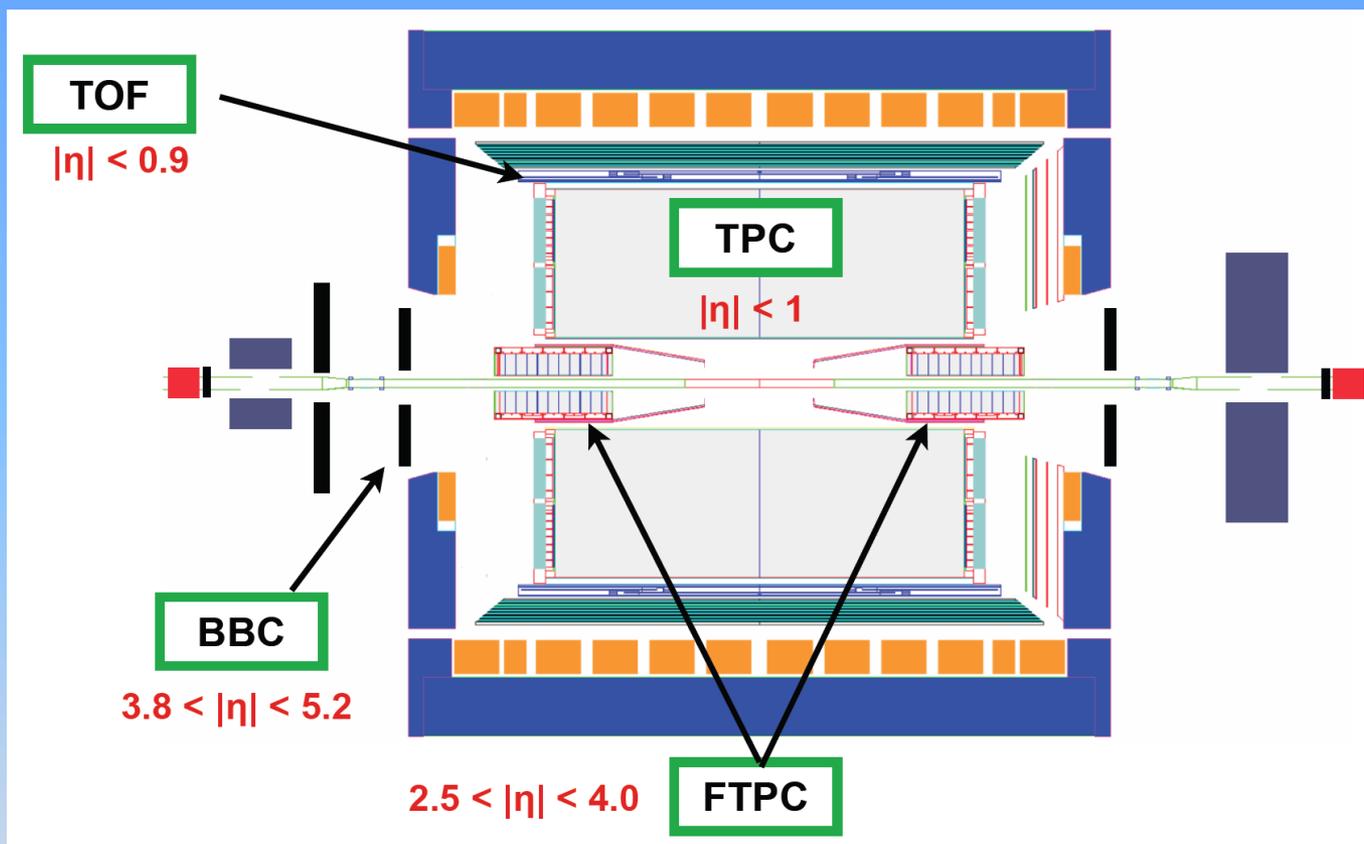
- моделирование AuAu столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  ГэВ для изучения характеристик рождающихся частиц ( $\pi$ , K, p, ...) и античастиц при больших поперечных импульсах (4-5 ГэВ/c).
- оценки потерь энергии при больших поперечных импульсах

STAR, H. Caines et al., arXiv:0906.0305.

STAR, B. Abelev et al., Phys. Rev. C81 (2010) 024911.

NA61, M. Gazdzicki et al., J. Phys. G36 (2009) 064039.

# Установка STAR



Большой акцептанс установки STAR  $|\eta| < 2.5$ ,  $0 < \phi < 2\pi$  позволяет с помощью TPC+TOF идентифицировать частицы  $\pi$ , K, p, e,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,... в диапазоне импульсов  $0.2 < p_T < 2$  (ГэВ/с)

STAR Collaboration

K.H. Ackermann et al., Nucl. Instr. Meth. A499 (2003) 624.

T. Zou et al., Nucl. Instr. Meth. A605 (2009) 282.

W.J. Llope et al., Nucl. Instr. Meth. A522 (2004) 252.

# Монте Карло модель UrQMD

Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamic (UrQMD) – микроскопическая модель, основанная на описании ядерных реакций в терминах фазового пространства. При энергии  $\sqrt{s_{NN}} > 5$  ГэВ модель учитывает возбуждения цветных струн, с последующей их фрагментацией в адроны. В семействе моделей QMD нуклон параметризуется

функцией  $\varphi_i(\bar{x}; \bar{q}_i, \bar{p}_i, t) = \left(\frac{2}{L\pi}\right)^{3/4} \exp\left\{-\frac{2}{L}(\bar{x} - \bar{q}(t))^2 + \frac{1}{\hbar}i\bar{p}_i(t)\bar{x}\right\}$  определяемой шестью время-зависимыми переменными. Волновая функция ядра является произведением волновых функций нуклонов. Гамильтониан системы имеет вид

$$H_{UrQMD} = \sum_{j=1}^N E_j^{kin} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N (E_{jk}^{Sk2} + E_{jk}^{Yukawa} + E_{jk}^{Coulomb} + E_{jk}^{Pauli}) + \frac{1}{6} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N E_{jkl}^{Sk3}$$

Уравнения эволюции во времени решаются численно. Сталкивающиеся ядра рассматриваются как ферми-газ нуклонов. Полное сечение взаимодействия в модели зависит от изоспина и аромата сталкивающихся частиц и энергии в с. ц. м. При энергии  $\sqrt{s_{NN}} > 5$  ГэВ для pp сечения используется CERN/HERA параметризация

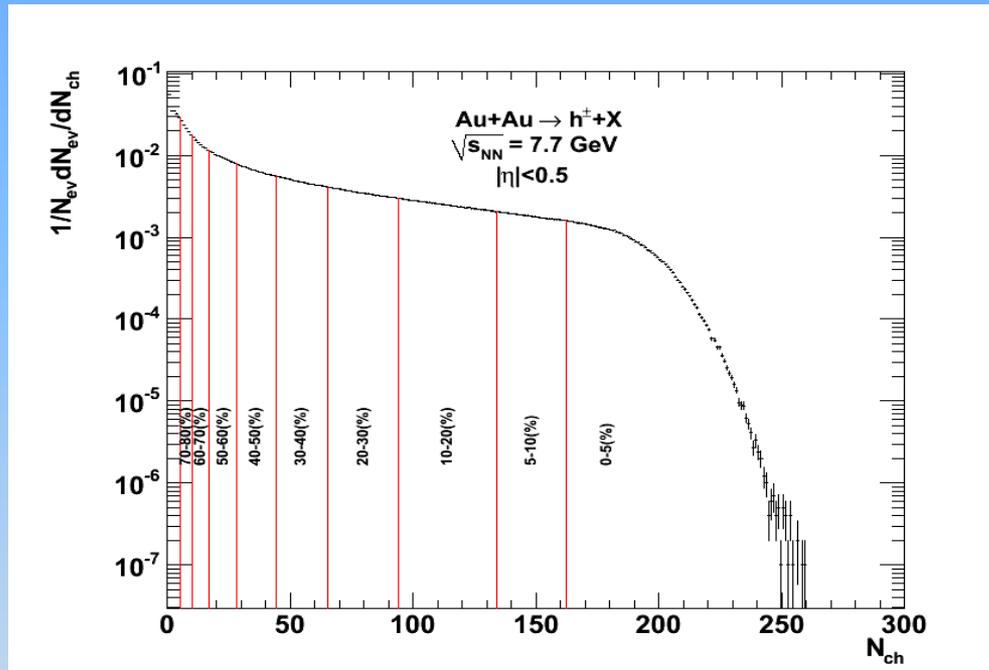
$$\sigma(p) = A + Bp^n + C \ln^2(p) + D \ln(p)$$

The UrQMD Model, <http://urqmd.org/>

S.A. Bass et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 41 (1998) 225.

M. Bleicher et al., J.Phys. G25 (1999) 1859.

# Распределение AuAu событий по множественности заряженных частиц при энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ и $|\eta| < 0.5$



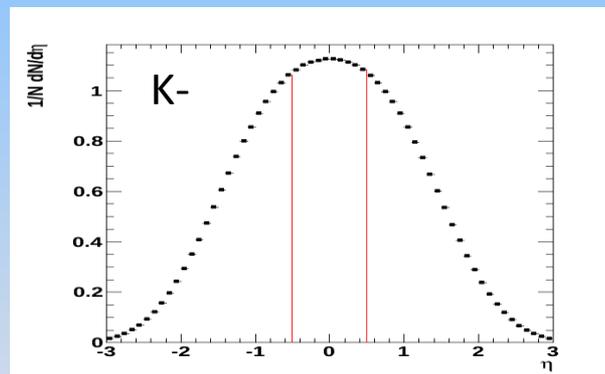
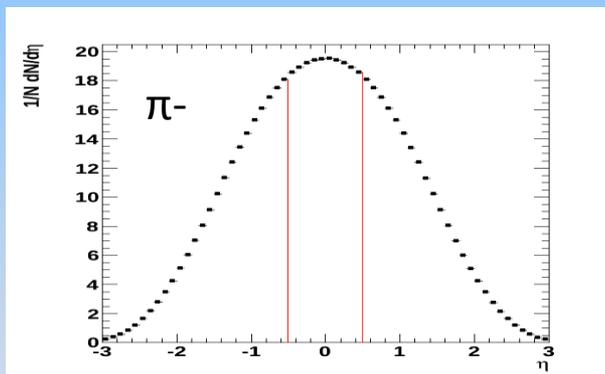
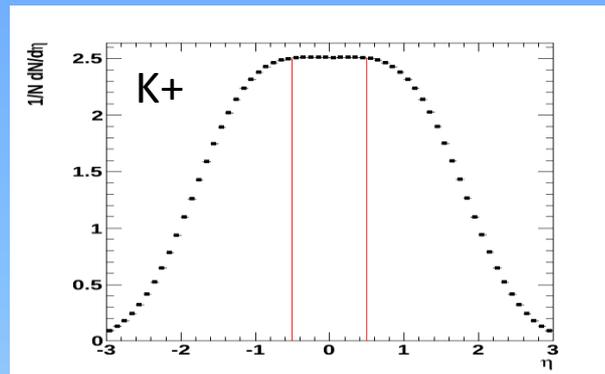
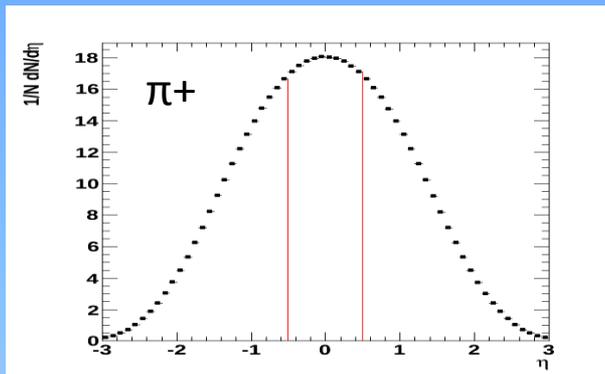
- Набрано 10 млн. AuAu событий.
- Потребовалось ~6500 CPU часов работы на вычислительной ферме ЛИТ ОИЯИ.
- Обработка событий проводилась в среде ROOT.

Среднее число заряженных частиц в каждом классе центральности

Центральность %	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
$\langle N_{ch} \rangle$	182	148	113	79	54	36	23	14	8

# Зависимость плотности множественности $1/N dN/d\eta$ частиц от псевдобыстроты при энергии столкновения

$$\sqrt{s_{NN}} = 7.7 \text{ ГэВ}$$



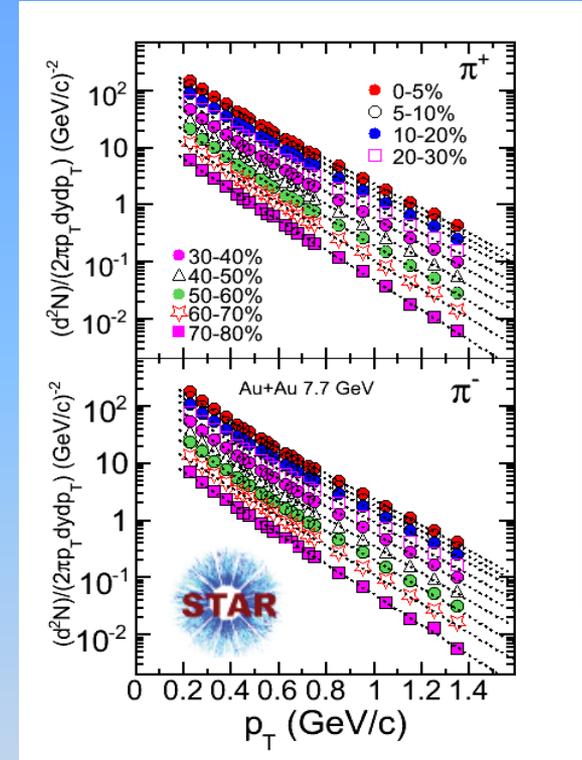
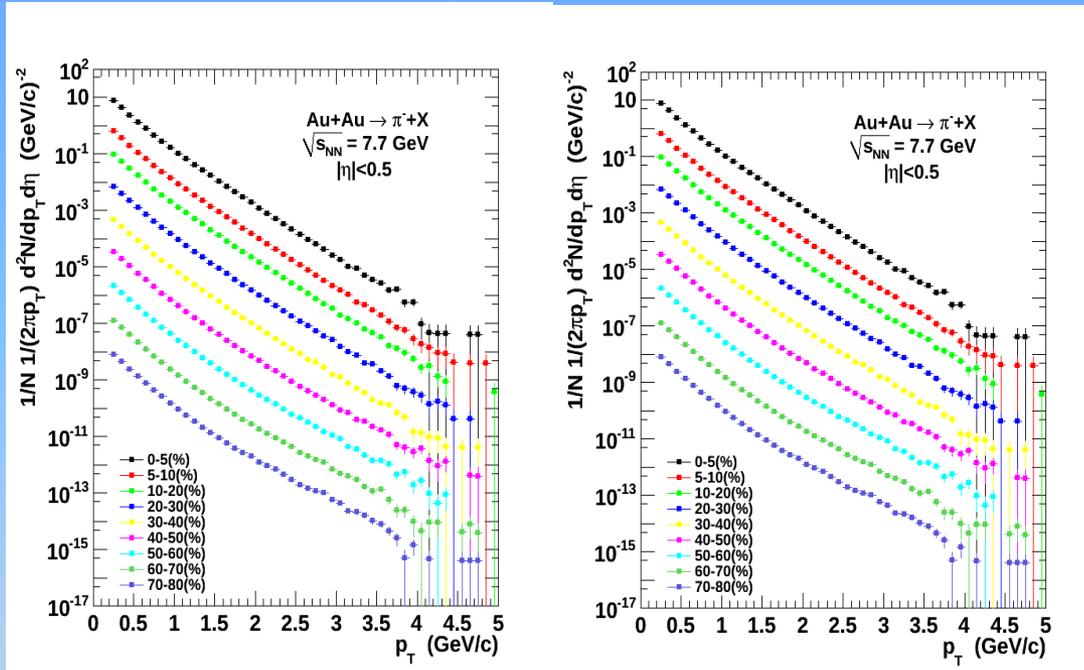
$$\eta = -\ln(\text{tg}(\vartheta/2))$$

Высокая эффективность ( $\sim 90\%$ ) регистрации частиц в интервале псевдобыстрот  $|\eta| < 0.5$  на установке **STAR**

# Спектры заряженных пионов

Результаты МС

Экспериментальные данные



МС спектры пионов

- достигают импульсов вплоть до  $p_T \approx 4-5$  ГэВ/с
- получены для 9 классов центральности
- убывают на 7-8 порядков

Распределения по поперечному импульсу для 9 классов центральности получены для  $K^\pm$ ,  $p^\pm$ ,  $h^\pm$

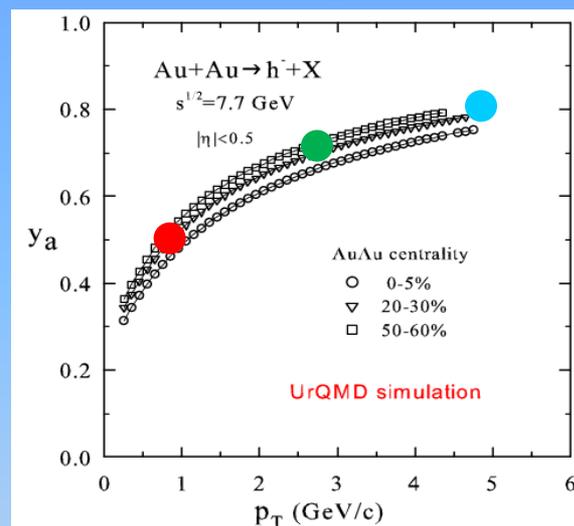
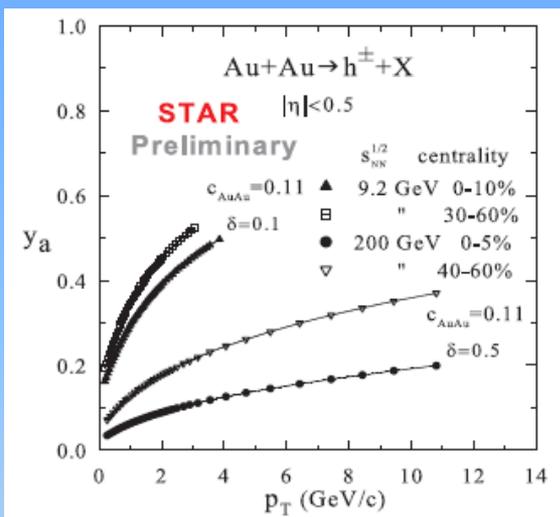
Экспериментальные данные измерены до  $p_T \approx 1.5$  ГэВ/с

# Оценка потерь энергии при рождении $h^-$ адронов в AuAu столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ

Потери энергии  $\Delta E/E \sim (1 - y_a)$

STAR  
PRL 91 (2003) 172302  
ЯФ 74 (2011) 1

z-Scaling  
M.Tokarev  
I.Zborovsky  
PRD 75(2007) 094008  
IJMPA 24 (2009) 1417



20% потерь  
 $p_T = 5$  ГэВ/с  
 $q \approx 6.3$  ГэВ/с

30% потерь  
 $p_T = 3$  ГэВ/с  
 $q \approx 4.3$  ГэВ/с

50% потерь  
 $p_T = 1$  ГэВ/с  
 $q \approx 2.$  GeV/c

$\Delta E$  – потеря энергии,  $E$  – полная энергия конститuenta,  
 $y_a$  – доля импульса конститuenta, уносимая инклюзивной частицей

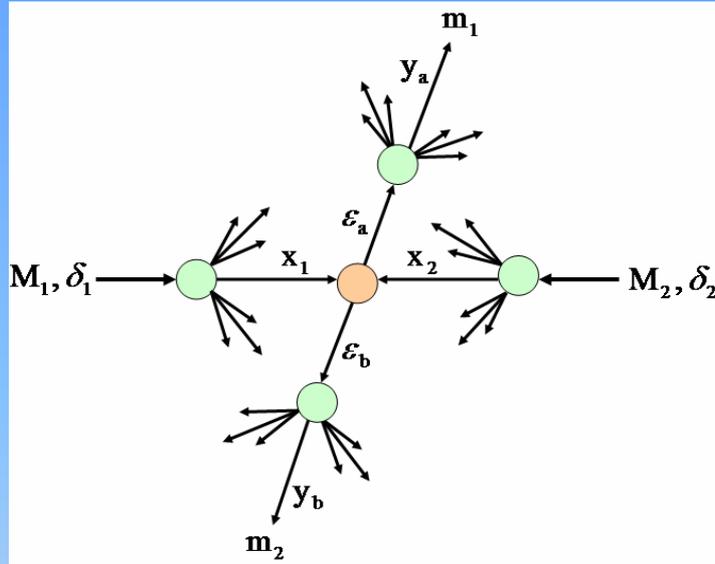
- Потери энергии увеличиваются с энергией и центральностью столкновения и уменьшаются с ростом поперечного импульса  $p_T$ .
- Поиск критической точки предпочтителен в области больших  $p_T$ .
- Поиск ярких сигнатур фазовых переходов в текущих - STAR (RHIC, BNL), NA61 (SPS, CERN) и планируемых - MPD (NICA, JINR), CBM (SIS, GSI), ALICE (LHC, CERN) экспериментах.

# Выводы

- Проведено моделирование AuAu столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  ГэВ. Статистика 10 млн. событий позволила провести анализ спектров частиц до импульсов  $p_T = 5$  ГэВ/с.
- Получены распределения AuAu событий по множественности заряженных адронов.
- Получены зависимости спектров идентифицированных адронов по псевдобыстроте ( $|\eta| < 3$ ).
- Получены зависимости спектров заряженных пионов, каонов, протонов и их античастиц для 9 классов центральности от поперечного импульса (до  $p_T = 4-5$  ГэВ/с).
- Проведено сравнение MC результатов с экспериментальными данными STAR.
- В рамках теории z-скейлинга получены оценки потерь энергии конститuentов в зависимости от поперечного импульса инклюзивной частицы, рожденной в AuAu столкновении при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  ГэВ.

**Дополнительные слайды**

# Кинематика элементарного подпроцесса



M.Tokarev. & I.Zborovsky  
PRD75,094008(2007)  
IJMPA24,1417(2009)

## Закон сохранения импульса

$$(x_1 P_1 + x_2 P_2 - p/y_a)^2 = M_X^2$$

$$M_X = x_1 M_1 + x_2 M_2 + m_2/y_b$$

## Принцип минимального разрешения $\Omega^{-1}$ фрактальной меры $z$ :

$$z = z_0 \Omega^{-1}$$

$$z_0 = \frac{s_{\perp}^{1/2}}{(dN_{ch}/d\eta|_0)^c m_N}$$

$$\Omega = (1 - x_1)^{\delta_1} (1 - x_2)^{\delta_2} (1 - y_a)^{\varepsilon_a} (1 - y_b)^{\varepsilon_b}$$

- $x_1, x_2 \rightarrow$  энергия подпроцесса
- $y_a \rightarrow$  энергия потерь (диссипация) при рождении инклюзивной частицы
- $M_X = x_1 M_1 + x_2 M_2 + m_2/y_b \rightarrow$  нерегистрируемая масса
- $y_b \rightarrow$  множественность  $M_X$

- Фрактальные размерности  $\delta, \varepsilon$  и “удельная теплоемкость”  $c$  – параметры модели, описывающие структуру ядер, процесс фрагментации и ядерную среду
- Параметры чувствительны к энергии и центральности столкновения при больших  $p_T$ .