

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

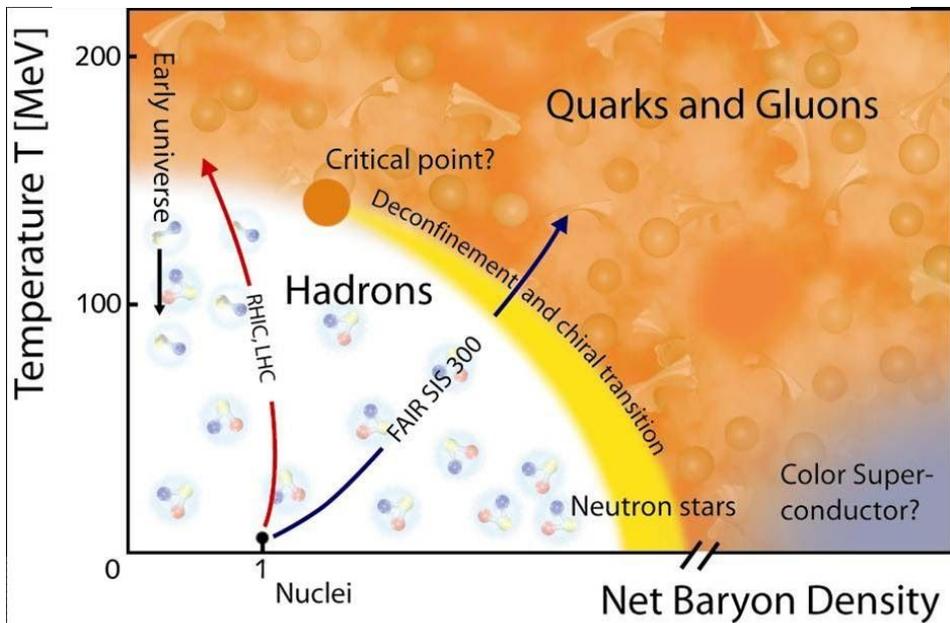
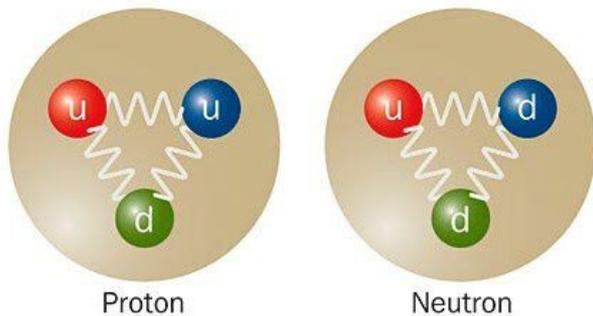
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

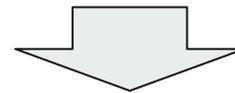
Эллиптические и треугольные потоки пионов, каонов и (анти)протонов в Au+Au столкновениях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 14.5 - 62.4$ ГэВ в эксперименте STAR

Аспирант гр. А21-121 Поваров А. С.

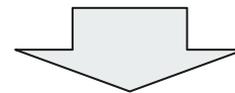
Кварк-глюонная материя: краткая справка



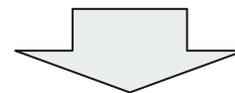
1950-ые года: Обсуждение горячей сильно взаимодействующей материи (Ферми, Ландау)



1960-ые года: Гелл-Манн предлагает теорию строения адронов - кварки и глюоны



1970-ые года: Поляков качественно описывает фазовый переход этой материи в рамках КХД, Сасскинд проводит вычисления на решетках

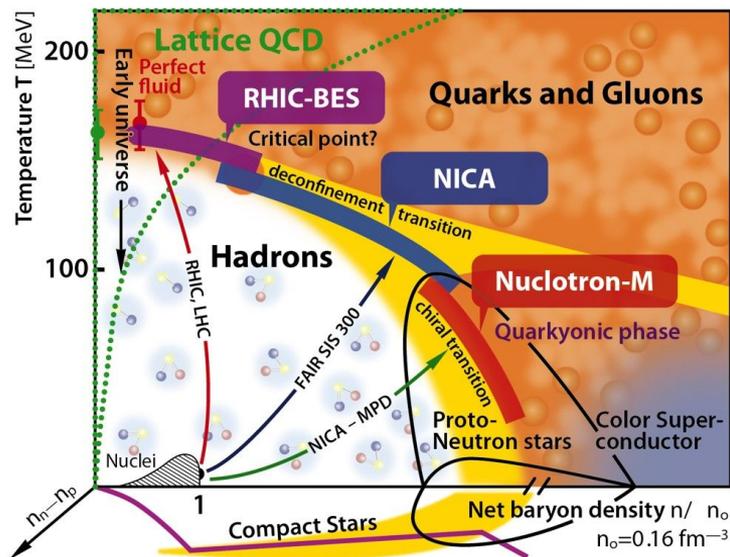


1980 - 2000-ые года: Эксперименты с ускорением тяжёлых ионов (SPS, RHIC)

Эксперименты по столкновению ионов



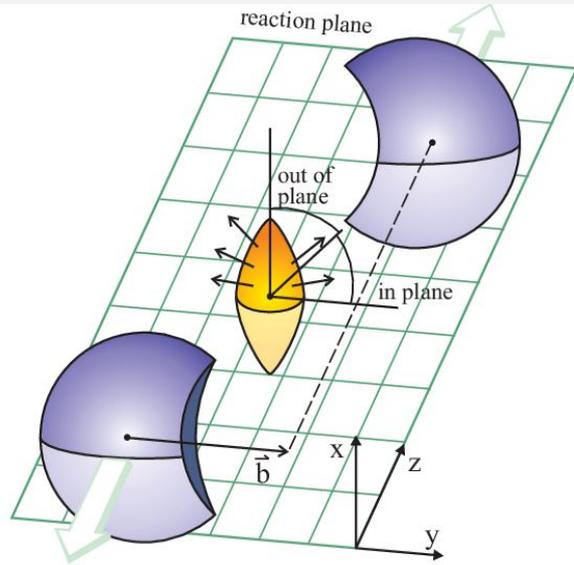
Ускорители тяжёлых ионов имеют кольцевую структуру для накопления и разгона пучков ионов.



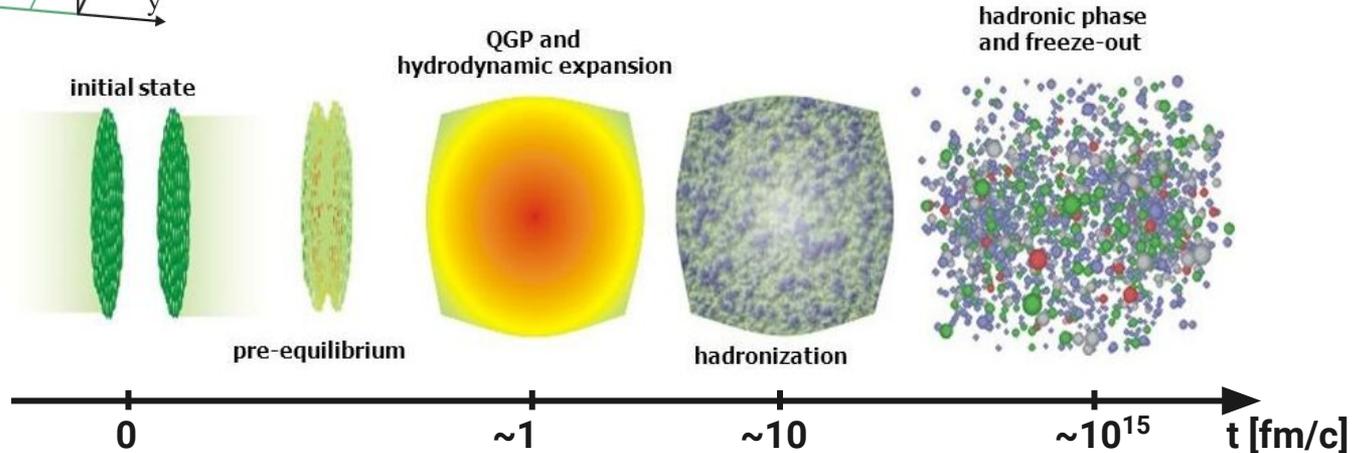
Пионеры в исследовании КГМ:
SPS, RHIC, LHC

Строящиеся эксперименты:
NICA, FAIR

Столкновения тяжёлых ионов

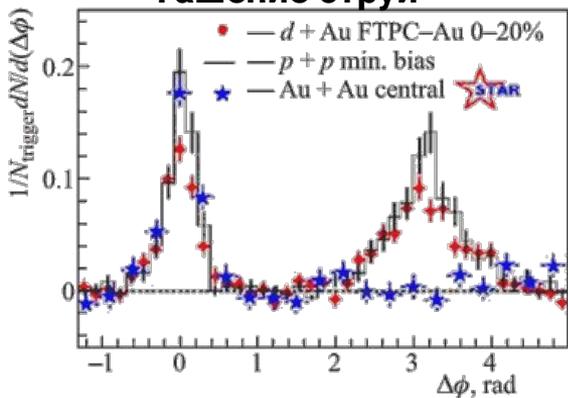


- Ядра протяженные объекты \Rightarrow образуется сильно сжатая и нагретая область
- Образовавшаяся система проходит несколько пространственно-временных стадий

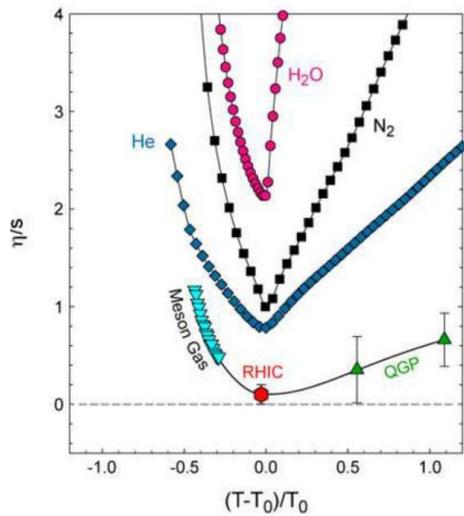


Сигналы КГМ

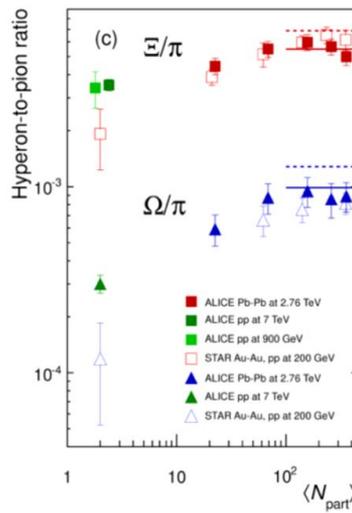
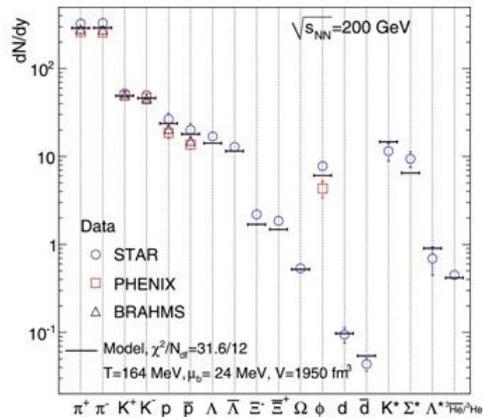
Гашение струй



Малое значение вязкости

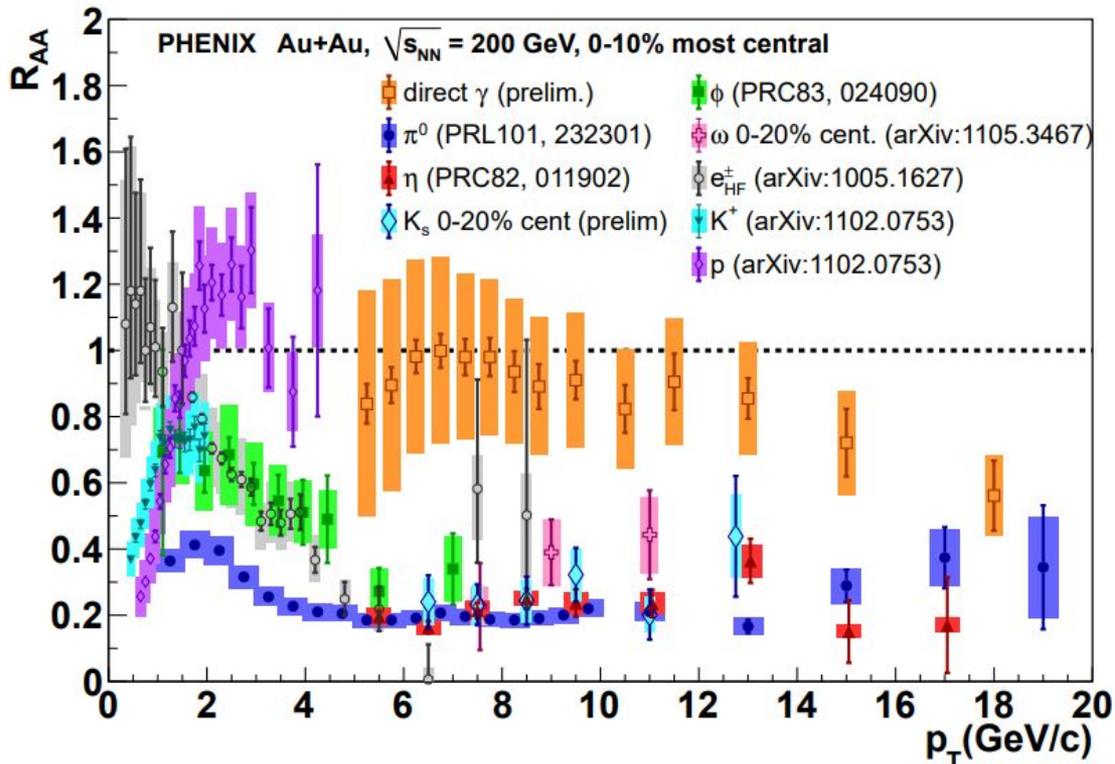


Выход адронов



- **Гашение струй** \Rightarrow плотная сильно взаимодействующая среда
- **Выходы адронов** согласуются с результатами термодинамической модели
- **Увеличенный выход странных частиц** \Rightarrow преодоление порога рождения s-кварка
- **Малое значение вязкости** \Rightarrow идеальная жидкость, коллективные эффекты

Подавление выхода жёстких частиц



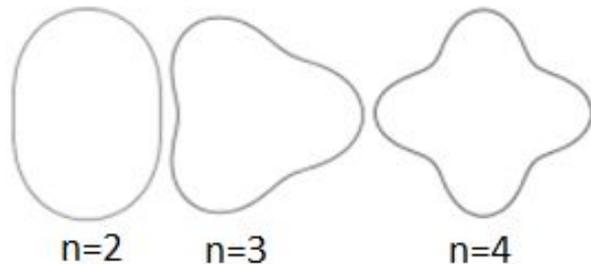
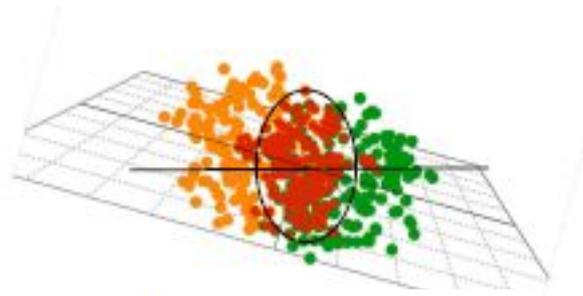
Фактор ядерной модификации:

$$R_{AA} = \frac{1}{\langle N_{part} \rangle} \frac{d^2 N_{AA} / dp_T d\eta}{d^2 N_{pp} / dp_T d\eta}$$

Отношение множественности частиц в AA- и pp-соударениях

Жёстких частицы претерпевают множественные вторичные рассеяния
 \Rightarrow наличие плотной горячей среды

Коллективные потоки

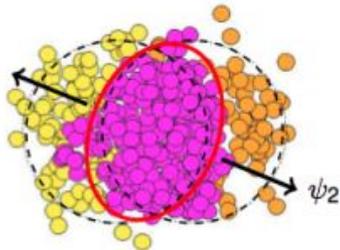


$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$

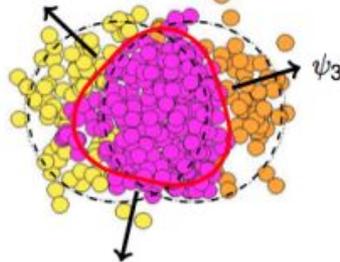
$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_T d p_T dy} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos(n(\phi - \Psi_{RP})) \right)$$

Начальный эксцентриситет (и сопутствующие ему флуктуации) ϵ_n преобразуется в анизотропию импульса v_n

v_2 - эллиптический

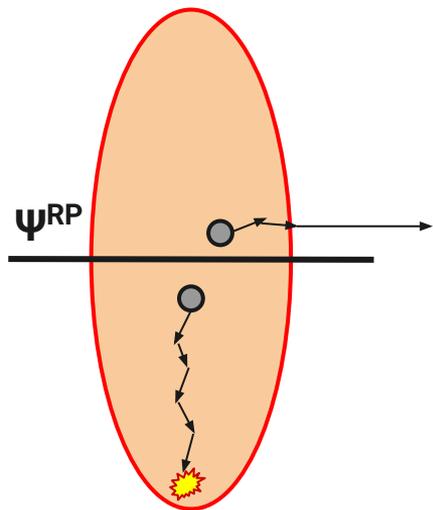


v_3 - треугольный



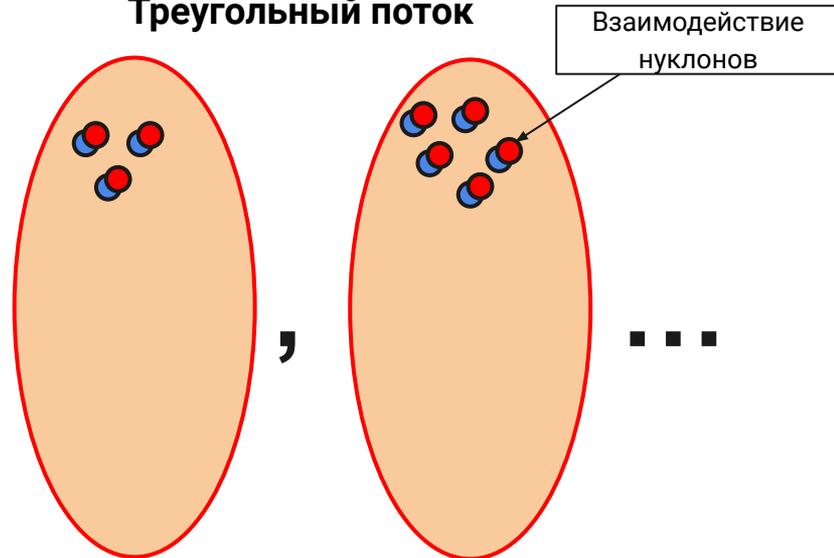
Эллиптический и треугольный

Эллиптический поток



Частицы, летящие перпендикулярно плоскости реакции, взаимодействуют с плотной горячей средой дольше

Треугольный поток

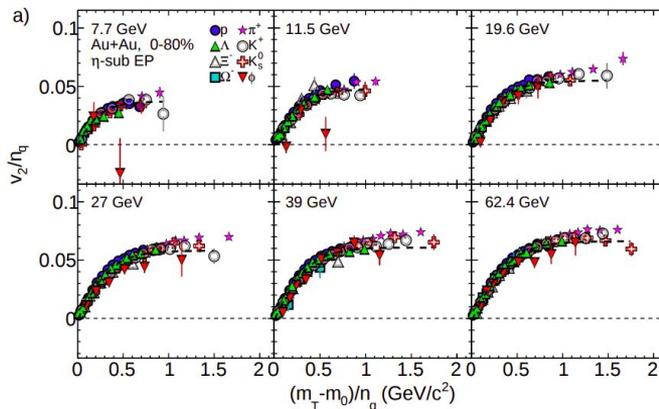
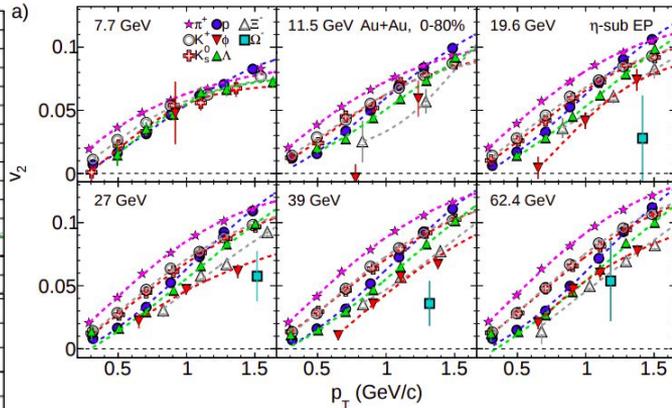
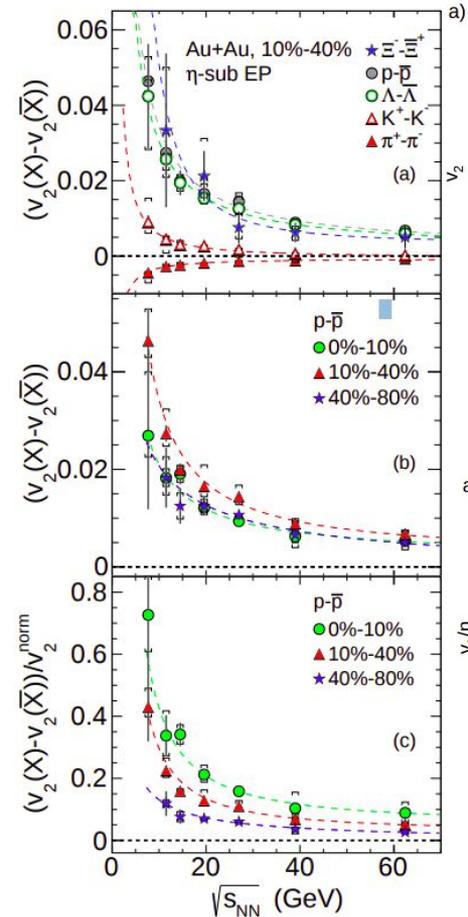


Чувствителен к флуктуациям нуклонов в начальном состоянии столкновения

Коллективные потоки на коллайдере RHIC

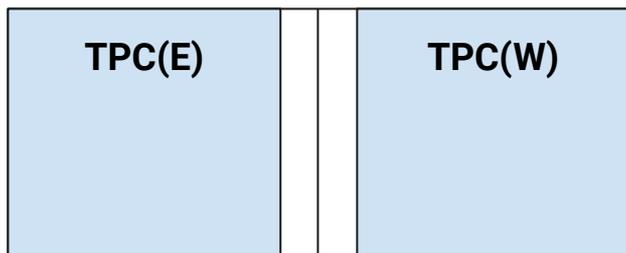
L. Adamczyk *et al.* Phys. Rev. C **93**, 014907

L. Adamczyk *et al.* Phys. Rev. C **88**, 014902



- $v_n(p_T, \text{centrality})$ - чувствителен к ранним стадиям столкновения.
- Можно извлечь ограничения на транспортные свойства: EOS, η/s , ζ/s .
- Поток лёгких адронов больше потока тяжёлых при одном и том же значении поперечного импульса при $p_T < 2$ ГэВ/с
- Различие потоков барионов и мезонов при $p_T > 2$ ГэВ/с
- Разница эллиптического потока частиц и античастиц больше для барионов чем для мезонов

Метод плоскости события



$-1 < \eta < -0.05$

$0.05 < \eta < 1$

TPC(E) half ($\eta < 0$) $\rightarrow \eta_-$

TPC(W) half ($\eta < 0$) $\rightarrow \eta_+$

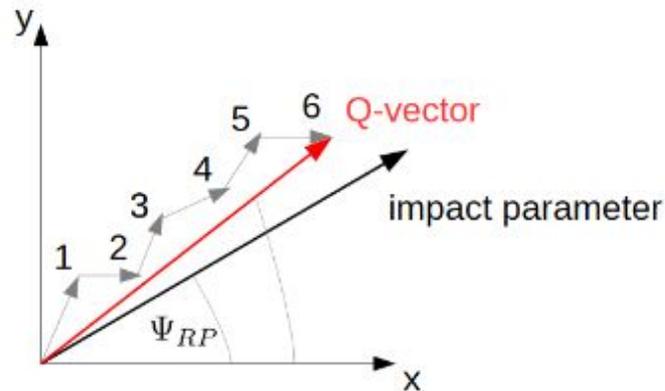
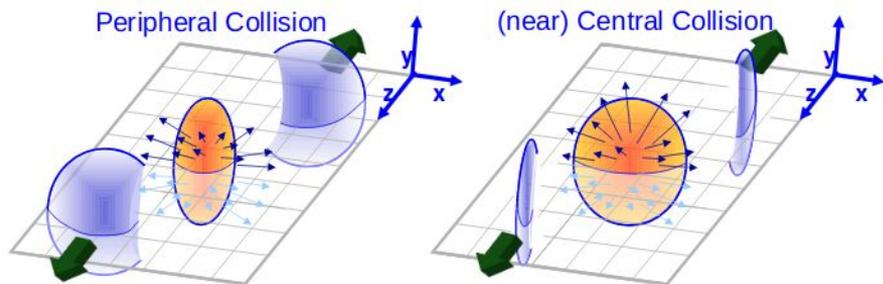
Коэффициент потока:

$$v_n = \frac{\langle \cos[n(\phi_{\eta_{\pm}} - \Psi_{n,\eta_{\mp}})] \rangle}{Res\{\Psi_n\}}$$

Разрешение плоскости события:

$$Res\{\Psi_n\} = \sqrt{\langle \cos[n(\Psi_{n,\eta_+} - \Psi_{n,\eta_-})] \rangle}$$

Угол плоскости события: $tg(n\Psi_n) = \frac{Q_{ny}}{Q_{nx}} = \frac{\sum_i \omega_i \sin(n\phi_i)}{\sum_i \omega_i \cos(n\phi_i)}$





Запасные слайды

Цель и задачи научной работы

Цель работы:

Определение характеристик кварк-глюонной материи путем исследования эллиптических и треугольных потоков пионов, каонов и (анти)протонов, образующихся в столкновениях ядер золота при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 14.5 - 62.4$ ГэВ

Задачи работы:

- Идентификация пионов, каонов и (анти)протонов по данным время-проекционной камеры и времяпролетной системы
- Измерение коэффициентов коллективных потоков v_2 и v_3 пионов, каонов и (анти)протонов, рождённых в столкновениях ядер золота при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 14.5 - 62.4$ ГэВ на установке STAR методом плоскости реакции
- Исследование зависимости эллиптического и треугольного потоков от поперечного импульса и типа частицы. Оценка энергетической зависимости разностей коэффициентов потока v_n для частиц и античастиц

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна:

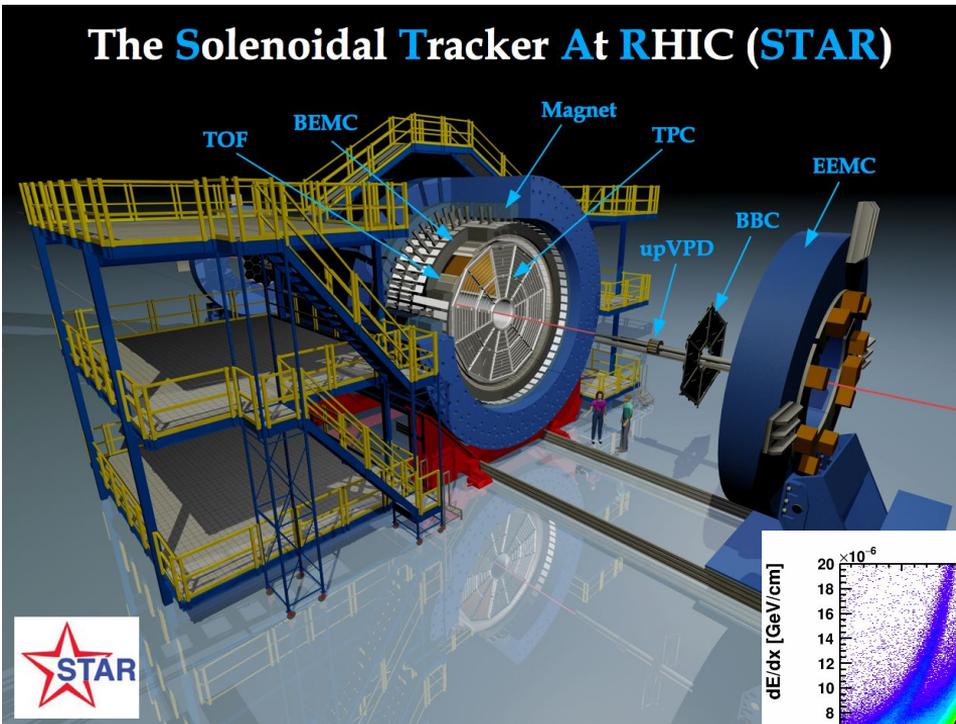
Впервые получены зависимости коэффициентов треугольного потока v_3 от поперечного импульса и типа частицы, а также энергетическая зависимость разности v_3 частиц и античастиц для центральных и средне центральных столкновений при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 14.5 - 62.4$ ГэВ на установке STAR.

Практическая значимость:

Полученные значения коэффициентов эллиптического и треугольного потоков могут быть использованы для улучшения Монте-Карло генераторов взаимодействий, а также современных моделей множественного рождения частиц.

Эксперимент STAR

The Solenoidal Tracker At RHIC (STAR)



Время-проекционная камера (TPC):

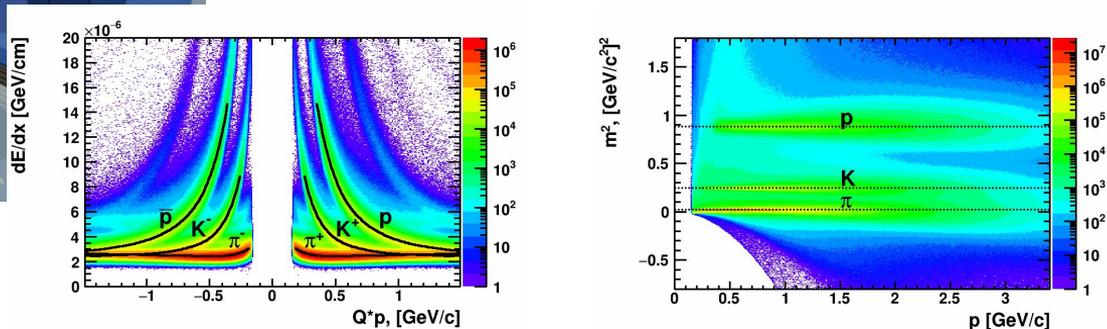
- Регистрация заряженных частиц с $|\eta| < 1$, $0 < \varphi < 2\pi$
- Для идентификации используется информация об удельных потерях энергии dE/dx

Времяпролетная система (TOF):

- $|\eta| < 0.9$, $0 < \varphi < 2\pi$
- Идентификация по времени пролёта

Наборы данных:

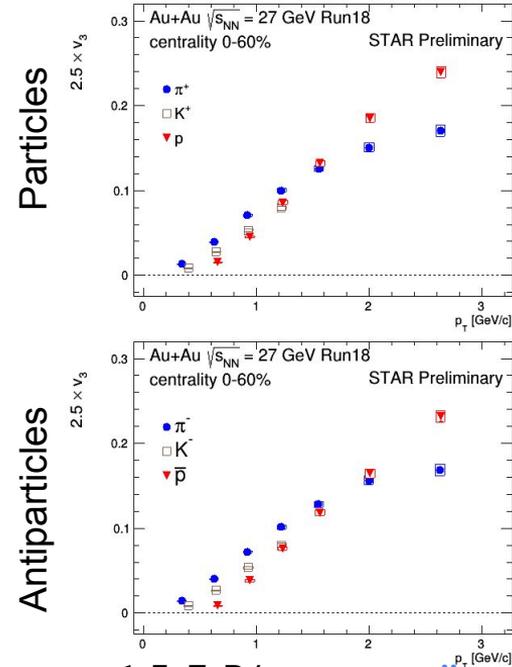
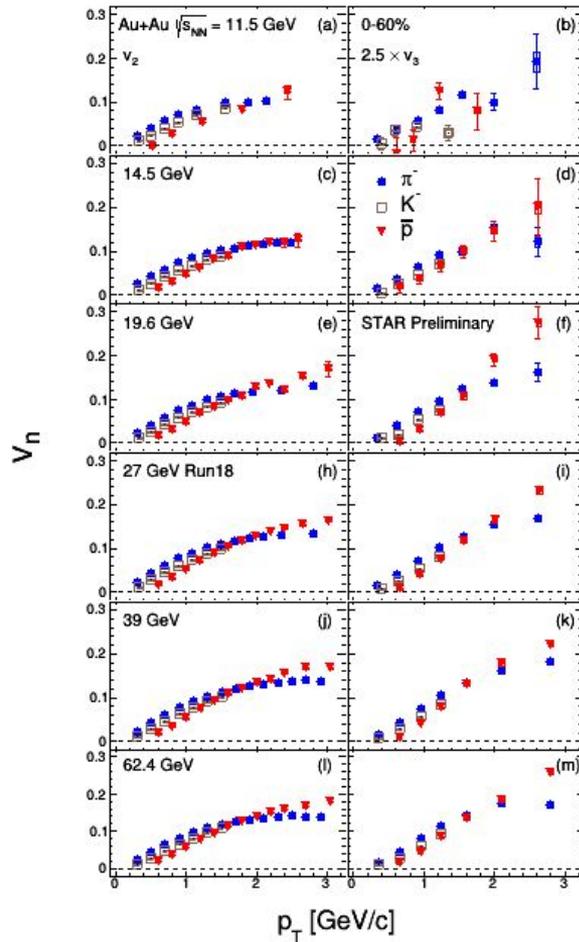
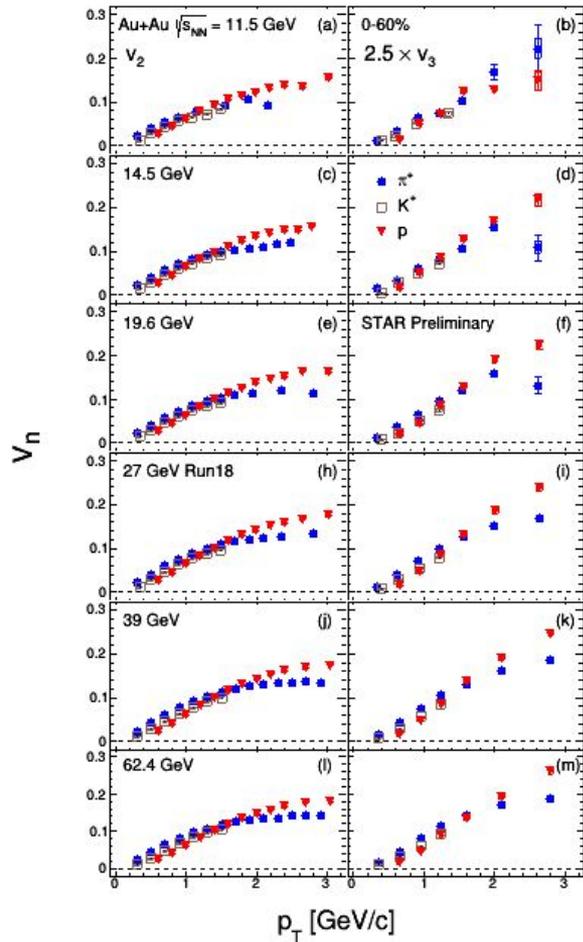
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}} = 14.5 - 62.4$ ГэВ



$v_2(p_T)$ и $v_3(p_T)$ идентифицированных адронов

Particles

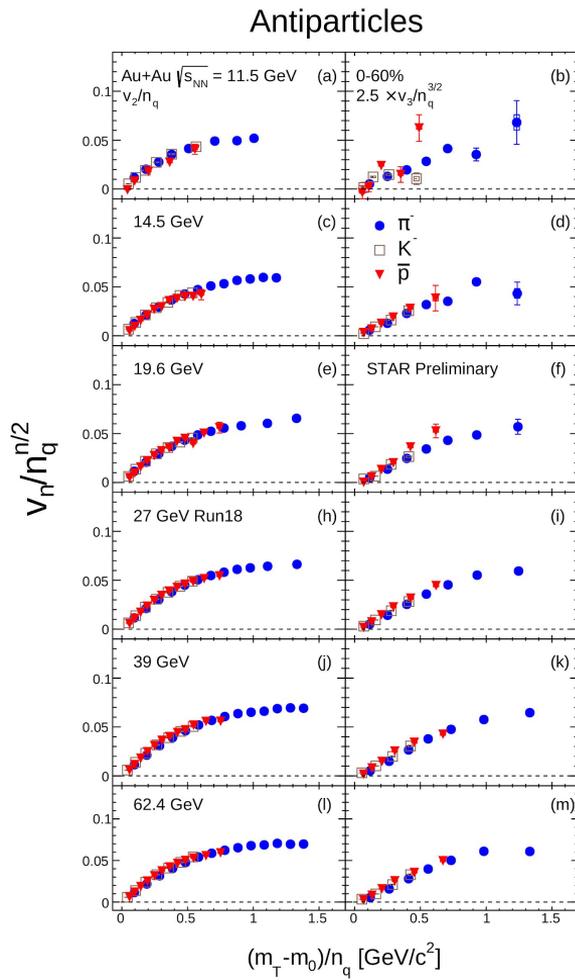
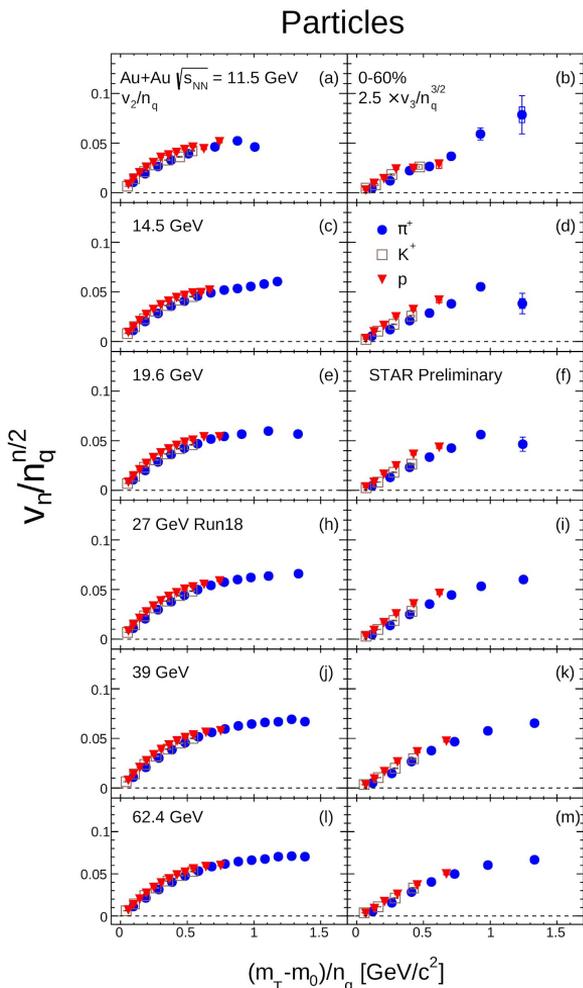
Antiparticles



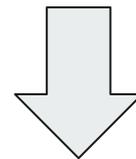
При $p_T < 1.5$ ГэВ/с поток лёгких адронов больше потока тяжёлых

Различие потоков барионов и мезонов при $p_T > 2$ ГэВ/с

Скейлинг на количество валентных кварков



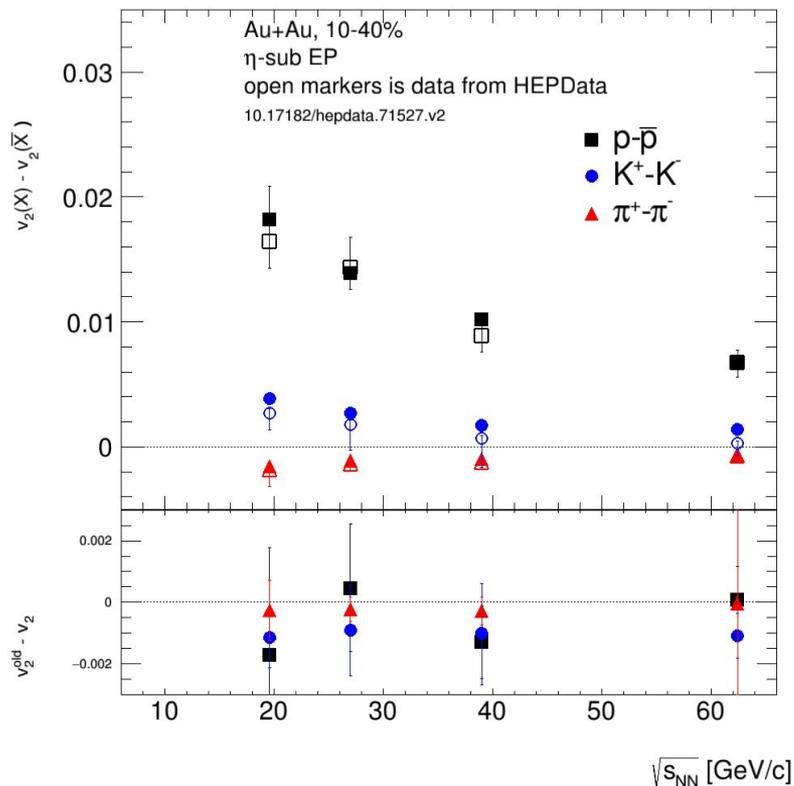
- Данный скейлинг был выполнен для v_2 и v_3 частиц и античастиц
- Скейлинг сохраняется лучше для высоких энергий



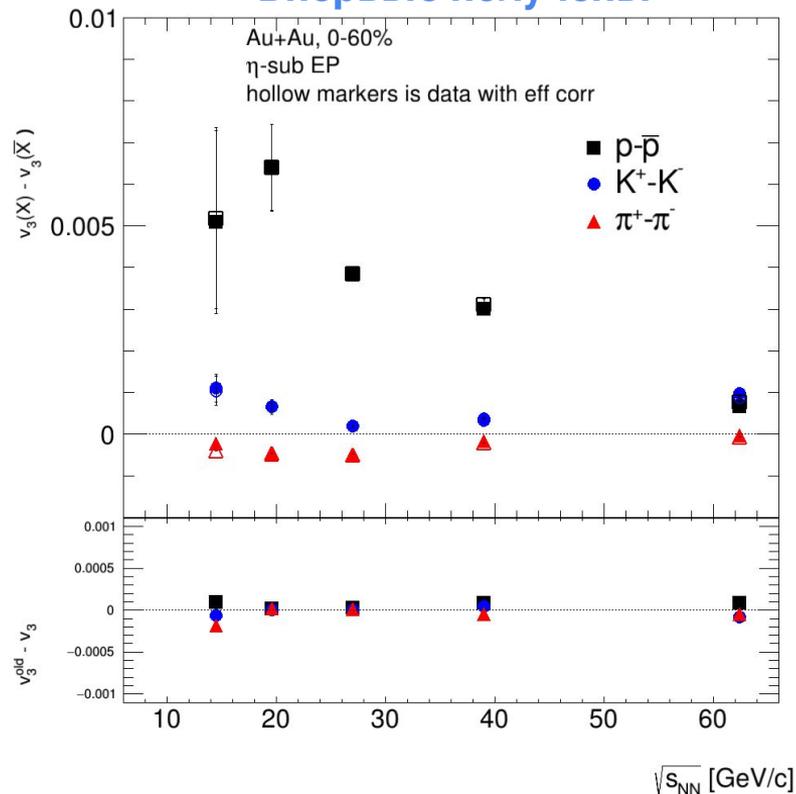
Коллективные эффекты зарождаются на стадии деконфаймента кварков и глюонов

Энергетическая зависимость разности v_n частиц и античастиц

STAR Collaboration, Phys. Rev. C 93, (2016) 014907



Впервые получены



Разность v_n частиц и античастиц увеличивается с уменьшением энергии столкновения.
Абсолютная величина разницы больше для протонов и антипротонов чем для π^\pm , K^\pm .

Заключение

Были представлены результаты v_2, v_3 в столкновениях золота при $\sqrt{s_{NN}} = 14.5 - 62.4$ ГэВ:

- При $p_T < 1.5$ ГэВ/с при одном и том же значении поперечного импульса поток $v_n(p_T)$ уменьшается с ростом массы адрона
- Наблюдается различие между потоками барионов и мезонов при $p_T > 2$ ГэВ/с
- Был выполнен скейлинг на количество валентных кварков, который интерпретируется как признак того, что коллективные эффекты зарождаются на партонной стадии. Данный скейлинг лучше сохраняется для более высоких энергий.
- Разность v_n частиц и античастиц увеличивается с уменьшением энергии столкновения и по модулю больше для протонов и антипротонов для π^\pm, K^\pm .
- **Полученные результаты треугольного потока являются новыми для данного диапазона энергий**

Планы:

- Измерение коэффициентов потоков в Монте-Карло генераторе EPOS4 и сравнение с экспериментальными результатами
- Публикация результатов (PRC)
- Выступление на конференции ICPPA-2024

Апробация работы

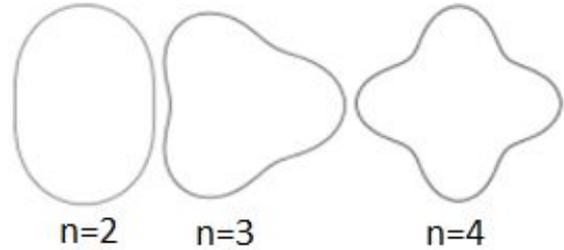
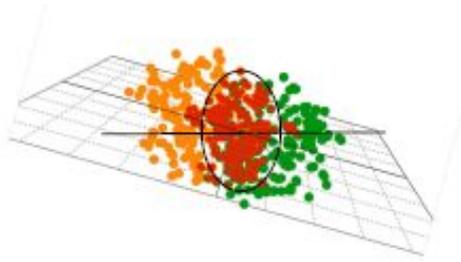
Результаты данной работы представлялись:

- На рабочих совещаниях коллаборации STAR
- На международных конференциях:
 - LXXI Международная конференция “Ядро-2021: Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии” (Санкт-Петербург, 2021)
 - LXXII Международная конференция “Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения” (Москва, 2022)

Публикации:

- Povarov A. (for the STAR collaboration). Scaling of Collective Flow of Charged and Identified Hadrons in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 11.5 - 62.4$ GeV from the STAR Experiment // Physics of Particles and Nuclei – 2023. – Vol. 54, No. 4. – p. 619–623.
- Povarov A. (for the STAR collaboration). Energy Dependence of Triangular Flow of Identified Hadrons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 14.5 - 62.4$ GeV from the STAR Experiment // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Vol. 85, No. 6. – p. 992–998.

Коллективные потоки

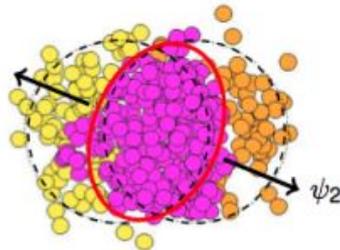


$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$

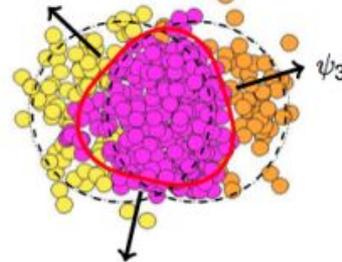
$$\frac{dN}{d\phi} \approx (1 + 2 \sum_{n=1} v_n \cos[n(\phi - \Psi_n)])$$

Начальный эксцентриситет (и сопутствующие ему колебания) ϵ_n преобразуется в анизотропию импульса v_n

v_2 - эллиптический



v_3 - треугольный



Отбор событий

Au+Au	$ Vz $, см	$ Vr $, см	Смещение по Vy , см	До отбора	После отбора
Run10 11.5 GeV	< 50	< 2	0.0	12M	10M
Run14 14.5 GeV	< 70	< 1	-0.89	28M	24M
Run11 19.6 GeV	< 70	< 2	0.0	25M	21M
Run10 27 GeV	< 70	< 2	0.0	74M	62M
Run18 27GeV	< 70	< 2	0.0	550M	460M
Run10 39 GeV	< 40	< 2	0.0	126M	105M
Run10 62.4 GeV	< 40	< 2	0.0	56M	47M

Отбор треков и идентификация частиц

Отбор треков:

- Первичные треки
- $|\eta| < 1$
- $DCA < 1 \text{ cm}$ ($\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$)
- $N_{\text{hits}} > 15$
- $N_{\text{hits}}/N_{\text{hitsPoss}} > 0.52$

Идентификация заряженных частиц:

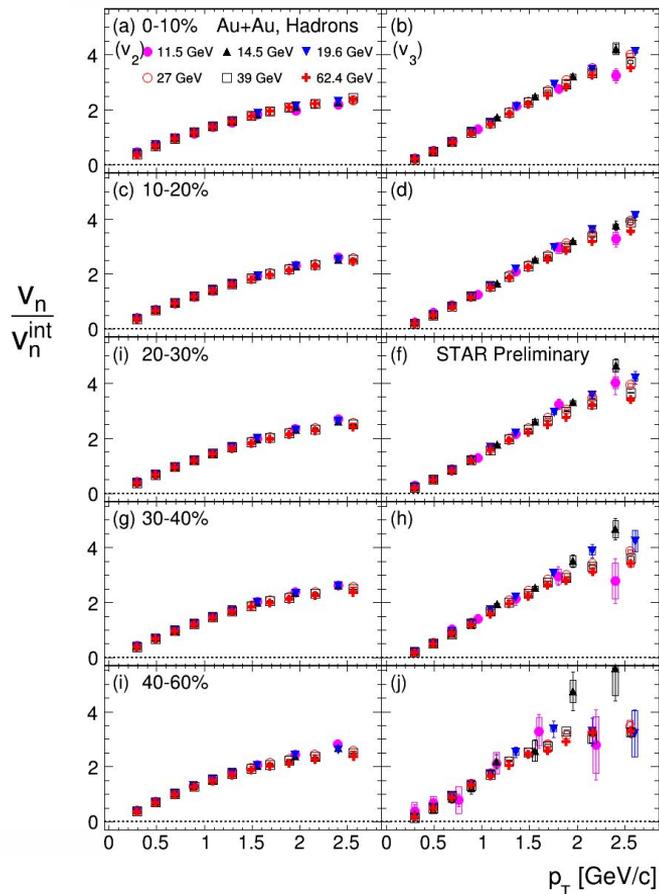
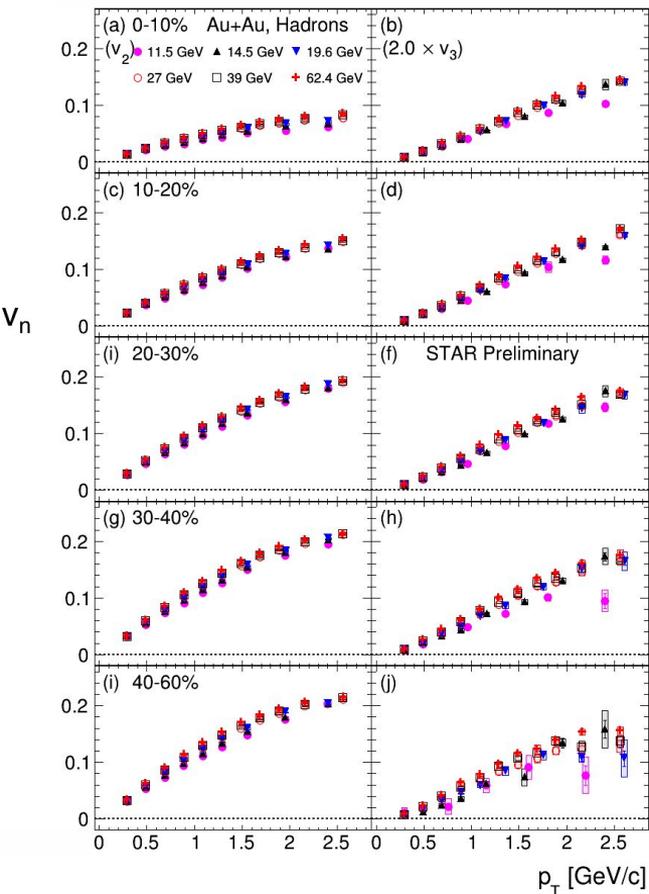
- dE/dx (TPC): $|\ln\sigma| < 1.5$ (для 27 GeV и 62.4 GeV)
- dE/dx (TPC): $|\ln\sigma| < 3$ (для остальных)
- Идентификация по TOF:

$$-0.15 < m_\pi^2 < 0.1$$

$$0.2 < m_K^2 < 0.32$$

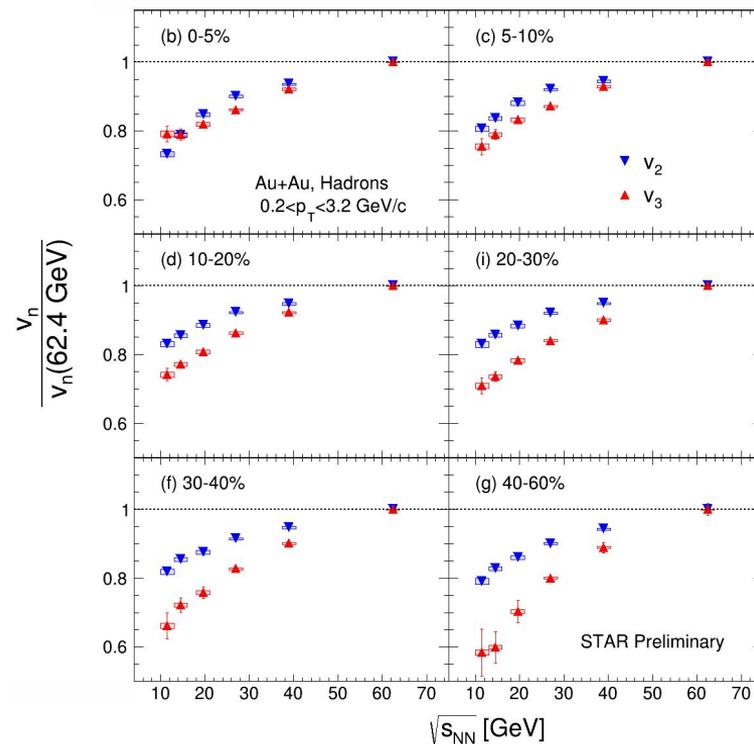
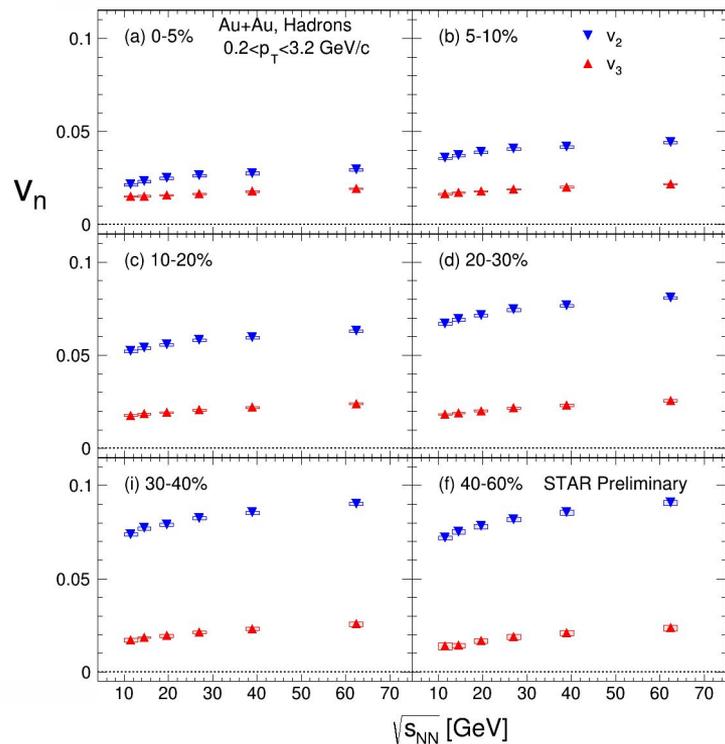
$$0.74 < m_p^2 < 1.2$$

$v_2(p_T)$ и $v_3(p_T)$ заряженных адронов как функция p_T



- Эллиптический поток зависит от центральности сильнее чем треугольный
- При нормировке на усредненное значение потока зависимости имеют похожую форму для каждой центральности и энергии

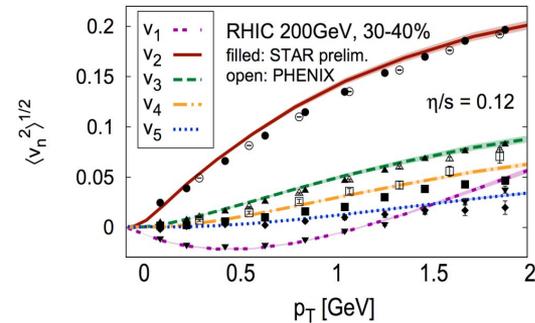
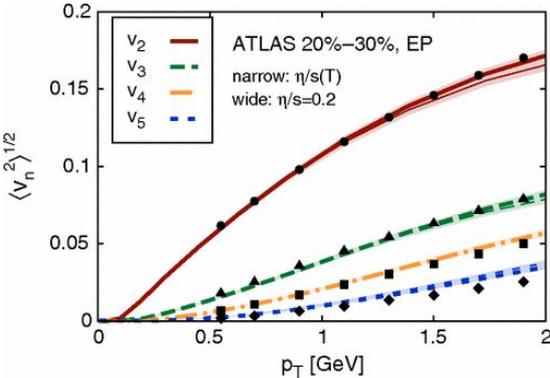
$v_2(p_T)$ и $v_3(p_T)$ заряженных адронов как функция энергии столкновения



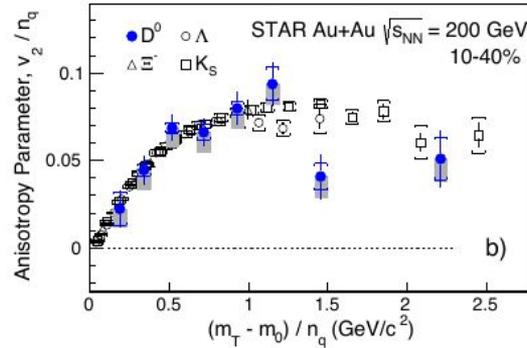
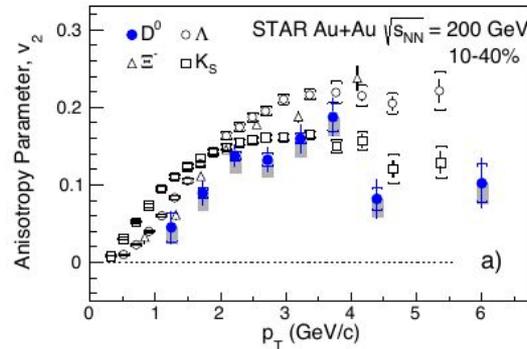
Значения эллиптического и треугольного потоков увеличиваются при увеличении энергии столкновения.

Коллективные потоки на RHIC и LHC

Gale et al., Phys. Rev. Lett. 110, 012302



STAR PRL118 (2017) 212301



$v_n(p_T, \text{centrality})$ - чувствителен к ранним стадиям столкновения.

Можно извлечь ограничения на транспортные свойства: EOS, η/s , ζ/s .

Поток лёгких адронов больше потока тяжёлых при одном и том же значении поперечного импульса при $p_T < 2$ ГэВ/с

Различие потоков барионов и мезонов при $p_T > 2$ ГэВ/с

Цель работы: изучение эллиптического и треугольного потоков заряженных и идентифицированных адронов и скейлингов при энергиях 14.5 – 62.4 ГэВ на пару нуклонов по данным эксперимента STAR

Содержание



- Коллективные потоки на RHIC и LHC
- Эксперимент STAR
- Метод измерения коллективных потоков
- Результаты
- Заключение