



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

**Рождение заряженных адронов в столкновениях
 $p+Al$, ${}^3He+Au$, $Cu+Au$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и $U+U$
при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ**

Работу выполнила: **Д.М.Ларионова**

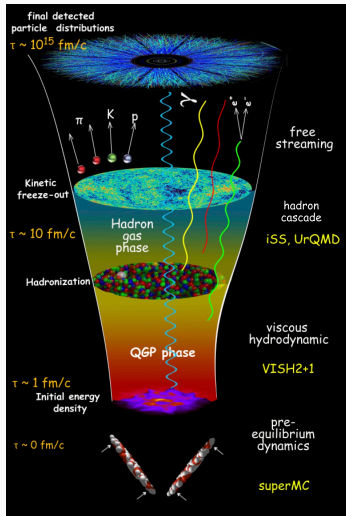
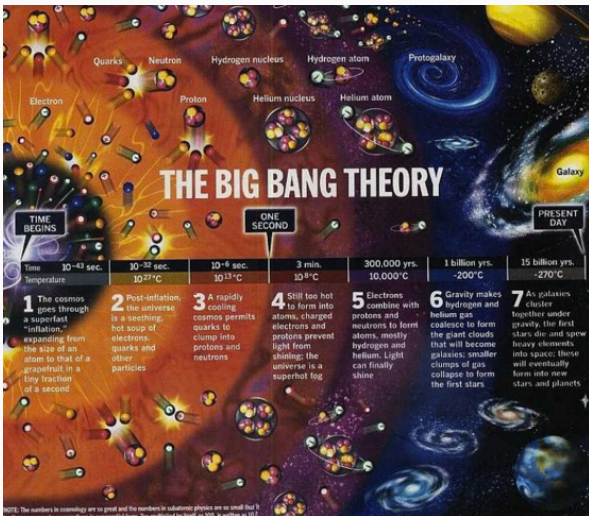
Научный руководитель: проф., д.ф.-м.н. **Я.А.Бердников**

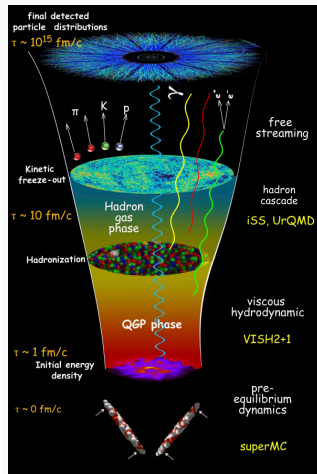
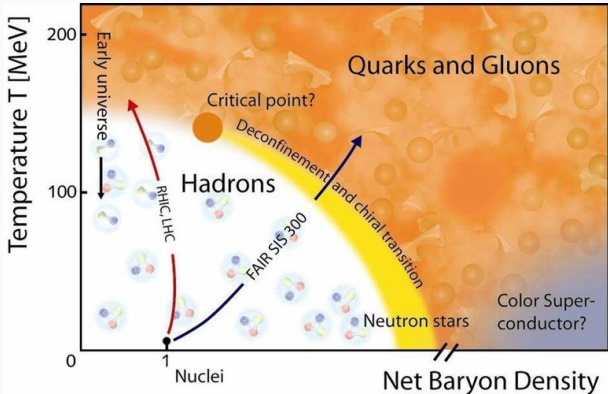
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
«СПбПУ»

Санкт-Петербург, 2024

Актуальность

Кварк-глюонная плазма (КГП)







- $p+p$ – Референсная система столкновений
- **Легкие системы столкновений** ($p+Al$, $d+Au$, ^3He+Au)
Эффекты холодной ядерной материи
 - Эффект Кронина
 - Ядерная модификация партонных функций распределения
 - Эффекты изоспина
 - и другие...
- **Тяжелые системы столкновений** ($Cu+Au$, $Au+Au$, $U+U$)
Эффекты холодной ядерной материи
Эффекты КГП
 - Увеличенный выход странности
 - Анизотропные потоки
 - Гашение струй
 - Увеличенный выход барионов
 - и другие...



- $p+p$ – Референсная система столкновений
- **Легкие системы столкновений** ($p+Al$, $d+Au$, ^3He+Au)
Эффекты холодной ядерной материи
Эффекты КГП?



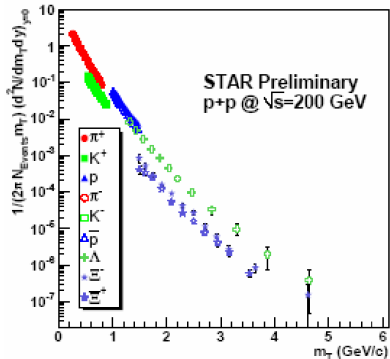
- **Тяжелые системы столкновений** ($Cu+Au$, $Au+Au$, $U+U$)
Эффекты холодной ядерной материи
Эффекты КГП

Минимальные условия формирования КГП?

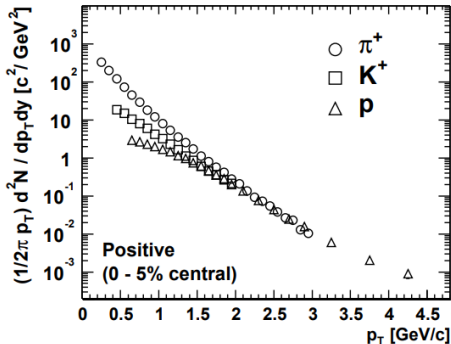
Образование идентифицируемых заряженных адронов ($\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$)



$p+p, \sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ



Au+Au, $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ



Модель радиально расширяющейся термализованной системы



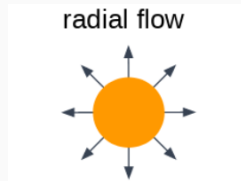
$$\frac{1}{2\pi m_T} \frac{d^2 N}{dm_T dy} = \frac{1}{2\pi T(T+m_0)} \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{m_T - m_0}{T}\right)$$

$$\langle E_{kinetic} \rangle = \langle E_{thermal} \rangle + \langle E_{collective} \rangle$$

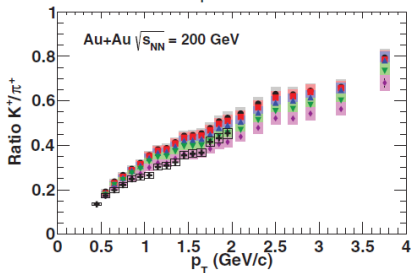
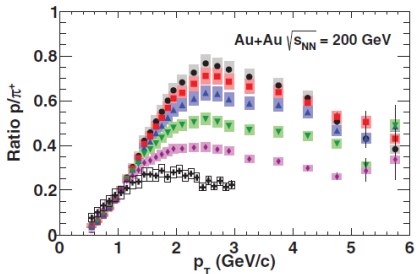
$$T = T_0 + \langle u_t \rangle \cdot m_0$$

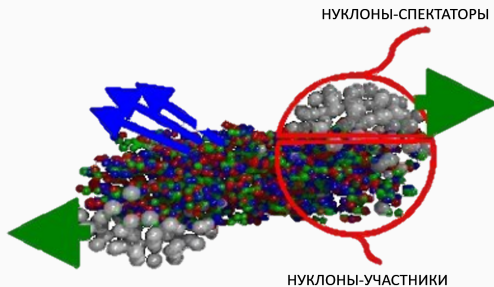
T_0 – температура кинетического «вымораживания»

$\langle u_t \rangle$ – средняя скорость радиального потока частиц



- Увеличение значений p/π при $p_T > 1.5$ ГэВ/с
Значения p/π достигают значения 0.8
(в ~ 2.5 раза больше, чем в $p + p$)
- p/π – зависимость от центральности
- K/π – слабо зависят от центральности



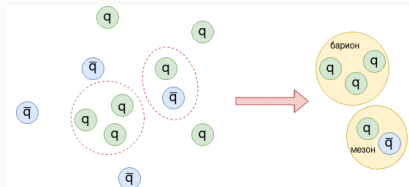


- Центральность – мера перекрытия ядер.
- $\langle N_{part} \rangle$ – количество нуклонов участников, рассчитывается с помощью модели Глаубера

0 % - наиболее центральные соударения, максимальная степень перекрытия ядер

100% - наиболее периферические соударения, минимальная степень перекрытия ядер

Рекомбинация – процесс образования адронов, в результате объединения кварков, находящихся в фазовом пространстве в области, ограниченной радиусом рекомбинации.



- Экспоненциальное убывание инвариантных p_T спектров;
- $p_T \lesssim 3 \text{ ГэВ/с}$
- КГП

Фрагментация – $p_T \gtrsim 3 \text{ ГэВ/с}$, $p + p$ столкновения



Исследование процессов рождения заряженных адронов позволяет изучать свойства КГП

Систематическое изучение процессов рождения заряженных адронов в легких и тяжелых системах столкновений позволяют изучать минимальные условия образования КГП

Измеряемые величины



- **Инвариантные p_T спектры**

$$\frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N}{dp_T dy} = \frac{N_h}{2\pi p_T N_{evt} \epsilon_{rec} \Delta p_T \Delta y}$$

- **Факторы ядерной модификации**

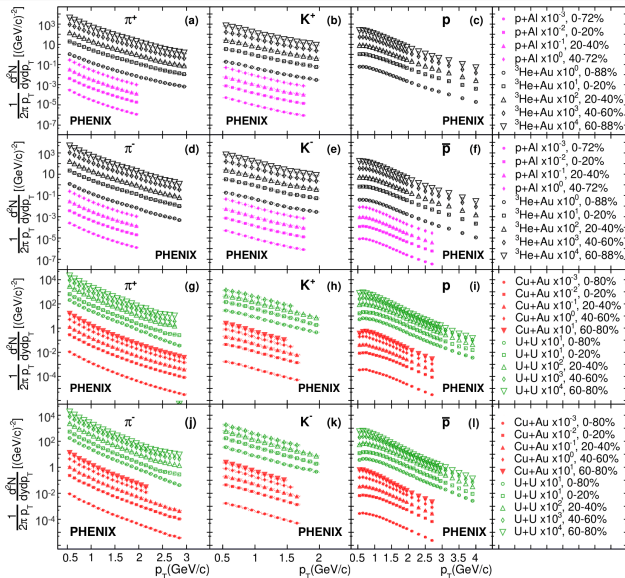
$$R_{AB}(p_T) = \frac{1}{N_{coll}} \frac{d^2 N_{AB}(p_T)/dy dp_T}{d^2 N_{pp}(p_T)/dy dp_T}$$

- **Величины отношений адронов**

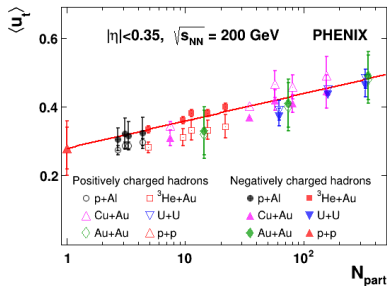
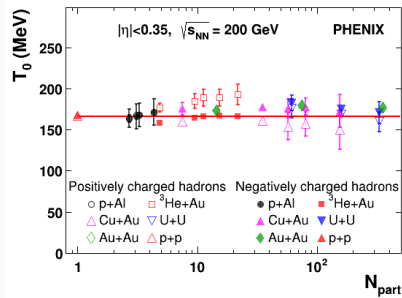
π^-/π^+ , K^-/K^+ , \bar{p}/p , K^+/π^+ , K^-/π^- , p/π^+ , \bar{p}/π^-

Вычисляются как отношения инвариантных p_T спектров соответствующих частиц

Результаты



Температура «вымораживания» T_0 и средние скорости коллективного потока $\langle u_t \rangle$ как функции от количества нуклонов-участников $\langle N_{part} \rangle$



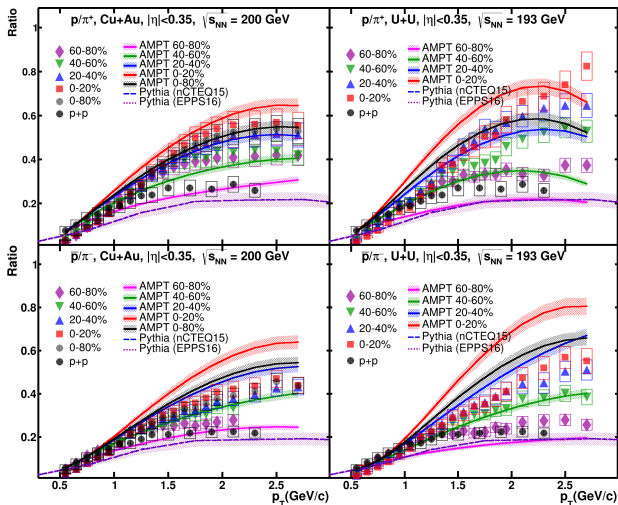
- $T_0 \approx 166.1 \pm 2.2 \text{ MeV}$
- $\langle u_t \rangle (\langle N_{part} \rangle) \approx p_1 \cdot \log(p_2 \cdot \langle N_{part} \rangle)$
 где $p_1 = 0.0345 \pm 0.0003, p_2 = 3196 \pm 342$.

Сравнение измеренных значений p/π с расчетами моделей PYTHIA и AMPT в Cu+Au и U+U столкновениях

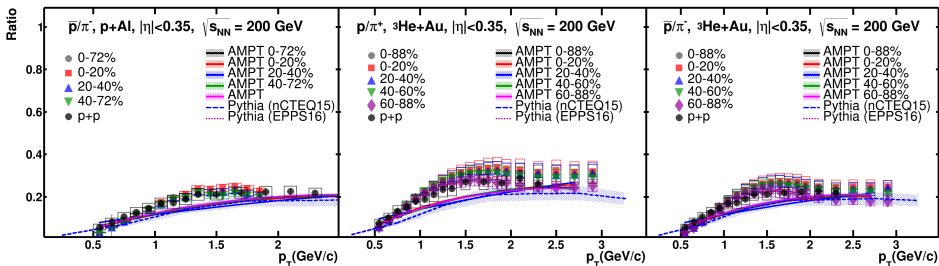


AMPT –
модель рекомбинации

PYTHIA –
модель фрагментации

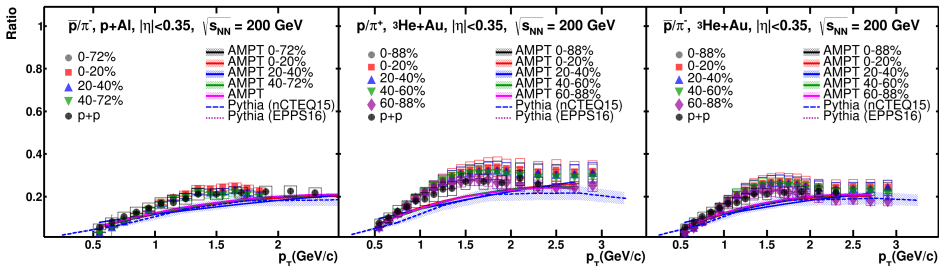


Сравнение измеренных значений ρ/π с расчетами моделей PYTHIA и AMPT в ρ +Al и ^3He +Au столкновениях

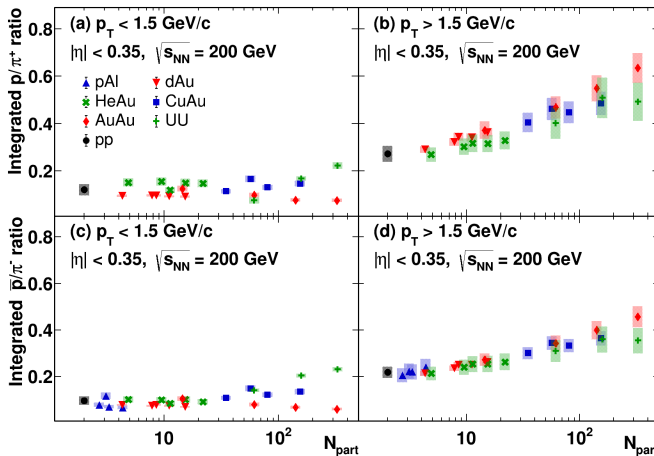


- КГП не образуется
- Объем КГП недостаточен для наблюдаемого увеличения выхода барионов.

Сравнение измеренных значений ρ/π с расчетами моделей PYTHIA и AMPT в $p+Al$ и ^3He+Au столкновениях

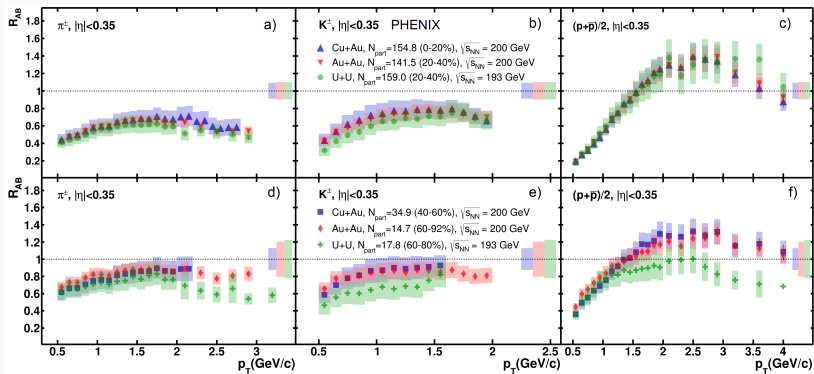


- КГП не образуется? PHENIX 2022г. – $\psi(2S)$ в $p+Al$, $p+Au$
- Объем КГП недостаточен для наблюдаемого увеличения выхода барионов

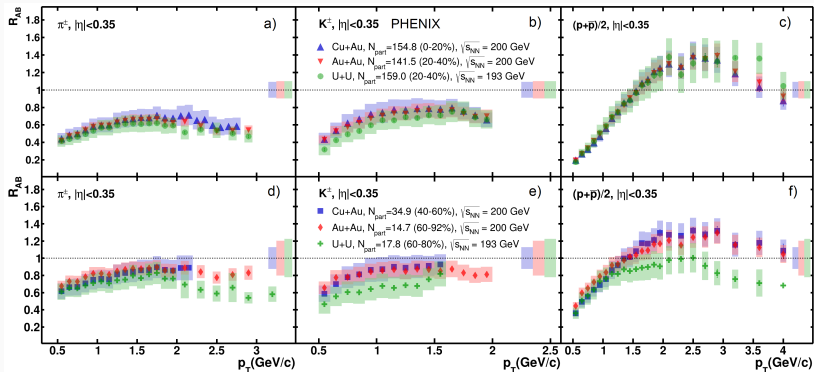


Можно интерпретировать как усиление роли процессов рекомбинации с увеличением количества нуклонов-участников $\langle N_{part} \rangle$.

Сравнение R_{AB} заряженных адронов в Cu+Au, Au+Au и U+U при схожих значениях $\langle N_{part} \rangle$

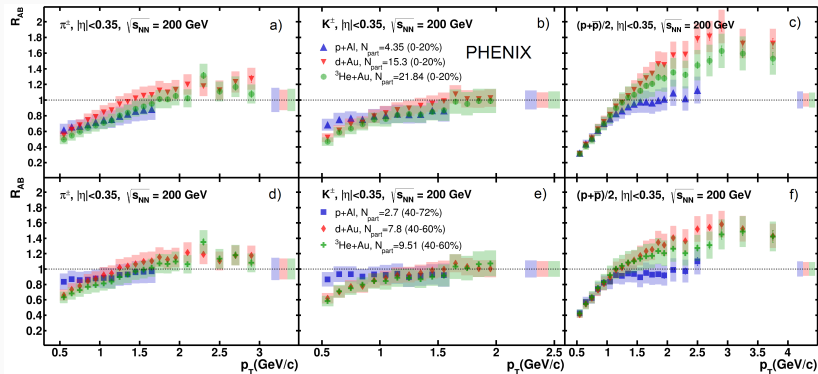


Сравнение R_{AB} заряженных адронов в Cu+Au, Au+Au и U+U при схожих значениях $\langle N_{part} \rangle$



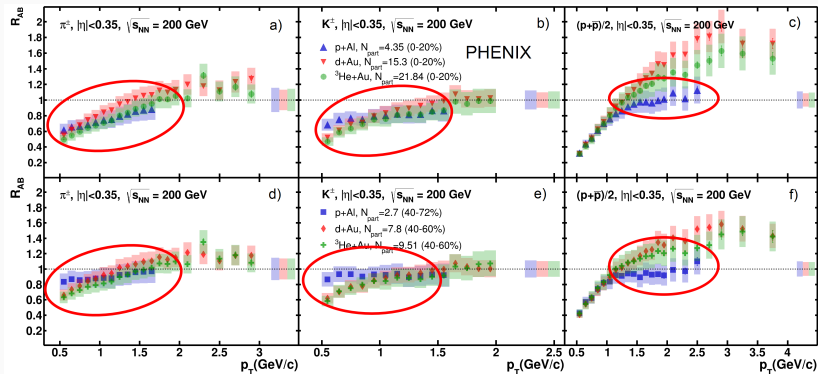
Значения R_{AB} определяются областью перекрытия сталкивающихся ядер и количеством нуклонов-участников и не зависят от геометрии столкновения.

Сравнение R_{AB} заряженных адронов в $p+Al$, $d+Au$ и ${}^3\text{He}+Au$ при схожих значениях $\langle N_{part} \rangle$



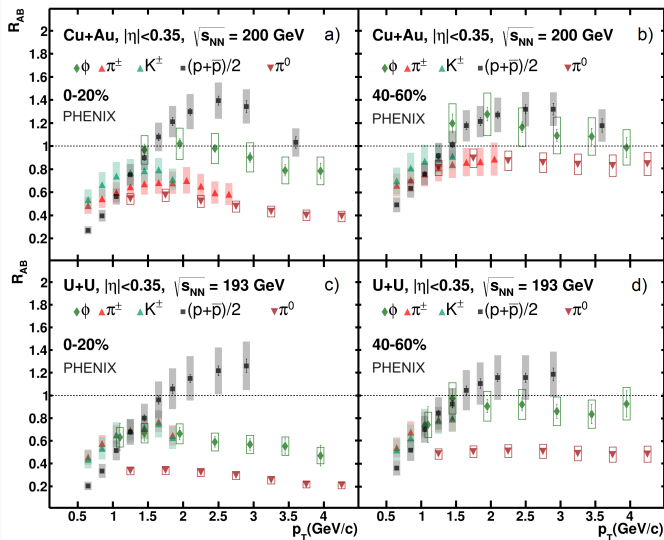
$p+Al$, π^\pm , K^\pm – наклон $R_{AB}(p_T)$
 $p+Al$, протоны – $R_{AB} \approx 1$

Сравнение R_{AB} заряженных адронов в $p+Al$, $d+Au$ и ${}^3\text{He}+Au$ при схожих значениях $\langle N_{part} \rangle$

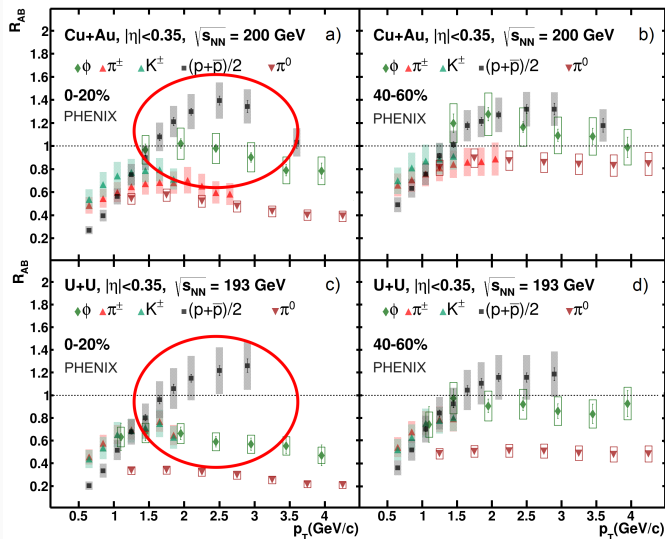


$p+Al, \pi^\pm, K^\pm$ – наклон $R_{AB}(p_T)$
 $p+Al$, протоны – $R_{AB} \approx 1$

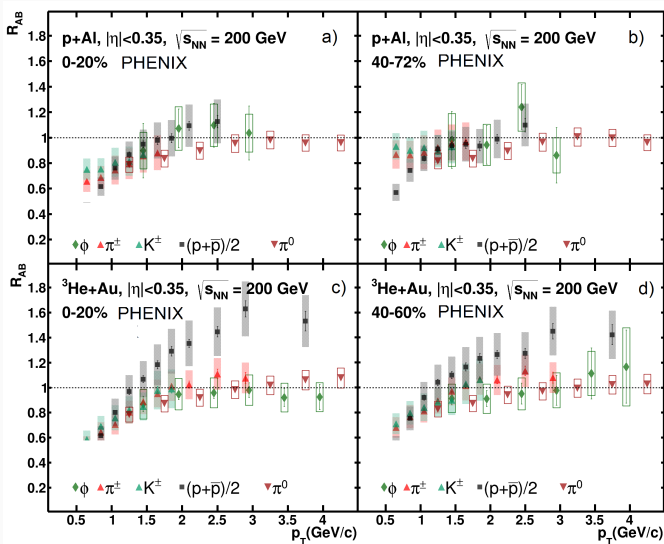
Факторы ядерной модификации R_{AB} легких адронов в Cu+Au и U+U столкновениях



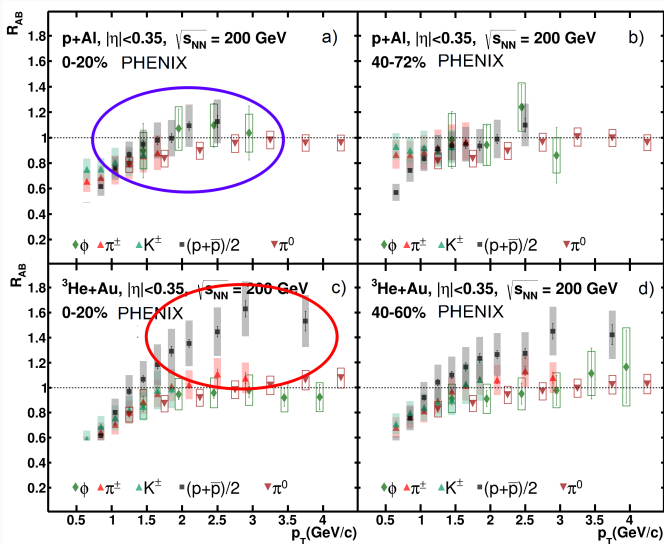
Факторы ядерной модификации R_{AB} легких адронов в Cu+Au и U+U столкновениях



Факторы ядерной модификации R_{AB} легких адронов в $p+Al$ и ${}^3He+Au$ столкновениях



Факторы ядерной модификации R_{AB} легких адронов в $p+Al$ и ${}^3He+Au$ столкновениях



Основные положения,
выносимые на защиту.



1. Впервые измеренные инвариантные спектры по поперечному импульсу, факторы ядерной модификации идентифицируемых заряженных адронов (π^\pm , K^\pm , p , \bar{p}), а также величины отношений выходов π^-/π^+ , K^-/K^+ , \bar{p}/p , K^+/π^+ , K^-/π^- , p/π^+ , \bar{p}/π^- в столкновениях $p+Al$, ${}^3He+Au$, $Cu+Au$ при энергии = 200 ГэВ и в столкновениях $U+U$ при энергии =193 ГэВ.
2. Значения температуры кинетического вымораживания (T_0) и средних скоростей коллективного потока частиц ($\langle u_t \rangle$), измеренные как функция от количества нуклонов-участников ($\langle N_{part} \rangle$) в $p+Al$, ${}^3He+Au$, $Cu+Au$ и $U+U$ столкновениях.
3. Особенности рождения π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} в ${}^3He+Au$, $Cu+Au$, $U+U$ столкновениях не зависят от геометрии области перекрытия сталкивающихся ядер, а определяются количеством нуклонов-участников.



4. В центральных столкновениях ${}^3\text{He}+\text{Au}$, $\text{Cu}+\text{Au}$, $\text{U}+\text{U}$ наблюдается эффект увеличенного выхода протонов и антипротонов, что может быть объяснено доминированием вклада процессов рекомбинации в образовании идентифицируемых заряженных адронов в диапазоне малых и промежуточных поперечных импульсов ($p_T < 4 \text{ ГэВ}/c$).
5. В $p+\text{Al}$ столкновениях, а также в периферических столкновениях ${}^3\text{He}+\text{Au}$, $\text{Cu}+\text{Au}$, $\text{U}+\text{U}$ эффект увеличенного выхода протонов и антипротонов не наблюдается, что может быть объяснено доминированием вклада процессов фрагментации в образовании идентифицируемых заряженных адронов в диапазоне промежуточных поперечных импульсов ($2 \text{ ГэВ}/c < p_T < 4 \text{ ГэВ}/c$).



1. Впервые измерены инвариантные спектры рождения по поперечному импульсу заряженных адронов (π^\pm , K^\pm , p , \bar{p}) в столкновениях $p+Al$, ^3He+Au , $Cu+Au$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и в столкновениях $U+U$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.
2. Впервые получены факторы ядерной модификации для π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} в столкновениях $p+Al$, ^3He+Au , $Cu+Au$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и в столкновениях $U+U$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.
3. Впервые измерены отношения выходов π^-/π^+ , K^-/K^+ , \bar{p}/p , K^+/π^+ , K^-/π^- , p/π^+ , \bar{p}/π^- в столкновениях $p+Al$, ^3He+Au , $Cu+Au$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и в столкновениях $U+U$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.



1. Полученные значения инвариантных спектров заряженных адронов могут быть использованы для уточнения параметров теоретических моделей, реализованных в пакетах прикладных программ, таких как AMPT, HIJING, PHSD и др. В частности, для уточнения радиуса рекомбинации в рекомбинационных моделях, реализованных в таких программных пакетах как AMPT, PHSD.
2. Методика измерения выходов заряженных адронов, представленная в данной работе, может быть применена в аналогичных исследованиях таких экспериментов, как SPD и MPD.

Достоверность



1. Ядро-2020. (Дубна, РФ)
2. ICPPA-2020., (Москва, РФ)
3. PhysicA.SPb 2020. (Санкт-Петербург, РФ)
4. Ядро-2021. (Санкт-Петербург, РФ)
5. PhysicA.SPb 2021. (Санкт-Петербург, РФ)
6. Lomonosov Conference. 2021 (Москва, РФ)
7. PhysicA.SPb 2022. (Санкт-Петербург, РФ)
8. ICPPA-2022. (Москва, РФ)
9. ICNFP-2022. (Крит, Греция)
10. Конференция имени Б. С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине"(Москва, РФ)
11. Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН (Дубна, РФ)

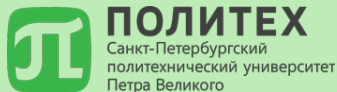


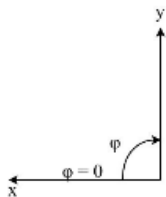
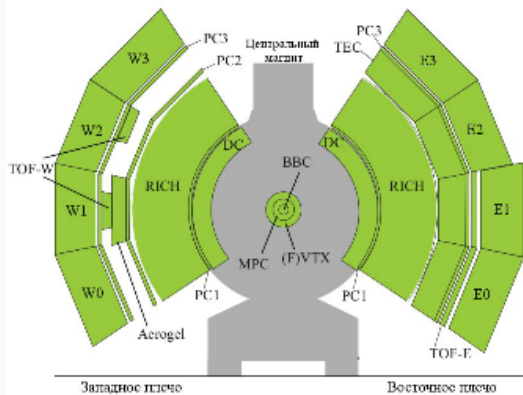
1. Identified charged-hadron production in $p+Al$, ^3He+Au and $Cu+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV and in $U+U$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=193$ GeV / L. D. M. [et al.] (PHENIX Collaboration) // Physical Review C. — 2024. — Vol. 109. — P. 054910.
2. Charged Hadron Production in $Cu+Au$ Collisions at 200 GeV in the PHENIX Experiment / L. D. M. [et al.] // Physics of Particles and Nuclei. — 2022. — Vol. 2, no. 53. — P. 261–264.
3. Comparative analysis of proton production as a function of quark content and collision geometry / L. D. M. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — (Scopus, WoS).
4. Charged pion, kaon, proton and antiproton production in large collision systems / L. D. M. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — (Scopus, WoS).



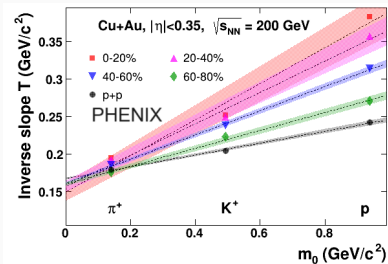
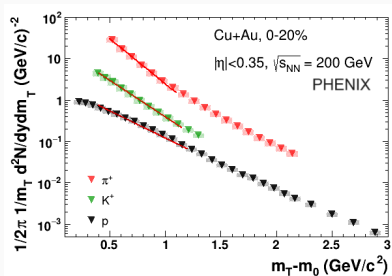
5. Influence of quark content and collision geometry on proton production in heavy ion collisions / L. D. M. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — (Scopus, WoS).
6. PHENIX Results on Hadron Production in Large Collision Systems / L. D. M. [et al.] // Moscow University Physics Bulletin. — 2022. — Vol. 77. — P. 232–233.
7. Measurement of Charged Hadron Production in Relativistic Ion Collision Systems / D. M. Larionova [et al.] // Physics of Particles and Nuclei. — 2023. — Vol. 54, no. 1. — P. 380–383
8. Recent Results from the PHENIX Experiment / L. D. M. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Vol. 87, no. 1. — P. 306–310

Спасибо за внимание!

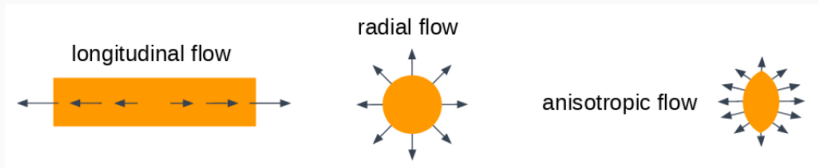




Измерены инвариантные p_T и m_T спектры для π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} в $p+Al$, ^3He+Au , $Cu+Au$ и $U+U$ столкновениях.



Модель радиально расширяющейся термализованной системы



$$\frac{1}{2\pi m_T} \frac{d^2 N}{dm_T dy} = \frac{1}{2\pi T(T+m_0)} \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{m_T - m_0}{T}\right)$$

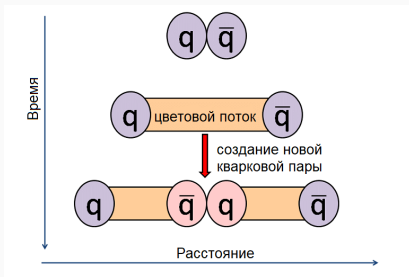
$$\langle E_{kinetic} \rangle = \langle E_{thermal} \rangle + \langle E_{collective} \rangle$$

$$T = T_0 + \langle u_t \rangle \cdot m_0$$

T_0 – температура кинетического «вымораживания»

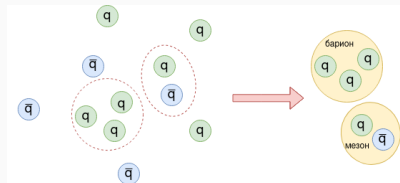
$\langle u_t \rangle$ – средняя скорость радиального потока частиц

Фрагментация

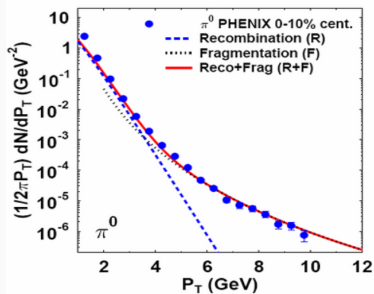
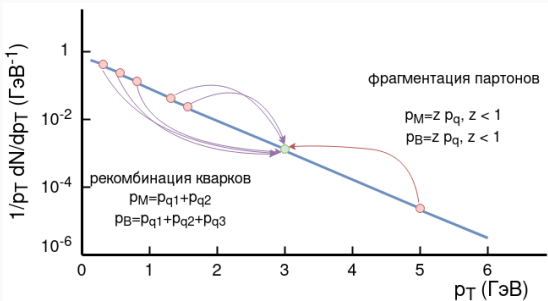


- Степенное убывание инвариантных p_T спектров;
- $p_T \gtrsim 3 \text{ ГэВ/с}$

Рекомбинация



- Экспоненциальное убывание инвариантных p_T спектров;
- $p_T \lesssim 3 \text{ ГэВ/с}$
- КГП



- Рекомбинация – $p_T \lesssim 3$ ГэВ/с
- Фрагментация – $p_T \gtrsim 3$ ГэВ/с

Согласно модели рекомбинации:

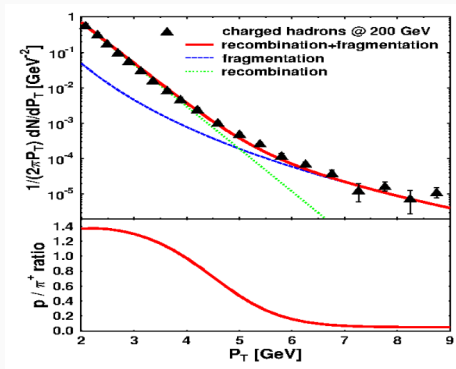
- импульс бариона:

$$p_B = p_{q1} + p_{q2} + p_{q3}$$

- импульс мезона:

$$p_M = p_{q1} + p_{q2}$$

- экспоненциальное убывание спектров



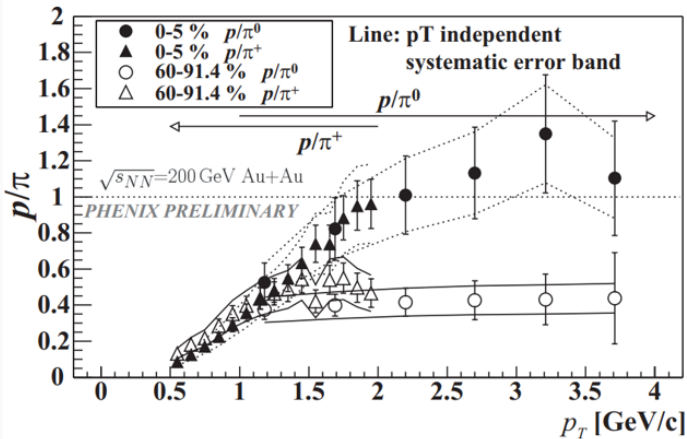
→ инвариантный p_T спектр барионов смещается относительно инвариантного p_T спектр мезонов в сторону больших p_T

→ при $1.5 \lesssim p_T \lesssim 5$ ГэВ/с наблюдается увеличение значений p/π

Признак образования КГП

Увеличенный выход барионов

«Барионная загадка» 2003 г. PHENIX



В $p + p$ столкновениях $p/\pi < 0.35$