

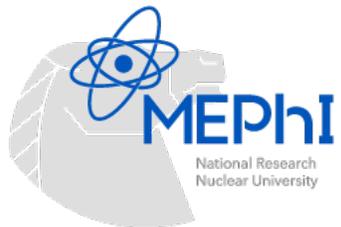
Анизотропные коллективные потоки в энергетическом диапазоне ускорительных комплексов Nuclotron-NICA

Петр Парфенов

НИЯУ МИФИ

Семинар ИЯИ РАН

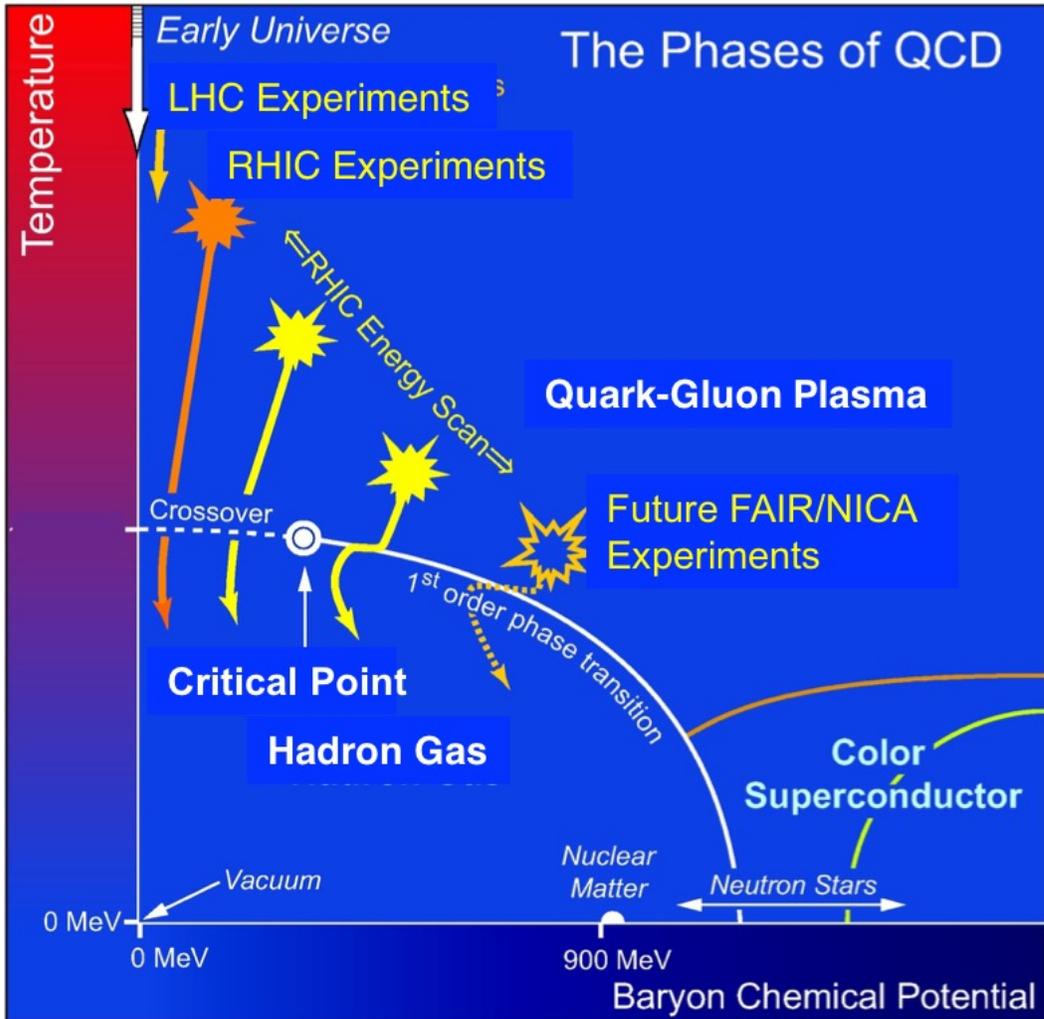
17 мая 2022



Краткое содержание

- Введение
- Анизотропные потоки при энергиях столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 4.5 - 11.5$ ГэВ: сравнение гибридных и адронных/каскадных моделей с данными
- Анизотропные потоки при энергиях столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 2.4 - 4.5$ GeV: сравнение адронных моделей с разными EOS vs. data from HADES and STAR BES FXT
- Что могут дать детальные измерения потоков $v_n(p_T, y)$ при энергиях Nuclotron-NICA?
- Заключение

Фазовая диаграмма КХД



Фазовая диаграмма сильновзаимодействующей материи

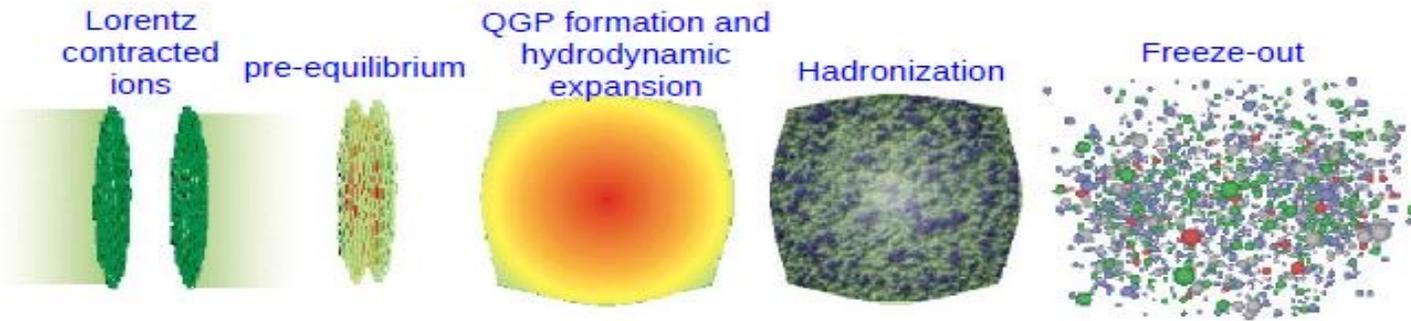
Кварк-Глюонная Материя (QGM)

E. Shuryak, Phys. Rep. 61 (1979) 71

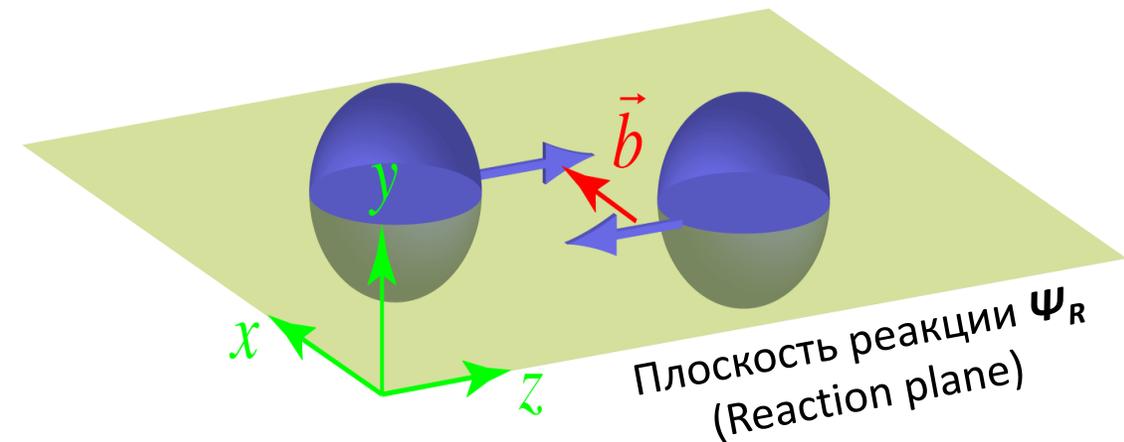
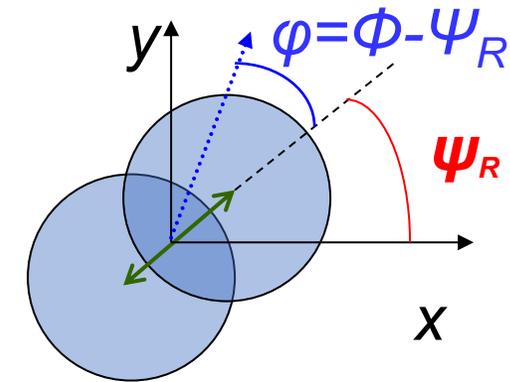
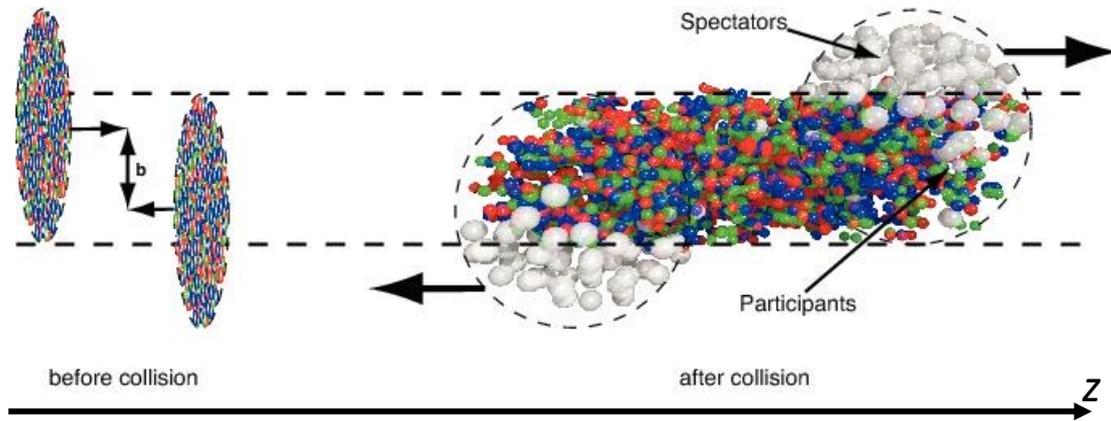
Экстремально возбуждённая материя из свободных кварков, антикварков и глюонов

- Критическая плотность энергии: $\sim 1 \text{ ГэВ/фм}^3$ (3.6×10^6 тонн/мм³)
 - $\sim 3.6 \times 10^{13} \rho_s$ (ρ_s – плотность материи в центре Солнца)
- Критическая температура: $\sim 170\text{-}200 \text{ МэВ}$ ($2.3 \times 10^{12} \text{ К}$)
 - $\sim 1.1 \times 10^5 T_s$ (T_s – температура материи в центре Солнца)
- Высокая T , малый μ_B – RHIC, LHC ($\sqrt{s_{NN}} \geq 200 \text{ ГэВ}$)
 - Фазовый переход типа «кроссовер»
- Широкая область (T, μ_B) – RHIC BES, SPS, NICA, Nuclotron, FAIR
 - Фазовый переход 1-го рода, критическая точка (?)

Геометрия ядро-ядерных столкновений



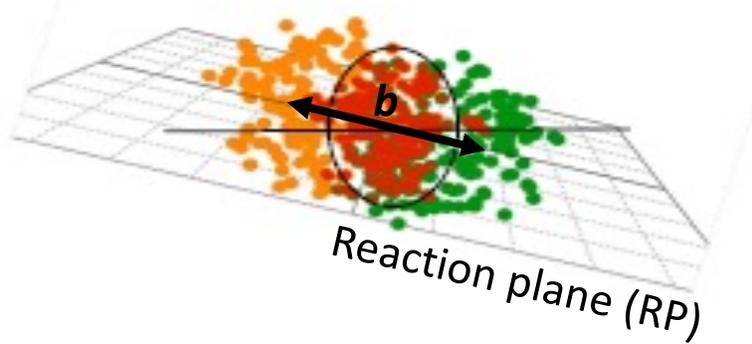
Основные этапы эволюции ядро-ядерного столкновения



- **Центральные столкновения ($b=0$):** много рожденных частиц (участников), мало нуклонов-спектаторов
- **Периферические столкновения ($b \leq 2R$):** мало рожденных частиц (участников), много нуклонов-спектаторов

Анизотропные коллективные потоки

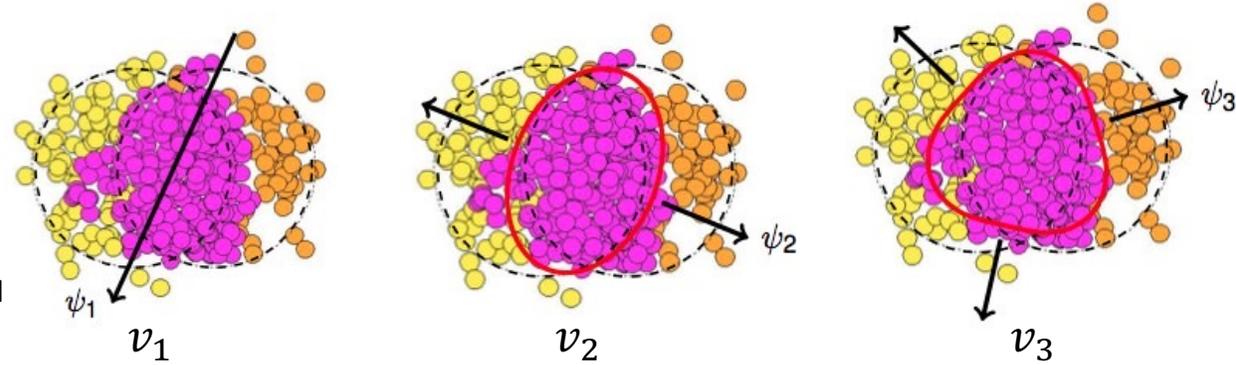
Анизотропия начальной геометрии



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

Многочисленные перерасеяния в области перекрытия

Импульсная азимутальная анизотропия частиц

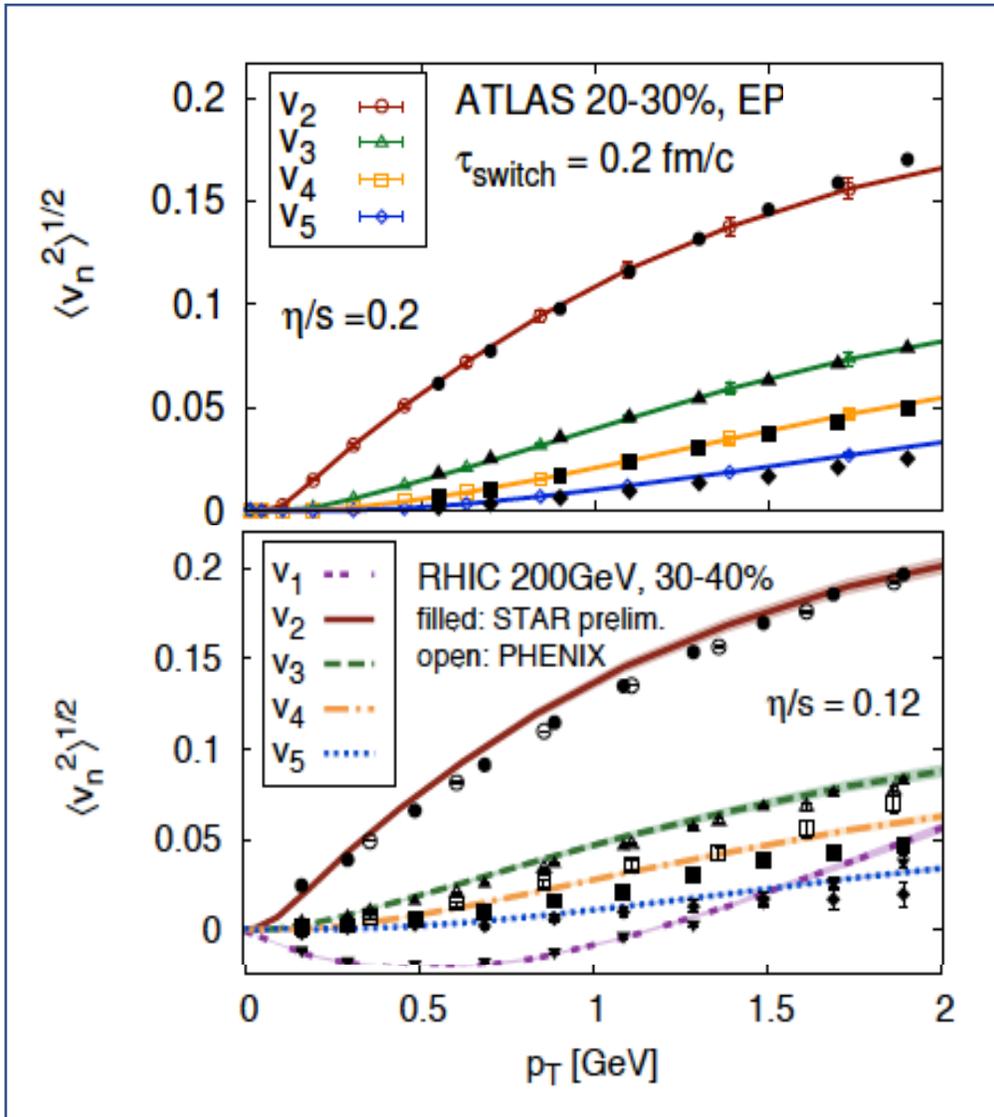


$$\frac{dN}{d\phi} \propto \left(1 + 2 \sum_{n=1} v_n \cos[n(\phi - \Psi_n)] \right) \quad v_n = \langle \cos[n(\phi - \Psi_{RP})] \rangle$$

v_1 - прямой (направленный) поток, v_2 - эллиптический поток, v_3 - треугольный поток

Анизотропия начальной геометрии (и ее флуктуаций) через взаимодействия рожденных частиц в области перекрытия двух ядер приводят к азимутальной анизотропии частиц в импульсном пространстве

Анизотропные потоки при энергиях top RHIC/LHC



$v_n(p_T, \text{centrality})$ чувствителен к начальным этапам ядро-ядерного столкновения (EOS, η/s , ζ/s , etc.)

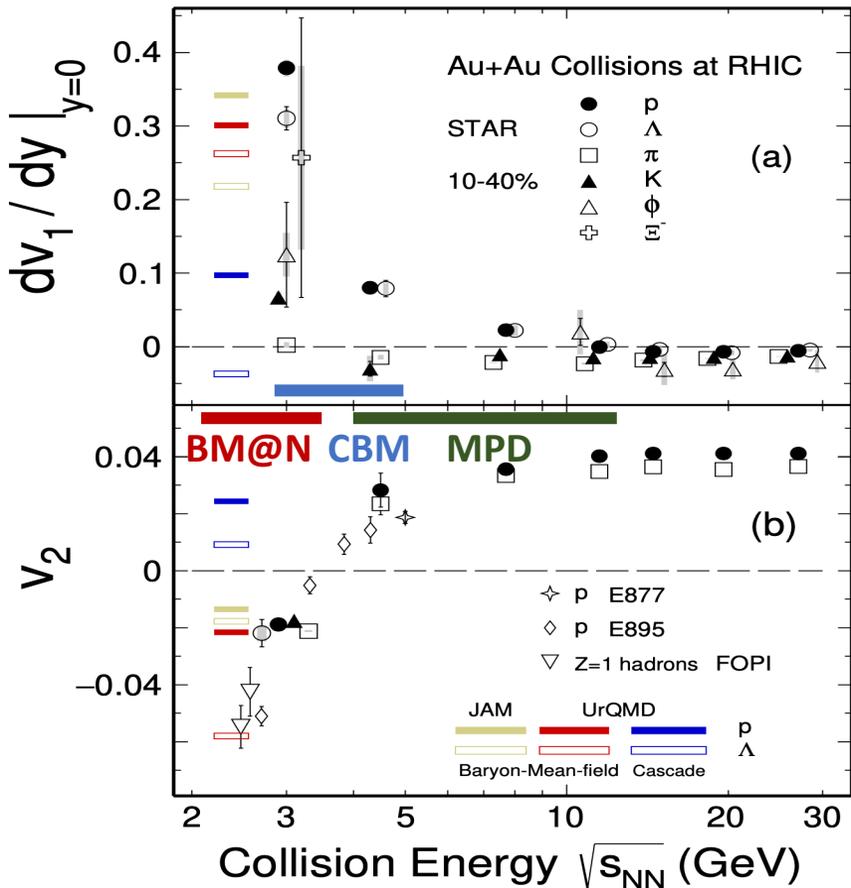
Гидродинамические модели хорошо описывают потоки заряженных адронов разных гармоник v_n ($n=1, \dots, 5$) при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 200 - 2760$ ГэВ:

Кварк-глюонная материя ведет себя как почти идеальная жидкость с минимальным отношением сдвиговой вязкости к энтропии системы η/s

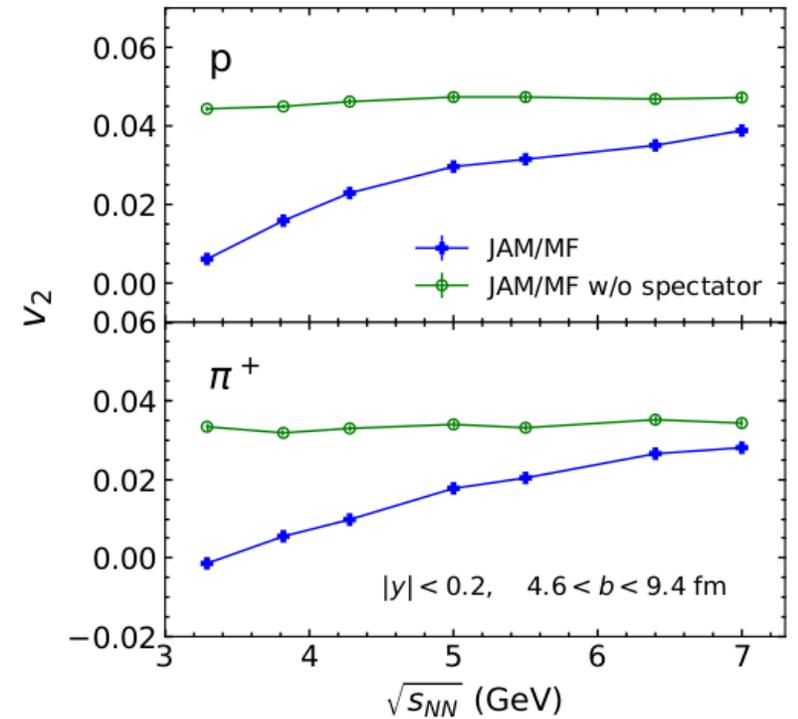
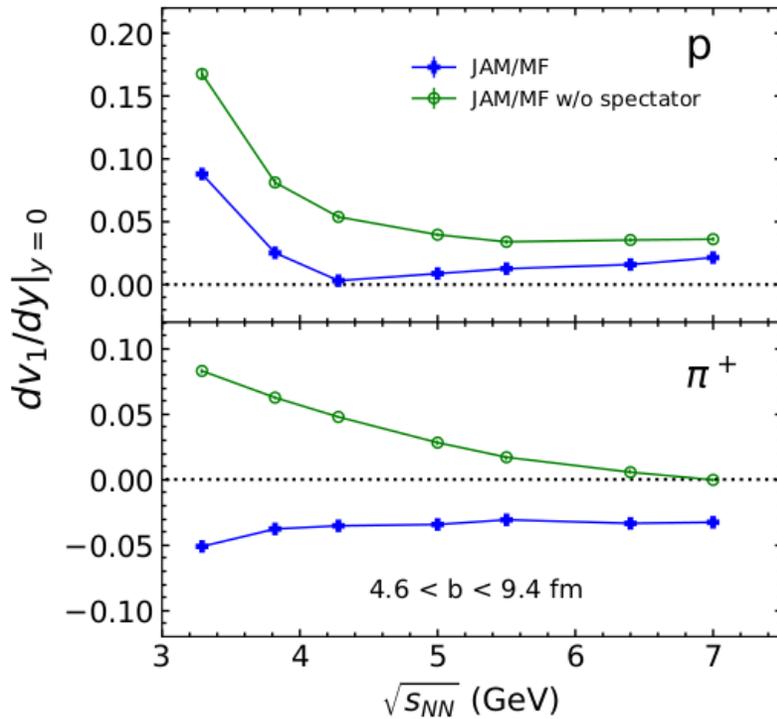
Gale, Jeon, et al., Phys. Rev. Lett. 110, 012302

Анизотропные потоки при энергиях Nuclotron-NICA

M. Abdallah et al. [STAR Collaboration] 2108.00908 [nucl-ex]



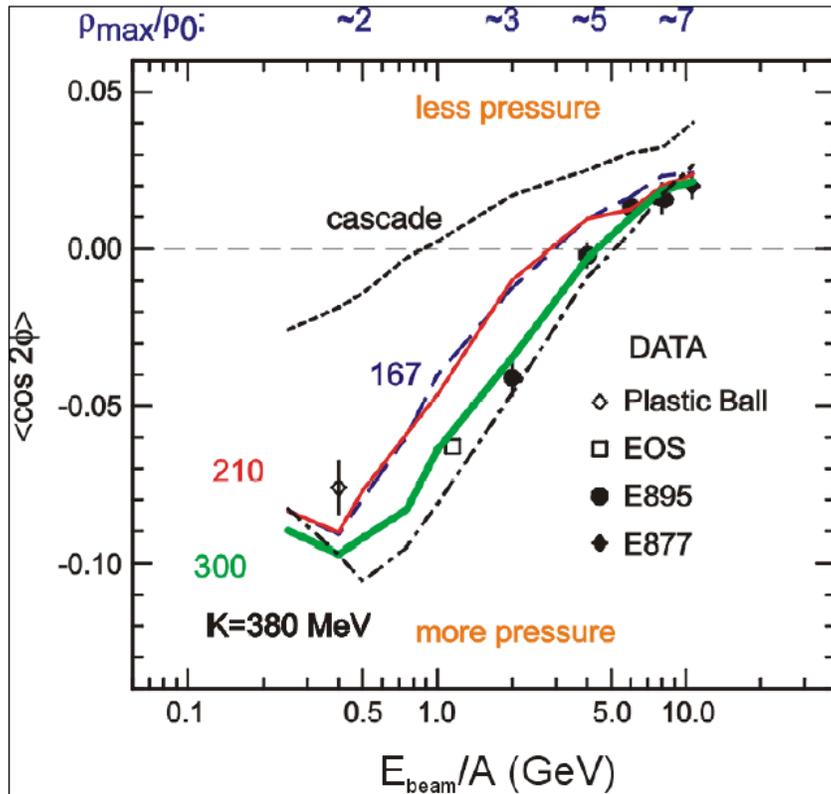
Сильная зависимость от энергии для dv_1/dy и v_2 при $\sqrt{s_{NN}}=2-11$ GeV



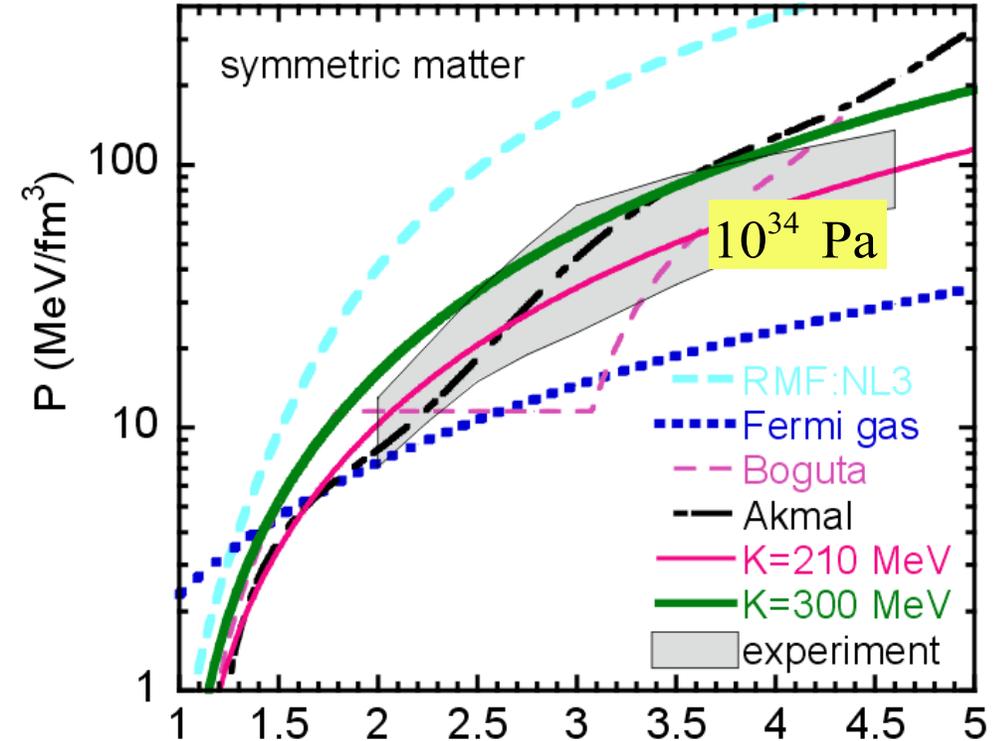
Анизотропные потоки при энергиях FAIR/NICA – это деликатный баланс между:

- I. Формированием градиентов давления в области перекрытия ядер $t_{exp} = R/c_s$
- II. Эффект вытеснения расширяющейся материи нуклонами-спектаторами $t_{pass} = 2R/\gamma_{CM}v_{CM}$

Анизотропные потоки как способ ограничить EOS



Danielewicz, Lacey, Lynch, *Science* 298 (2002) 1592-1596



Достигнуты хорошие ограничения для EOS

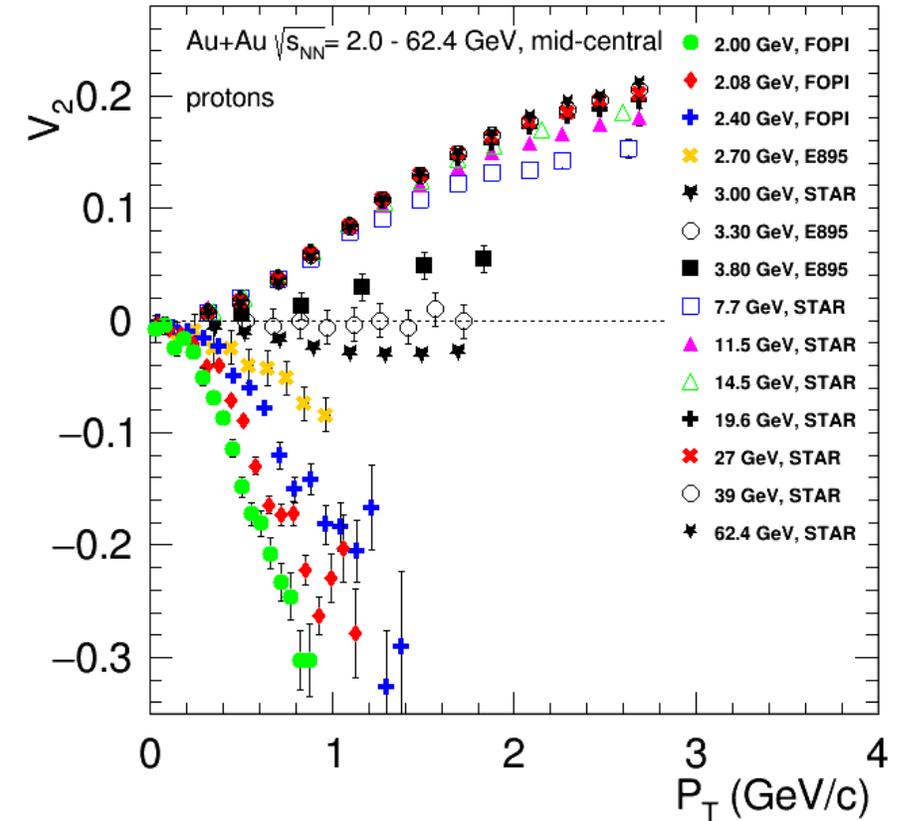
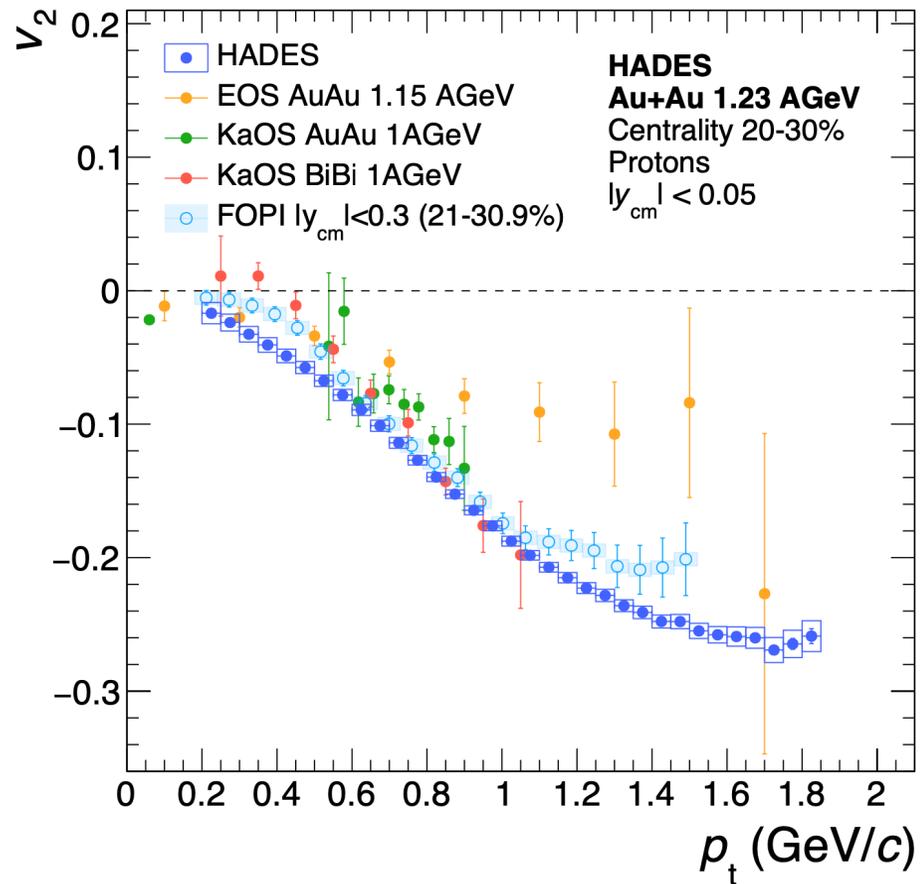
Рост $t_{\text{pass}} = 2R/\gamma_{\text{CM}}v_{\text{CM}}$ с уменьшением энергии

Чувствительность потоков к начальным условиям позволяет использовать их для оценки свойств материи, образующейся в ядро-ядерных столкновениях

$$c_s = \sqrt{\frac{K}{9m_N} \frac{\rho}{\rho_0}} \approx 0.15c, 0.21c$$

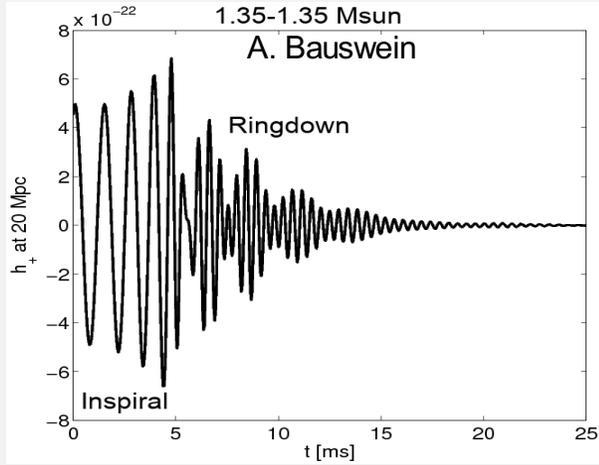
Soft and **hard** EOS

Зачем нам нужны новые измерения в VM@N и MPD?

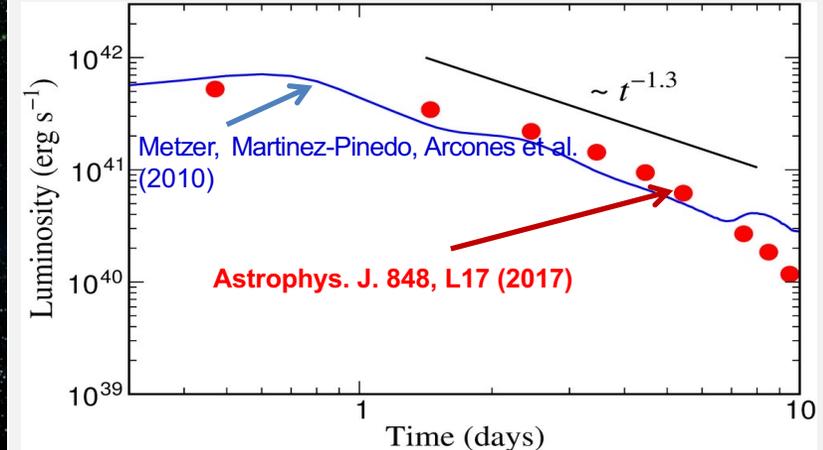


- Основной источник систематических погрешностей при сравнении v_n - разница между экспериментальными измерениями (например, между данными FOPI и HADES)
- Новые данные, полученные в экспериментах VM@N ($\sqrt{s_{NN}}=2.3-3.3$ ГэВ) и MPD ($\sqrt{s_{NN}}=4-11$ ГэВ) предоставят более детальные дифференциальные измерения v_n

Астрофизика: слияние нейтронных звезд



Gravitational
Wave Signal

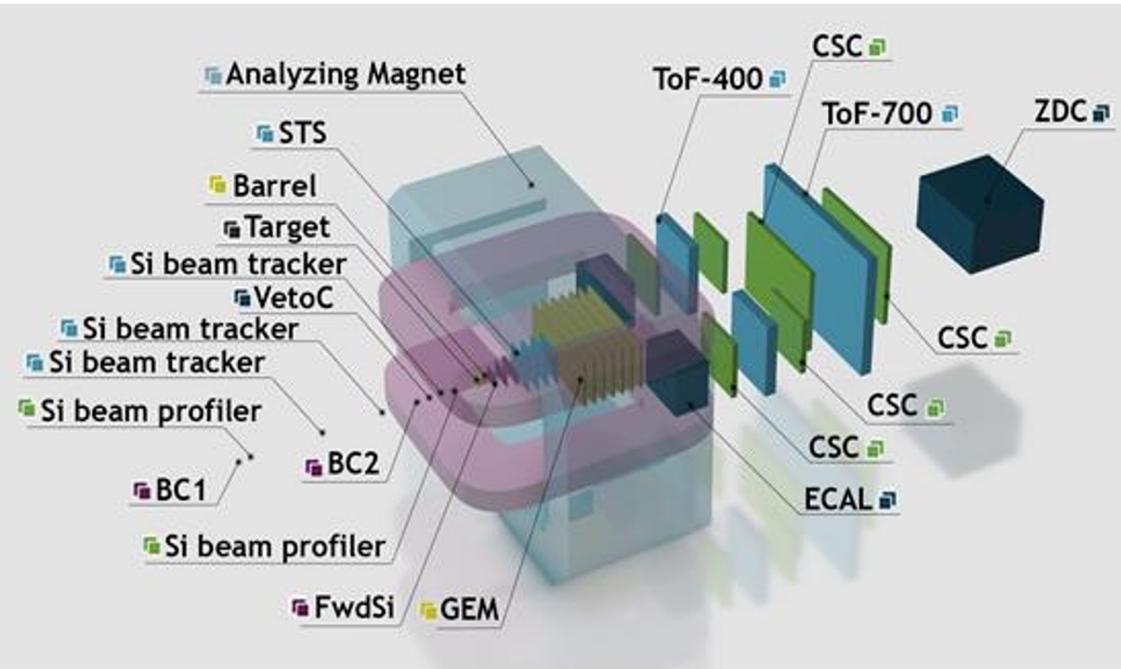


Electromagnetic
"Kilonova" Signal

- Электромагнитный "Kilonova" сигнал "r-процесса" в слиянии нейтронных звезд был предсказан учеными из GSI в 2010.
- Подтверждение недавними астрономическими наблюдениями: обнаружение гравитационных волн GW170817 (Август 2017).
- Источник тяжелых элементов, включая золото, платину и уран.

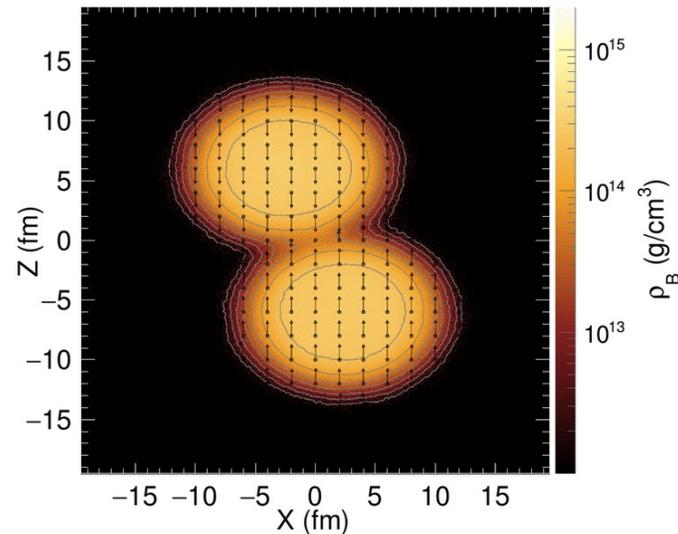
Изучение слияния нейтронных звезд в BM@N

Эксперимент BM@N (Nuclotron)



Столкновения ядер

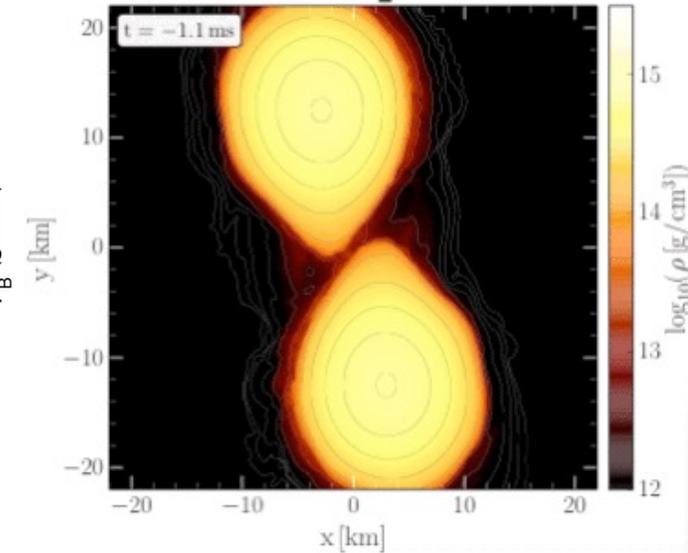
Au+Au 1.25A GeV



$T < 70$ МэВ, $\rho \cong 3\rho_0$

Слияние нейтронных звезд

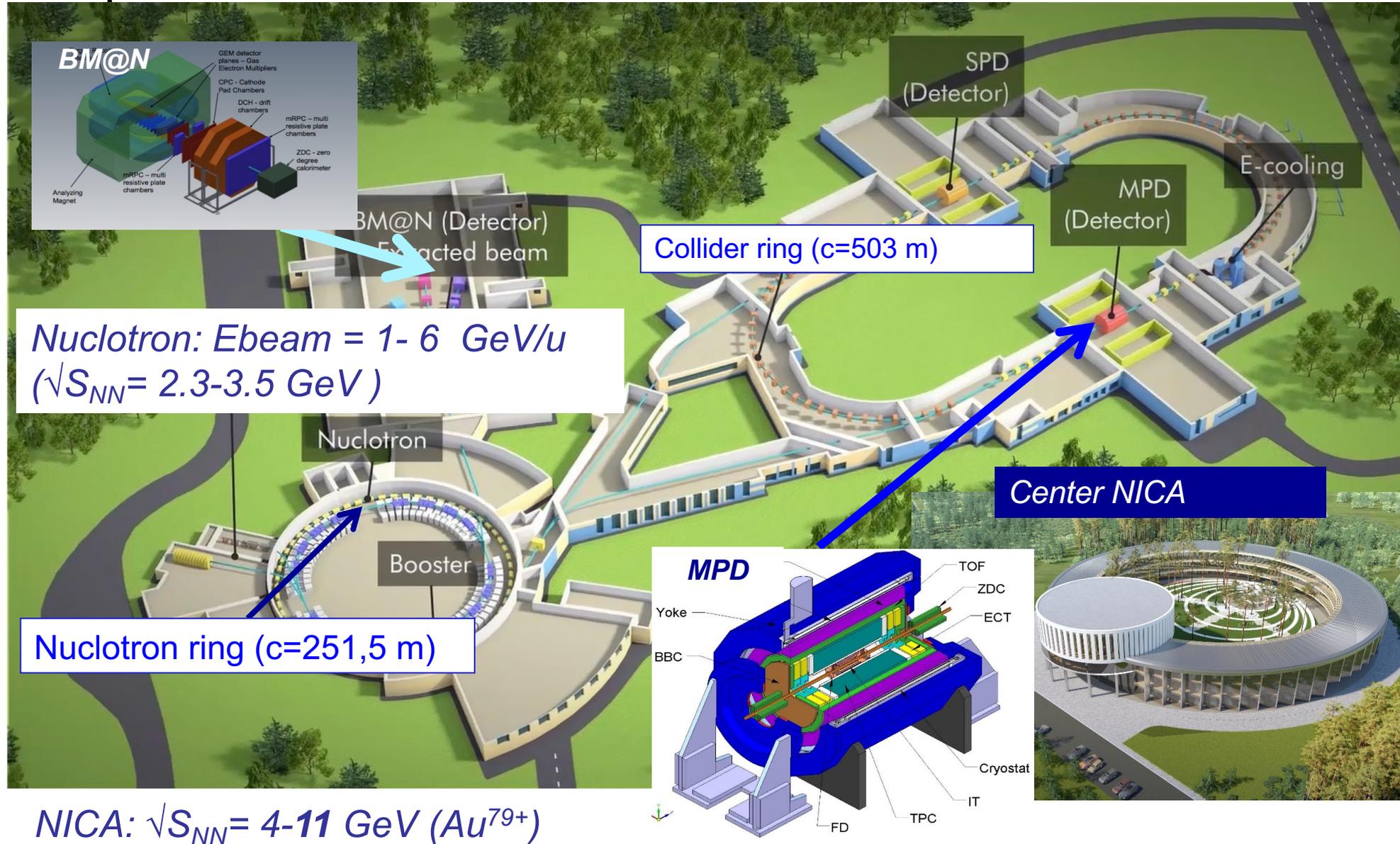
NS mergers



$T < 70$ МэВ, $\rho \cong 3\rho_0$

- В эксперименте BM@N возможно создать материю в том же состоянии, что и при слиянии нейтронных звезд

Ускорительные комплексы Nuclotron-NICA



Использование гибридных моделей при top RHIC/LHC

1. UrQMD + 3D вязкая гидродинамическая модель vHLL+UrQMD

Iurii Karpenko, Comput. Phys. Commun. 185 (2014), 3016

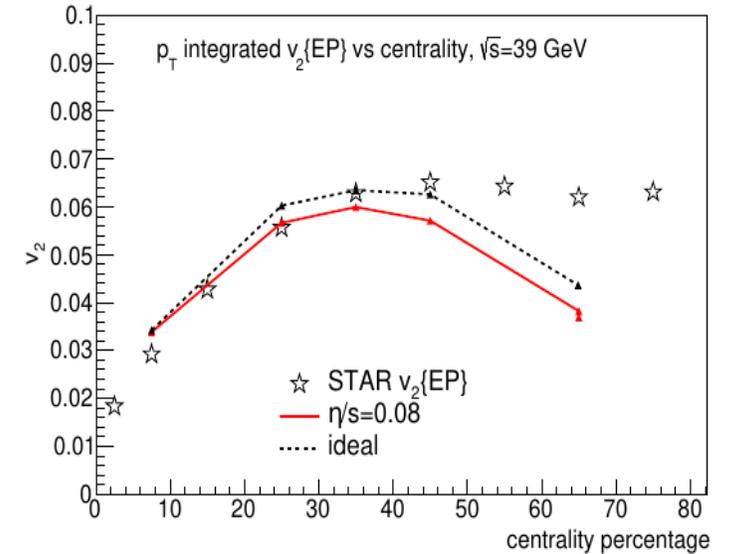
<https://github.com/yukarpenko/vhll>

Parameters: from Iu. A. Karpenko, P. Huovinen, H. Petersen, M. Bleicher, Phys. Rev. C91 (2015) no.6, 064901 – good description of STAR BES results for v_2 of inclusive charged hadrons (7.7-62.4 GeV)

Начальные условия: модель UrQMD

КГМ фаза: 3D viscous hydro (vHLL) с EOS по типу «кроссовер» (XPT)

Адронная фаза: модель UrQMD



2. Многофазовая транспортная модель (AMPT) для ядро-ядерных столкновений при высоких энергиях

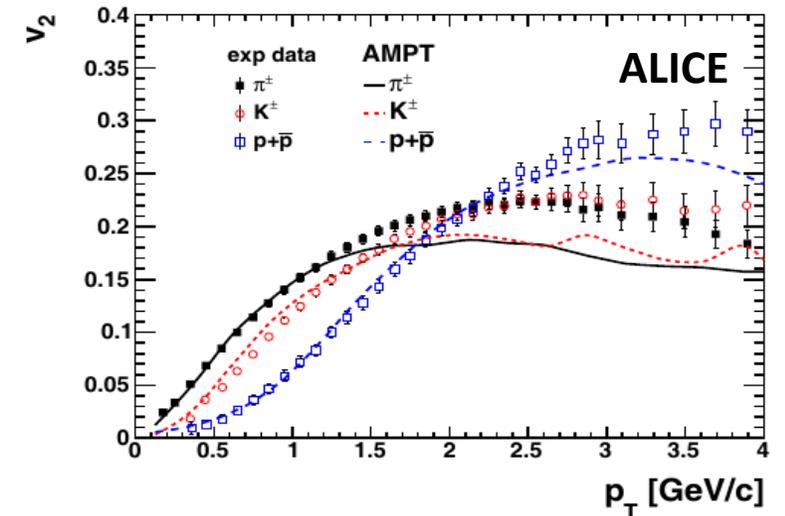
Исходный код (Zi-Wei Lin):

<https://myweb.ecu.edu/linz/ampt/v1.26t9b/v2.26t9b>

Начальные условия: модель HIJING

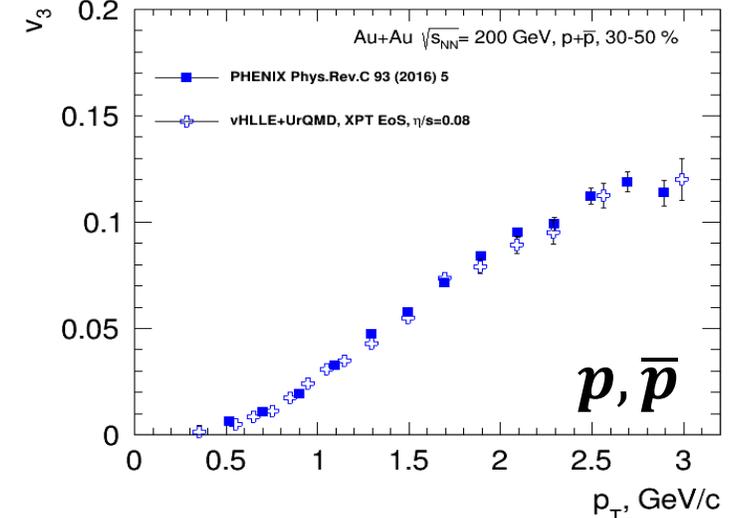
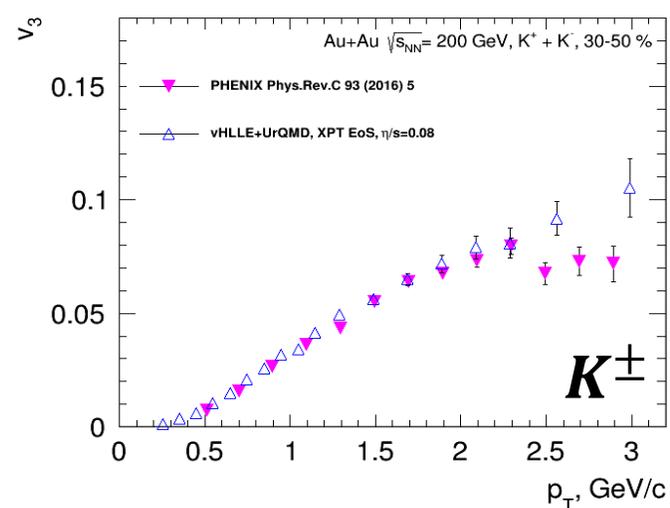
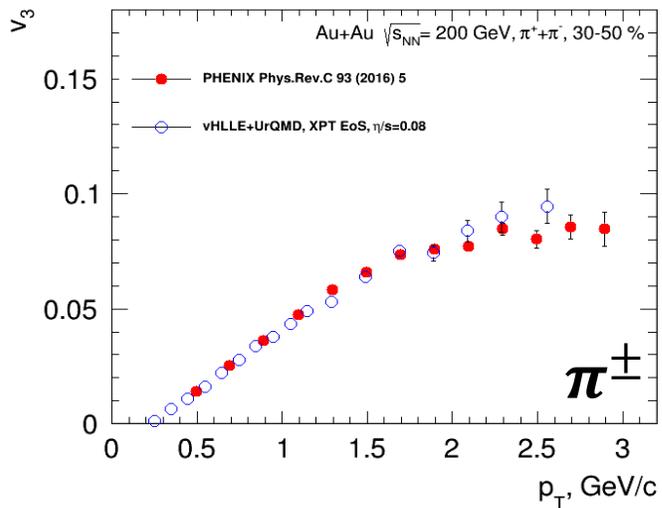
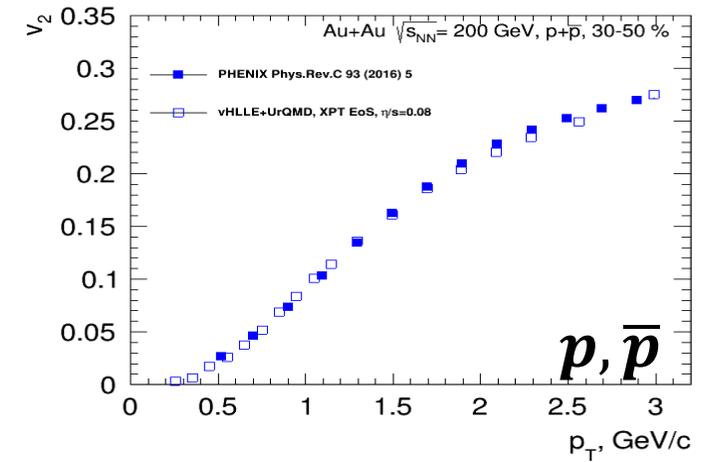
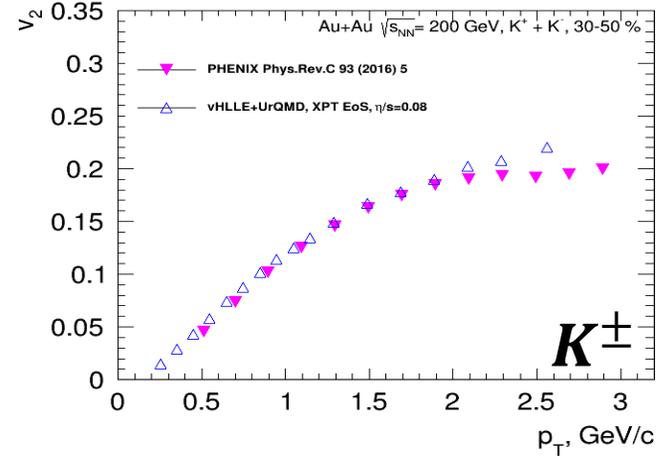
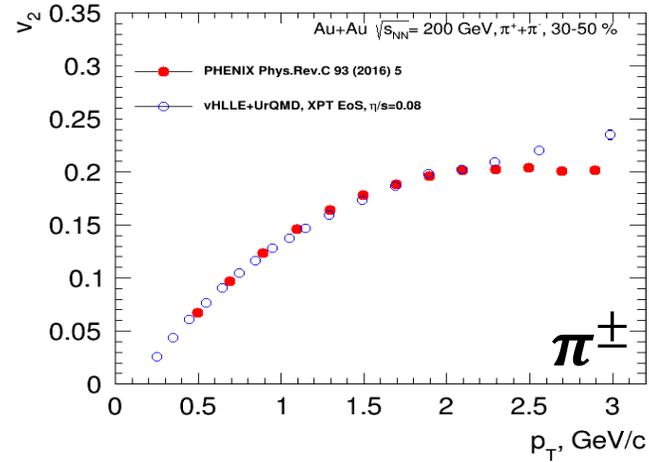
КГМ фаза: каскадная партонная модель Жанга (Zhang)

Адронная фаза: модель ART



Z.W. Lin, C. M. Ko, B.A. Li, B. Zhang and S. Pal:
Physical Review C 72, 064901 (2005).

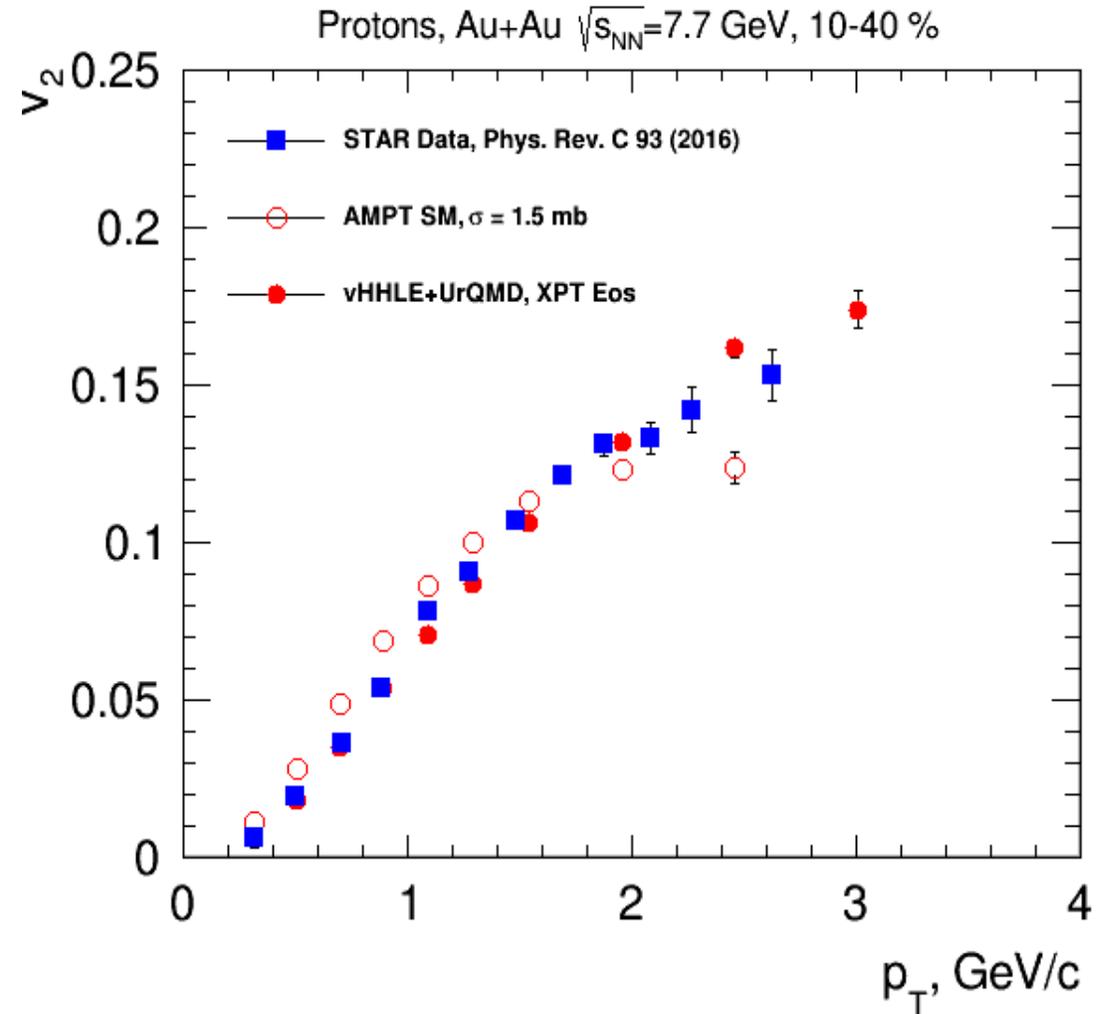
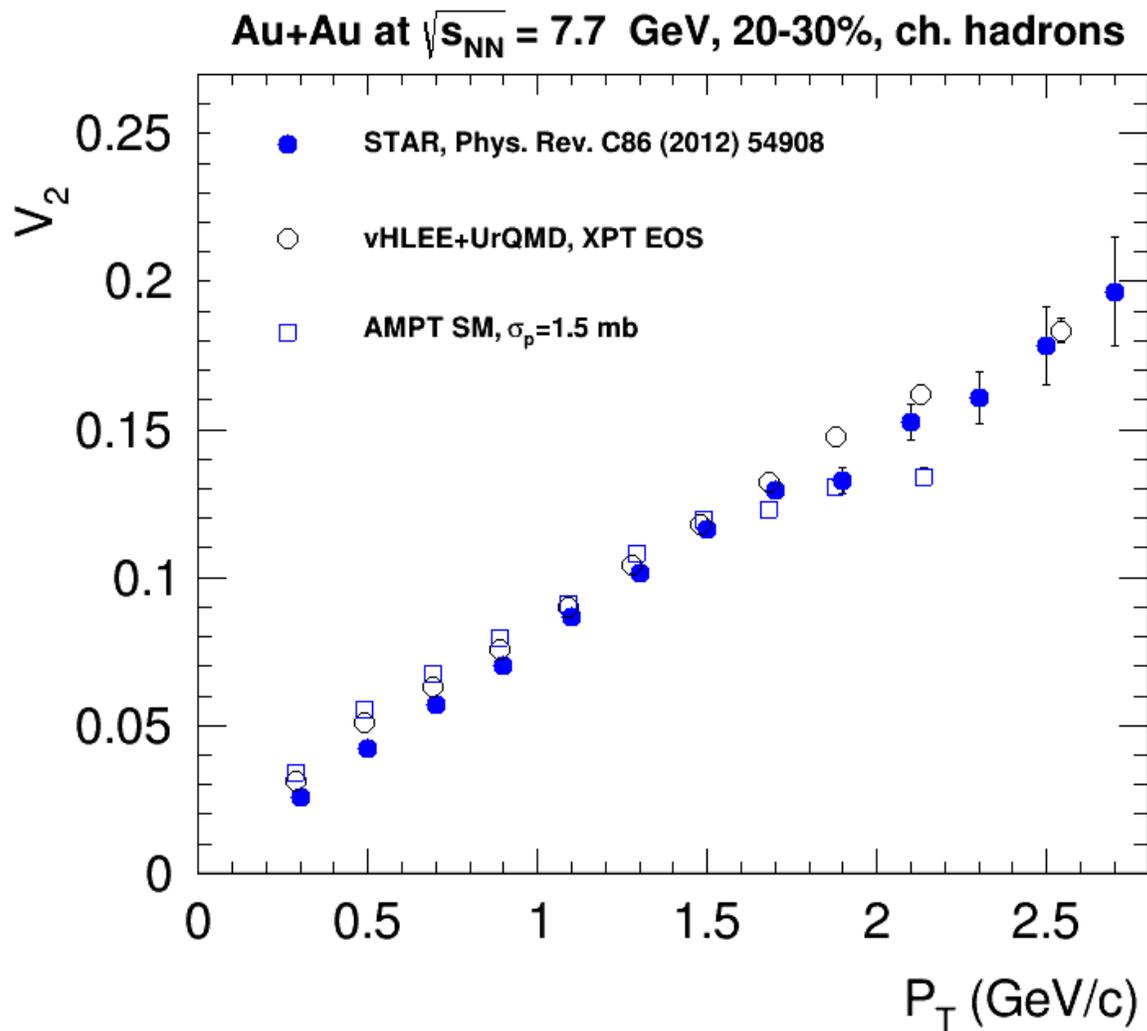
$v_{HLLE+UrQMD}$: Эллиптический и треугольный потоки при 200 GeV



3D hydro model vHLLE + UrQMD (XPT EOS), $\eta/s=0.08$ + param from Iu.A. Karpenko, P. Huovinen, H. Petersen, M. Bleicher, Phys.Rev. C91 (2015) no.6, 064901

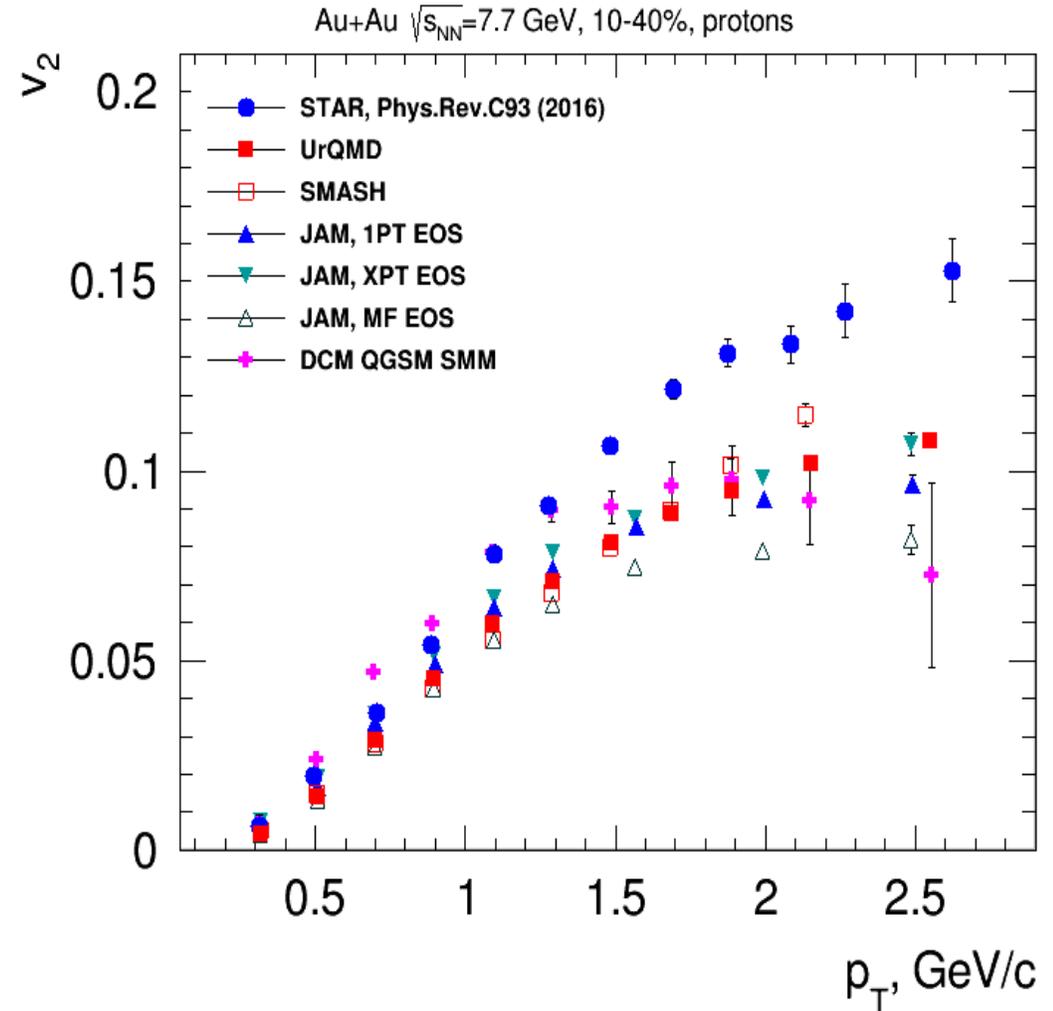
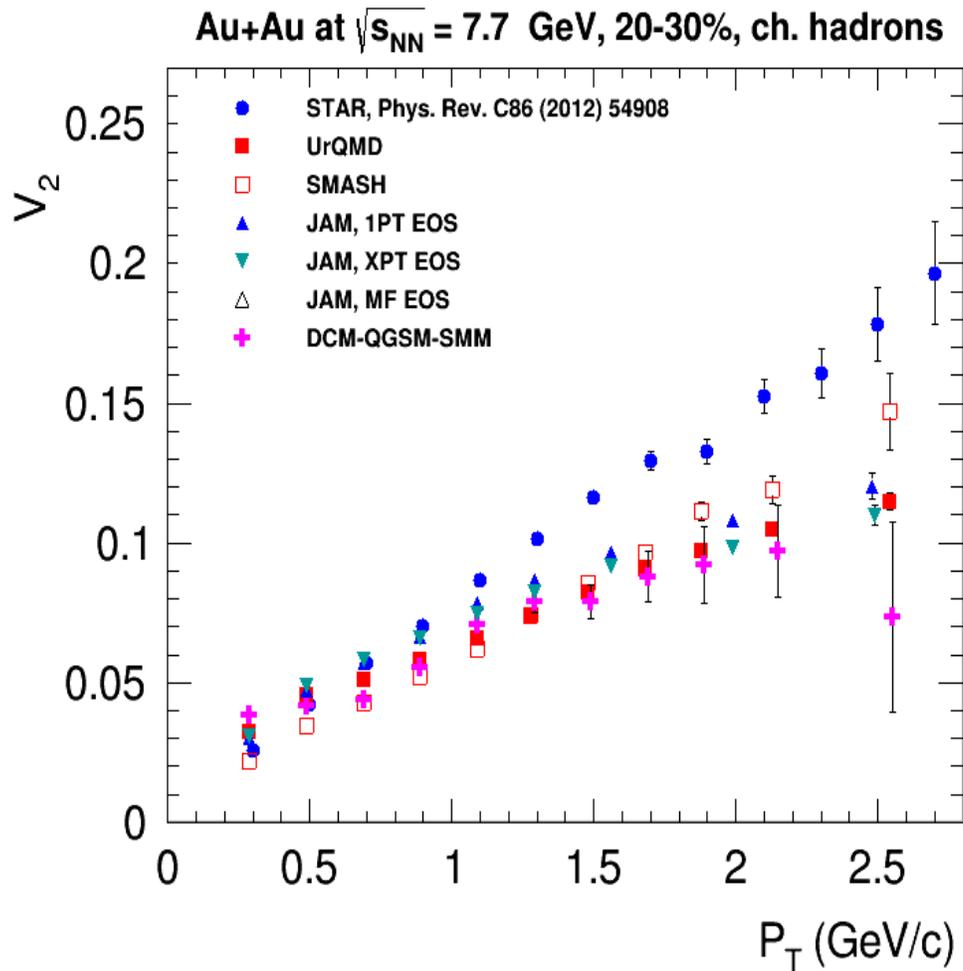
Хорошее согласие между результатами vHLLE+UrQMD модели и данными PHENIX

Эллиптический поток при энергиях NICA: модели vs. данные



Модели vHLEE+UrQMD ($\eta/s = 0.2$, XPT EOS), AMPT хорошо описывают данные STAR при $\sqrt{s_{NN}} \geq 7.7$ ГэВ

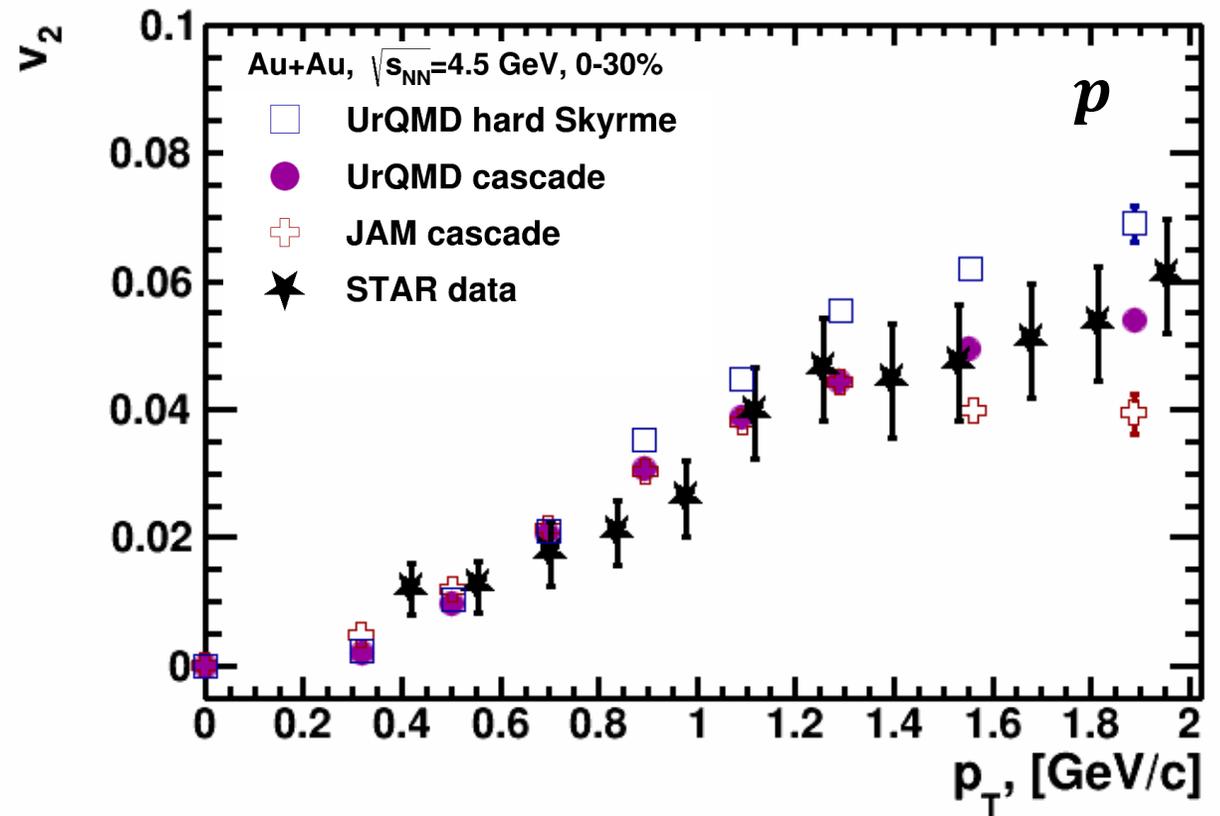
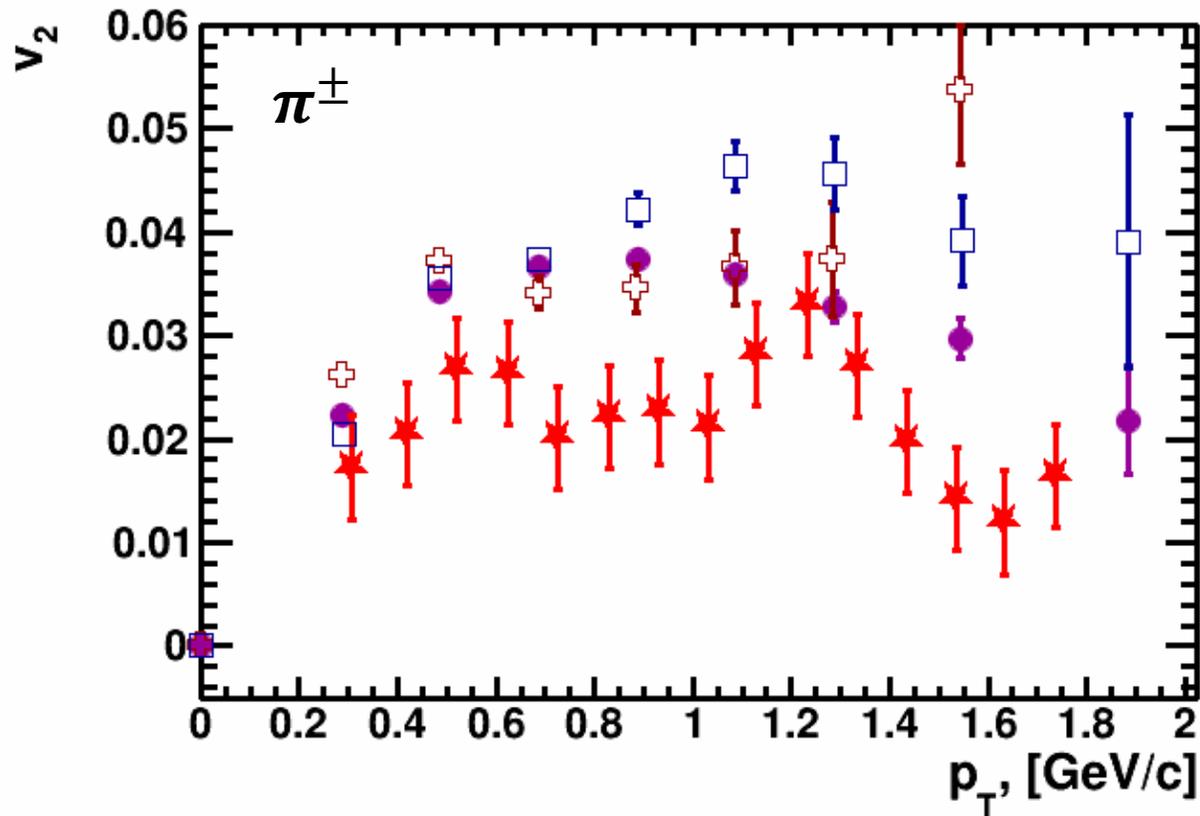
Эллиптический поток при энергиях NICA: модели vs. данные



Каскадно-струнные модели (без формирования КГМ) предсказывают меньший v_2 сигнал в сравнении с данными эксперимента STAR при $\sqrt{s_{NN}} \geq 7.7$ ГэВ

Эллиптический поток при энергиях NICA: модели vs. данные

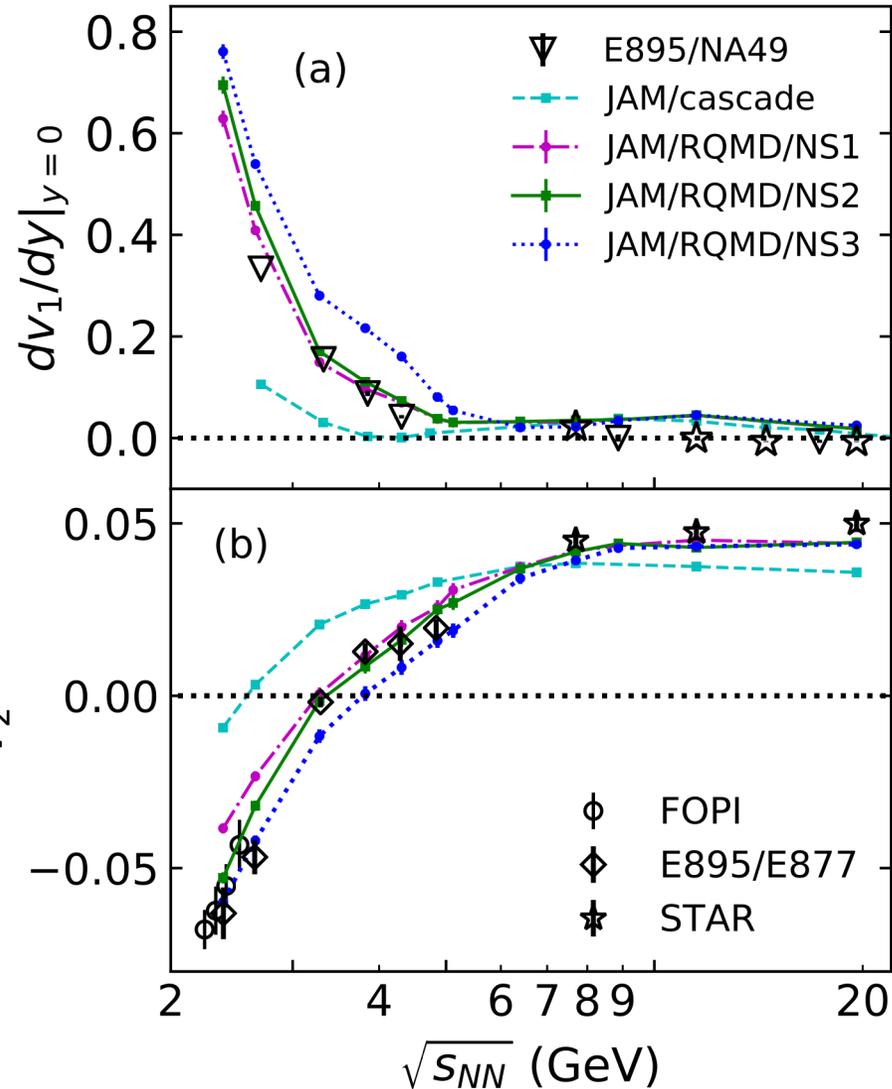
Экспериментальные точки взяты из: *Phys.Rev.C* 103 (2021) 3, 034908



Каскадно-струнные модели (без формирования КГМ) дают схожий с данными STAR v_2 сигнал при $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ ГэВ

Изучение анизотропных потоков при $\sqrt{s_{NN}}=2-4.5$ GeV с JAM моделью

Y.Nara, et al., Phys. Rev. C 100, 054902 (2019)



Для изучения зависимости v_n от энергии, была выбрана модель JAM (ver. 1.90597)

Ядро-ядерные столкновения моделируются с помощью:

- $\sqrt{s_{NN}} < 4$ ГэВ: рождение резонансов
- $4 < \sqrt{s_{NN}} < 50$ ГэВ: мягкие возбуждения струн
- $\sqrt{s_{NN}} > 10$ ГэВ: рождение мини-струй

Использовался режим RQMD с релятивистской теорией средних полей (non-linear mean-field σ - ω model)

Были использованы разные EOS:

- **MD3** (импульсно-зависимый потенциал): $K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$, $U_{opt}(\infty) = 30$ MeV
- **MD2** (импульсно-зависимый потенциал): $K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$, $U_{opt}(\infty) = 67$ MeV
- **MD4** (импульсно-зависимый потенциал): $K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$, $U_{opt}(\infty) = 200$ MeV
- **NS1**: $K=380$ MeV, $m^*/m=0.83$
- **NS2**: $K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

Y.Nara, T.Maruyama, H.Stoecker Phys. Rev. C 102, 024913 (2020)

Y.Nara, H.Stoecker Phys. Rev. C 100, 054902 (2019)

Изучение анизотропных потоков с PHQMD/HSD моделями

1. Модель партон-адронной квантовой молекулярной динамики (PHQMD)

J. Aichelin, et al., Phys.Rev.C 101 (2020) 4, 044905

Параметры: [hard](#) & [soft](#) EOS

Начальные условия: модель QMD

КГМ фаза: модель DQPM в составе PHSD (отключена в данной работе)

Адронная фаза: модель off-shell HSD + образование фрагментов с помощью SACA/MST

2. Модель адронной струнной динамики (HSD)

W. Ehehalt and W. Cassing Nucl. Phys. A 602 (1996) 449-486

Начальные условия: модель HSD (создание пре-адронных струн)

КГМ фаза: нет

Адронная фаза: модель off-shell HSD

Изучение анизотропных потоков с UrQMD/DCM моделями

1. Модель ультра-релятивистской квантовой молекулярной динамики (UrQMD)

M. Bleicher et al, J.Phys. G25 (1999) 1859-1896

Решение уравнения движения с функцией вероятности частицы:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + (\nabla_p \varepsilon)(\nabla_r f) - (\nabla_r \varepsilon)(\nabla_p f) = I \text{ с энергией частицы } \varepsilon = E_{kin} + U_{mf}$$

Параметры: hard & soft EOS с потенциалами U_{mf} Скирма, cascade mode ($U_{mf}=0$)

Начальные условия: начальные условия в UrQMD

КГМ фаза: нет

Адронная фаза: адронный транспорт в UrQMD (модель LUND/PYTHIA)

2. Дубнинская каскадная модель – кварк-глюонная струнная модель со статистической мультифрагментацией (DCM-QGSM-SMM)

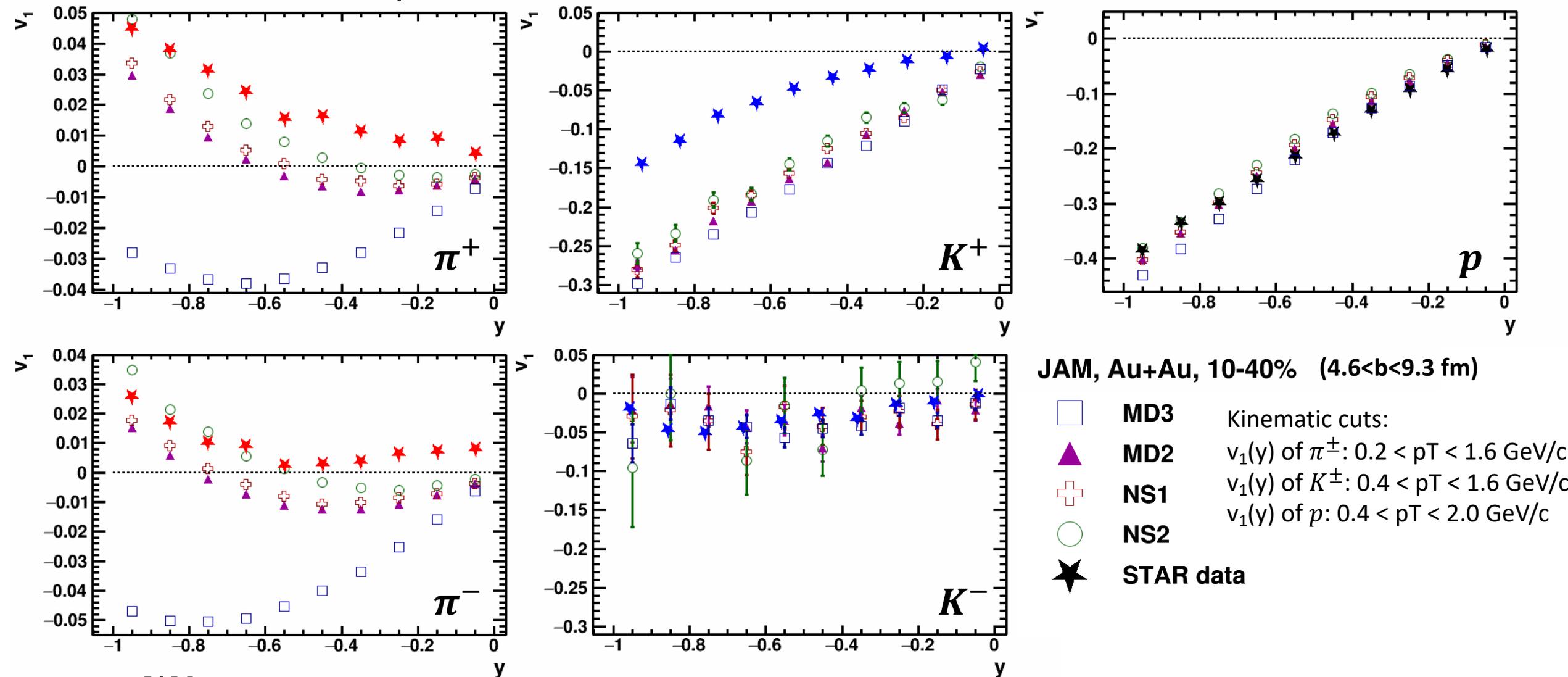
M. Vaznat et al, Phys.Part.Nucl.Lett. 17 (2020) 3, 303-324

Начальные условия: начальные условия в каскадной модели DCM-QGSM (intranuclear cascade: hadronic model для $E_{kin} < 4.5$ АГэВ или QGSM для $E_{kin} > 4.5$ АГэВ)

КГМ фаза: нет

Адронная фаза: адронный транспорт в DCM-QGSM и фрагментация с помощью SMM

$v_1(y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=3$ ГэВ: сравнение с данными STAR

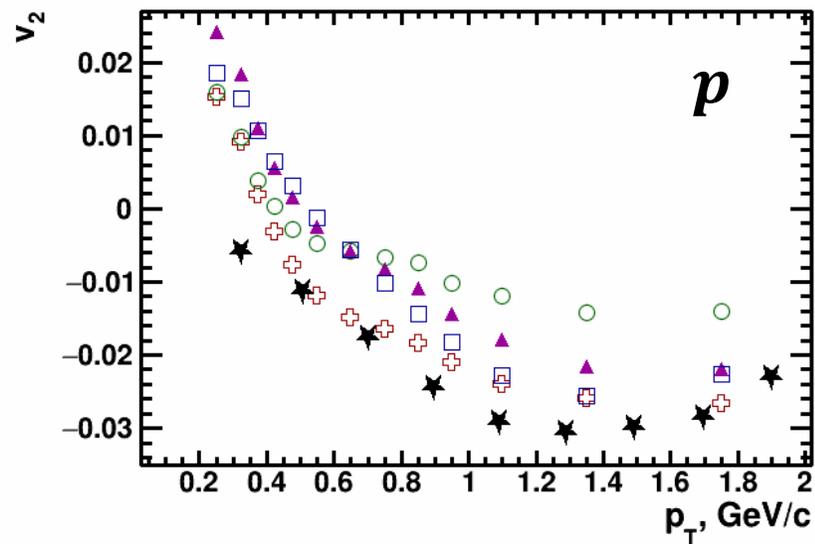
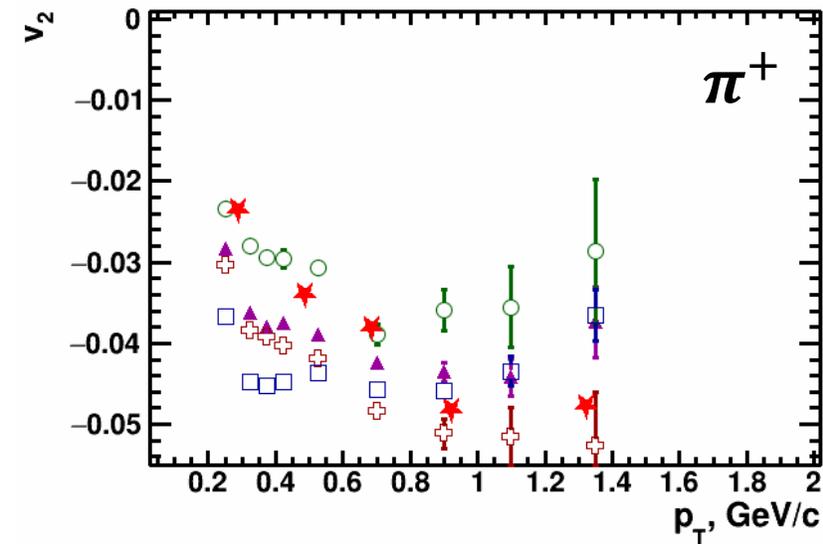


**JAM не описывает одинаково хорошо все типы частиц
 v_1 пионов более чувствителен к EOS, чем v_1 протонов**

Экспериментальные данные взяты из:

M. Abdallah et al. [STAR Collaboration] *Phys.Lett.B* 827 (2022) 137003

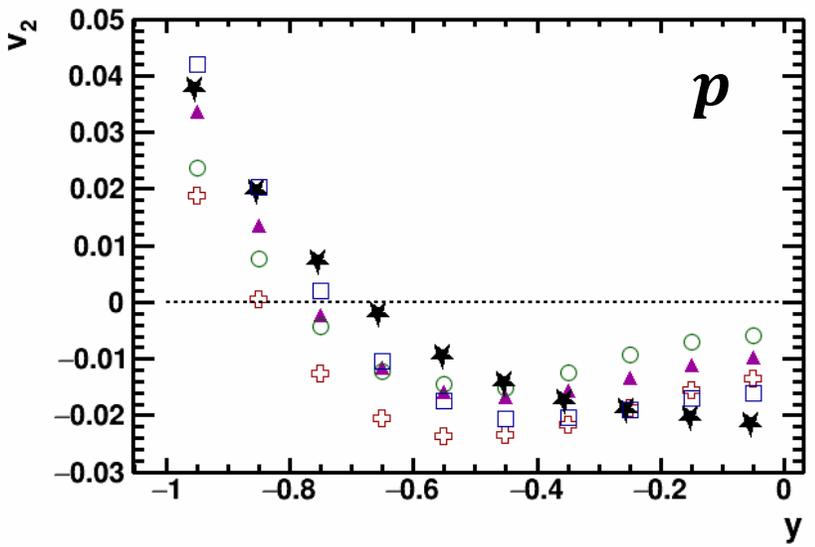
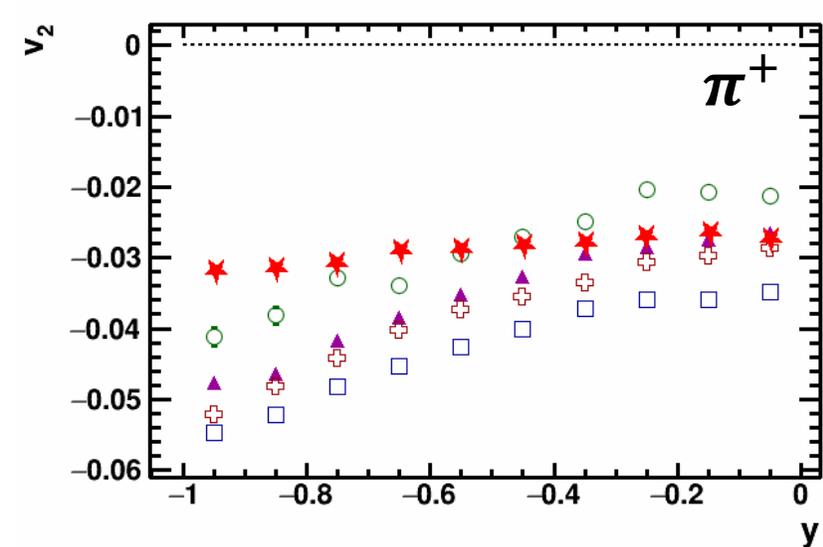
$v_2(p_T, y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=3$ ГэВ: сравнение с STAR



JAM, Au+Au, 10-40% ($4.6 < b < 9.3$ fm)

- MD3
- ▲ MD2
- + NS1
- NS2
- ★ STAR data

Экспериментальные данные взяты из:
M. Abdallah et al. [STAR Collaboration] 2108.00908 [nucl-ex]



Kinematic cuts:

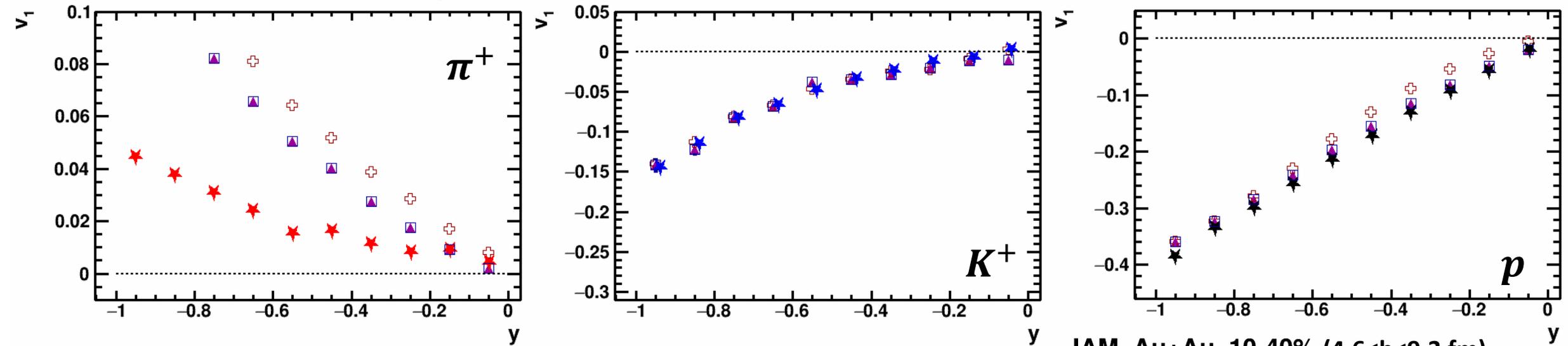
$v_2(p_T)$: $-1 < y < 0$

$v_2(y)$ of π^\pm : $0.2 < p_T < 1.6$ GeV/c

$v_2(y)$ of p : $0.4 < p_T < 2.0$ GeV/c

v_2 более чувствителен к разным EOS, чем v_1

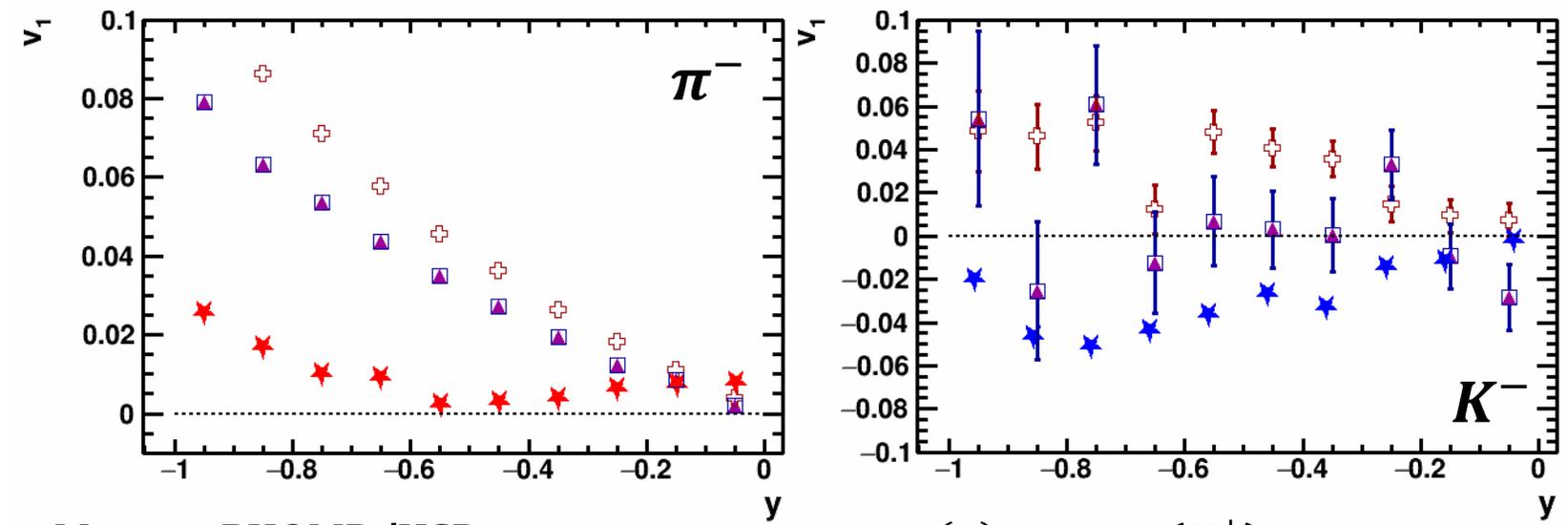
$v_1(y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=3$ ГэВ: сравнение с STAR



JAM, Au+Au, 10-40% ($4.6 < b < 9.3$ fm)

- PHQMD hard EoS
- ▲ PHQMD soft EoS
- + HSD
- ★ STAR data

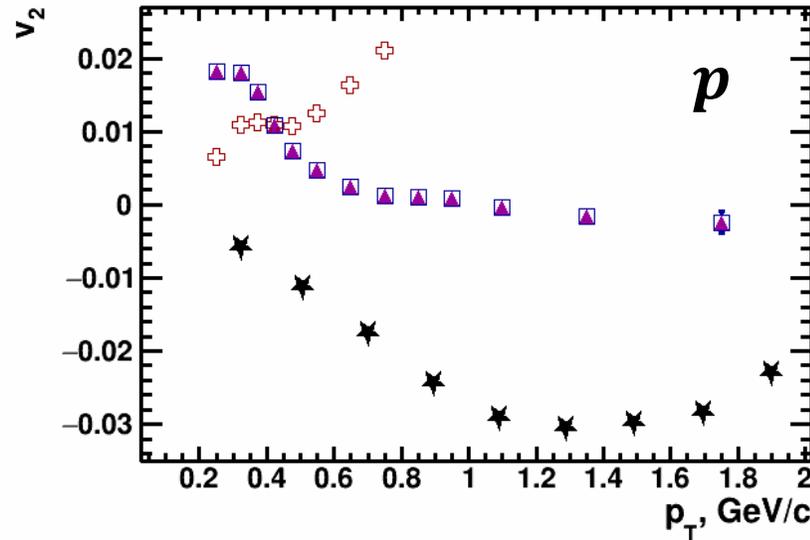
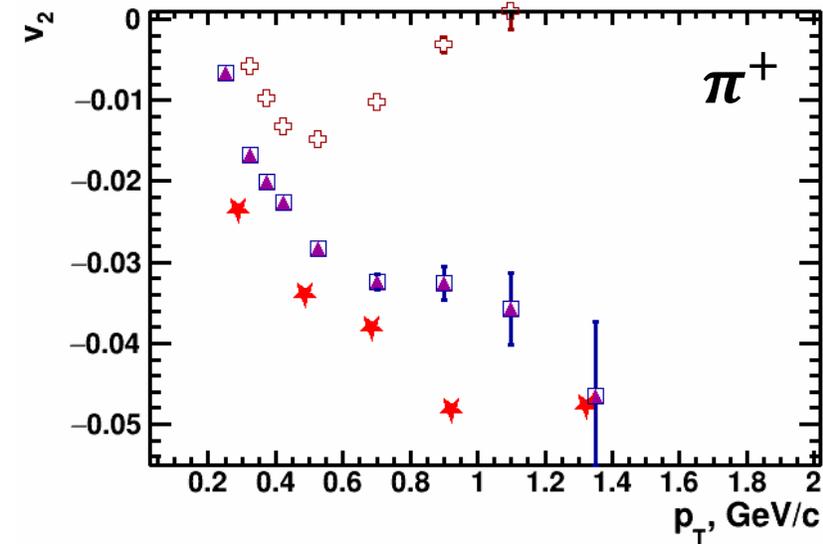
Kinematic cuts:
 $v_1(y)$ of π^\pm : $0.2 < p_T < 1.6$ GeV/c
 $v_1(y)$ of K^\pm : $0.4 < p_T < 1.6$ GeV/c
 $v_1(y)$ of p : $0.4 < p_T < 2.0$ GeV/c



Модель PHQMD/HSD хорошо описывает $v_1(y)$ каонов (K^\pm) и протонов Экспериментальные данные взяты из:

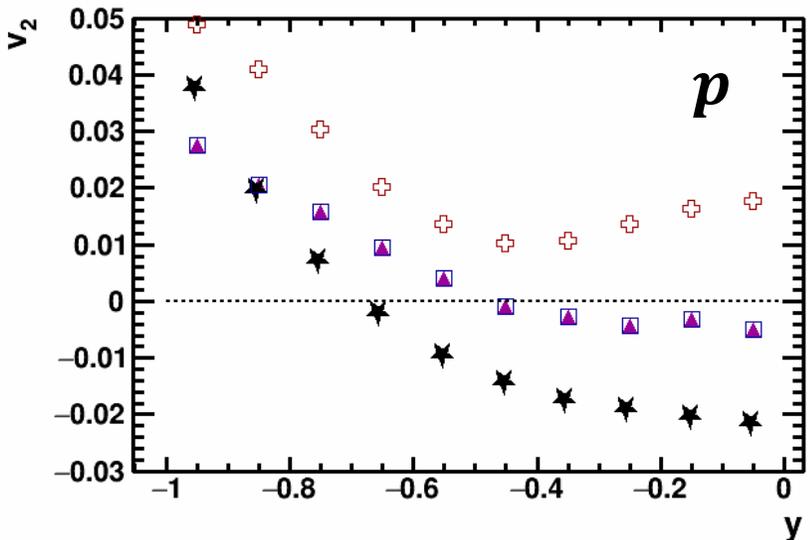
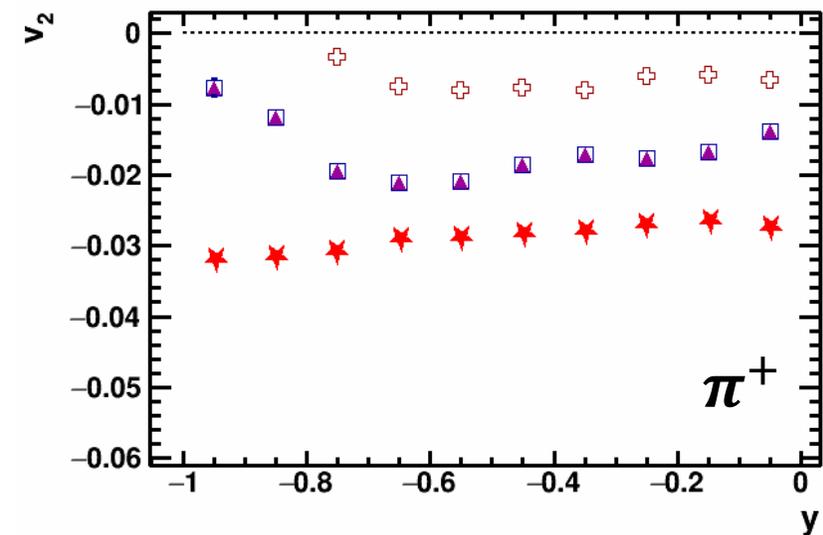
M. Abdallah et al. [STAR Collaboration] 2108.00908 [nucl-ex]

$v_2(p_T, y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=3$ ГэВ: сравнение с STAR



JAM, Au+Au, 10-40% ($4.6 < b < 9.3$ fm)

- PHQMD hard EoS
- ▲ PHQMD soft EoS
- + HSD
- ★ STAR data



Экспериментальные данные взяты из:
M. Abdallah et al. [STAR Collaboration] 2108.00908 [nucl-ex]

Kinematic cuts:

$v_2(p_T)$: $-1 < y < 0$

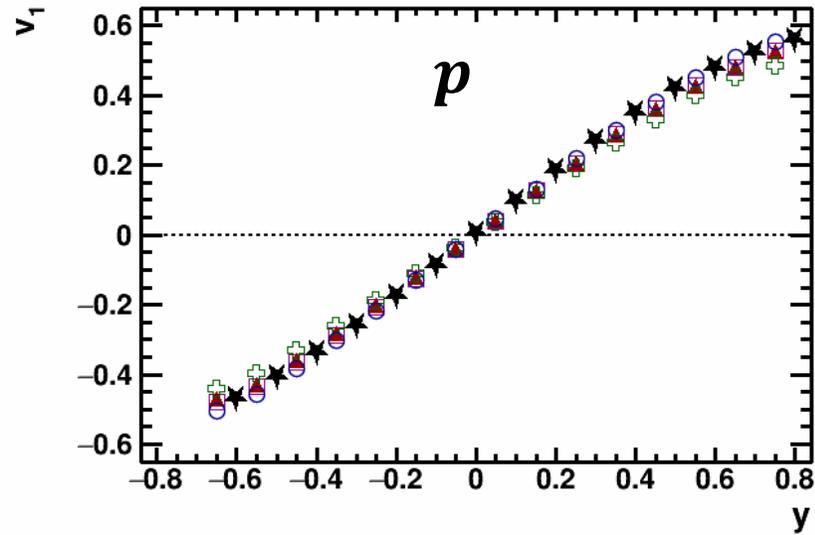
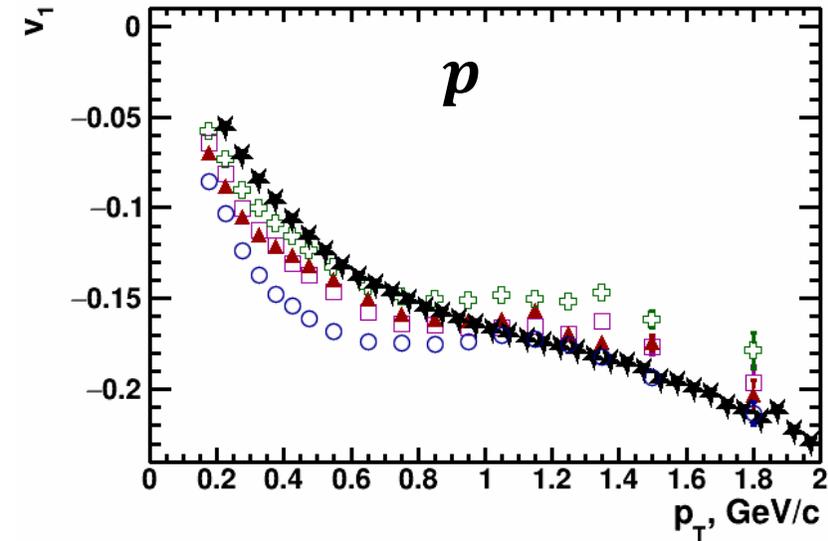
$v_2(y)$ of π^\pm : $0.2 < p_T < 1.6$ GeV/c

$v_2(y)$ of p : $0.4 < p_T < 2.0$ GeV/c

Модель PHQMD/HSD описывает v_2 хуже, чем JAM

HSD не описывает v_2 вовсе

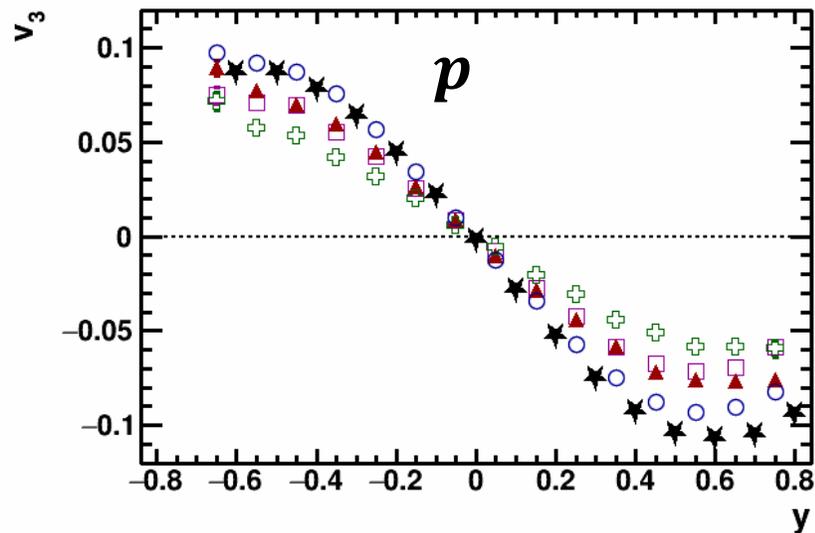
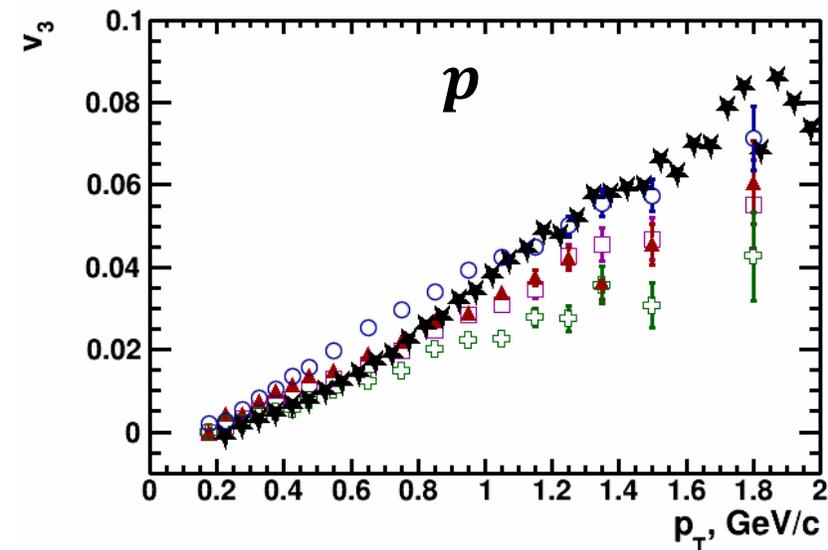
$v_{1,3}(p_T, y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ ГэВ: сравнение с HADES



JAM, Au+Au, 20-30% ($6 < b < 9$ fm)

- MD3
- MD2
- ▲ NS1
- ⊕ NS2
- ★ HADES data

Экспериментальные данные взяты из:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301



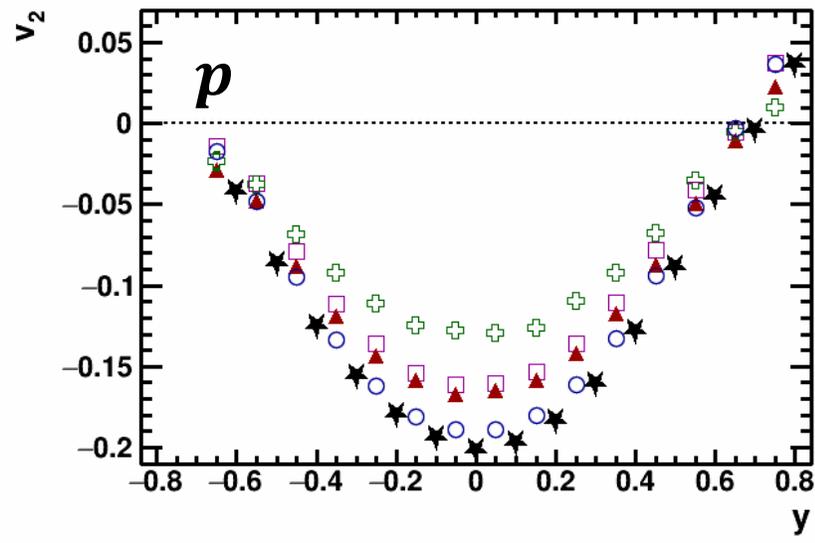
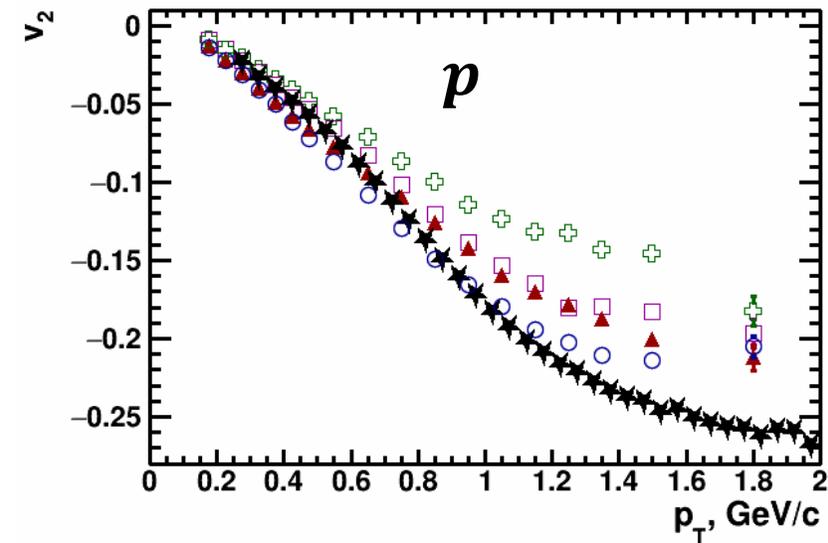
Kinematic cuts:

$$v_{1,3}(p_T): -0.25 < y < -0.15$$

$$v_{1,3}(y): 1.0 < p_T < 1.5 \text{ GeV/c}$$

Хорошее согласие для $v_{1,3}(y)$
 $v_3(y)$ более чувствителен к EOS,
чем $v_1(y)$

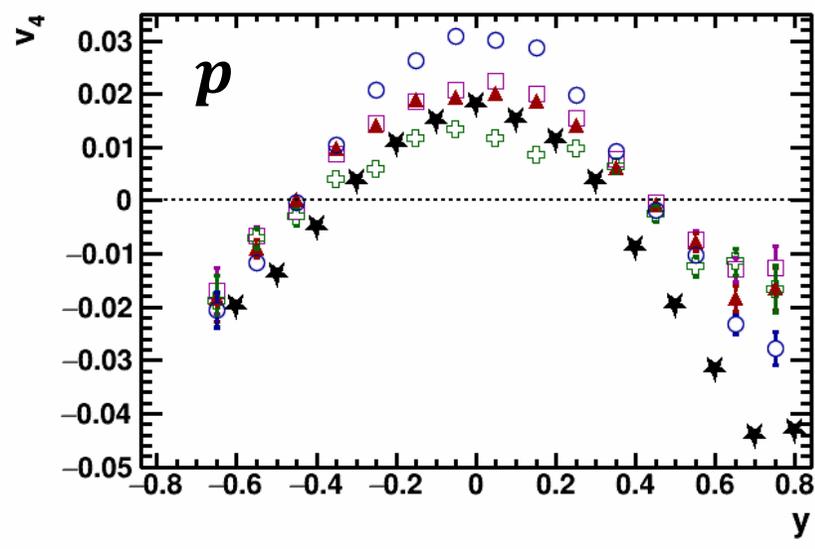
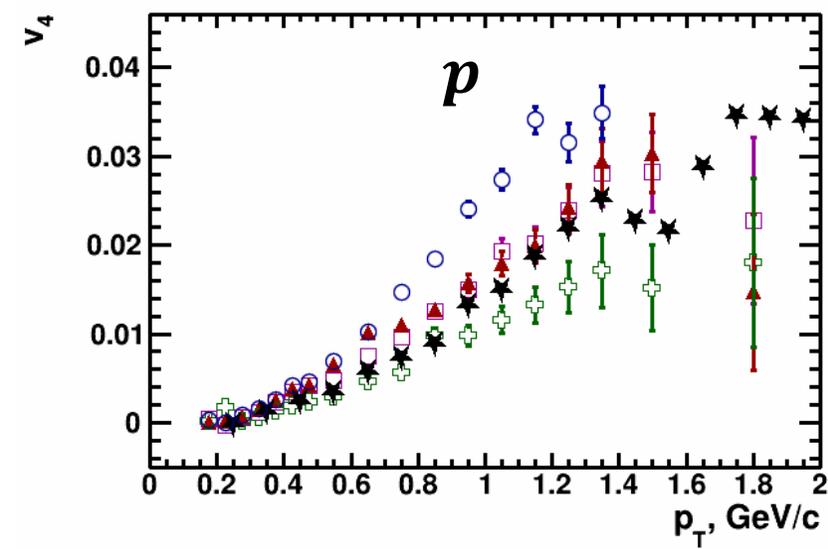
$v_{2,4}(p_T, y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ ГэВ: сравнение с HADES



JAM, Au+Au, 20-30% ($6 < b < 9$ fm)

- MD3
- MD2
- ▲ NS1
- ⊕ NS2
- ★ HADES data

Экспериментальные данные взяты из:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301

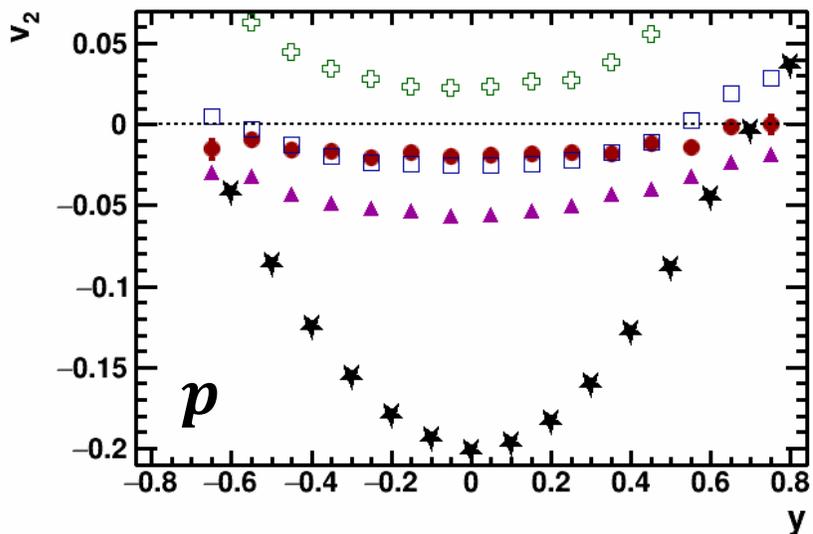


Kinematic cuts:
 $v_{2,4}(p_T)$: $-0.05 < y < 0.05$
 $v_{2,4}(y)$: $1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c

Хорошее согласие для $v_{2,4}(y)$
 $v_{2,4}$ более чувствителен к EOS, чем v_1
Необходимо больше результатов с разными EOS для JAM модели

$v_2(y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ ГэВ: каскадно-струнные модели

Экспериментальные данные взяты из:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301

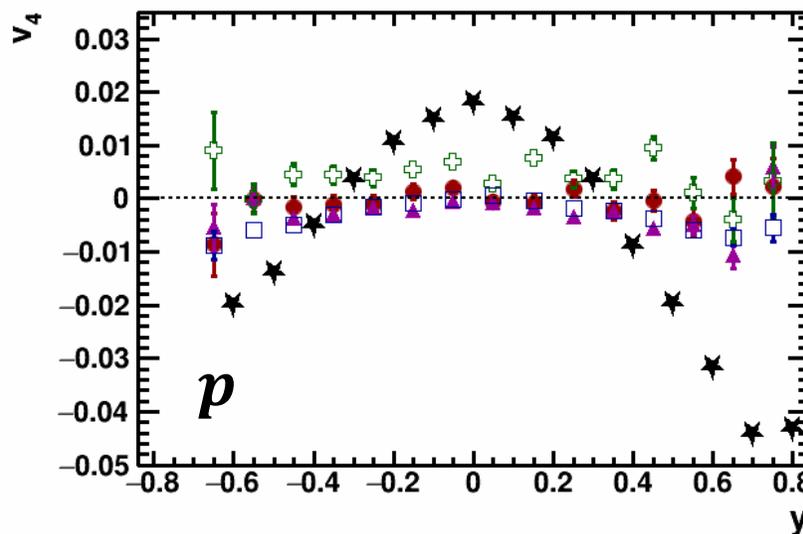
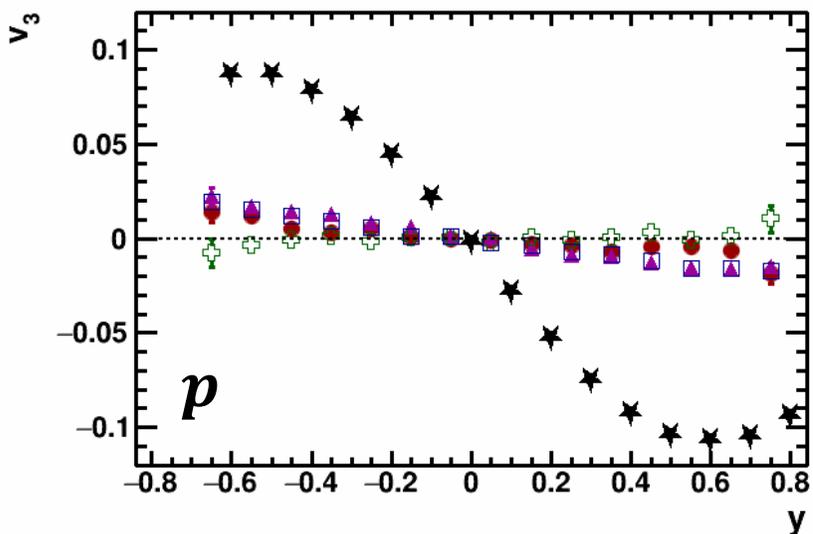


Au+Au, 20-30% ($6 < b < 9$ fm)

- DCM-QGSM-SMM
- UrQMD cascade
- JAM cascade
- HSD
- HADES data

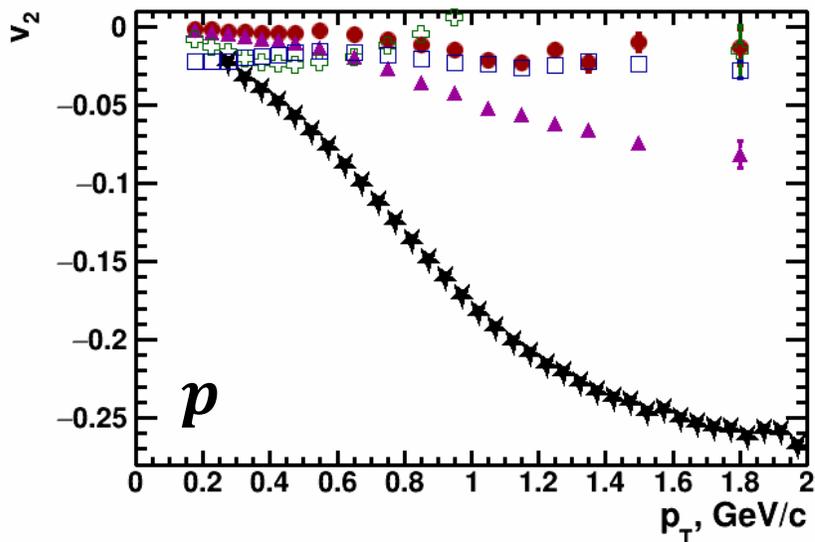
Kinematic cuts:

$V_{2,3,4}(y): 1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c



Модели с каскадным/струнным режимом не могут воспроизвести данные в области энергий $\sqrt{s_{NN}} < 4.5$ ГэВ

$v_2(p_T)$ при $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ ГэВ: каскадно-струнные модели



Au+Au, 20-30% ($6 < b < 9$ fm)

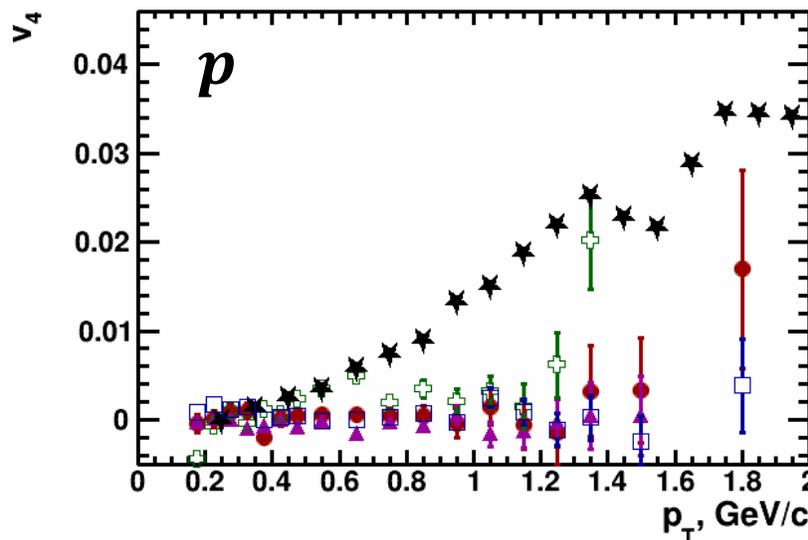
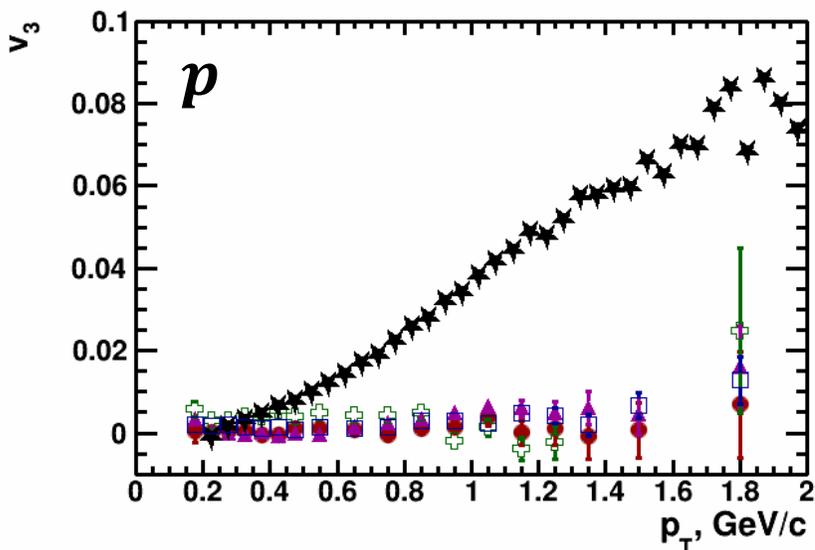
- DCM-QGSM-SMM
- UrQMD cascade
- JAM cascade
- HSD
- HADES data

Экспериментальные данные взяты из:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301

Kinematic cuts:

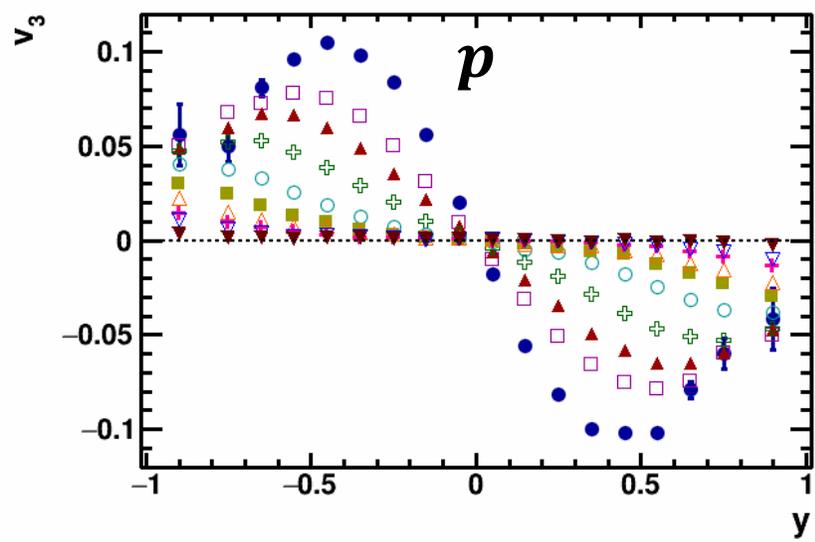
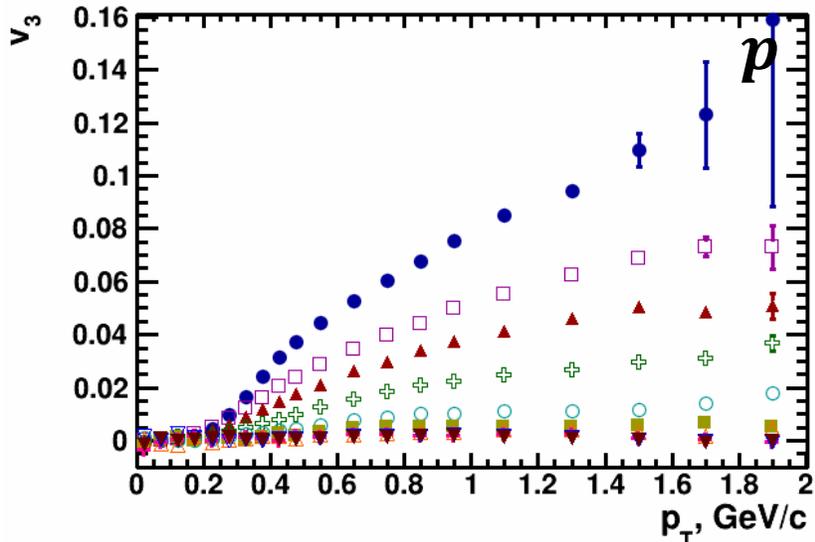
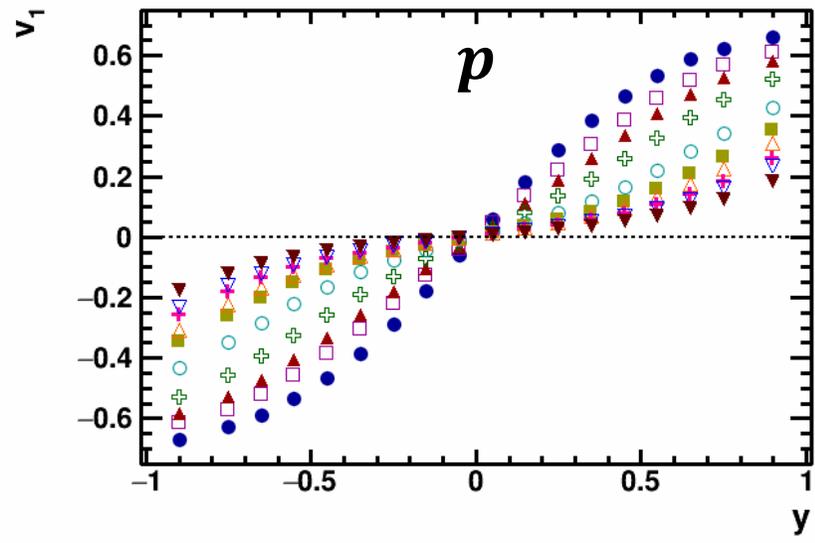
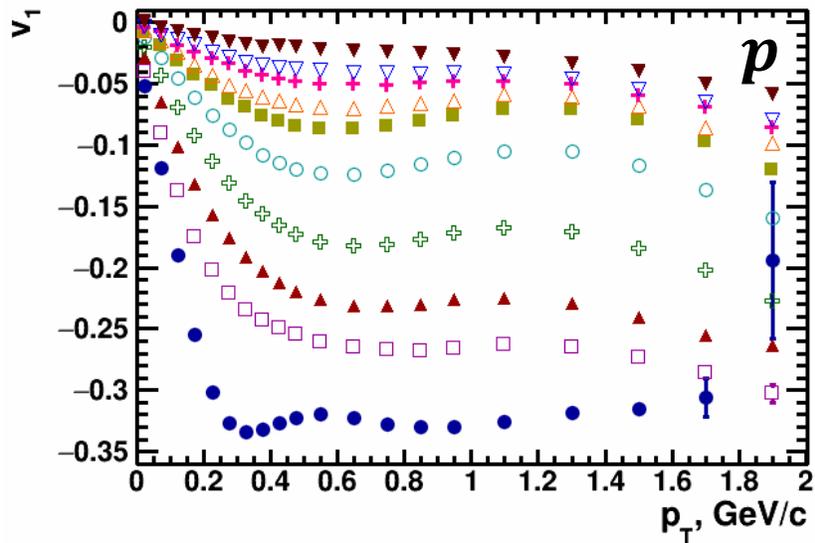
$V_{2,4}(p_T): -0.05 < y < 0.05$

$V_3(p_T): -0.2 < y < 0.2$

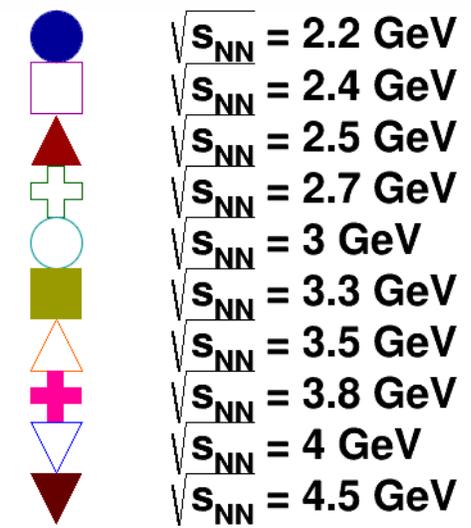


Модели с каскадным/струнным режимом не могут воспроизвести данные в области энергий $\sqrt{s_{NN}} < 4.5$ ГэВ

$v_{1,3}(p_T, y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=2.2-4.5$ ГэВ: JAM модель



JAM MD3, Au+Au, 10-40%



Протоны:

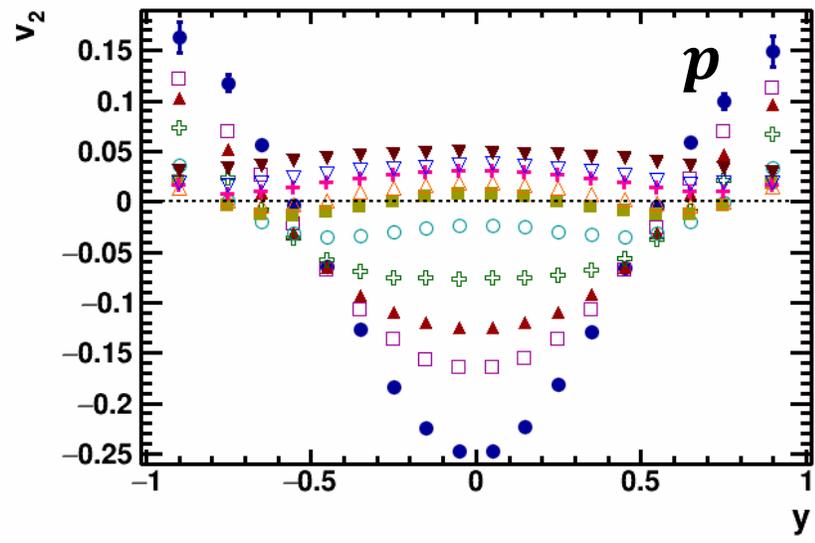
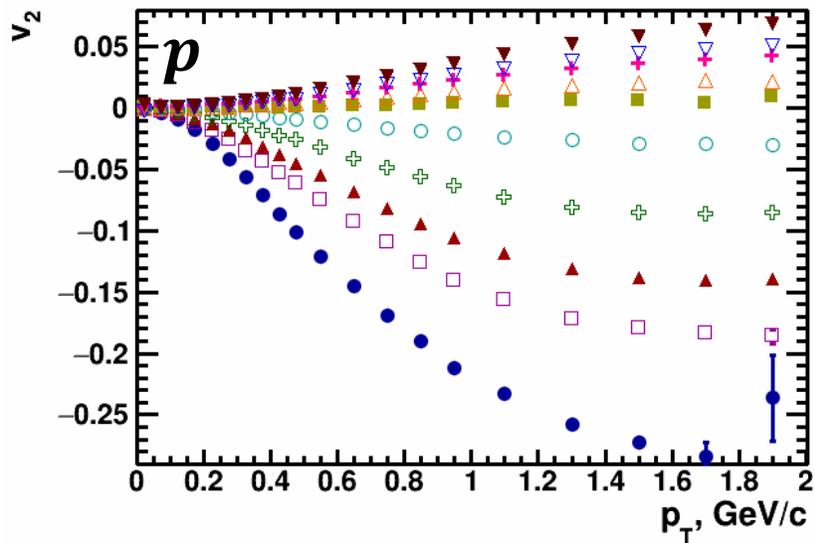
$v_{1,3}(p_T): -0.5 < y < -0.15$

$v_{1,3}(y): 1.0 < p_T < 1.5 \text{ GeV}/c$

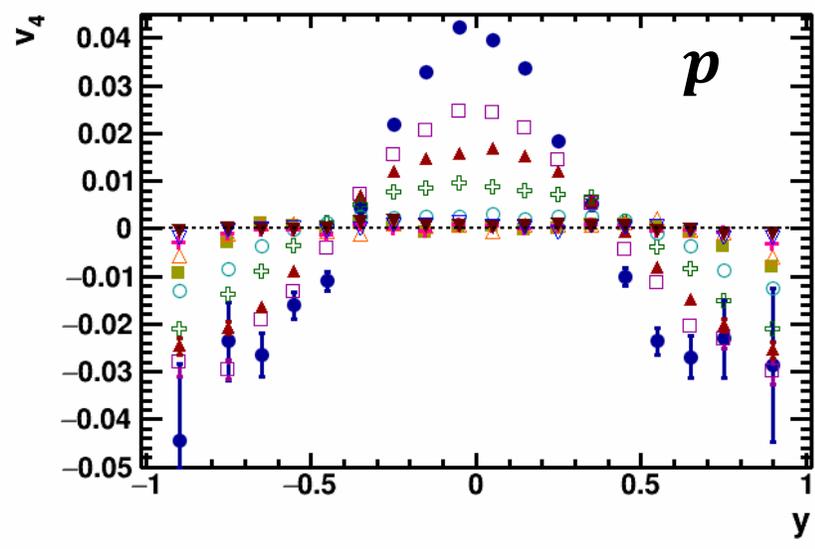
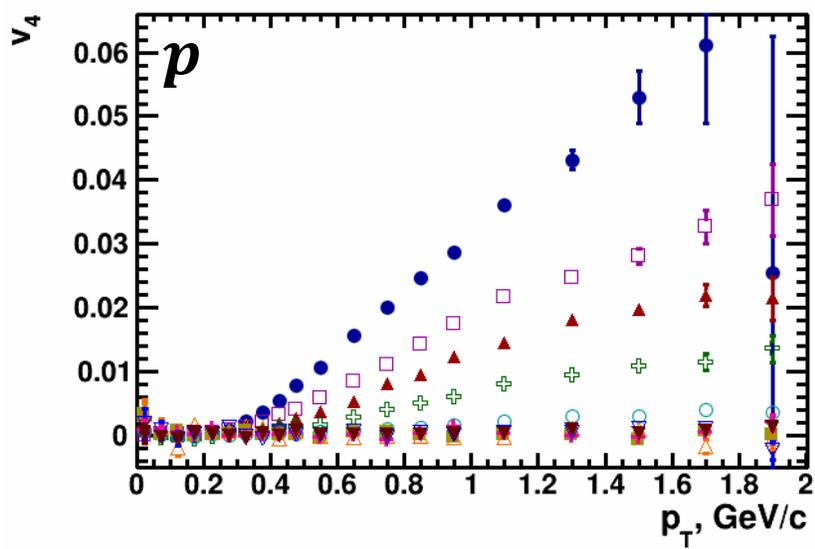
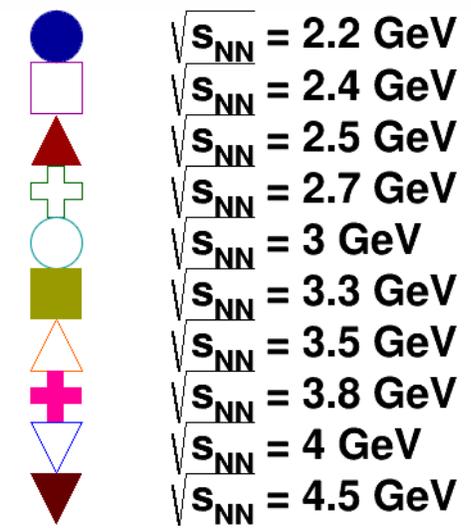
$|v_{1,3}\{\Psi_1\}|$ уменьшается с ростом энергии

$v_3 \approx 0$ при $\sqrt{s_{NN}} \geq 3.5$ ГэВ

$v_{2,4}(p_T, y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=2.2-4.5$ ГэВ: JAM модель



JAM MD3, Au+Au, 10-40%



Протоны:

$V_{2,4}(p_T): -0.2 < y < 0.2$

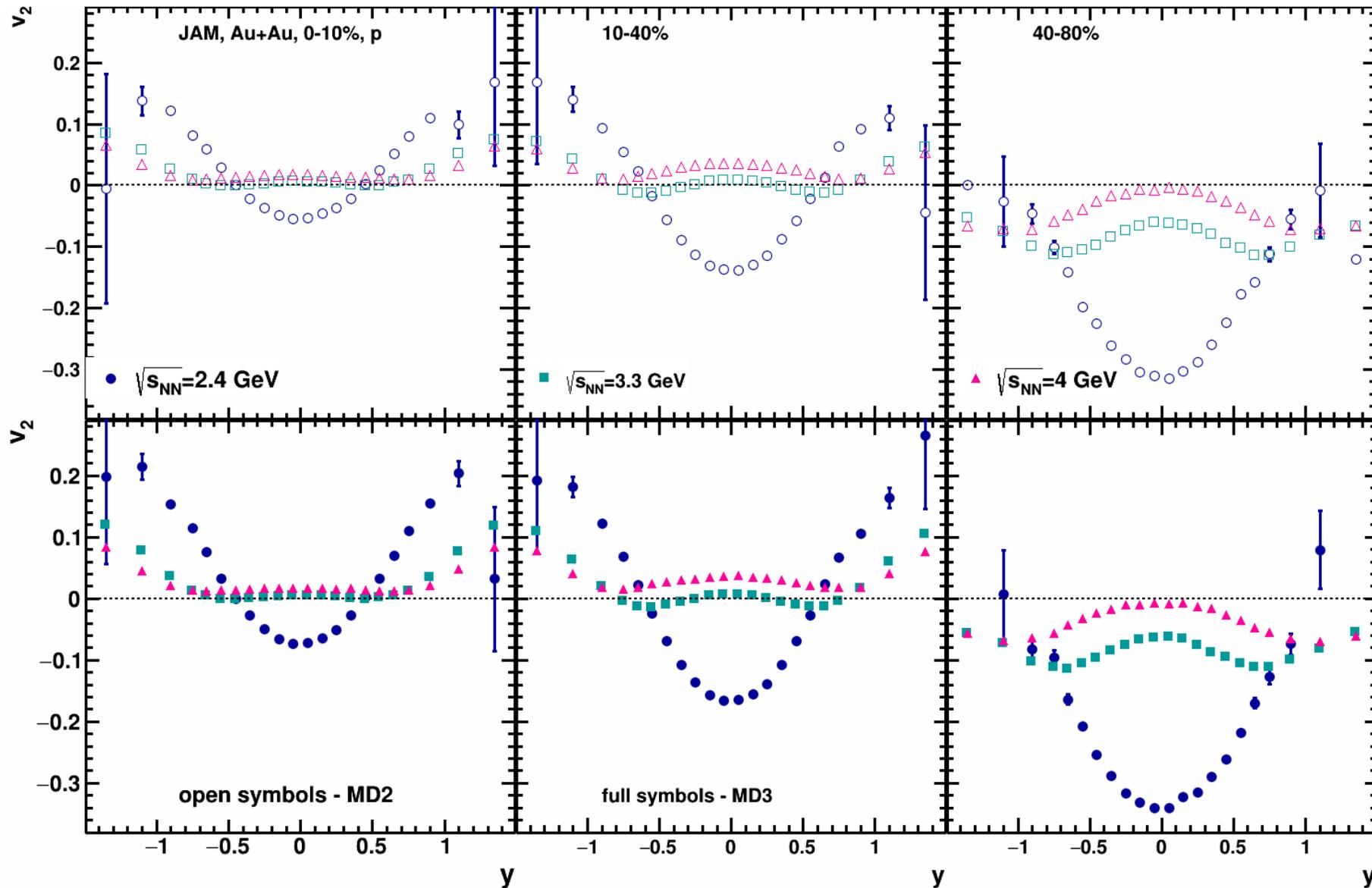
$V_{2,4}(y): 1.0 < p_T < 1.5 \text{ GeV}/c$

$v_2 \approx 0$ в области $y=0$ при $\sqrt{s_{NN}}=3.3 \text{ GeV}$

$v_4\{\Psi_1\} \approx 0$ при $\sqrt{s_{NN}} \geq 3.5 \text{ ГэВ}$

Для более детального изучения $v_n(p_T, y)$ необходимо использовать больше моделей при разных EOS

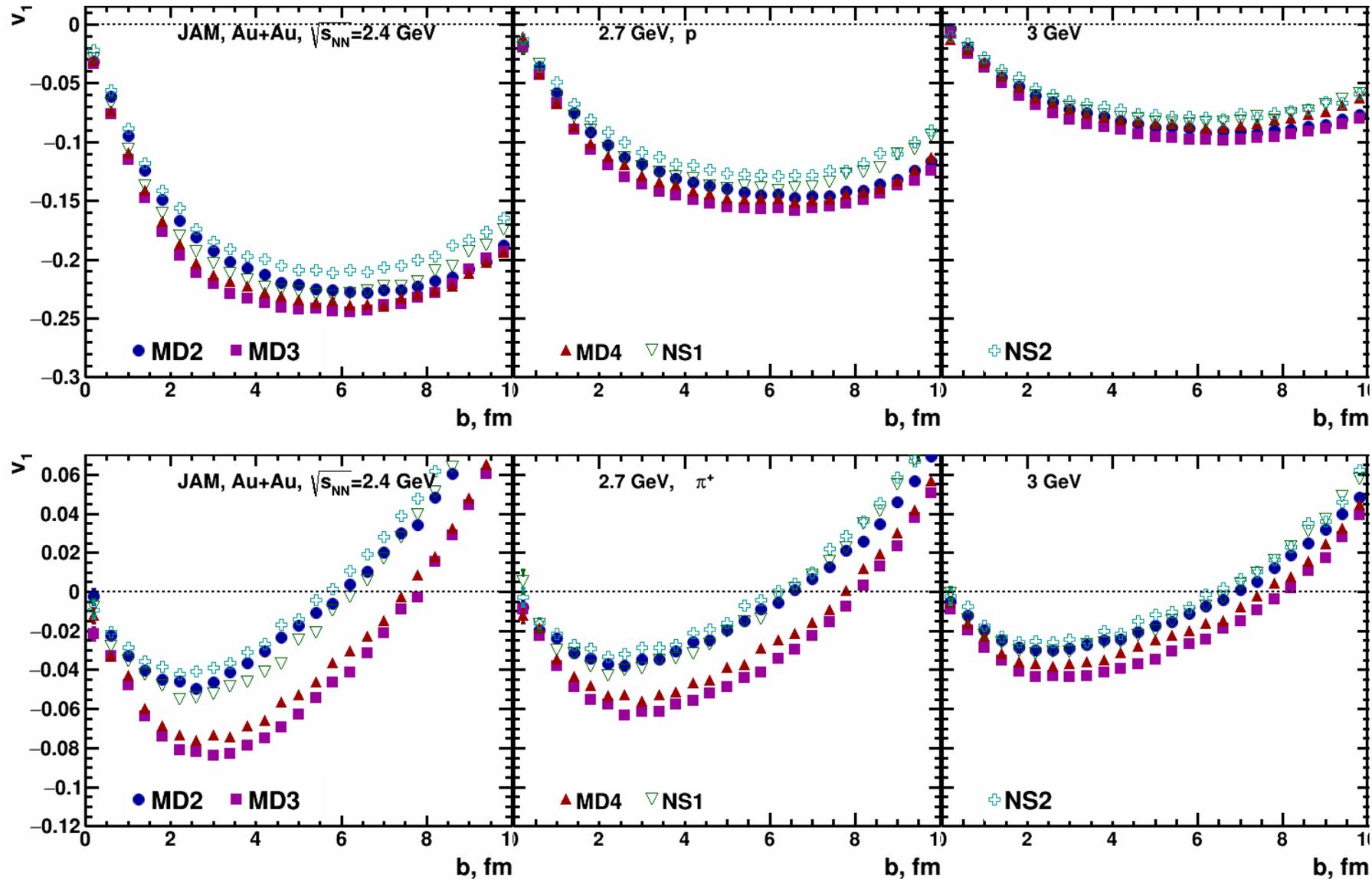
$v_2(y)$ переход из «out-of-plane» в «in-plane»



Протоны:
 $V_{2,4}(y): 1.0 < p_T < 1.5 \text{ GeV}/c$

- Слабая зависимость от EoS
- $v_2(p_T)$ сильно зависит от центральности:
 - Переход v_2 через ноль зависит от быстроты и центральности
 - $v_2 < 0$ даже при $\sqrt{s_{NN}} = 4 \text{ ГэВ}$ в периферийных столкновениях

Сравнение $v_1(b)$ при разных EOS



MD2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

MD3:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

MD4:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

NS1:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.83$

NS2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

$V_1(b)$:

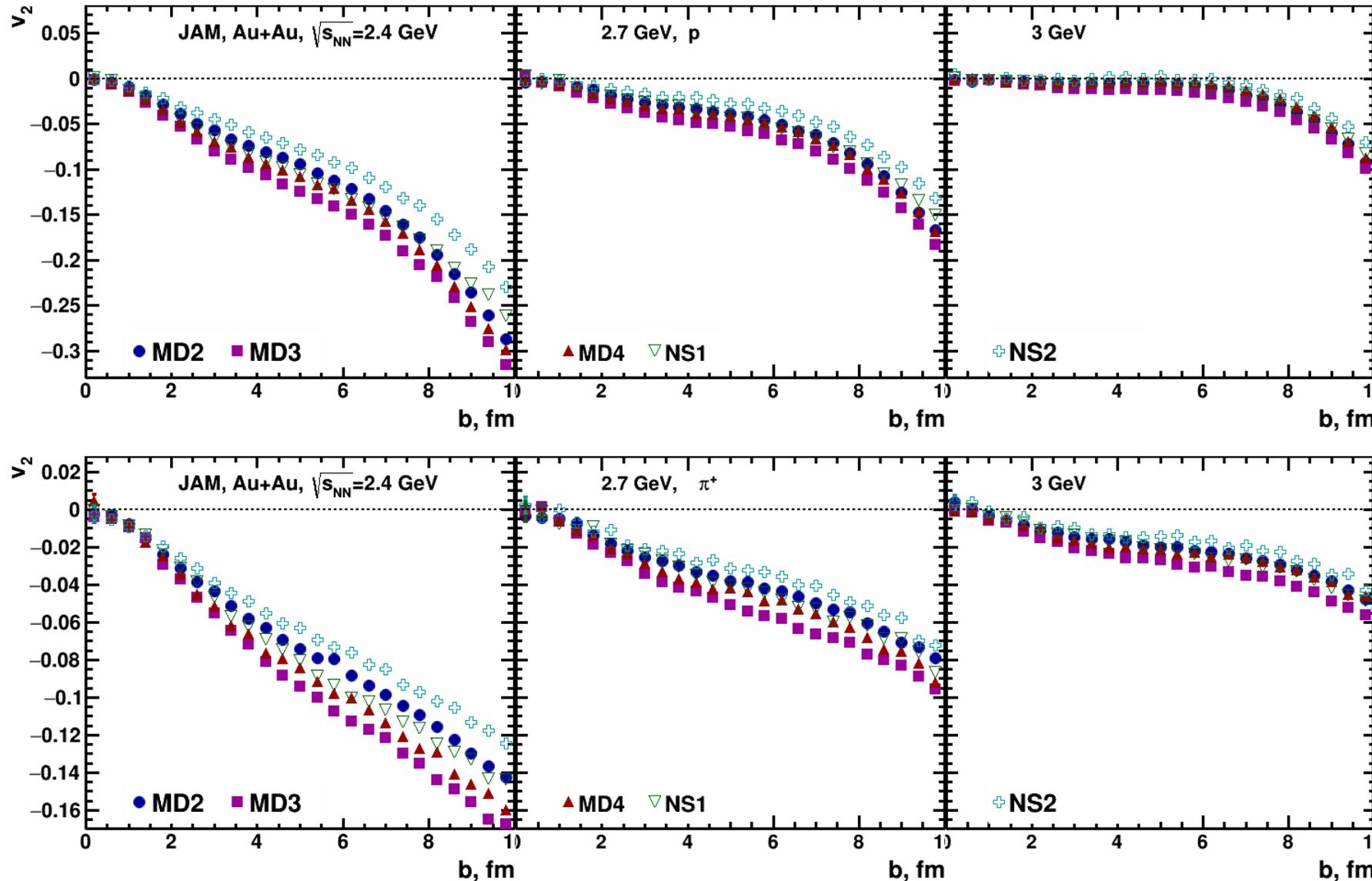
$-0.5 < y < 0.15$

$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (p)

$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (π^+)

- v_1 пионов более чувствителен к изменению EOS, чем v_1 протонов
- Меньший вклад от нуклонов-спектаторов для EOS с меньшим K

Сравнение $v_2(b)$ при разных EOS



MD2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

MD3:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

MD4:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

NS1:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.83$

NS2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

$V_2(b)$:

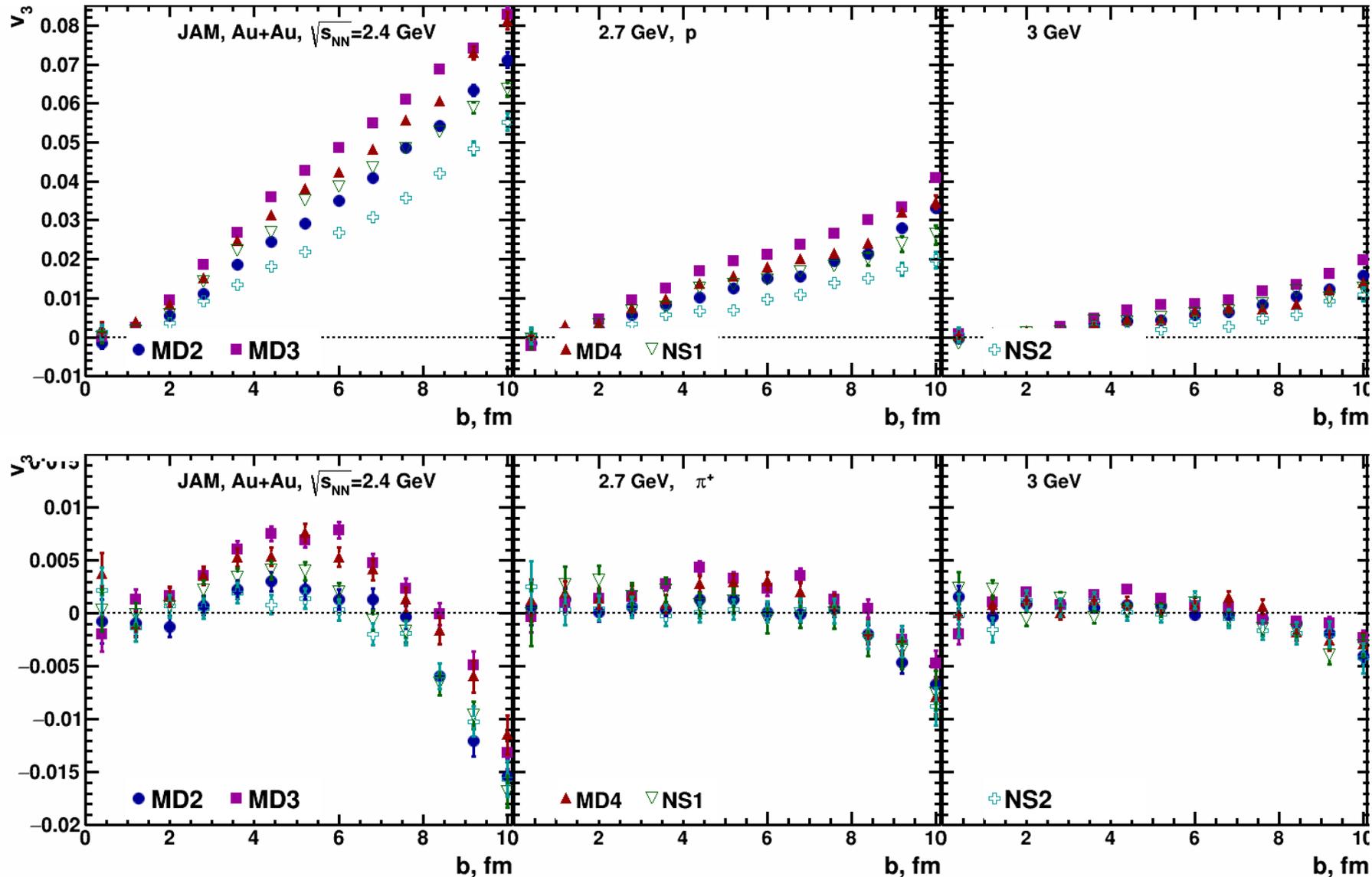
$-0.2 < y < 0.2$

$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (p)

$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (π^+)

- Меньший вклад от нуклонов-спектаторов для EOS с меньшим K

Сравнение $v_3(b)$ при разных EOS



MD2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

MD3:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

MD4:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

NS1:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.83$

NS2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

$V_3(b)$:

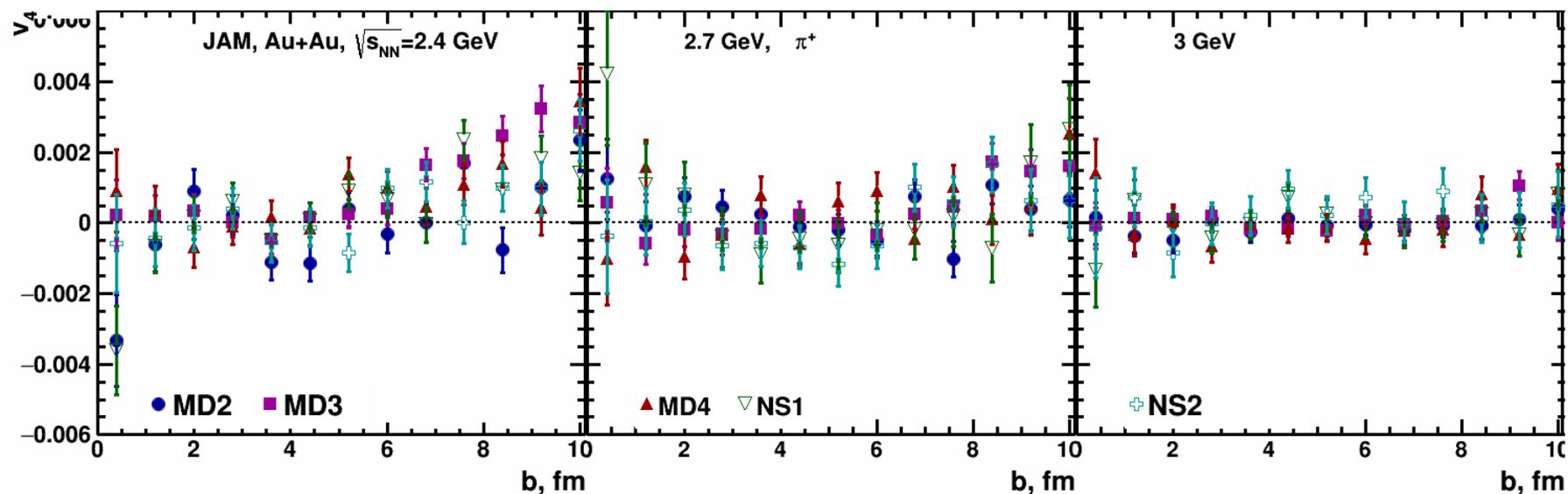
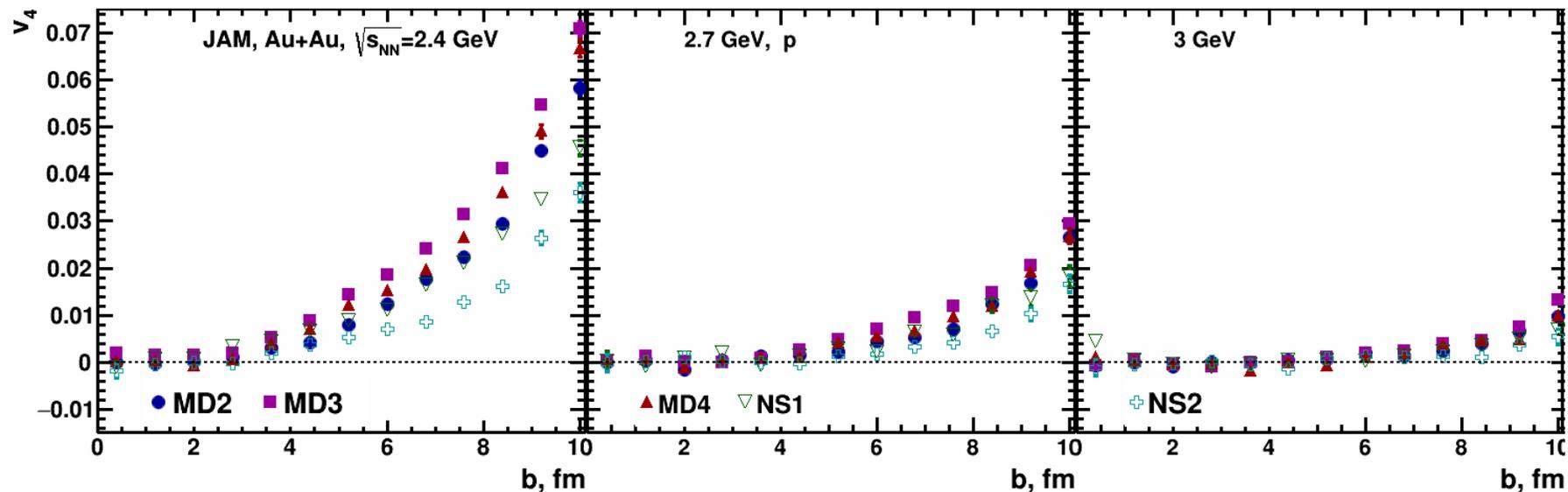
$-0.5 < y < 0.15$

$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (p)

$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (π^+)

- v_3 более чувствителен к изменению EOS, чем v_1, v_2
- Меньший вклад от нуклонов-спектаторов для EOS с меньшим K

Сравнение $v_4(b)$ при разных EOS



MD2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

MD3:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

MD4:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.65$

NS1:

$K=380$ MeV, $m^*/m=0.83$

NS2:

$K=210$ MeV, $m^*/m=0.83$

$V_2(b)$:

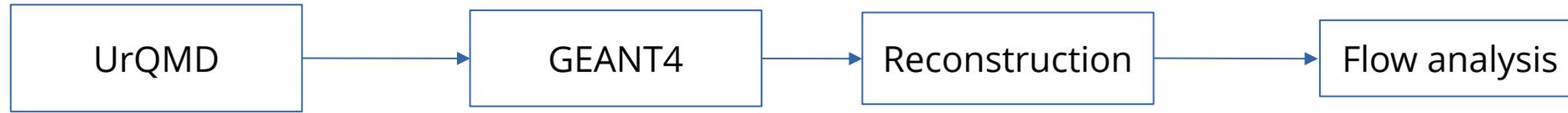
$-0.2 < y < 0.2$

$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (p)

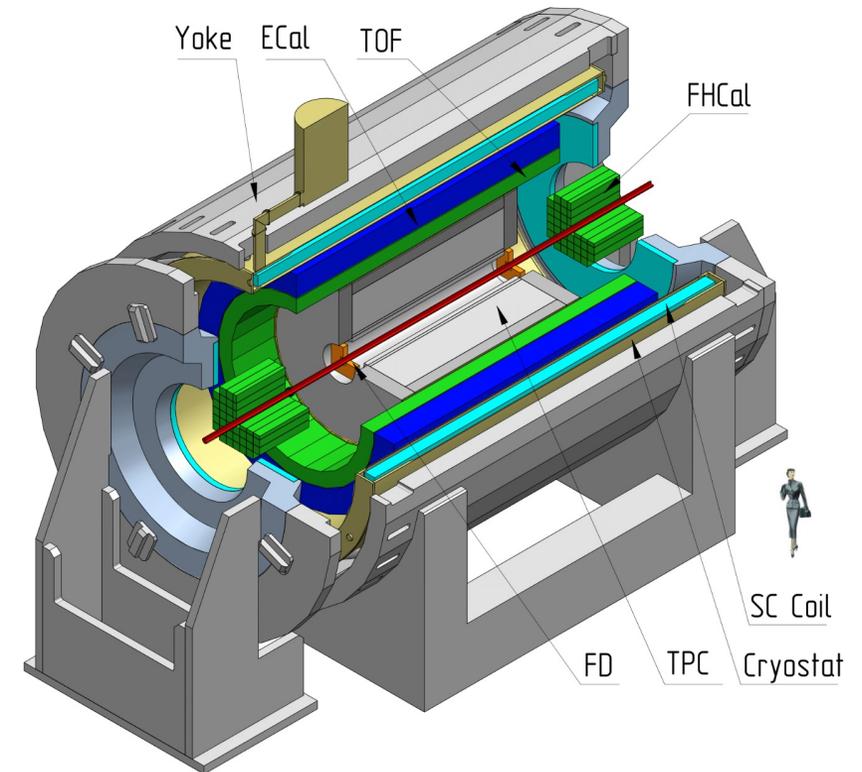
$1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c (π^+)

- v_4 более чувствителен к изменению EOS, чем v_1 , v_2
- Меньший вклад от нуклонов-спектаторов для EOS с меньшим K

Использование детектора MPD для измерения v_n

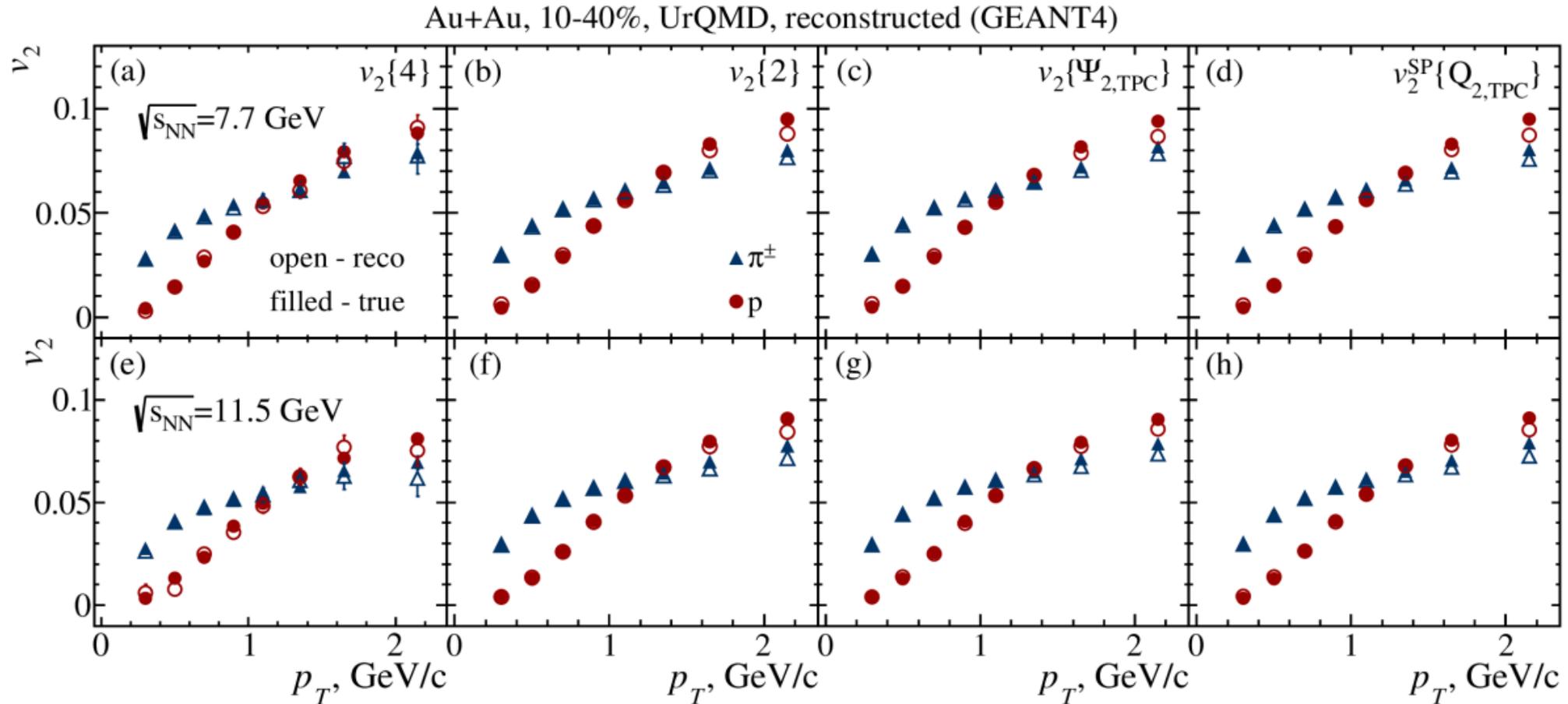


- **Au+Au:**
 - 20M at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ GeV
 - 10M at $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$ GeV
- **Определение центральности:**
 - Определение по b на основе метода MC-Glauber
- **Определение плоскости события: TPC**
- **Отбор треков частиц:**
 - Отбор первичных треков
 - $N_{hits}^{TPC} > 15$
 - $|\eta| < 1.5$
 - $0.2 < p_T^{RFPs} < 3.0$ ГэВ/с
 - Идентификация частиц на базе PDG



Multi-Purpose Detector (MPD) Stage 1

Изучение способностей детектора MPD к измерению v_n



Результаты для v_2 пионов и протонов, полученные из реконструированных и модельных данных находятся в хорошем согласии для всех использованных методов измерения потоков (метод кумулянтов, плоскости события и скалярного произведения)

Цель сравнений моделей и существующих данных

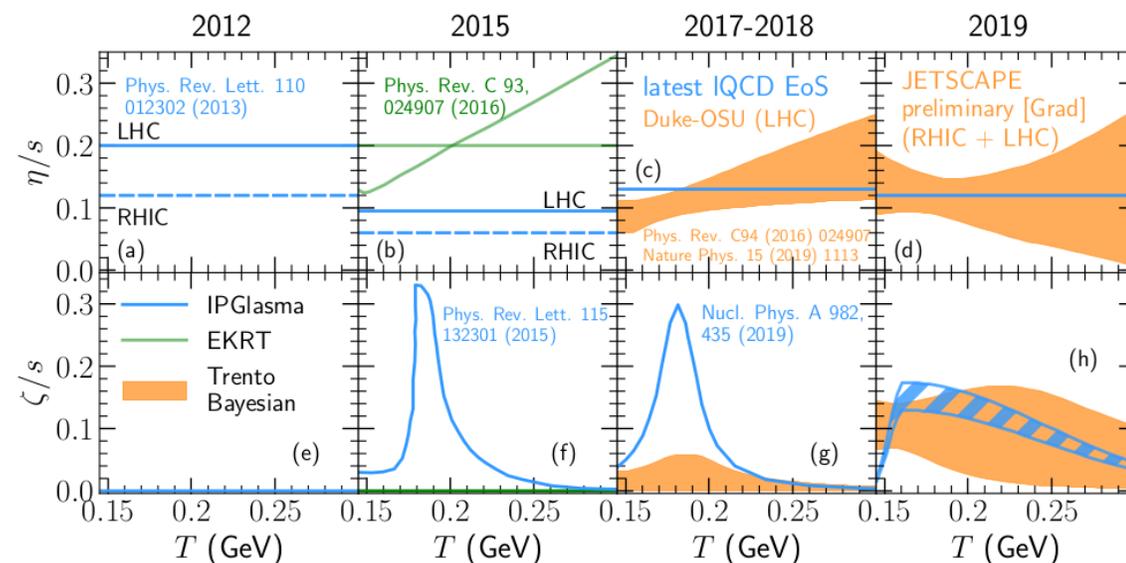
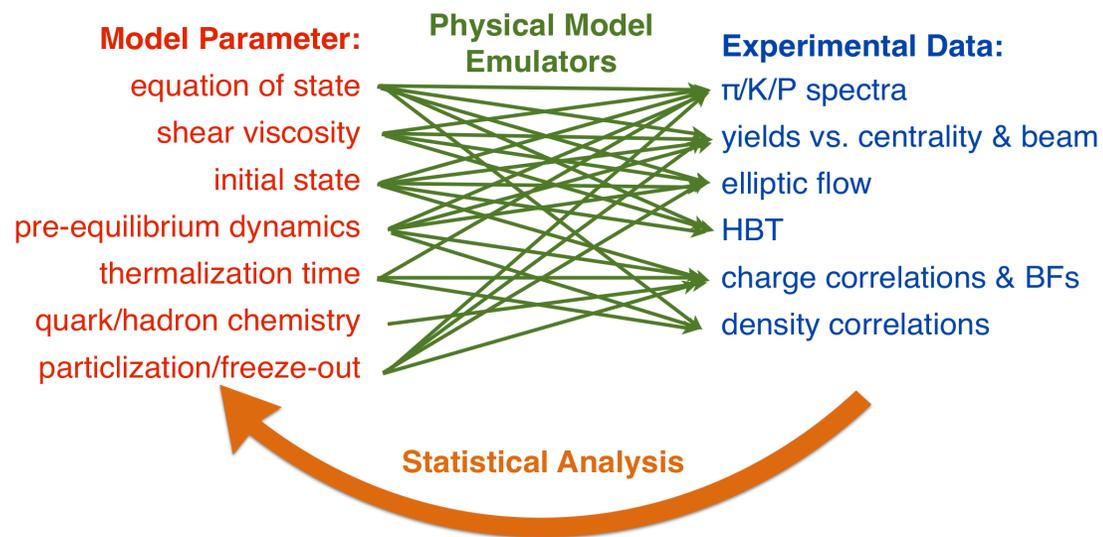
Анизотропные потоки при энергиях NICA - модели:

(1) Каскадные модели: UrQMD, HSD, SMASH, JAM, DCM-QGSM

(2) Гибридные модели: вязкая гидродинамика + каскад (vHLLE+UrQMD, MUSIC+UrQMD, vHLLE+SMASH) и партонные/струнные (AMPT, PHSD и PHQMD)

Цели:

- Провести согласованный сравнительный анализ с использованием тех же методов измерения v_n , что и в экспериментах
- Гибридный конструктор с возможностью варьирования моделей описания разных этапов столкновения и их конфигураций
- Разработка инструментов Байесовского анализа для области энергий Nuclotron-NICA



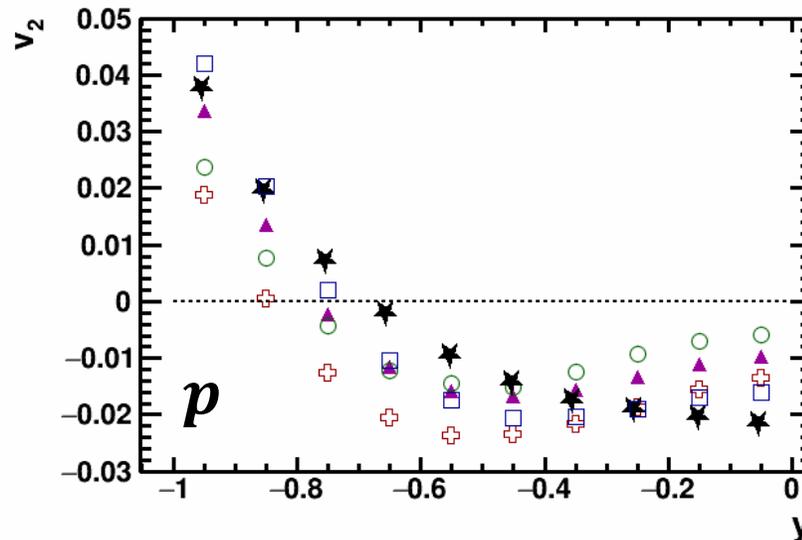
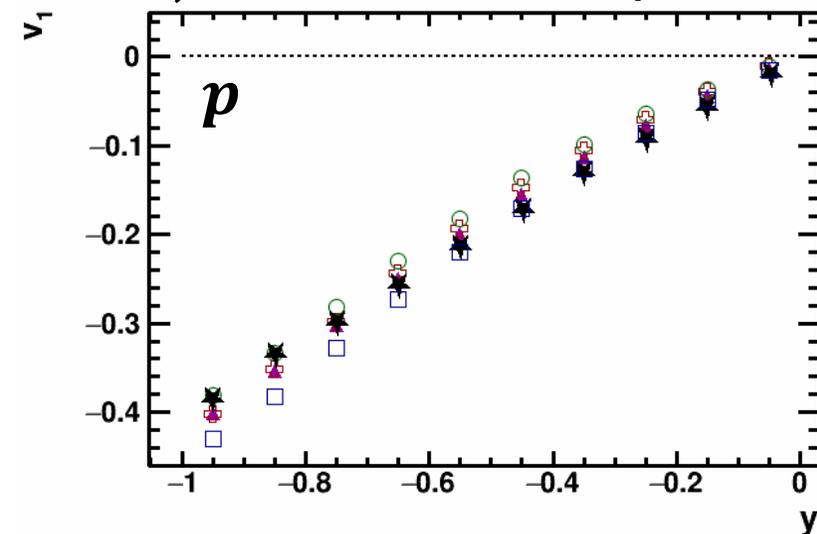
Заключение

- **Анизотропные потоки при $\sqrt{s_{NN}}=4-11.5$ ГэВ:**
 - Каскадные модели без фазы КГМ предсказывают меньший сигнал v_2 по сравнению с данными эксперимента STAR при $\sqrt{s_{NN}}=7.7-11.5$ ГэВ
 - Каскадные модели дают схожий сигнал v_2 по сравнению с данными эксперимента STAR при $\sqrt{s_{NN}}=4.5$ ГэВ
- **Сравнение с STAR BES при $\sqrt{s_{NN}}=4.5, 3$ ГэВ и HADES при $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ ГэВ:**
 - Хорошее общее согласие модели JAM с данными для v_n протонов
 - Модели в каскадном режиме не могут хорошо описать v_n
 - Потоки высоких гармоник более чувствительны к EOS
- **Изучение энергетической зависимости v_n :**
 - $|v_{1,3}|$ уменьшается с ростом энергии
 - $v_2 \approx 0$ в области $y = 0$ при $\sqrt{s_{NN}}=3.3$ ГэВ
 - $v_{3,4}\{\Psi_1\} \approx 0$ при $\sqrt{s_{NN}} \geq 4$ ГэВ
 - Переход $v_2(p_T, y, \sqrt{s_{NN}})$ протонов через ноль зависит от энергии, центральности и быстроты
- Новые данные, полученные в экспериментах BM@N ($\sqrt{s_{NN}}=2.3-3.3$ ГэВ) и MPD ($\sqrt{s_{NN}}=4-11$ ГэВ) предоставят более детальные дифференциальные измерения v_n
- В дальнейшем планируется использовать другие сталкивающиеся системы для детального сравнительного анализа

Спасибо за внимание!

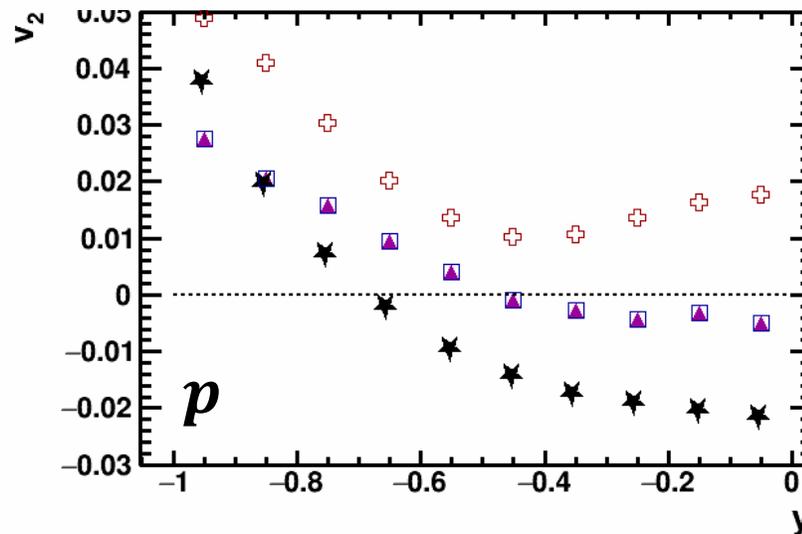
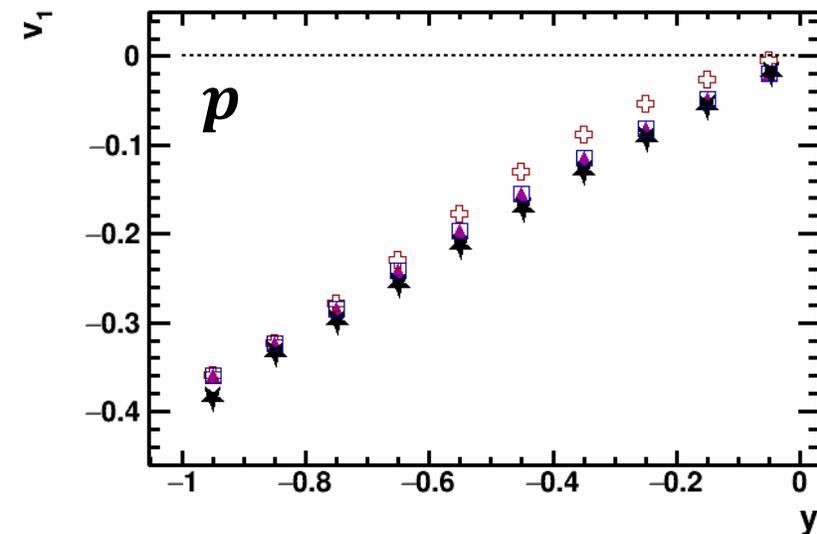
Запасные слайды

$v_{1,2}(y)$ при $\sqrt{s_{NN}}=3$ ГэВ: сравнение с STAR



JAM, Au+Au, 10-40%

- MD3 Kinematic cuts:
- ▲ MD2 $v_1(y)$ of π^\pm : $0.2 < p_T < 1.6$ GeV/c
- + NS1 $v_1(y)$ of K^\pm : $0.4 < p_T < 1.6$ GeV/c
- NS2 $v_1(y)$ of p : $0.4 < p_T < 2.0$ GeV/c
- ★ STAR data



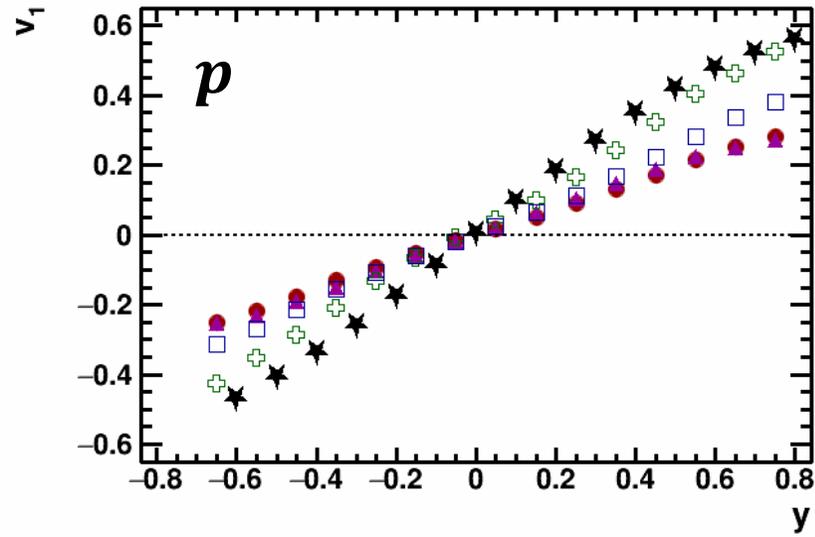
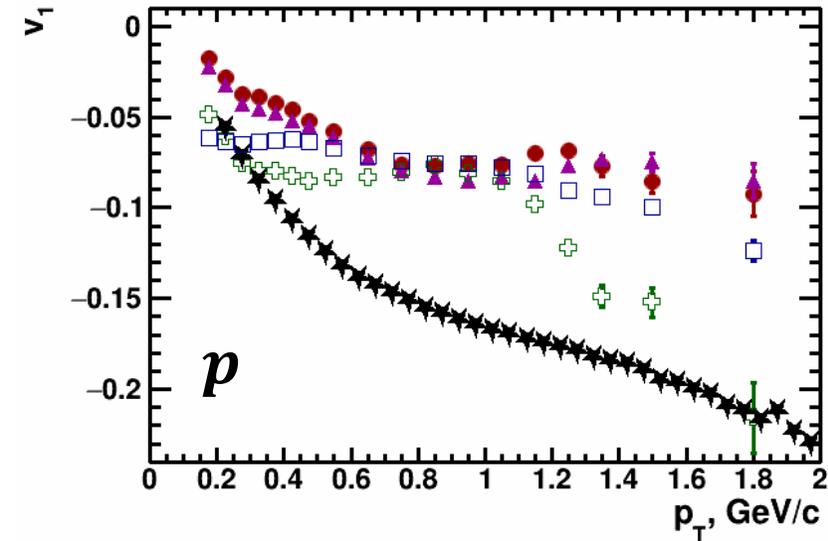
Au+Au, 10-40%

- PHQMD hard EoS
- ▲ PHQMD soft EoS
- + HSD
- ★ STAR data

JAM не описывает одинаково хорошо все типы частиц
 v_1 пионов более чувствителен к EOS, чем v_1 протонов

Экспериментальные данные взяты из:
 M. Abdallah et al. [STAR Collaboration] 2108.00908 [nucl-ex]

$v_{1,3}(p_T, y)$ in Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ GeV: cascade models



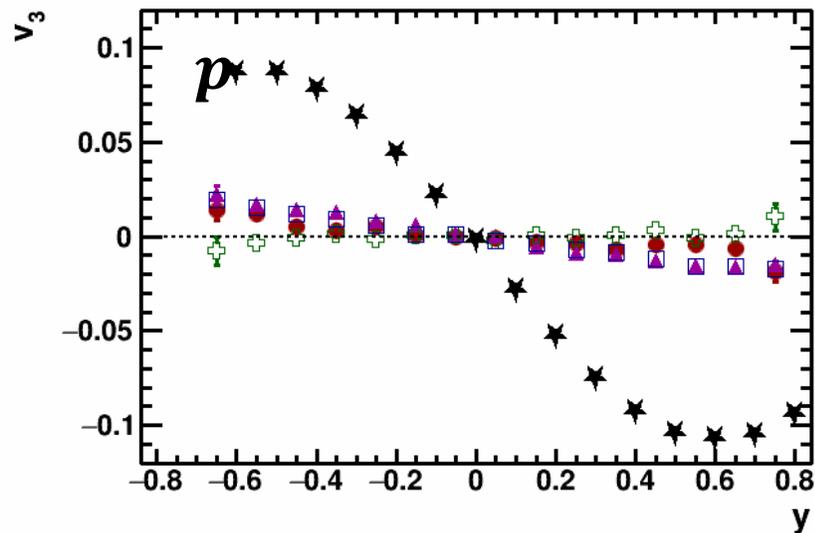
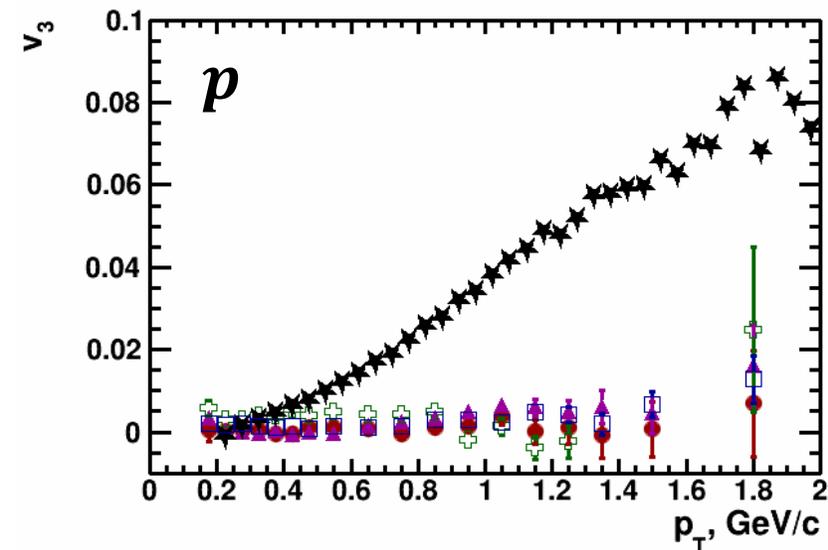
Au+Au, 20-30% (6<b<9 fm)

- DCM-QGSM-SMM
- UrQMD cascade
- ▲ JAM cascade
- + HSD cascade
- ★ HADES data

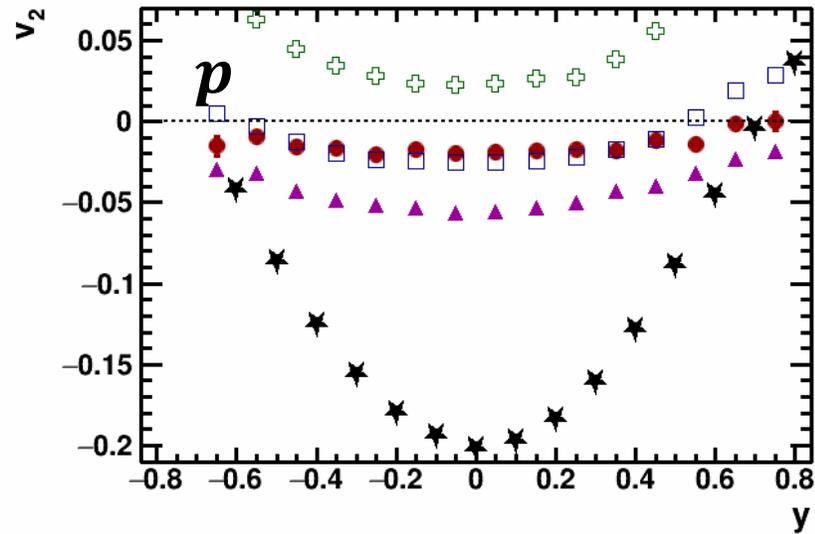
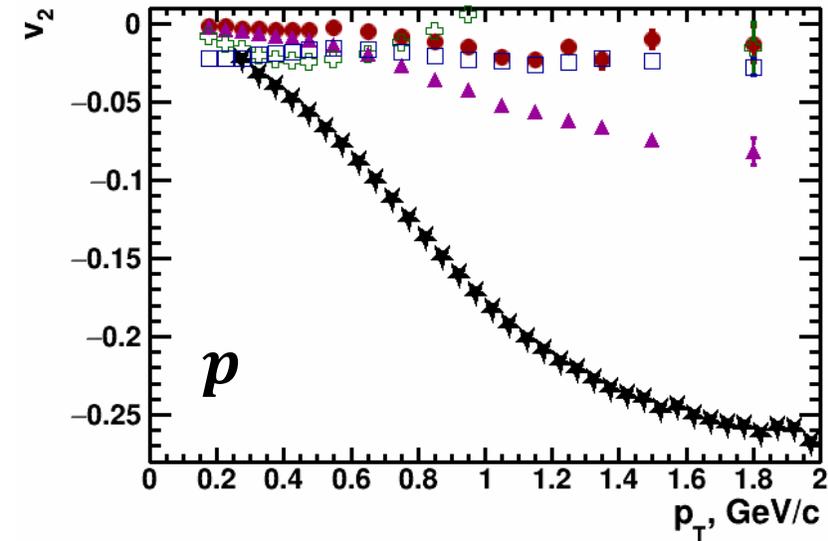
Experimental data points:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301

Kinematic cuts:
 $v_{1,3}(p_T): -0.25 < y < -0.15$
 $v_{1,3}(y): 1.0 < p_T < 1.5 \text{ GeV}/c$

Models with cascade mode cannot reproduce the experimental data



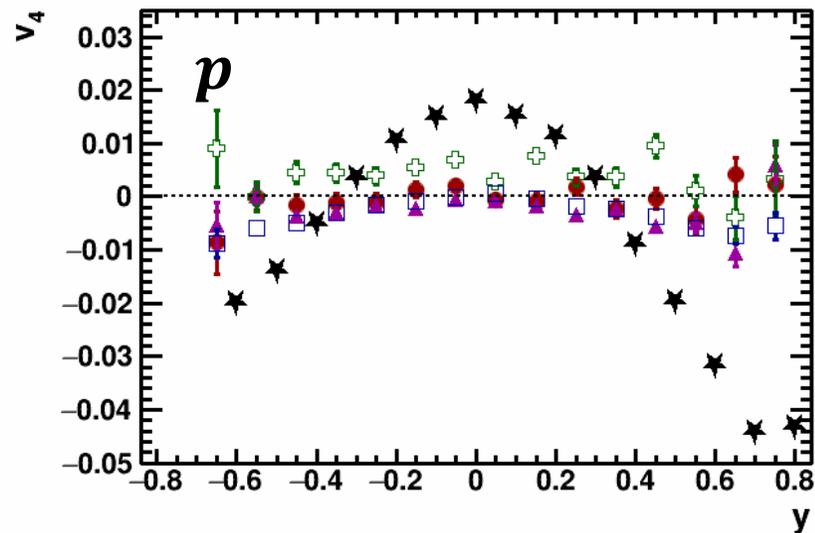
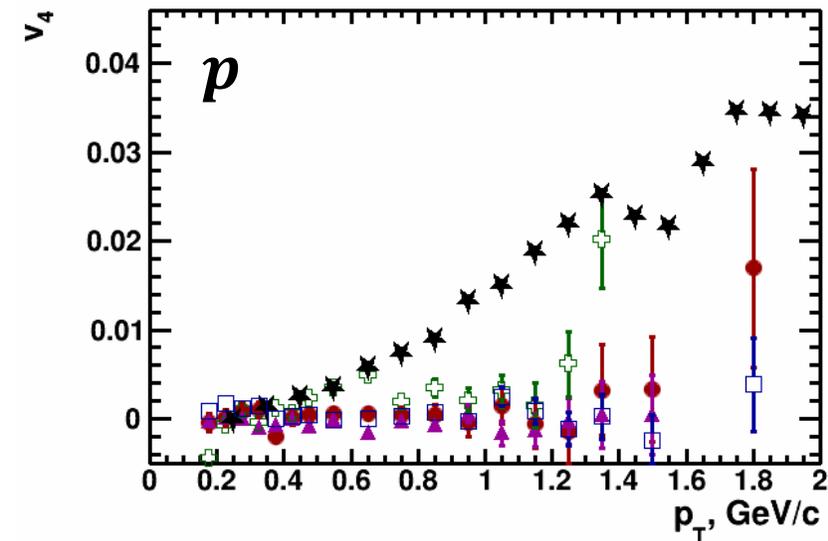
$v_{2,4}(p_T, y)$ in Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ GeV: cascade models



Au+Au, 20-30% (6 < b < 9 fm)

- DCM-QGSM-SMM
- UrQMD cascade
- JAM cascade
- HSD cascade
- HADES data

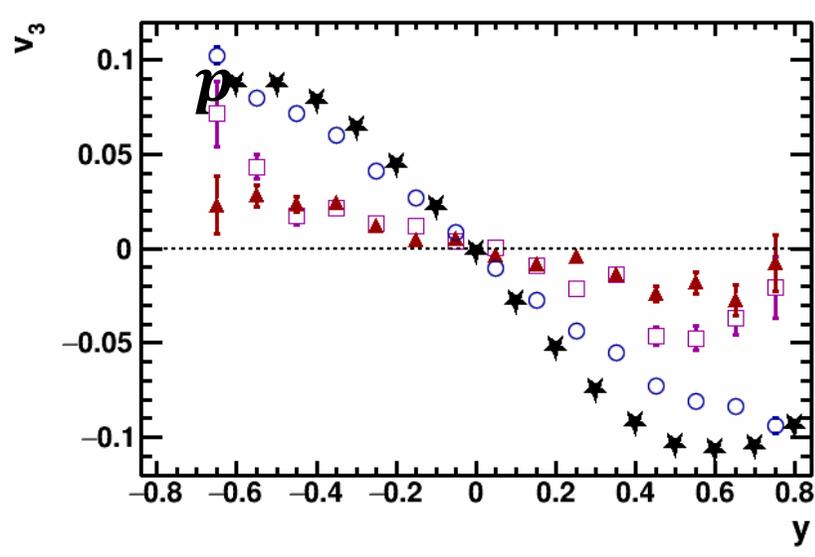
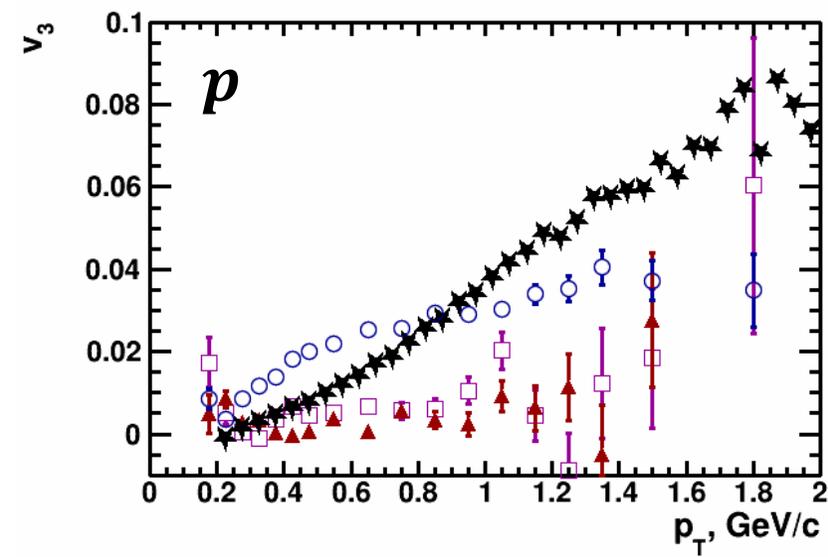
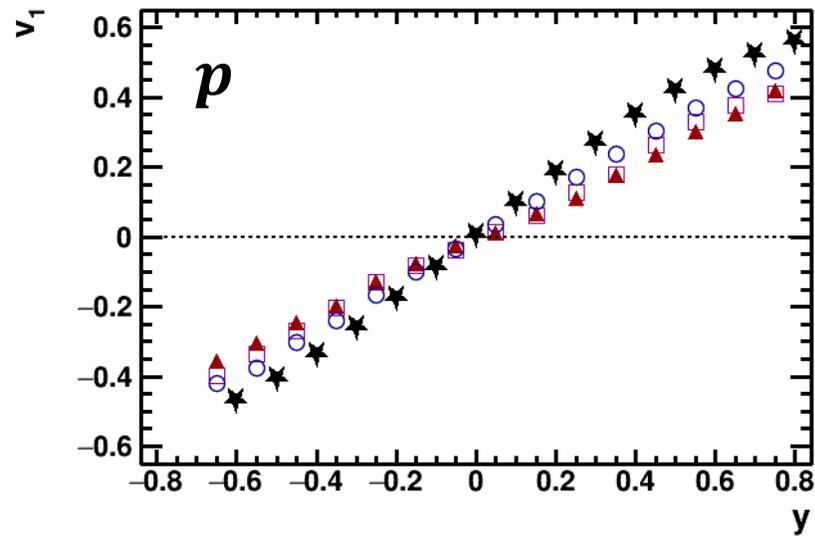
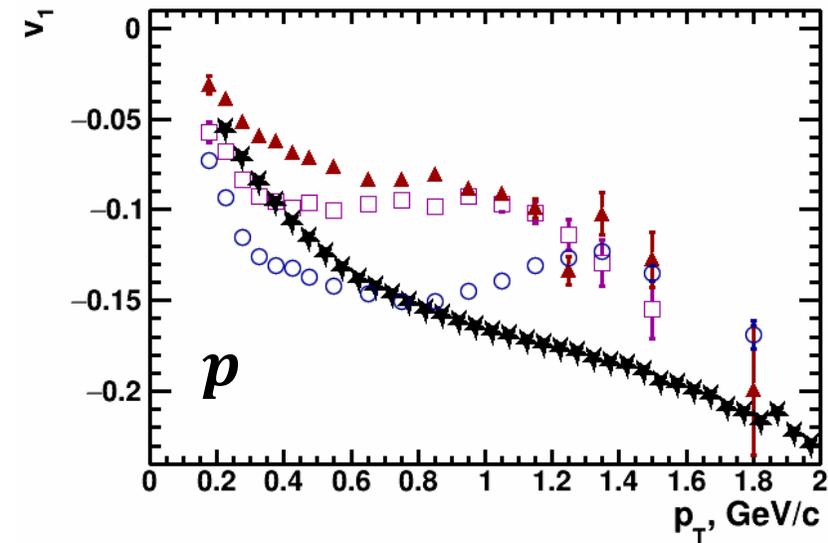
Experimental data points:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301



Kinematic cuts:
 $v_{2,4}(p_T)$: $-0.05 < y < 0.05$
 $v_{2,4}(y)$: $1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c

Models with cascade mode cannot reproduce the experimental data

$v_{1,3}(p_T, y)$ in Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ GeV: mean-field models



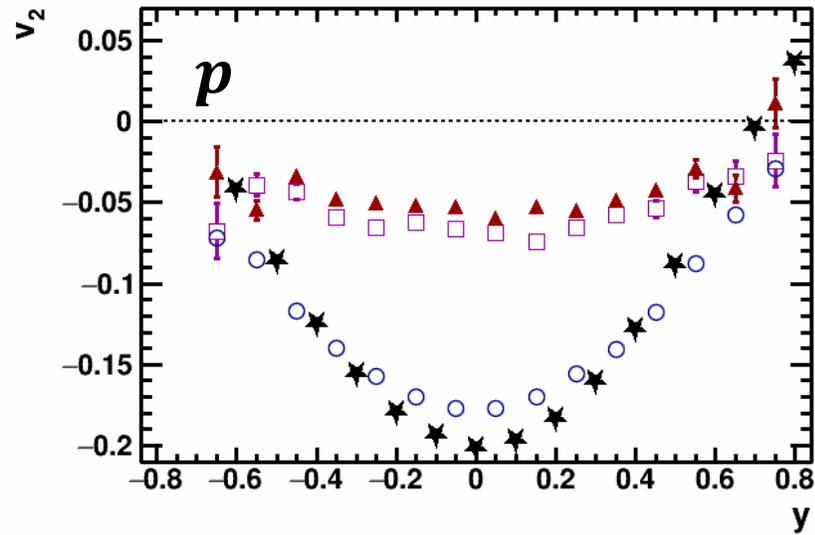
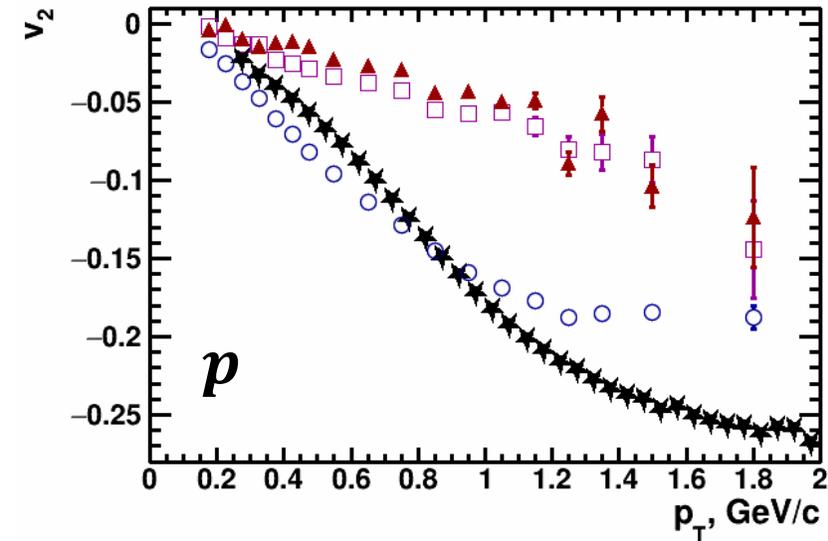
- Au+Au, 20-30% (6 < b < 9 fm)**
- **UrQMD hardSkyrme**
 - **PHQMD hard EoS**
 - ▲ **PHQMD soft EoS**
 - ★ **HADES data**

Experimental data points:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301

Kinematic cuts:
 $v_{1,3}(p_T)$: $-0.25 < y < -0.15$
 $v_{1,3}(y)$: $1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c

Models with cascade mode cannot reproduce the experimental data

$v_{2,4}(p_T, y)$ in Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=2.4$ GeV: mean-field models



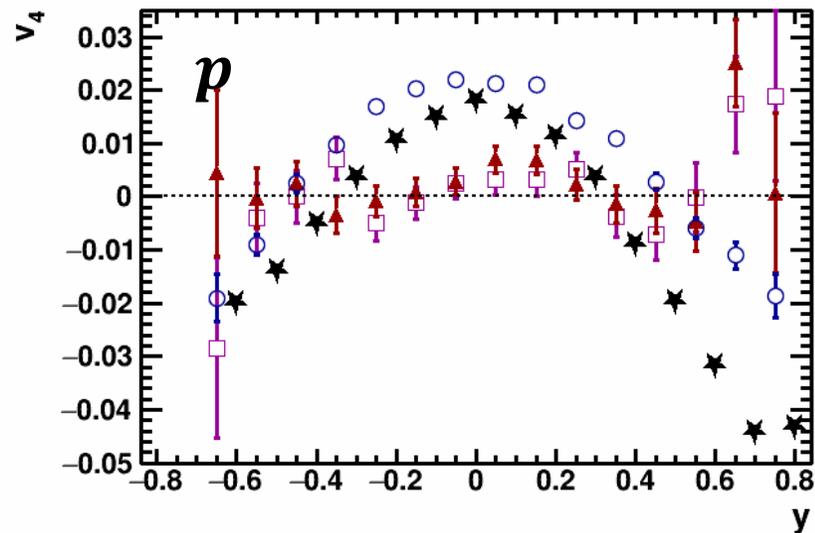
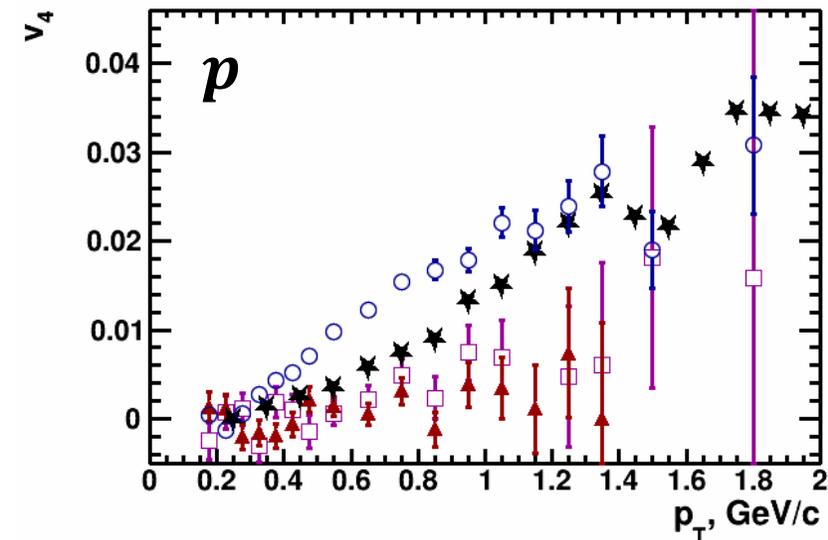
Au+Au, 20-30% (6<b<9 fm)

- UrQMD hardSkyrme
- PHQMD hard EoS
- ▲ PHQMD soft EoS
- ★ HADES data

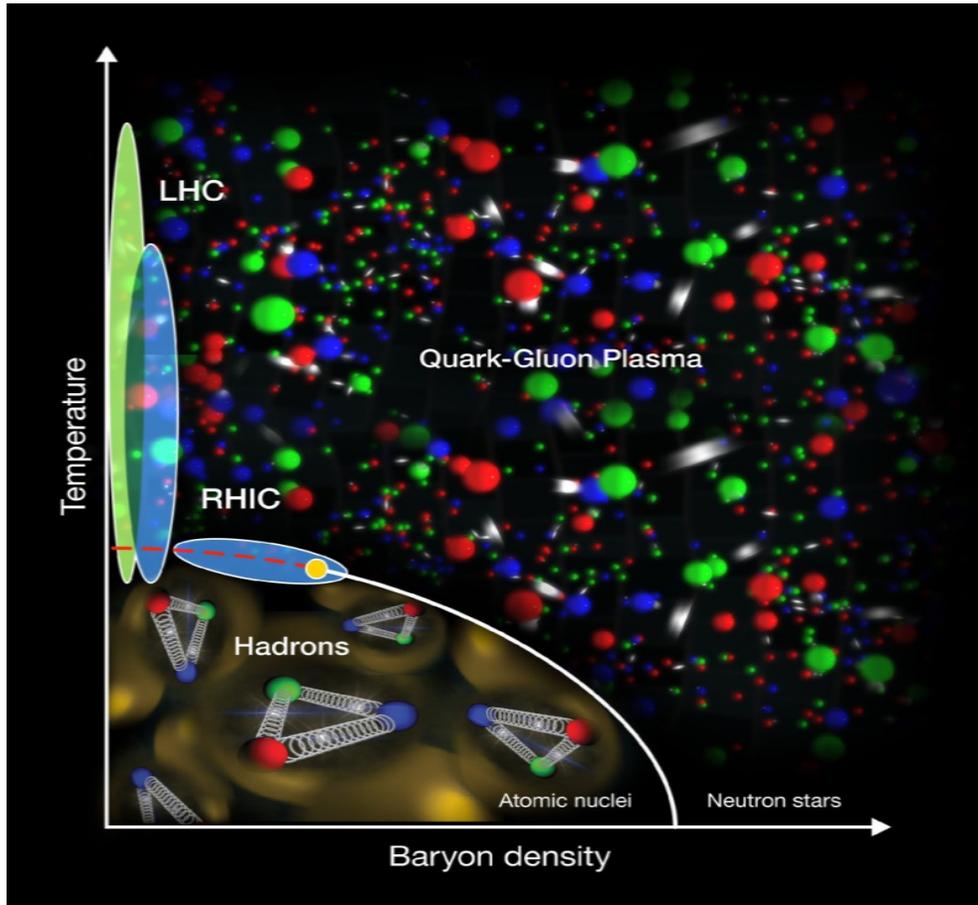
Experimental data points:
Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 262301

Kinematic cuts:
 $v_{2,4}(p_T)$: $-0.05 < y < 0.05$
 $v_{2,4}(y)$: $1.0 < p_T < 1.5$ GeV/c

Models with cascade mode cannot reproduce the experimental data



Фазовая диаграмма КХД



Фазовая диаграмма материи, состоящей из сильно взаимодействующих частиц

Кварк-Глюонная Плазма (QGP)

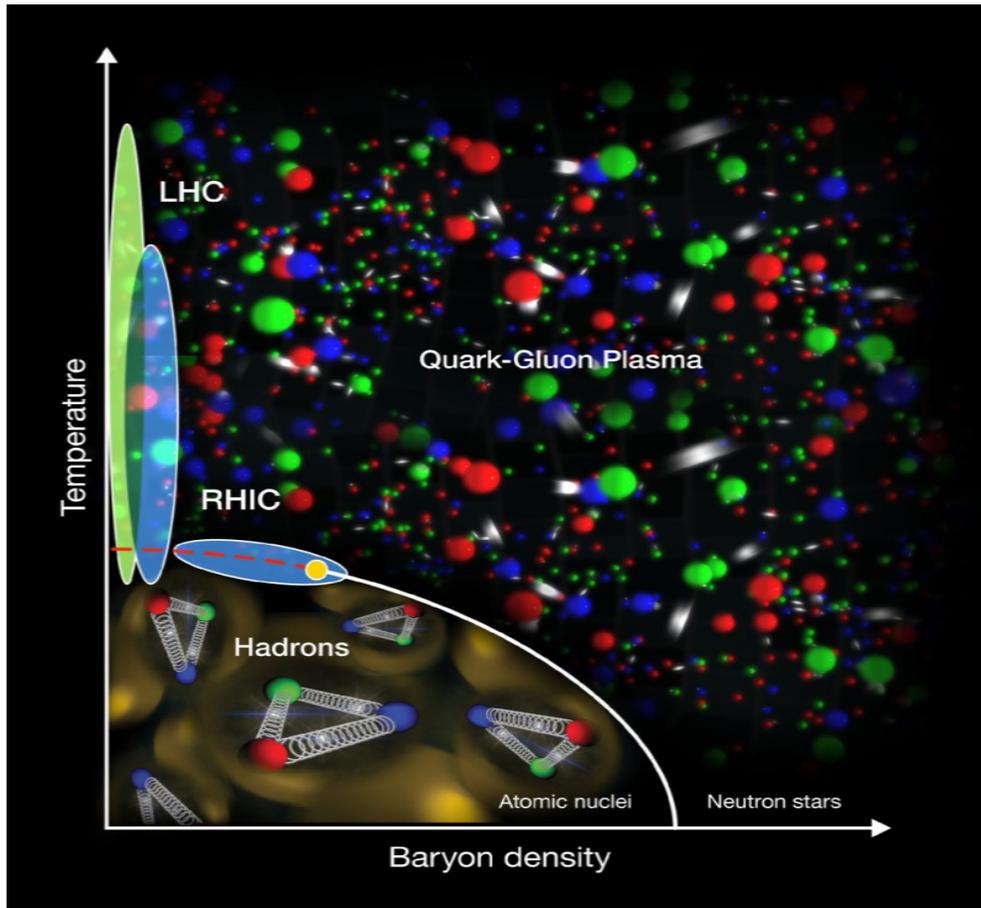
E. Shuryak, Phys. Rep. 61 (1979) 71

Экстремально возбуждённая материя из свободных кварков, антикварков и глюонов

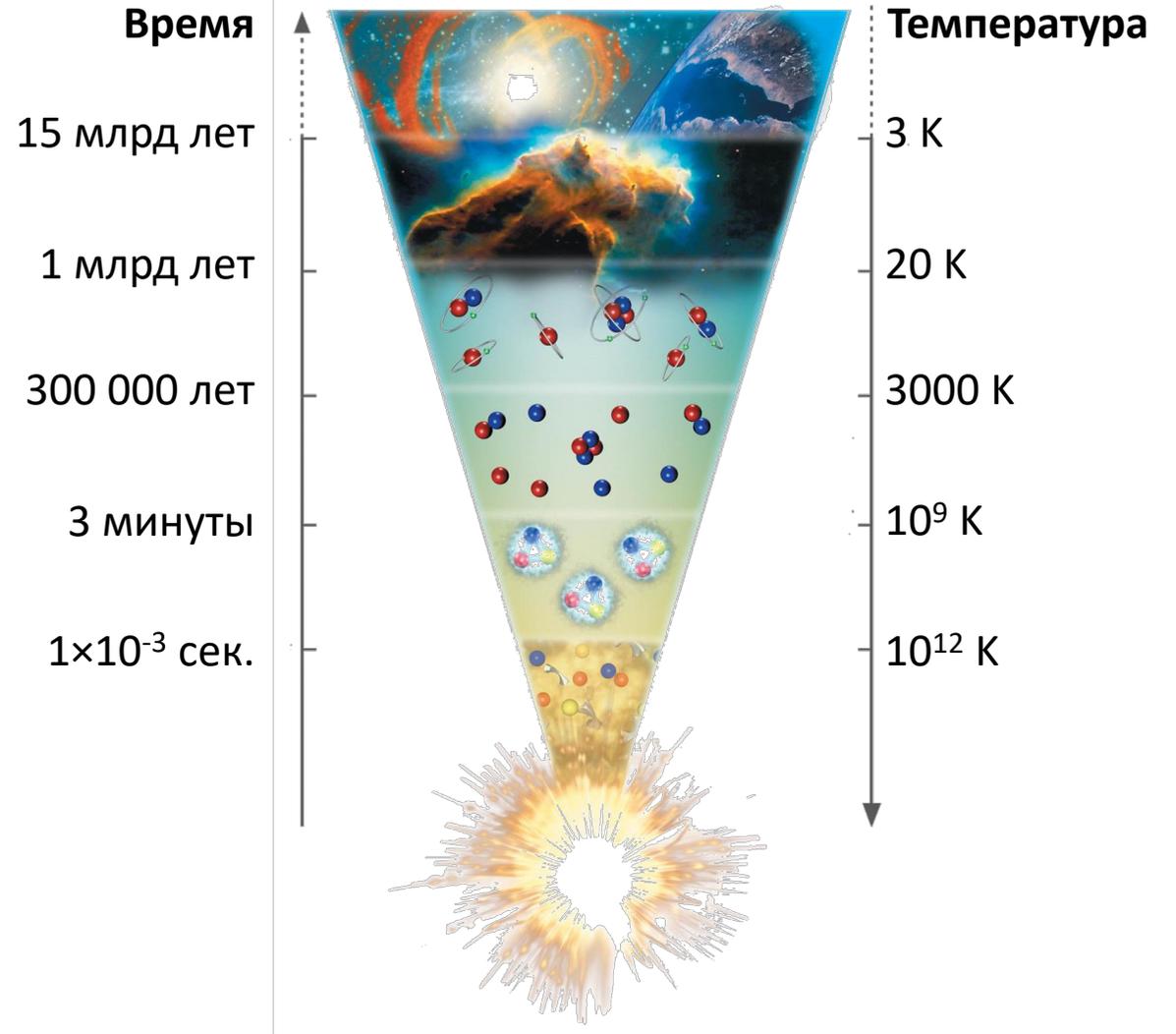
- Критическая плотность энергии: $\sim 1 \text{ ГэВ/фм}^3$ (3.6×10^6 тонн/мм³)
 - $\sim 3.6 \times 10^{13} \rho_s$ (ρ_s – плотность материи в центре Солнца)
- Критическая температура: $\sim 170\text{-}200 \text{ МэВ}$ ($2.3 \times 10^{12} \text{ К}$)
 - $\sim 1.1 \times 10^5 T_s$ (T_s – температура материи в центре Солнца)

- Высокая T , малый μ_B – топ RHIC, LHC
 - Фазовый переход типа «кроссовер»
- Широкая область (T, μ_B) – RHIC BES, SPS, NICA, Nuclotron, FAIR
 - Фазовый переход 1-го рода, критическая точка (?)

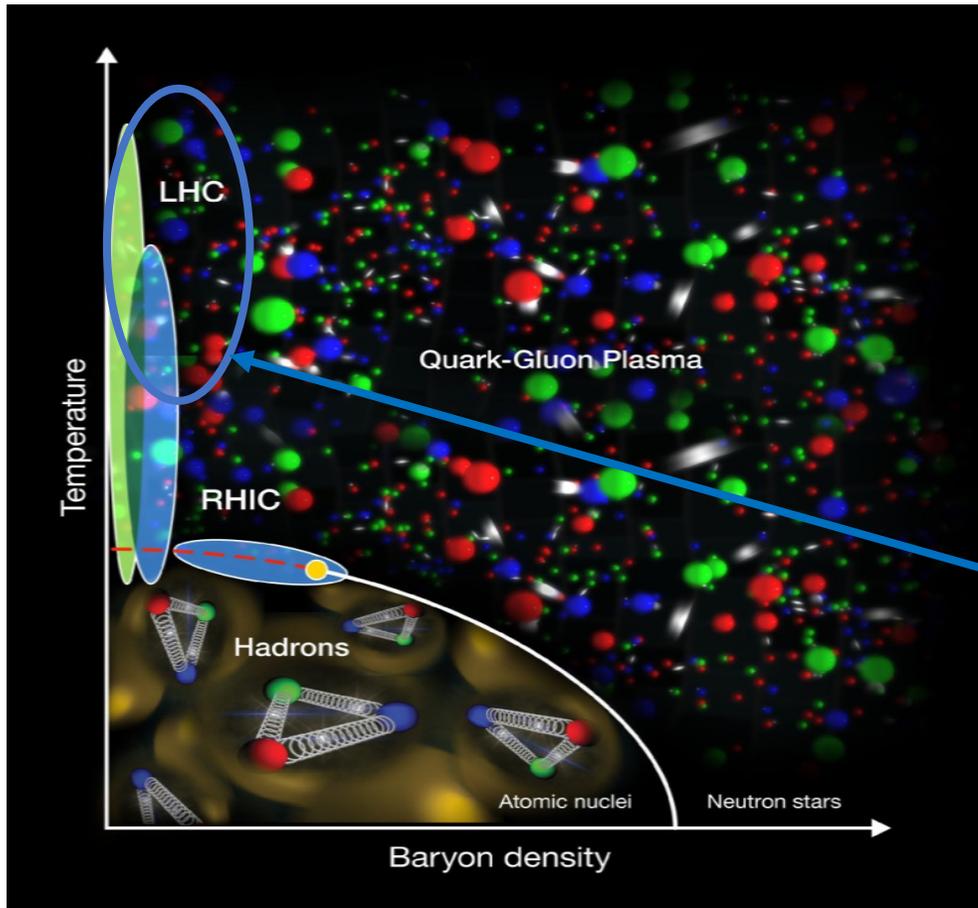
Эволюция состояния материи во Вселенной



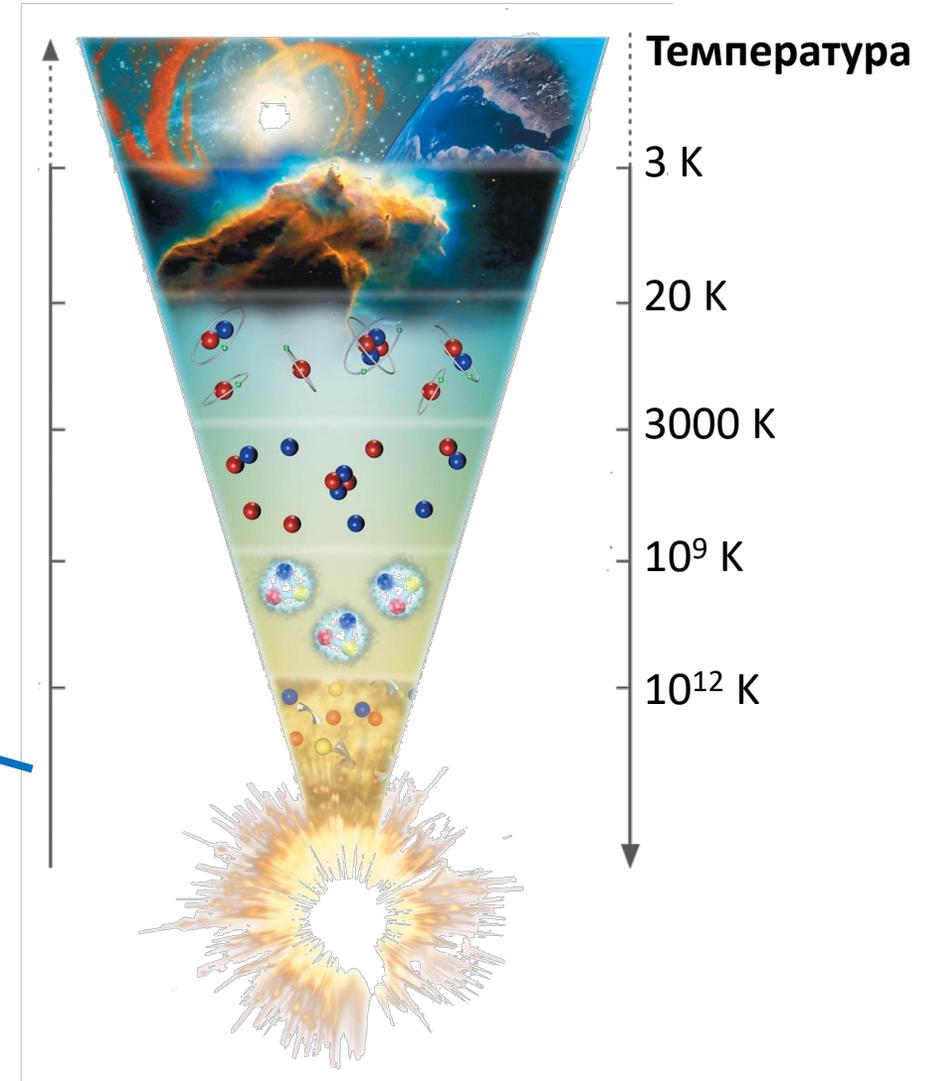
Фазовая диаграмма материи, состоящей из сильно взаимодействующих частиц



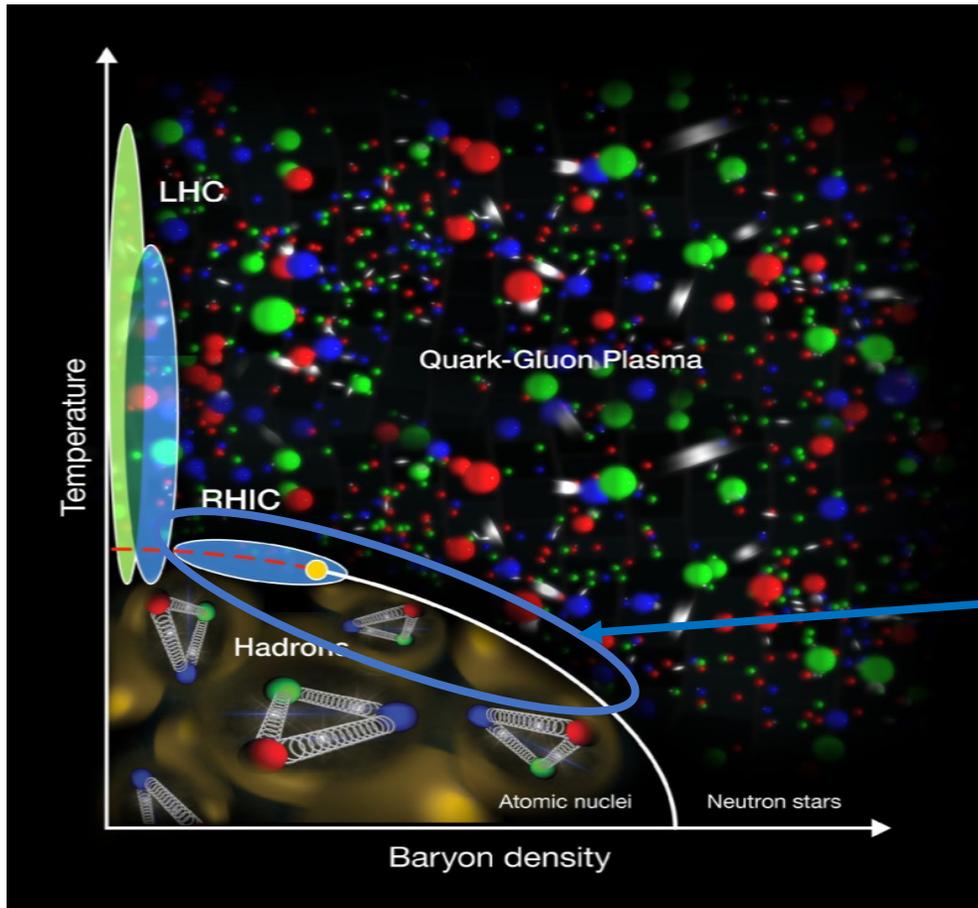
Эволюция состояния материи во Вселенной



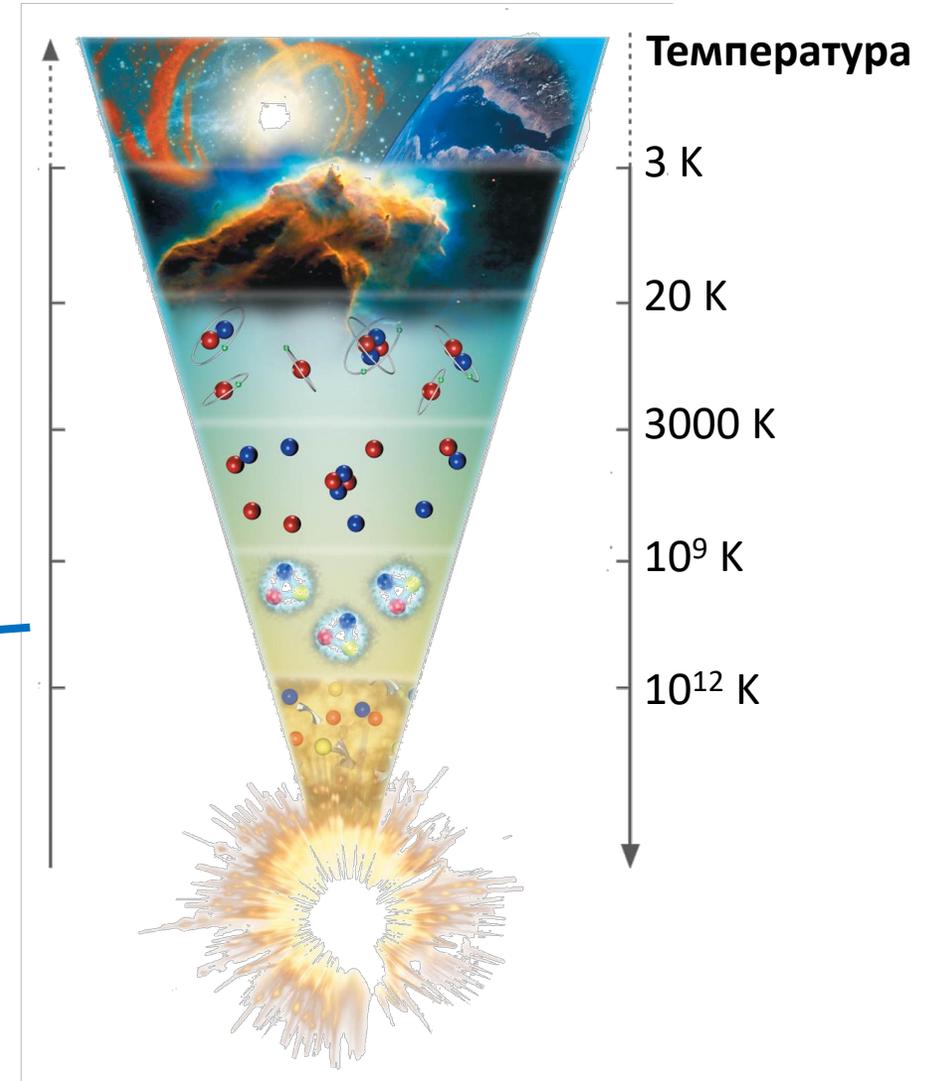
Фазовая диаграмма материи, состоящей из сильно взаимодействующих частиц



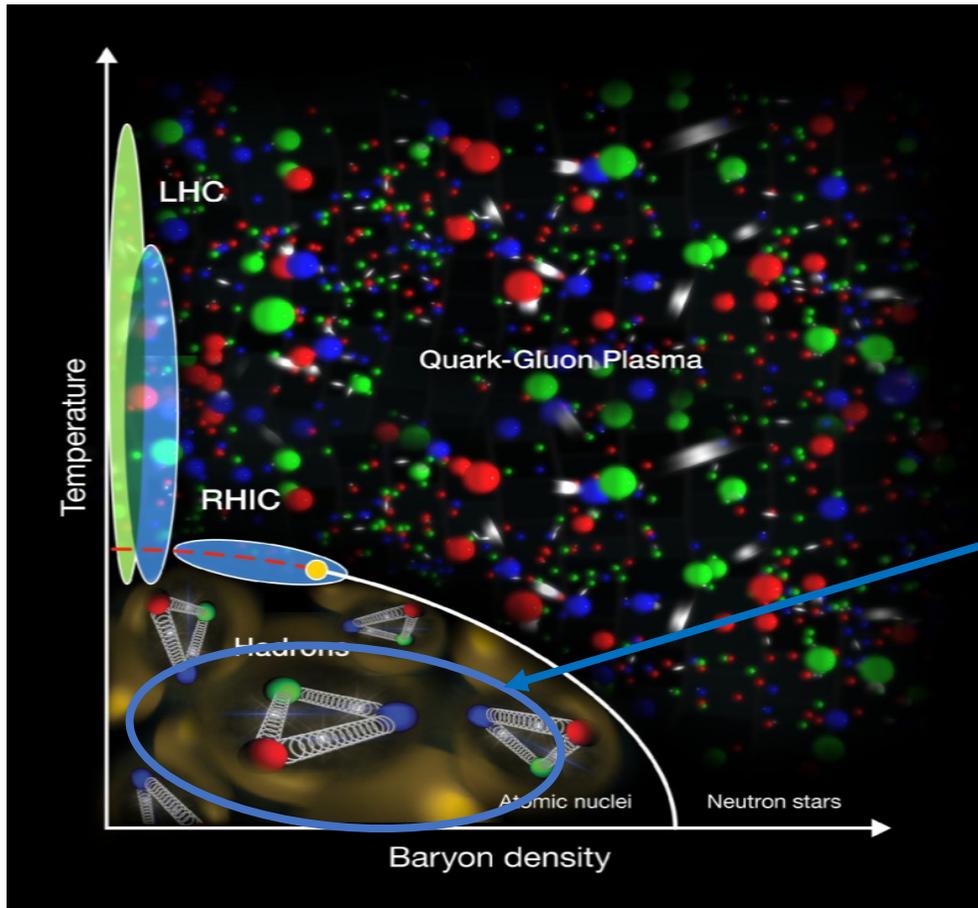
Эволюция состояния материи во Вселенной



Фазовая диаграмма материи, состоящей из сильно взаимодействующих частиц



Эволюция состояния материи во Вселенной



Фазовая диаграмма материи, состоящей из сильно взаимодействующих частиц

