

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

научно-квалификационная работа аспиранта

Роль геометрии в изучении ядро-ядерных столкновений при энергиях ускорительного комплекса NICA

Деманов Александр Евгеньевич

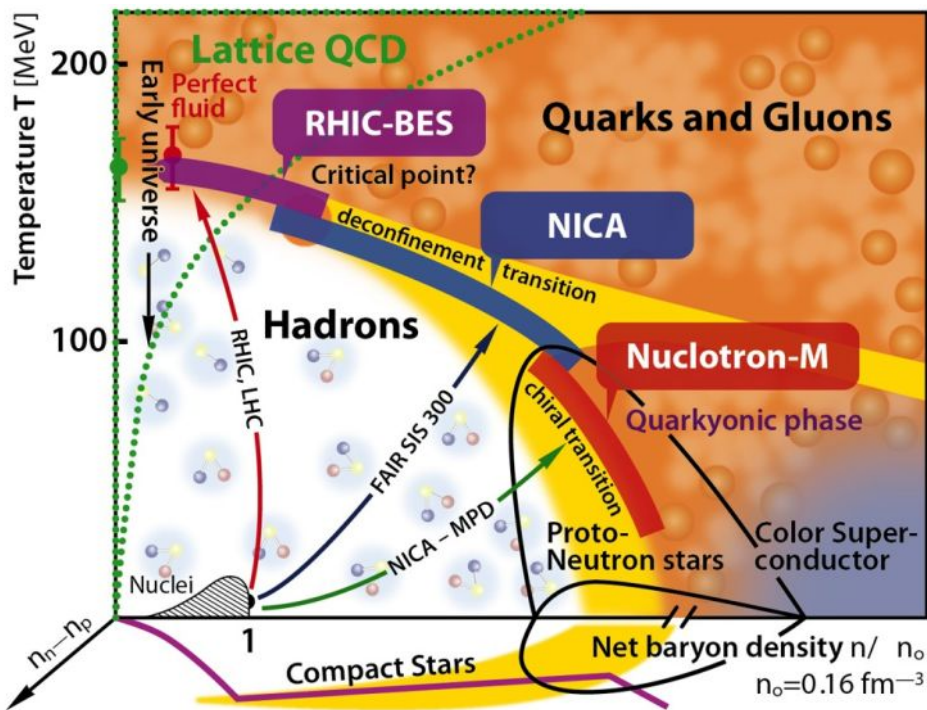
03.06.01 - Физика и астрономия

1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Научный руководитель: к.ф-м. н., доцент, Тараненко Аркадий Владимирович

Москва - 2025

Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей материи



$$(\mu_c, T_c) = (495-654, 100-119) \text{ MeV} \rightarrow 3.5 < \sqrt{s_{NN}} < 4.9 \text{ GeV}$$

Высшие энергии RHIC/LHC:

- ☐ Фазовый переход типа кроссовер
- ☐ Высокая T , маленький μ_B

RHIC-BES/SPS/NICA/FAIR:

- ☐ Поиск критической точки и фазового переход 1-го рода
- ☐ Широкая область в плоскости (T, μ_B)

Существующие:

- BM@N/NICA (ОИЯИ) — 2.4-3.3 ГэВ
- HADES/SIS18 (Германия) — 2.4-2.55 ГэВ
- STAR/RHIC (США) — 3-200 ГэВ

Будущие:

- MPD/NICA (ОИЯИ) — 4-11 ГэВ (2025)
- CEE/HIAF (Китай) — 2.1-4.4 ГэВ (2026)
- CBM/FAIR (Германия) 2.4-4.9 ГэВ (2029)

Геометрия столкновения ядер и центральность

Начальная геометрия области перекрытия ядер:

- прицельный параметр (b)
- число участвующих нуклонов (N_{part})

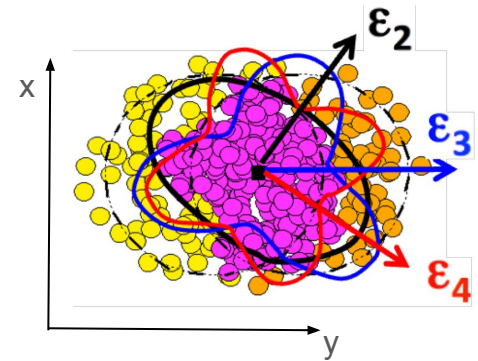
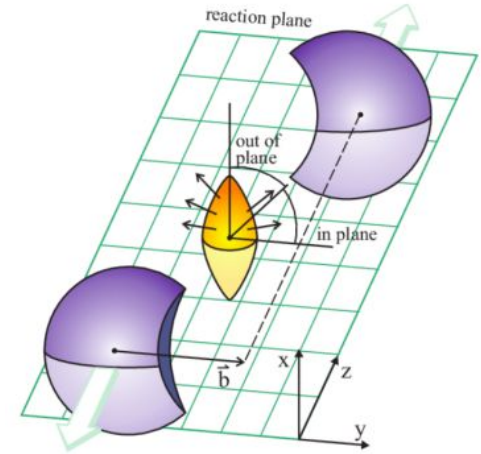
Класс центральности S1-S2: группа событий, соответствующая заданной доле (в %) от общего сечения:

$$C_S = \frac{1}{\sigma_{\text{inel}}^{AA}} \int_{S_1}^{S_2} \frac{d\sigma}{dS} dS$$

Методы определение центральности:

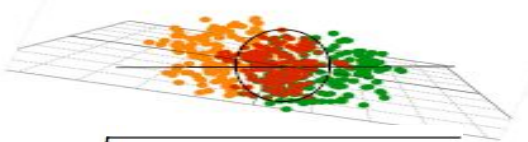
- MC-Glauber
 - хорошо работает при $\sqrt{s_{NN}} > 20$ ГэВ
 - при низких энергиях требуется проверка
- новый метод инверсии Байеса (Γ -fit)

Начальную пространственную асимметрию можно можно описать с помощью коэффициентов эксцентриситета ϵ_n

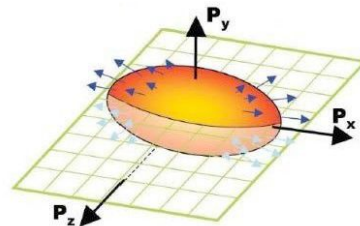


$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$

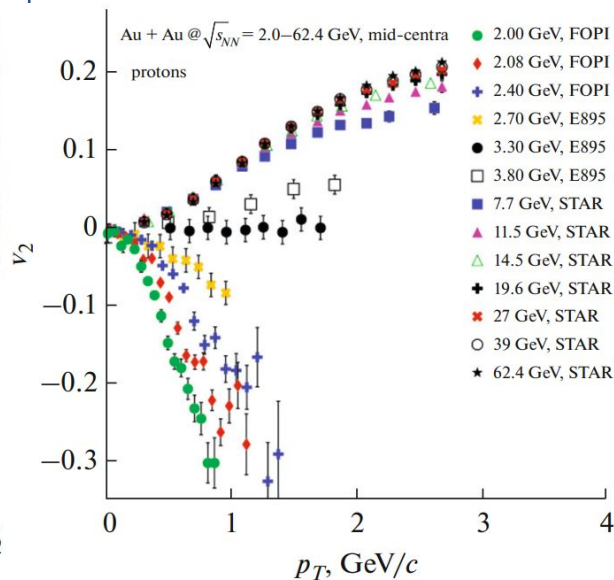
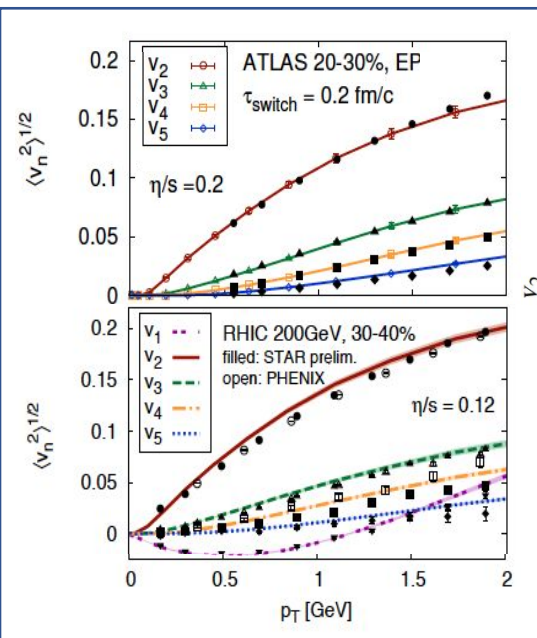
Коллективные потоки на RHIC/LHC и NICA



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



$$\frac{dN}{d\phi} \propto \left(1 + 2 \sum_n v_n \cos[n(\phi - \psi_n)] \right)$$



Анизотропные потоки, $v_n(p_T, \text{centrality})$:

- чувствительны к ранней стадии столкновения
- на RHIC и LHC согласуются с гидродинамическими расчетами
- для v_2 и v_3 : $v_n \sim k_n \epsilon_n$, где k_n чувствителен к транспортным свойствам КГМ (η/s)
- для определения k_n необходимы детальные измерения v_n от центральности столкновения

Phys. Part. Nuclei 51, 309–313
(2020), 10.1134/S1063779620030296

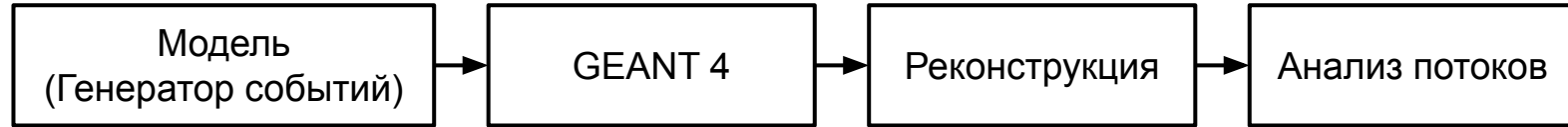
Цель работы:

Исследование роли начальной геометрии и отбор событий по центральности в изучении анизотропных потоков в ядро-ядерных столкновениях при энергиях NICA ($\sqrt{s_{NN}} = 3\text{--}11$ ГэВ) и изучение возможности их измерения на установке MPD (NICA).

Задачи:

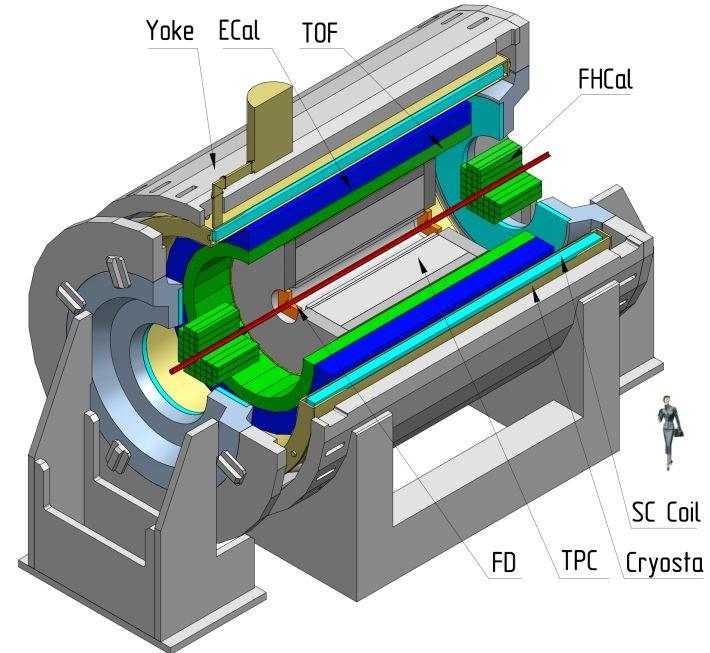
1. Реализовать моделирование столкновений ядер Au+Au, Bi+Bi и Xe+Cs(I) в области энергий $\sqrt{s_{NN}} = 3\text{--}11$ ГэВ используя современные Монте-Карло-генераторы ядро-ядерных столкновений (DCM-QGSM-SMM, UrQMD, vHLL+UrQMD, AMPT) с последующим моделированием реалистичного отклика детекторных подсистем установок MPD и BM@N.
2. Провести проверку качества экспериментальных данных и верифицировать применение Γ -fit и MC-Glauber методов определения центральности для столкновений Xe+Cs(I) при $E_{kin} = 3,8$ А ГэВ в эксперименте BM@N.
3. Провести сравнение сигнала эллиптического потока и его относительных флуктуаций, полученного в модельных расчетах, с экспериментальными данными коллаборации STAR для энергий $\sqrt{s_{NN}} = 3\text{--}11$ ГэВ.
4. Усовершенствовать и апробировать экспериментальные методики измерения азимутальных коллективных потоков на установке MPD (NICA).
5. Изучить возможности измерения эллиптического (v_2) и треугольного (v_3) потоков заряженных адронов на установке MPD (NICA).

Эксперимент MPD



Набор модельных данных:

- Au+Au:
 - UrQMD, $\sqrt{s_{NN}} = 5, 6, 7, 11.5$ GeV
 - AMPT, SMASH, JAM $\sqrt{s_{NN}} = 4.5, 7.7, 11.5$ GeV
- Bi+Bi, $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV:
 - UrQMD
 - vHLLE+UrQMD



Эксперимент BM@N

Модельные данные:

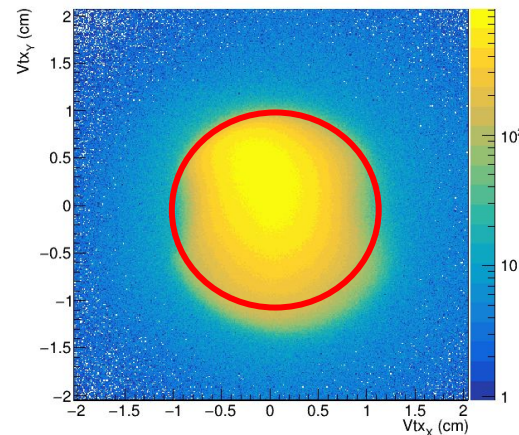
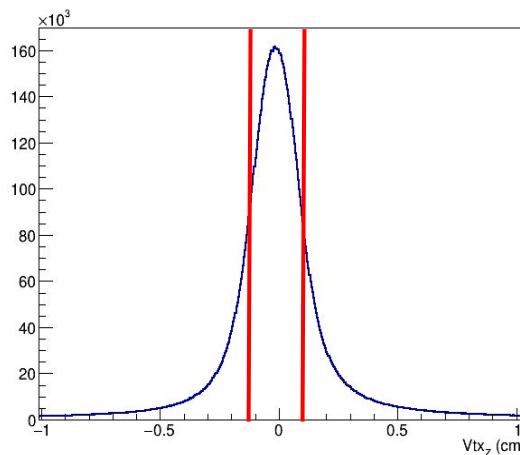
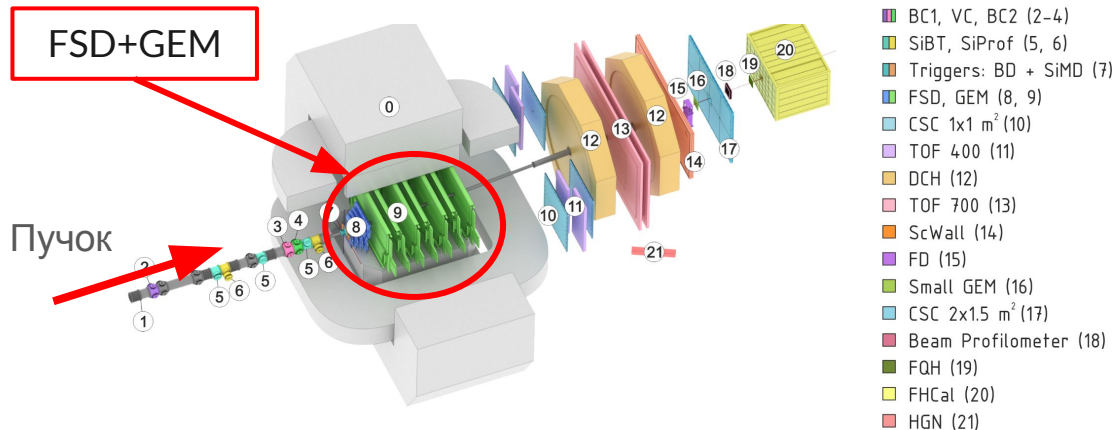
- DCM-QGSM-SMM, Xe-Cs
- GEANT4 transport

Экспериментальные данные:

- run8 Xe-Csl @3.8A GeV
- Отбор событий:
 - физические запуски
 - центральный триггер (CCT2)
 - более 1 трека для реконструкции вершины
 - $Vtx_R < 1.0$ cm
 - $Vtx_Z < 0.1$ cm

Множественность заряженных
частиц из трековой системы
FSD+GEM

S. Afanasiev (a), ..., A. Demanov, et al. (140): arXiv:2312.17573

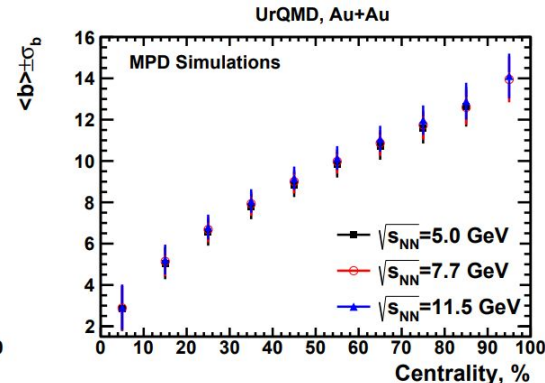
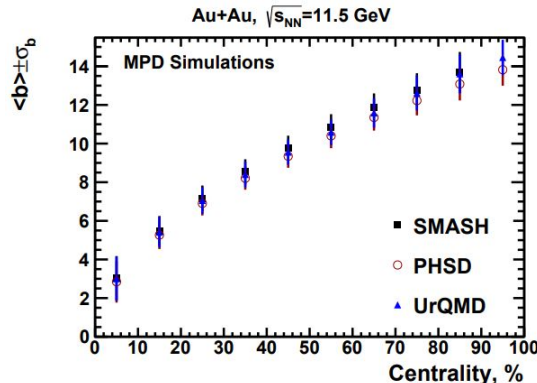
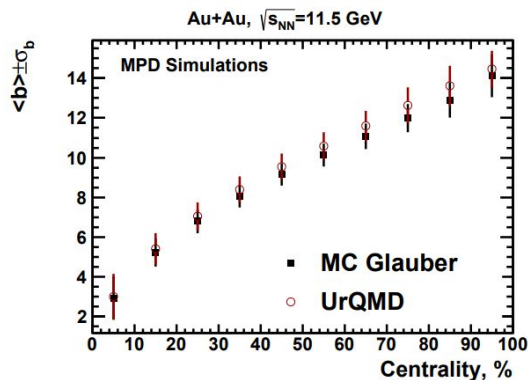
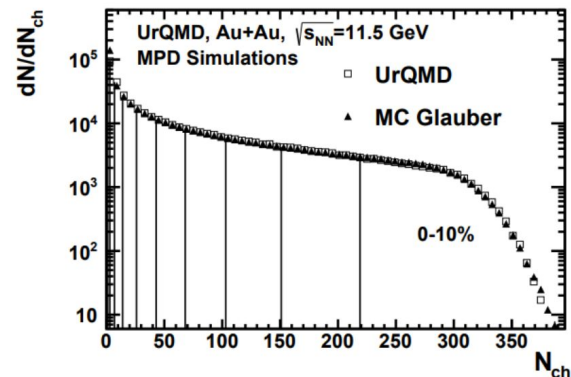


Методы определения центральности

MC-Glauber метод:

- начальные параметры столкновения из модели (b , N_{part})
- множественность рожденных частиц
- внедрен алгоритм учёта событий с pile-up эффектом (для результатов BM@N)
- подгонка распределения множественности из модели к экспериментальной

<https://tqlaubermc.hepforge.org/>, arXiv:1408.2549, arXiv:2011.14909



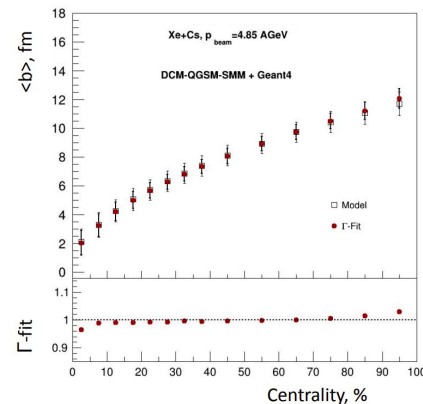
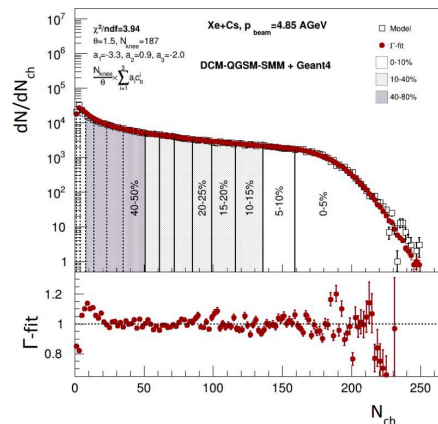
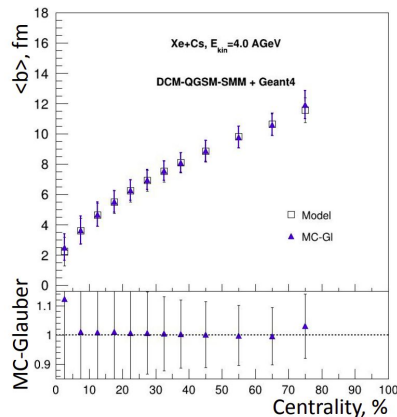
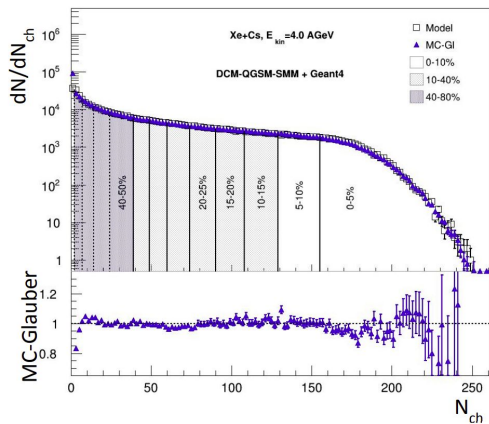
Хорошее согласие между результатами указывает на то, что геометрические свойства столкновения не меняются в диапазоне энергий NICA

Методы определения центральности (BM@N)

Г-фит метод:

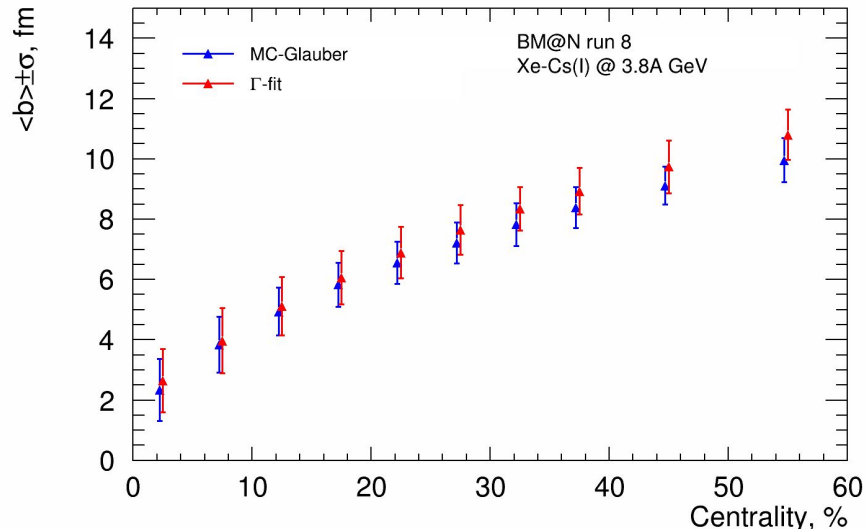
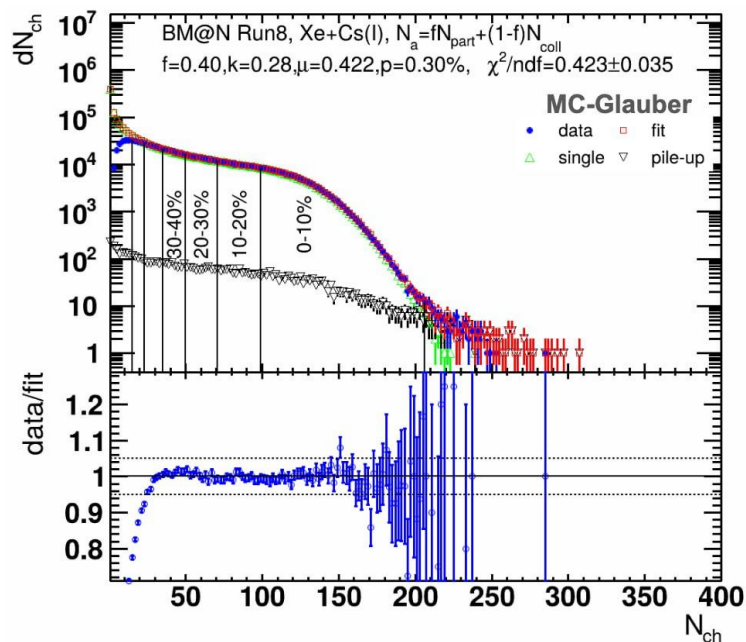
- модельно-независимый метод
- связь между множественностью и прицельным параметром b определяется флуктуационным ядром $P(N)$
- подобрать экспериментальное (модельное) распределение с $P(N)$
- построить $P(b|N)$ с помощью теоремы Байеса: $P(b|N) = P(b)P(N|b)/P(N)$

R. Rogly, G. Giacalone and J. Y. Ollitrault, Phys.Rev. C98 (2018) no.2, 024902



Для обоих методов наблюдается хорошее согласие между модельными данными и результатами подгонки

Результаты определения центральности в Xe-CsI @ 3.8 AGeV



Demanov A.; Taranenko A.; Methods of Determining Centrality in the BM@N Experiment // ISSN 1063-7796, Physics of Particles and Nuclei, 2025, Vol. 56, No. 3, pp. 886–890

- Для определения центральности в данных столкновений Xe+Cs(I) при 3.8 AGeV в эксперименте BM@N были впервые применены два метода: MC-Glauber и Γ -фит метод.
- Для обоих методов наблюдается хорошее согласие между экспериментальными данными и результатами подгонки

Методы измерения v_n

u_n и Q_n векторы: $u_{n,j} = e^{in\varphi_j} = (\cos n\varphi_j, \sin n\varphi_j)$

$$Q_n = \sum_{j=1}^M w_j u_{n,j},$$

Метод плоскости события (EP): $v_n\{\Psi_{n,\text{TPC}}\} = \frac{\langle \cos [n(\varphi_i^{\text{a(b)}} - \Psi_n^{\text{b(a)}})] \rangle}{R_n\{\Psi_{n,\text{TPC}}\}}$

$$R_n\{\Psi_{n,\text{TPC}}\} = \sqrt{\langle \cos [n(\Psi_n^{\text{a}} - \Psi_n^{\text{b}})] \rangle}$$

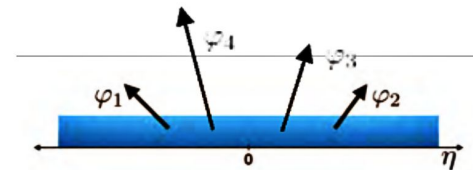
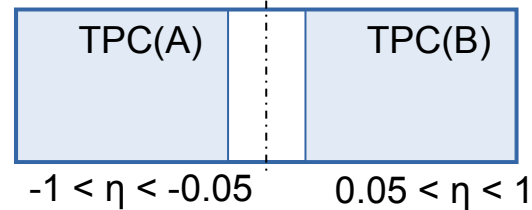
Метод скалярного произведения (SP): $v_n^{\text{SP}}\{Q_{n,\text{TPC}}\} = \langle u_{n,i}^{\text{a(b)}} Q_n^{*\text{b(a)}} \rangle / \sqrt{\langle Q_n^{\text{a}} Q_n^{\text{b}*} \rangle}$

Метод под-событийных двух частичных Q-кумулянтов: $v_2\{2\} = \sqrt{\langle \langle 2 \rangle \rangle_{a|b}}$

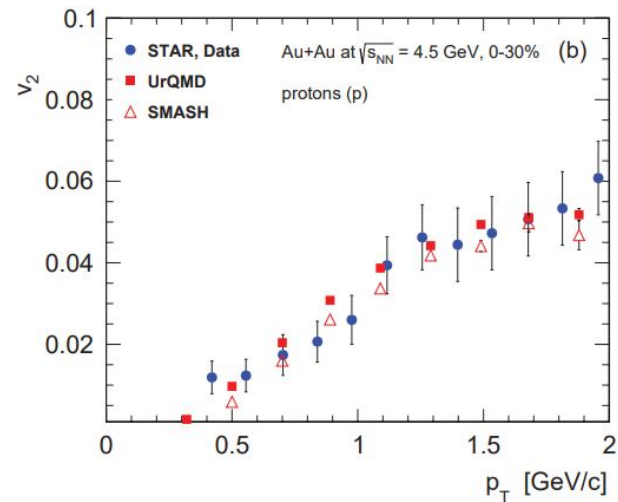
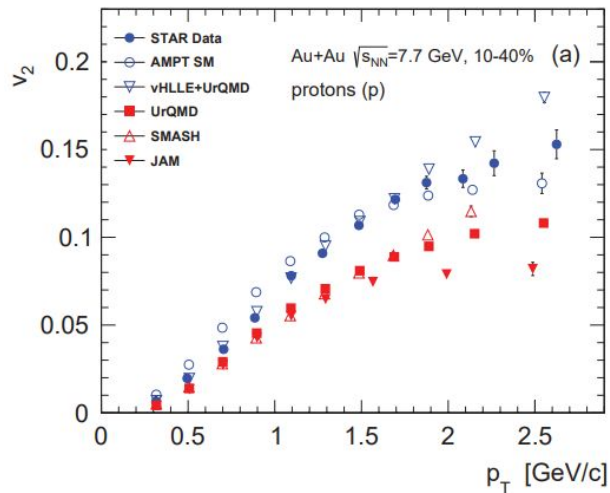
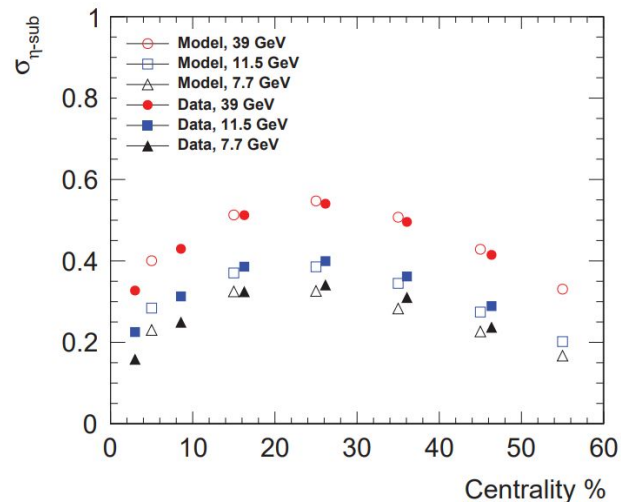
$$Q_n = \sum_{i=1}^M e^{in\phi} \quad \langle 2 \rangle_{a|b} = \frac{Q_{n_a} Q_{n_b}^*}{M_a M_b}$$

Метод четырех-частичных Q-кумулянтов: $v_2\{4\} = \sqrt[4]{2 \langle \langle 2 \rangle \rangle^2 - \langle \langle 4 \rangle \rangle}$

$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)} \quad \langle 4 \rangle = \frac{|Q_n|^4 + |Q_{2n}|^2 - 2\Re[Q_{2n} Q_n^* Q_n^*] - 4(M-2)|Q_n|^2 - 2M(M-3)}{M(M-1)(M-2)(M-3)}$$



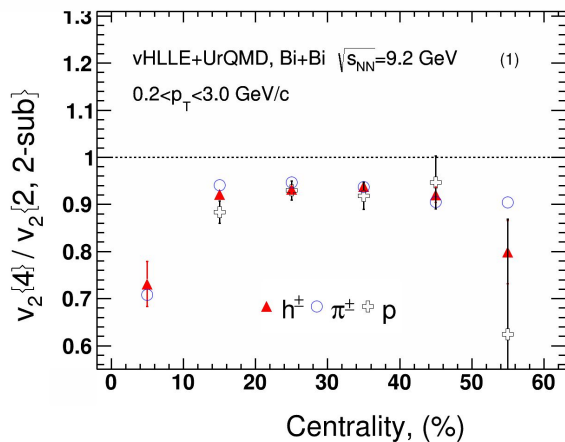
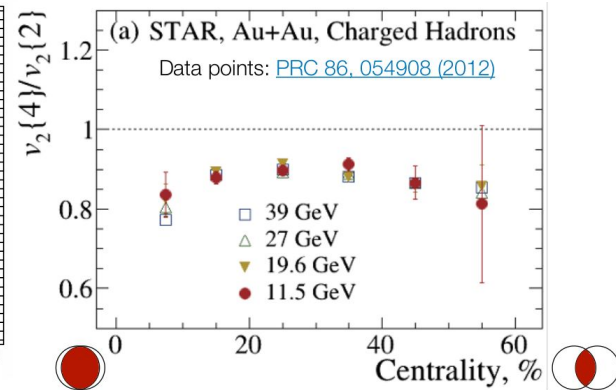
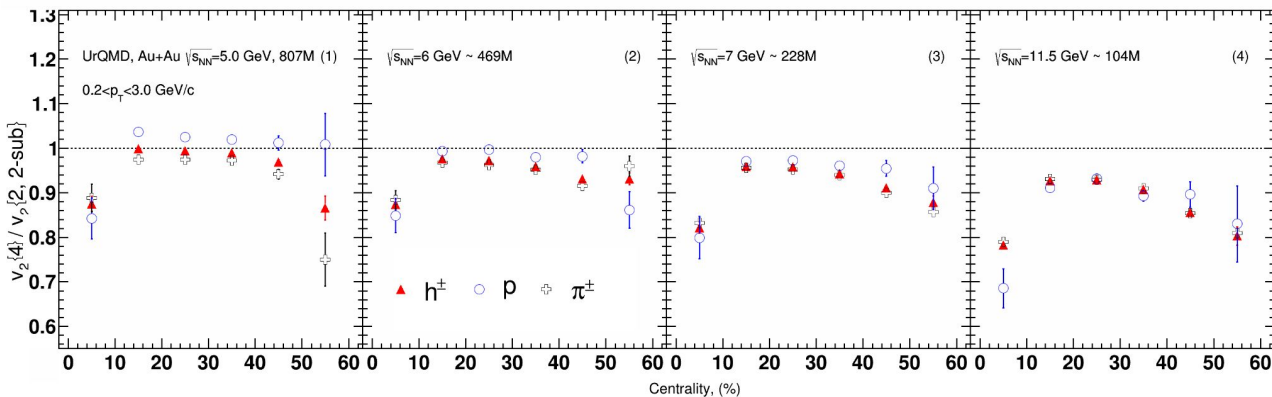
Эволюция эллиптического потока в моделях



- Модели с КГМ (vHLE+UrQMD и AMPT SM) хорошо описывают v_2 протонов в Au+Au столкновениях при 7,7 ГэВ на пару нуклонов
- Модели без формирования КГМ (UrQMD, SMASH и JAM) - занижают сигнал v_2 при 7,7 ГэВ, и хорошо воспроизводят при 4,5 ГэВ

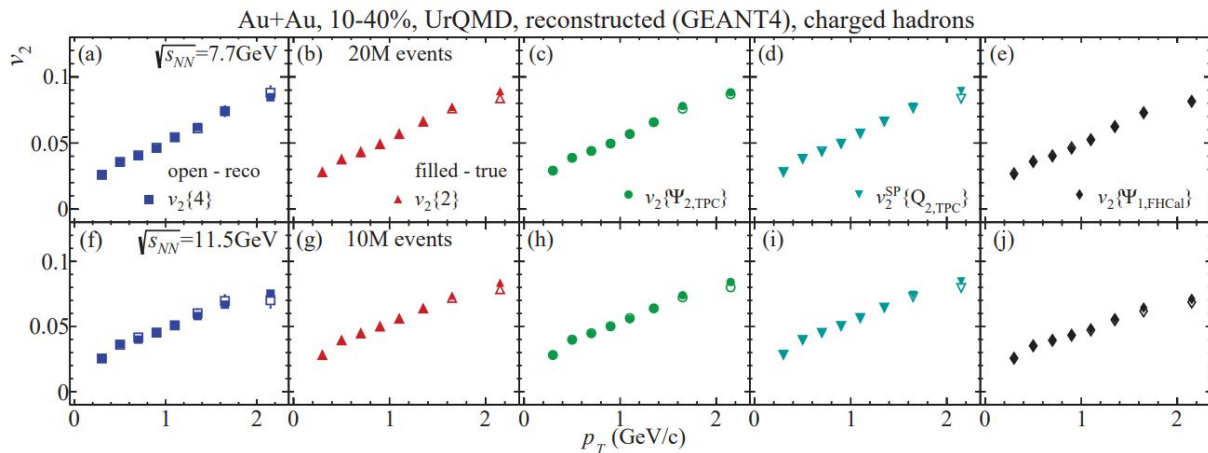
В диапазоне энергий NICA возможен переход от партонной к адронной материи

Относительные флуктуации v_2 идентифицированных адронов



- Флуктуации v_2 при высоких энергиях не зависят от энергии и типа частиц
- При низких энергиях (в диапазоне энергий NICA) для $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ наблюдается зависимость от типа частиц и энергии
- Для столкновений Bi+Bi наблюдается та же зависимость $v_2\{4\}/v_2\{2\}$, что и для Au+Au

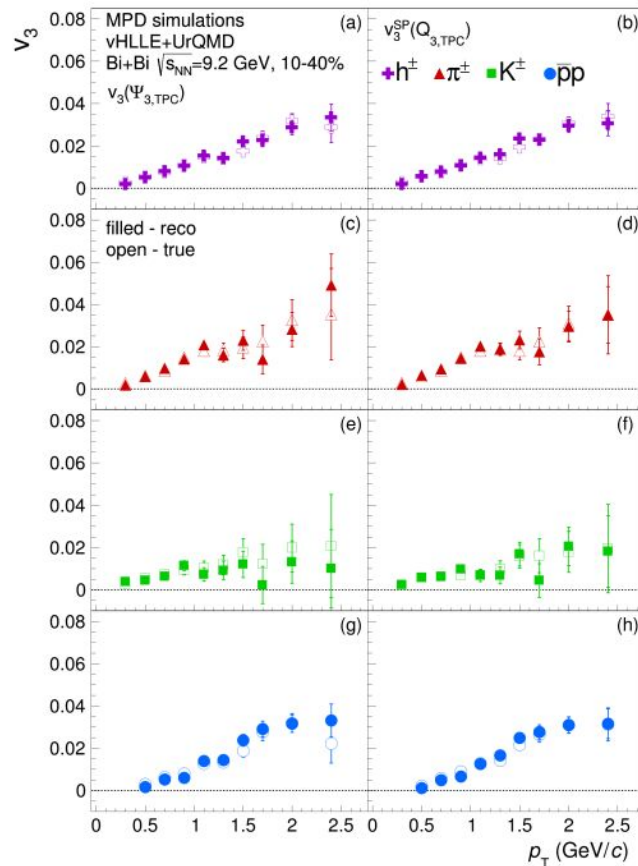
Оценка эффективности измерения эллиптического (v_2) и треугольного (v_3) потоков



Demanov, A. et al.; Comparison of methods for elliptic flow measurements at NICA energies $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ GeV // AIP Conference Proceedings. - 2021. - 2377. - c

Demanov A. et al.; Elliptic Flow Fluctuations at NICA Energy Range // Physics of Particles and Nuclei. - 2024. - 55. - c. 1124-1128

- Хорошее согласие v_2 и v_3 ($< 10\%$) с реконструированными и сгенерированными данными для всех видов частиц и методов
- На установке MPD возможны детальные измерения коэффициентов коллективных потоков v_n с высокой точностью



MPD Collaboration, ...Demanov A. et al.; MPD physics performance studies in Bi+Bi collisions at $s_{NN} = 9.2$ GeV // Revista Mexicana de Física, arXiv:2503.21117

Заключение

- Разработаны и апробированы экспериментальные методики определения центральности и измерения анизотропных коллективных потоков на установке MPD.
- Получены оценки эффективности измерения эллиптического (v_2) и треугольного (v_3) потоков заряженных адронов в области энергий NICA на основе анализа полностью реконструированных модельных данных. Показано, что установка MPD обеспечит детальные измерения азимутальных коллективных потоков с высокой точностью.
- Анализ флуктуаций v_2 в столкновениях Au+Au и Bi+Bi выявил уменьшение флуктуаций с ростом энергии и зависимость $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ от типа частиц при энергиях <6 ГэВ.
- Разработаны методы проверки качества данных и впервые исследовано применимость методов определения центральности для столкновений Xe+Cs(I) при $E_{\text{kin}}=3,8$ А ГэВ в эксперименте BM@N. Это позволило эксперименту BM@N сравнить свои первые физические результаты с опубликованными данными других экспериментов и предсказаниями современных моделей ядро-ядерных столкновений.

Усовершенствованные автором методы определения центральности планируются применить для эксперимента MPD в режиме работы с фиксированной мишенью.

Положения, выносимые на защиту

1. Получены результаты для эллиптического потока заряженных адронов и его относительных флуктуаций в столкновениях Au+Au при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 4.5, 7.7$ и 11.5 ГэВ в рамках современных моделей ядро-ядерных столкновений с формированием КГМ (vHLL+UrQMD, AMPT-SM) и без формирования КГМ (DCM-QGSM-SMM, UrQMD, SMASH), проведено сравнение с экспериментальными данными коллаборации STAR.
2. Проведена проверка эффективности процедуры определения центральности методами инверсии Байеса (Г-fit) и MC-Glauber для столкновений Xe+Cs(I) при $E_{kin}=3.8A$ ГэВ в эксперименте BM@N.
3. Получены оценки эффективности измерения эллиптического (v_2) и треугольного (v_3) потоков заряженных адронов на установке MPD (NICA).

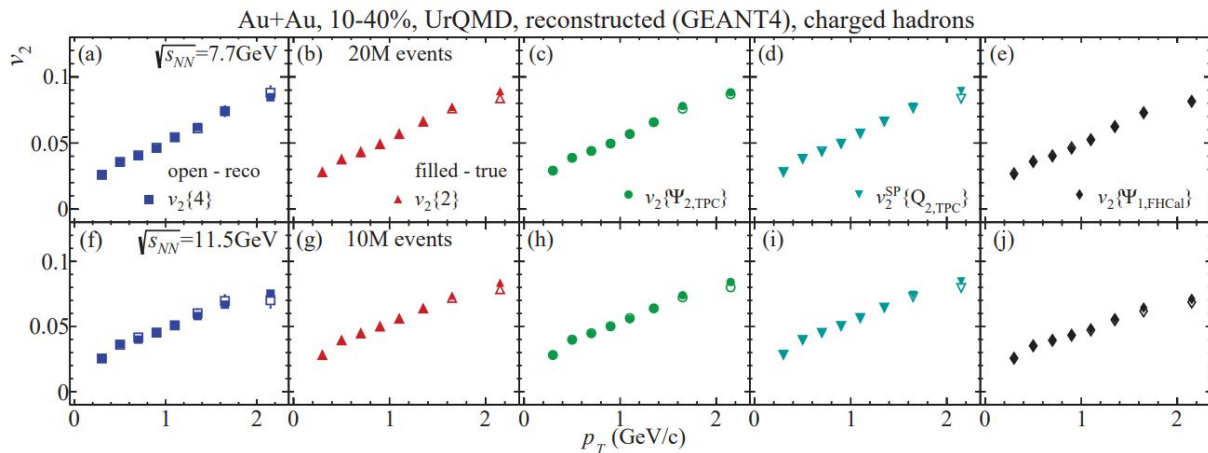
Публикации

1. Idrisov,D., Luong,V.B., Taranenko,A., Parfenov,P., Demanov,A., Truttse,A., **Methods for anisotropic flow measurements with the MPD Experiment at NICA** // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - 1690. - с. // 10.1088/1742-6596/1690/1/012129
2. Parfenov,P.; Segal,I.; Idrisov,D.; Luong,V.B.; Taranenko,A.; Demanov,A.; Truttse,A.; Volodikhin,E.; **Centrality determination in heavy-ion collisions with MPD detector at NICA** // Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement. - 2021. - 14. - с. 503-506 // 10.5506/APHYSPOLBSUPP.14.503
3. Demanov, A; Parfenov, P; Idrisov, D; Luong, VB; Truttse, A; **Anisotropic Flow Measurements of Identified Hadrons with MPD Detector at NICA** // Particles. - 2021. - 4. - с. 146-158 // 10.3390/particles4020014
4. Demanov, A.; Parfenov,P.; Taranenko,A.; **Evolution of elliptic flow of produced particles from Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 4.5 - 200$ GeV in a hybrid model** // AIP Conference Proceedings. - 2021. - 2377. - с. // 10.1063/5.0067505
5. Luong,V.B.; Idrisov,D.; Parfenov,P.; Taranenko,A.; Demanov,A.; **Comparison of methods for elliptic flow measurements at NICA energies $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ GeV** // AIP Conference Proceedings. - 2021. - 2377. - с. // 10.1063/5.0063369
6. Abgaryan V., Demanov A., MPD Collaboration.// **Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA** // Eur. Phys. J. A. — 2022. — T. 58, № 7. —C. 140.
7. Demanov A.; Parfenov,P.; Taranenko,A.; **Elliptic Flow Fluctuations at NICA Energy Range** // Physics of Particles and Nuclei. - 2024. - 55. - с. 1124-1128 // 10.1134/S1063779624700825
8. Demanov A.; Taranenko A.; **Methods of Determining Centrality in the BM@N Experiment** // ISSN 1063-7796, Physics of Particles and Nuclei, 2025, Vol. 56, No. 3, pp. 886–890 // 10.1134/S1063779624702460

Доклады на конференциях

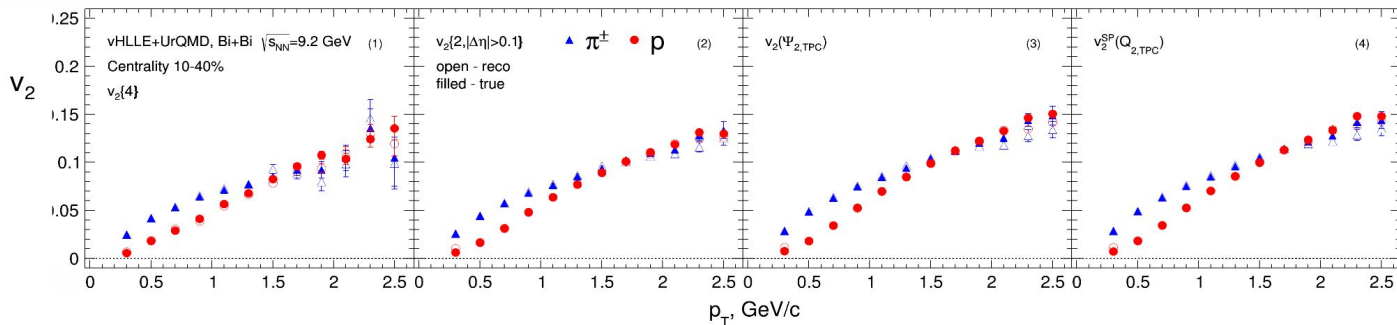
1. Study of NCQ scaling of elliptic and triangular flow for identified hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=11.5-200$ GeV - Международная конференция «Ядро» (2022, <https://events.sinp.msu.ru/event/8/abstracts/>)
2. Methods for centrality determination at the BM@N experiment - Международная конференция «Ядро», 2024 (<https://indico.jinr.ru/event/4304/contributions/27056/>)
3. Evolution of anisotropic flow of produced particles from Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=7.7 - 62.4$ GeV in a hybrid models - Международная конференция по физике элементарных частиц и астрофизике «ICPPA», 2020 (<https://indico.particle.mephi.ru/event/35/abstracts/1278/>)
4. Methods for centrality determination of Xe+Cs(I) collisions at $\sqrt{s_{NN}}=3.8$ A GeV at BM@N - Международная конференция по физике элементарных частиц и астрофизике «ICPPA», 2024 (<https://indico.particle.mephi.ru/event/436/abstracts/1948/>)
5. Evolution of anisotropic flow of produced particles from Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=4.5 - 200$ GeV in a hybrid models - Международная научная конференция молодых учёных и специалистов «AYSS», 2020 (<https://indico.jinr.ru/event/1119/abstracts/3864/>)
6. Elliptic flow fluctuations at NICA energy range - XXV Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий, 2023 (<https://indico.jinr.ru/event/3694/abstracts/5211/>)
7. Методы определения центральности в эксперименте BM@N - Научная сессия ядерной физики ОФН РАН ,2024 (<https://indico.jinr.ru/event/4174/contributions/25577/>)
8. Определение центральности столкновений тяжелых ионов в эксперименте BM@N - Научная сессия ядерной физики ОФН РАН, 2025 (<https://indico.inr.ac.ru/event/5/contributions/194/>)

v_2 заряженных адронов, пионов и протонов в MPD



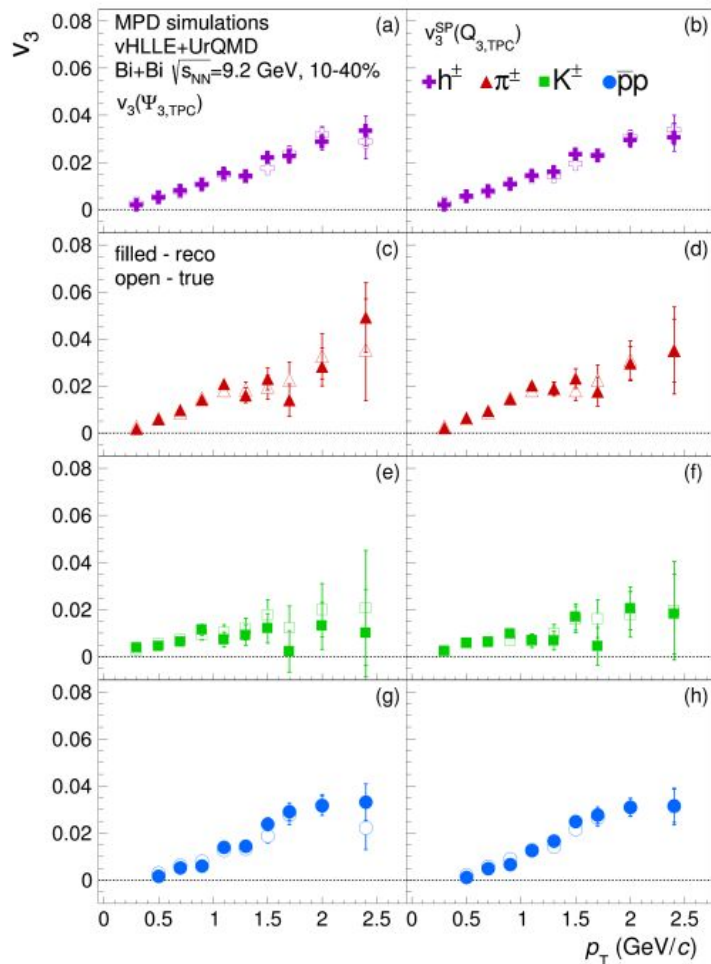
- Хорошее согласие ($< 5\text{-}10\%$) v_2 с реконструированными и сгенерированными данными для всех видов частиц и методов
- Установка MPD обеспечит детальные измерения коэффициентов коллективных потоков v_n с высокой точностью.

Demanov, A. et al.; Comparison of methods for elliptic flow measurements at NICA energies $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ GeV // AIP Conference Proceedings. - 2021. - 2377. - c



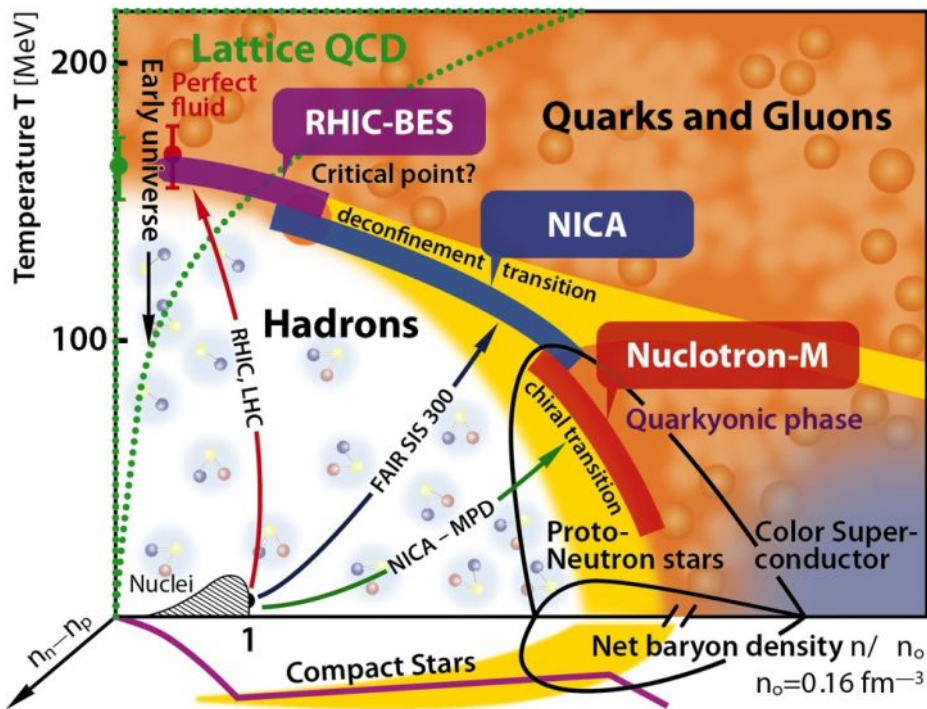
Demanov A. et al.; Elliptic Flow Fluctuations at NICA Energy Range // Physics of Particles and Nuclei. - 2024. - 55. - c. 1124-1128

v_3 заряженных адронов, пионов, каонов и протонов в MPD



- Хорошее согласие ($< 5\text{-}10\%$) v_3 с реконструированными и сгенерированными данными для всех видов частиц и методов
- Установка MPD обеспечит детальные измерения коэффициентов коллективных потоков v_n с высокой точностью.

Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей материи



Высшие энергии RHIC/LHC:

- ☐ Фазовый переход типа кроссовер
- ☐ Высокая T , маленький μ_B

RHIC-BES/SPS/NICA/FAIR:

- ☐ Поиск критической точки и фазового переход 1-го рода
- ☐ Широкая область в плоскости (T, μ_B)

Существующие:

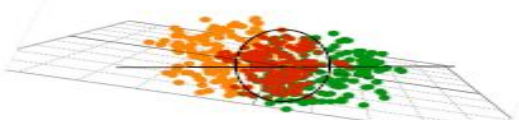
- BM@N/NICA (ОИЯИ) — 2.4-3.3 ГэВ
- NADES/SIS18 (Германия) — 2.4-2.55 ГэВ
- STAR/RHIC (США) — 3-200 ГэВ

Будущие:

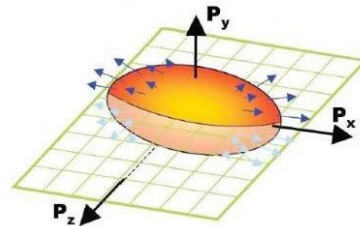
- MPD/NICA (ОИЯИ) — 4-11 ГэВ (2025)
- CEE/HIAF (Китай) — 2.1-4.4 ГэВ (2026)
- CBM/FAIR (Германия) 2.4-4.9 ГэВ (2029)

$$(\mu_c, T_c) = (495-654, 100-119) \text{ MeV} \rightarrow 3.5 < \sqrt{s_{NN}} < 4.9 \text{ GeV}$$

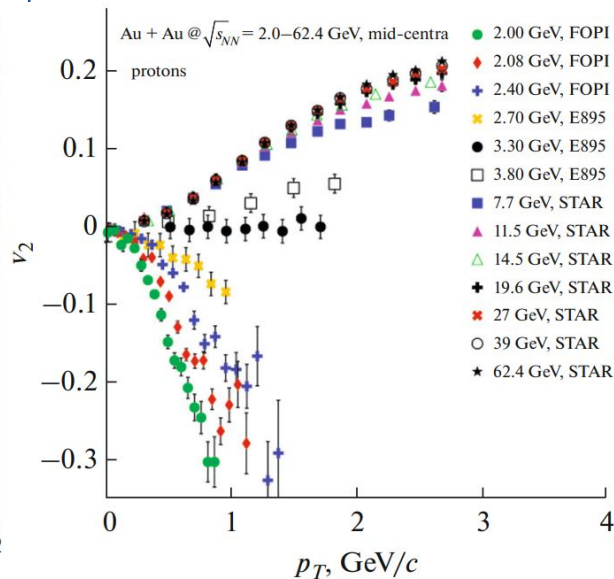
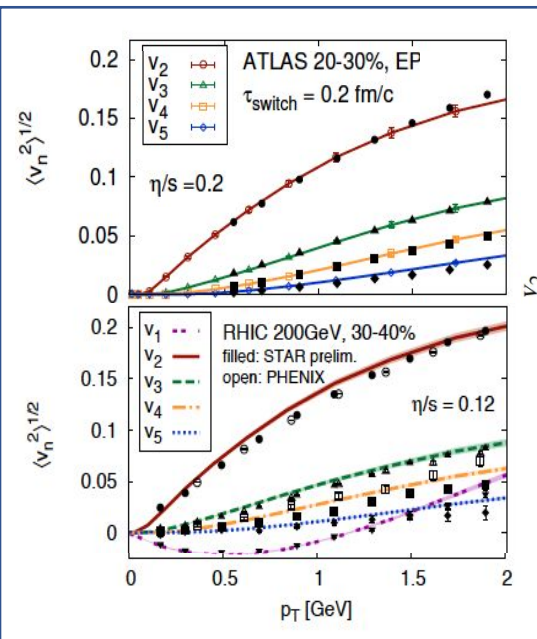
Коллективные потоки на RHIC/LHC и NICA



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



$$\frac{dN}{d\phi} \propto \left(1 + 2 \sum_n v_n \cos[n(\phi - \psi_n)] \right)$$



Phys. Part. Nuclei 51, 309–313
(2020), 10.1134/S1063779620030296

- $v_n(p_T, \text{centrality})$ - очень чувствителен к ранней стадии столкновения
- Анизотропные потоки на RHIC и LHC согласуются с гидродинамическими расчетами с η/s близкими предсказанному минимуму $\eta/s > 1/4\pi$
- Эксцентриситет области перекрытия ядер ϵ_n (и сопутствующие ему флуктуации) вызывают азимутальную анизотропию в пространстве импульсов v_n с вязкими модуляциями η/s
- Для v_2 и v_3 : $v_n \sim k_n \epsilon_n$

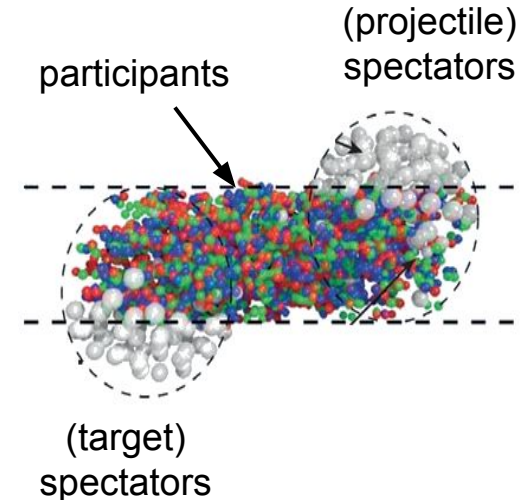
Motivation for centrality determination

- Evolution of matter produced in heavy-ion collisions depends on its initial geometry

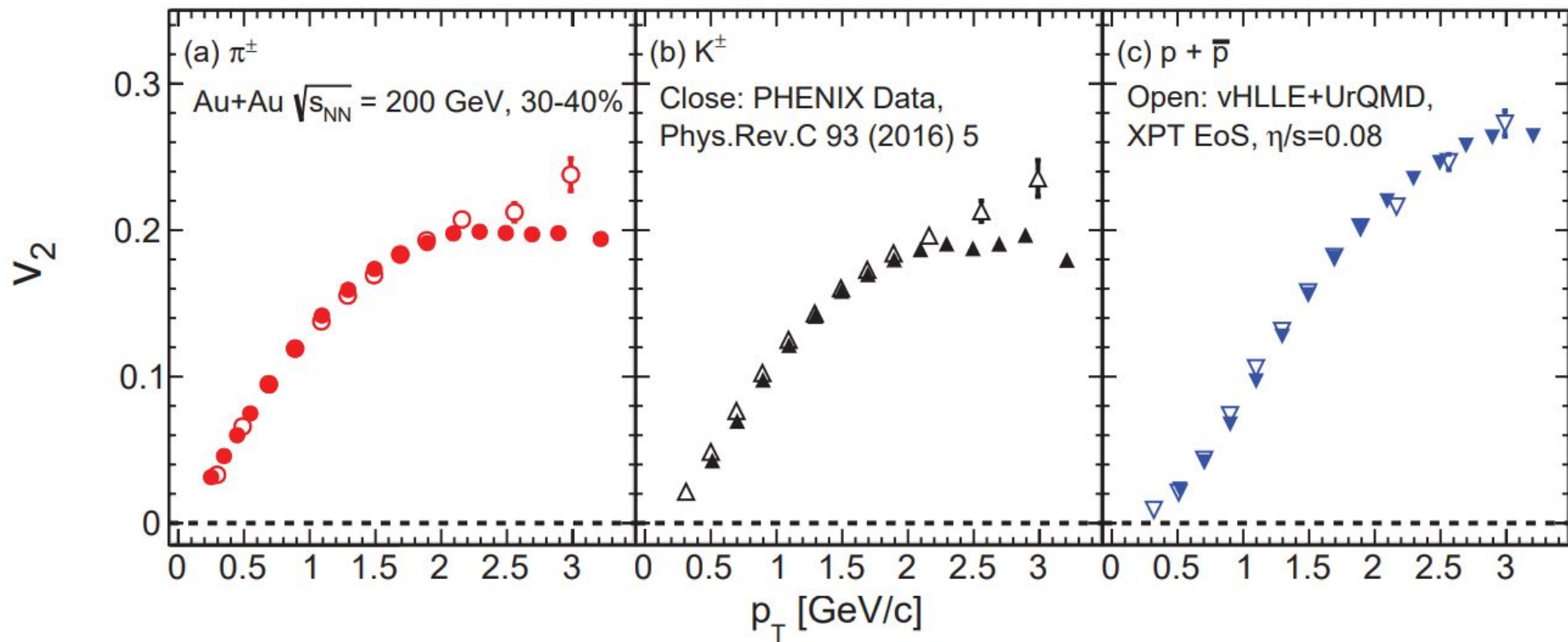
- **Goal of centrality determination:**
map (on average) the collision geometry parameters
to experimental observables (centrality estimators)

- Centrality class S_1 - S_2 : group of events corresponding to a given fraction (in %) of the total cross section:

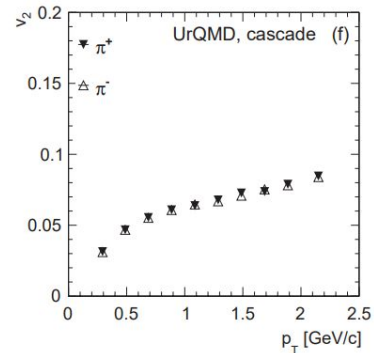
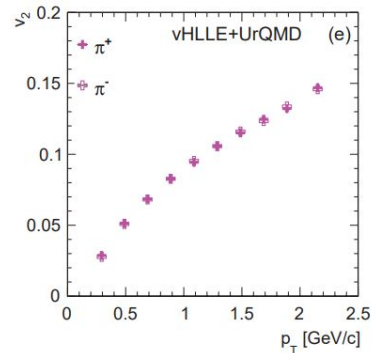
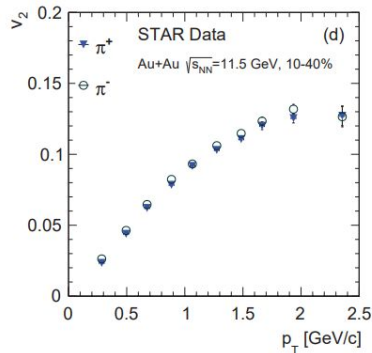
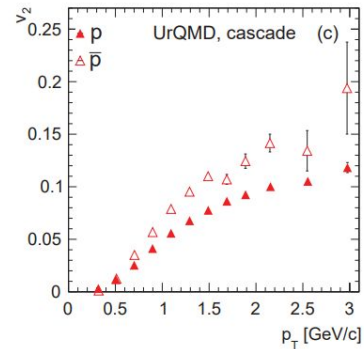
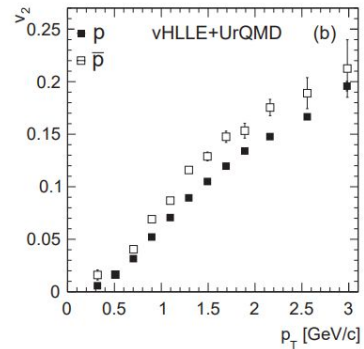
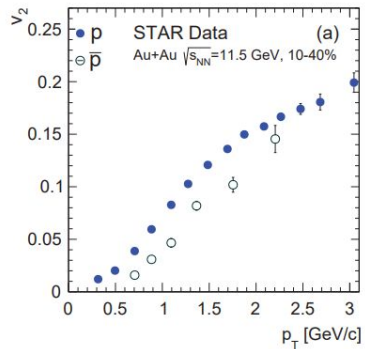
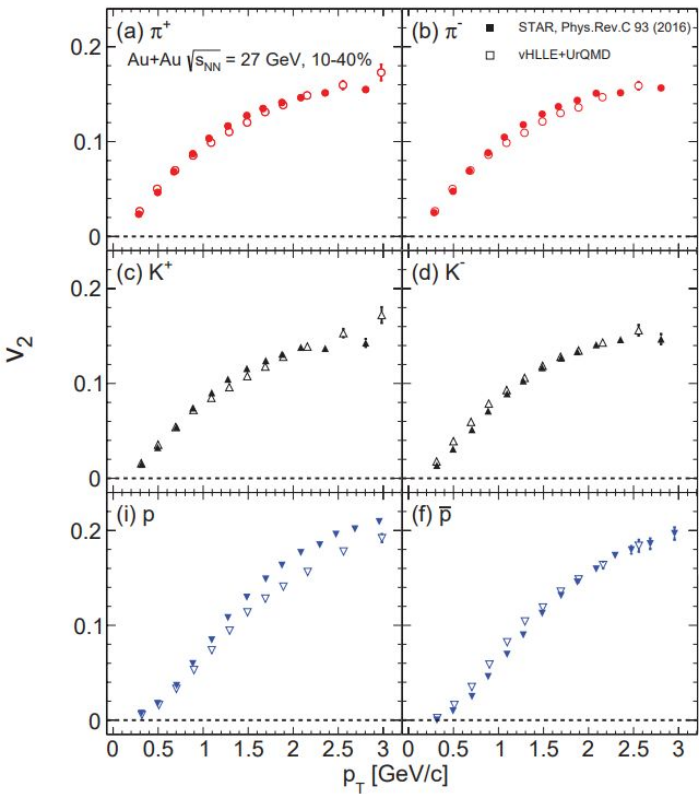
$$C_S = \frac{1}{\sigma_{inel}^{AA}} \int_{S_1}^{S_2} \frac{d\sigma}{dS} dS$$



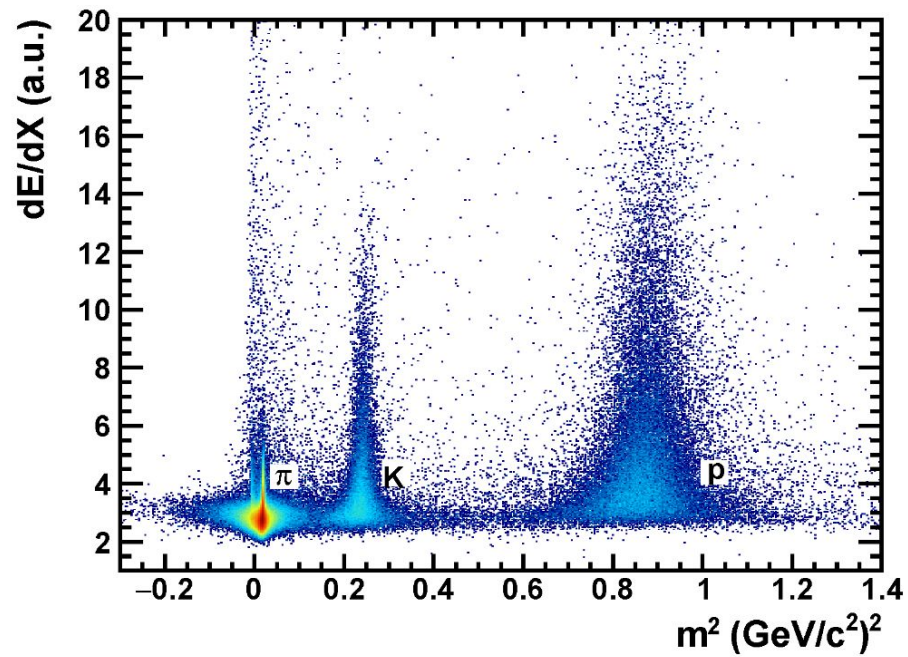
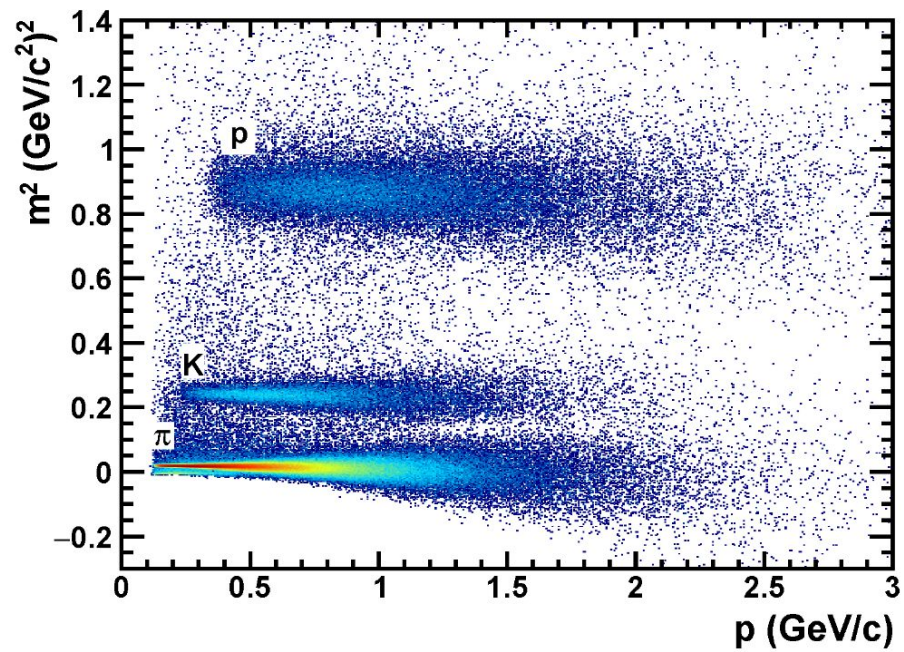
MPD



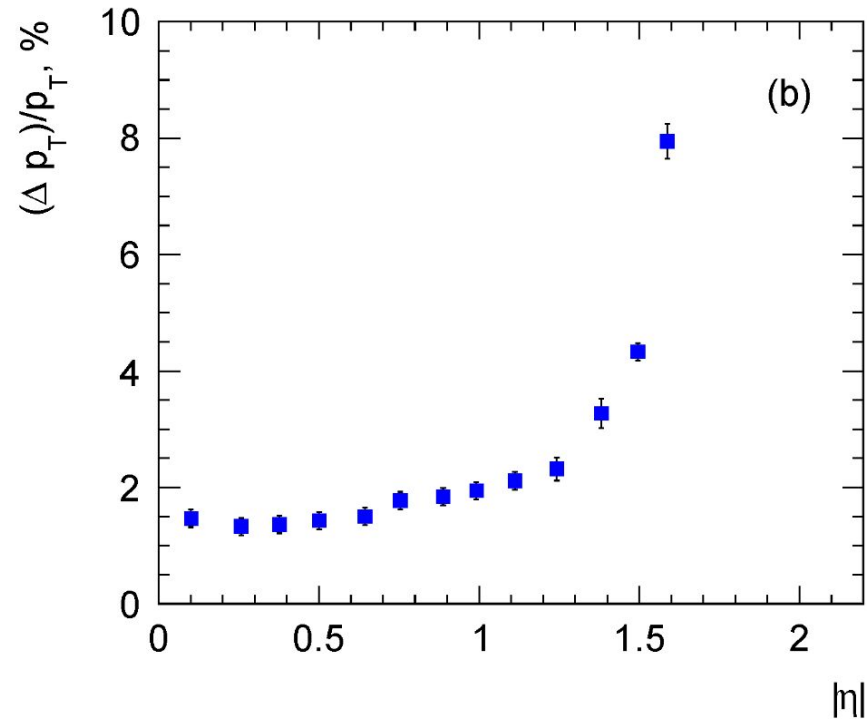
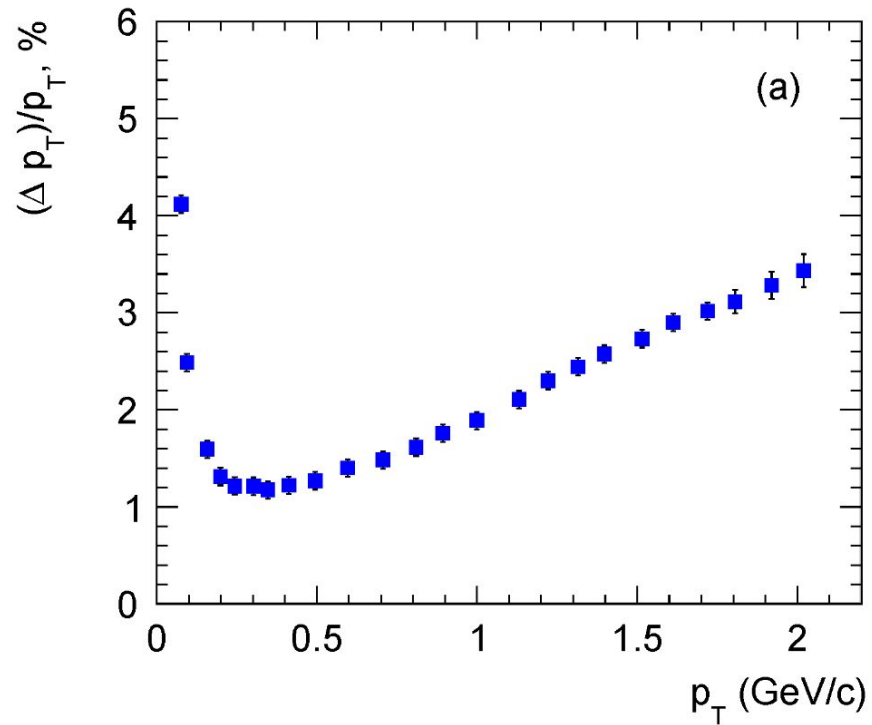
MPD



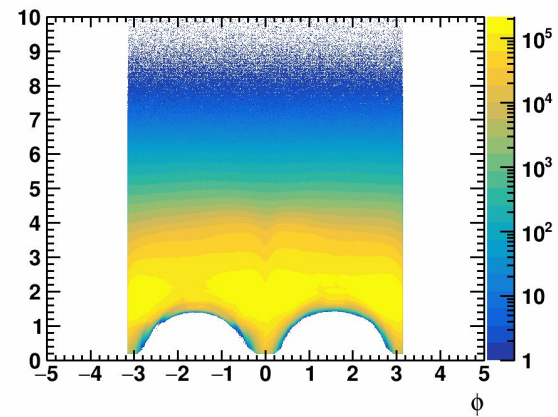
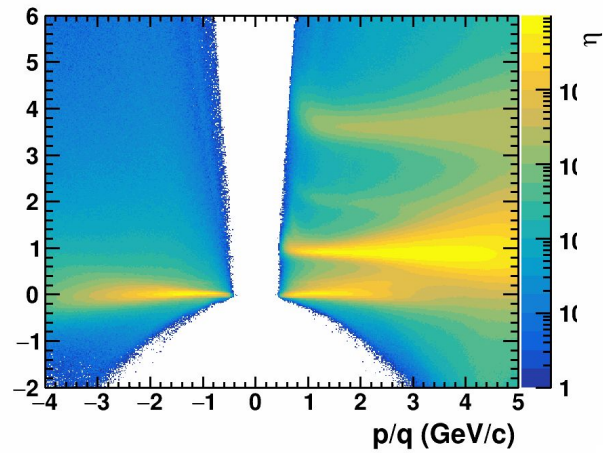
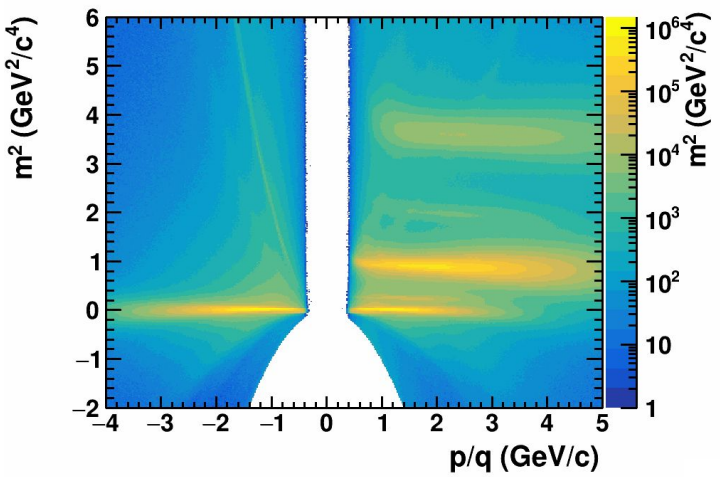
MPD



MPD

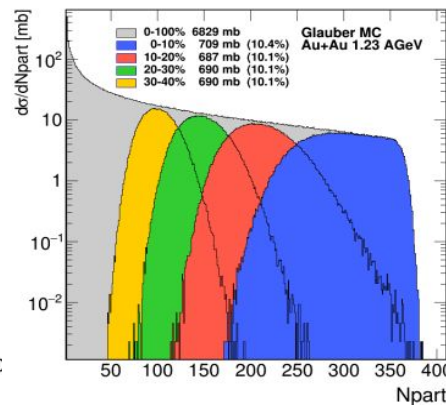
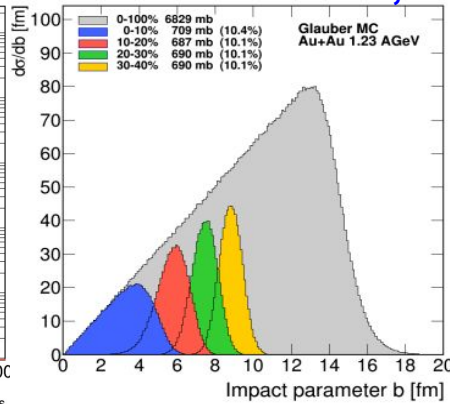
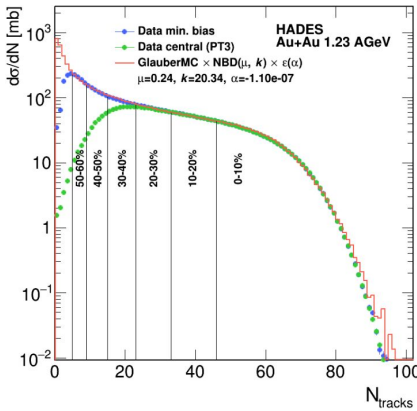


BM@N



Centrality determination

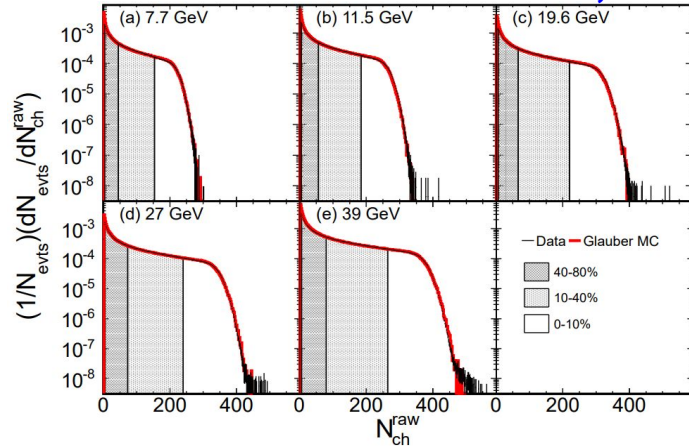
HADES, Au+Au 1.23A GeV



Eur. Phys. J. A (2018) 54: 85

Centrality Classes	$b_{\min}$	$b_{\max}$	$\langle b \rangle$
0 – 5 %	0.00	3.30	2.20
5 – 10 %	3.30	4.70	4.04
10 – 15 %	4.70	5.70	5.22
15 – 20 %	5.70	6.60	6.16
20 – 25 %	6.60	7.40	7.01
25 – 30 %	7.40	8.10	7.75
30 – 35 %	8.10	8.70	8.40
35 – 40 %	8.70	9.30	9.00
40 – 45 %	9.30	9.90	9.60
45 – 50 %	9.90	10.40	10.15
50 – 55 %	10.40	10.90	10.65
55 – 60 %	10.90	11.40	11.15

STAR, Au+Au, BES



Phys. Rev. C 86, 054908 (2012)

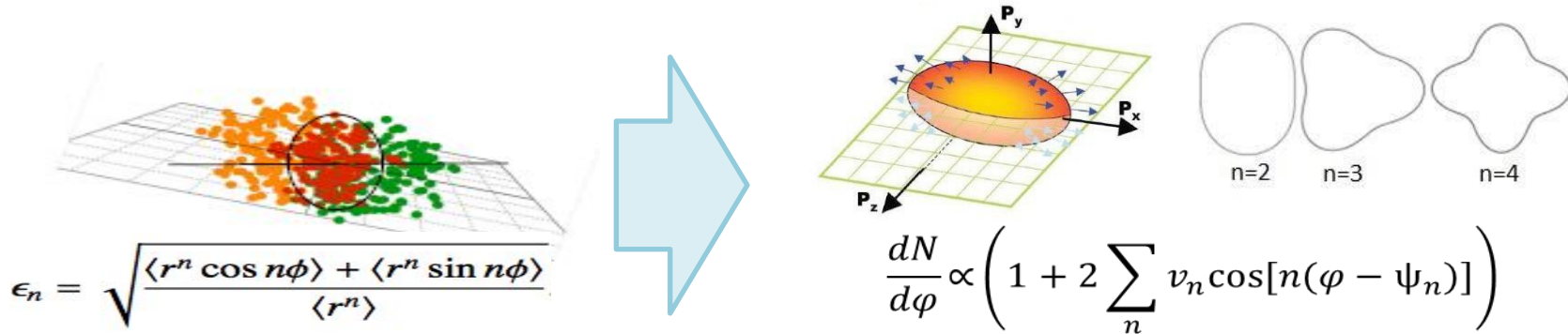
Centrality (%)	$\langle N_{\text{part}} \rangle$	$\langle N_{\text{coll}} \rangle$
0-5%	337 ± 2	774 ± 28
5-10%	290 ± 6	629 ± 20
10-20%	226 ± 8	450 ± 22
20-30%	160 ± 10	283 ± 24
30-40%	110 ± 11	171 ± 23
40-50%	72 ± 10	96 ± 19
50-60%	45 ± 9	52 ± 13
60-70%	26 ± 7	25 ± 9
70-80%	14 ± 4	12 ± 5

Centrality determination based on multiplicity provides with:

- impact parameter (b)
- number of participating nucleons (N_{part})

Similar centrality estimator is needed for comparisons with STAR, HADES, etc.

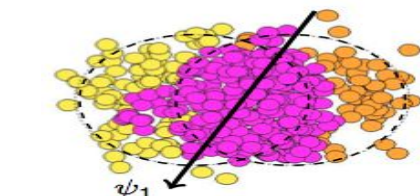
Анизотропные коллективные потоки



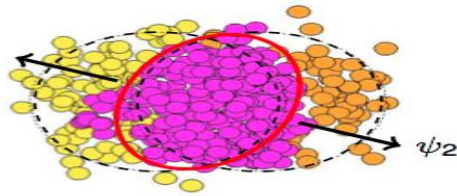
Начальный эксцентриситет (и сопутствующие ему флуктуации) ϵ_n преобразуется в азимутальную анизотропию в импульсном распределении рожденных частиц, v_n

$$v_n = k_n \epsilon_n \quad (n = 2; 3)$$

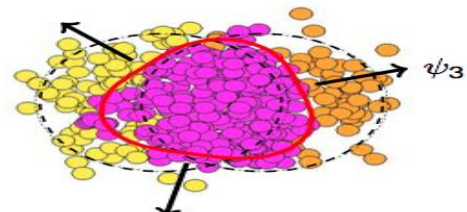
k_n чувствителен к транспортным свойствам вещества (η/s , ζ/s)



v_1 – прямой поток

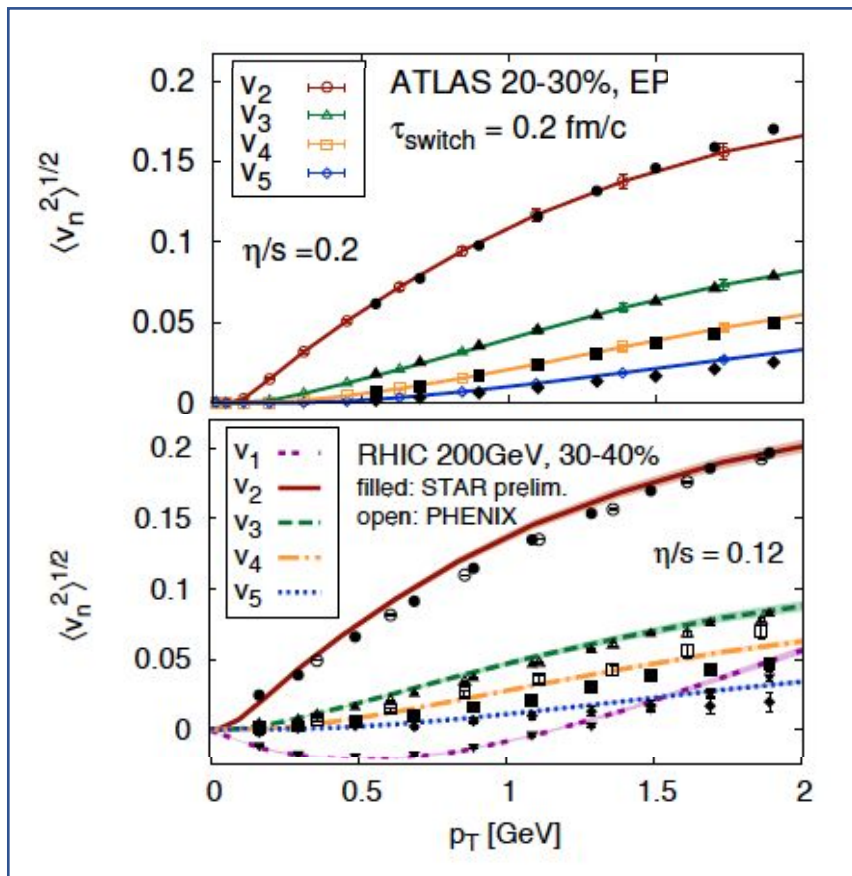


v_2 – эллиптический поток



v_3 – треугольный поток

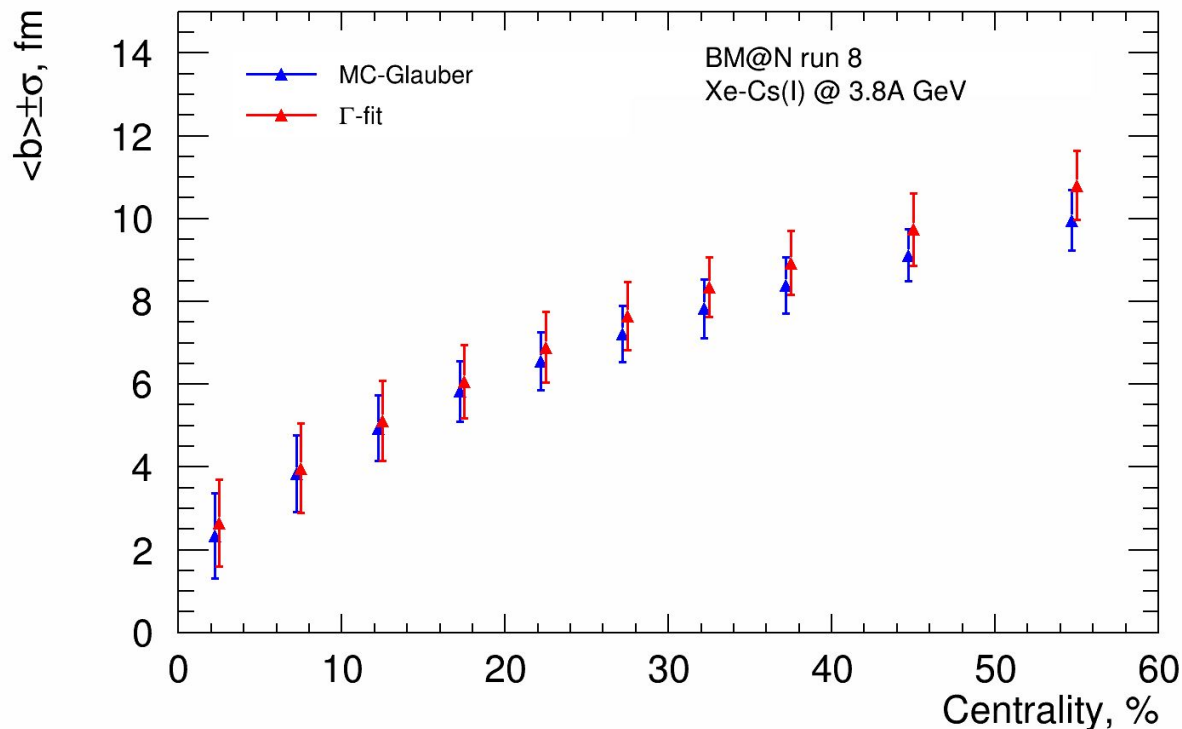
Коллективные потоки на RHIC/LHC (7-8) объединить



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

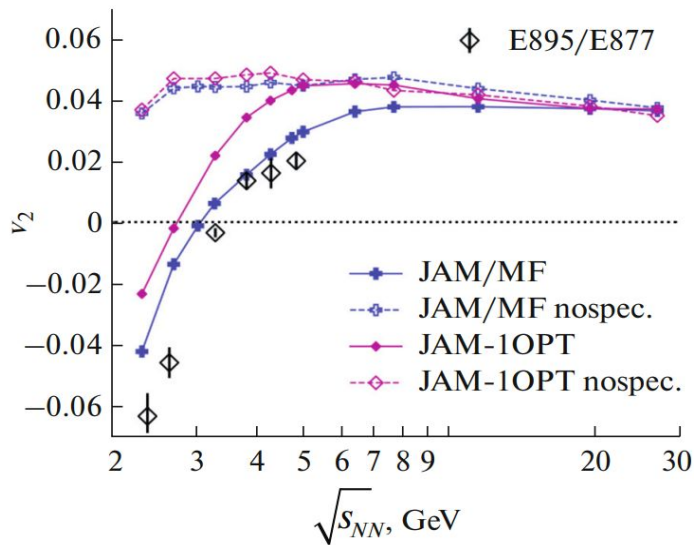
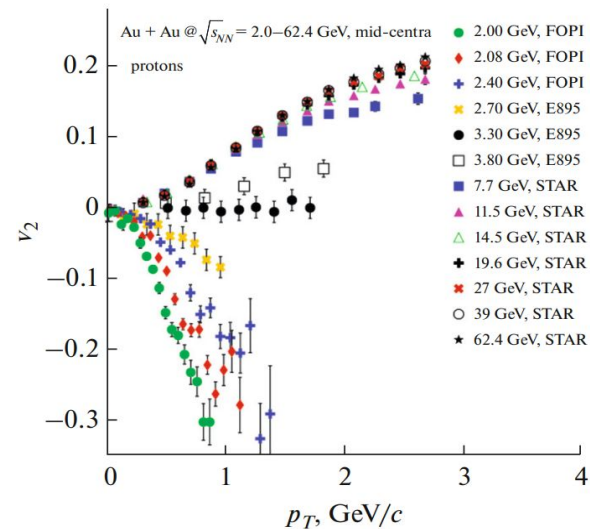
- $v_n(p_T, \text{centrality})$ - очень чувствителен к ранней стадии столкновения
- Эксцентриситет области перекрытия ядер ϵ_n (и сопутствующие ему флуктуации) вызывают азимутальную анизотропию в пространстве импульсов v_n с вязкими модуляциями η/s
- Для v_2 и v_3 : $v_n \sim k_n \epsilon_n$
- Анизотропные потоки на RHIC и LHC согласуются с гидродинамическими расчетами с η/s близкими предсказанному минимуму $\eta/s > 1/4\pi$

Comparison between impact parameter distributions



- For Γ -fit, all centrality classes are comparable
- Γ -fit and MC-Glauber are in good agreement

Коллективные потоки в диапазоне энергий NICA



- При энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 11.5-2$ ГэВ время пролета увеличивается с 2 до 16 фм/с
- v_2 меняет знак при энергии $\sqrt{s_{NN}} \sim 3.2$ ГэВ

При энергиях NICA на анизотропный поток влияют:

1. Время расширения области перекрытия:
2. Время пролета сталкивающихся ядер:

$$t_{exp} = R/c_s, c_s = \sqrt{dp/d\varepsilon}$$

$$t_{pass} = 2R/\gamma_{beam}\beta_{beam}$$

Sensitivity of $v_2\{\text{QC}\}$ to flow fluctuations and non-flow

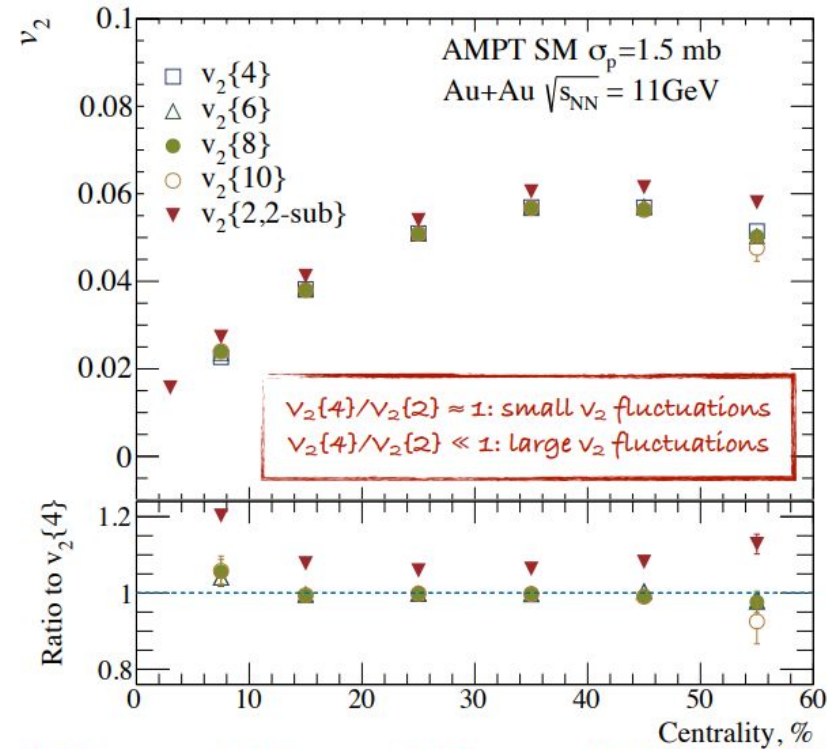
- Non-flow contribution for k-particle cumulants:
 $\delta_k \sim 1/M^{k-1}$
- Elliptic flow fluctuations: $\sigma_{v_2}^2 = \langle v_2^2 \rangle - \langle v_2 \rangle^2$
- Assuming $\sigma_{v_2} \ll \langle v_2 \rangle$, fluctuations enhance $v_2\{2\}$ and suppress $v_2\{2k, k>1\}$ compared to $\langle v_2 \rangle$

$$v_2\{2\} \approx \langle v_2 \rangle + \frac{1}{2} \frac{\sigma_{v_2}^2}{\langle v_2 \rangle}$$

$$v_2\{4\} \approx \langle v_2 \rangle - \frac{1}{2} \frac{\sigma_{v_2}^2}{\langle v_2 \rangle}$$

- Assuming a Gaussian form of fluctuations

$$v_2\{4\} \approx v_2\{6\} \approx v_2\{8\} \approx v_2\{10\}$$

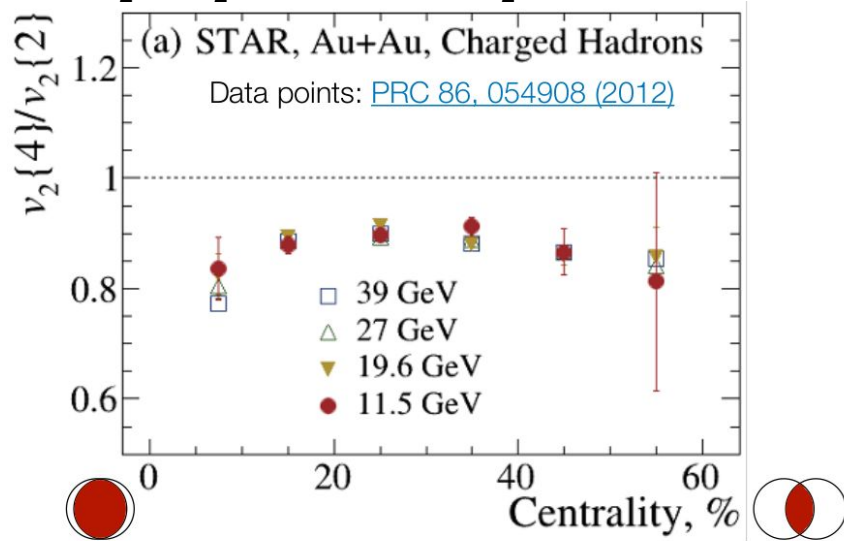


$$v_2\{2\} > v_2\{4\} \approx v_2\{6\} \approx v_2\{8\} \approx v_2\{10\}$$

Motivation: study of v_2 fluctuation

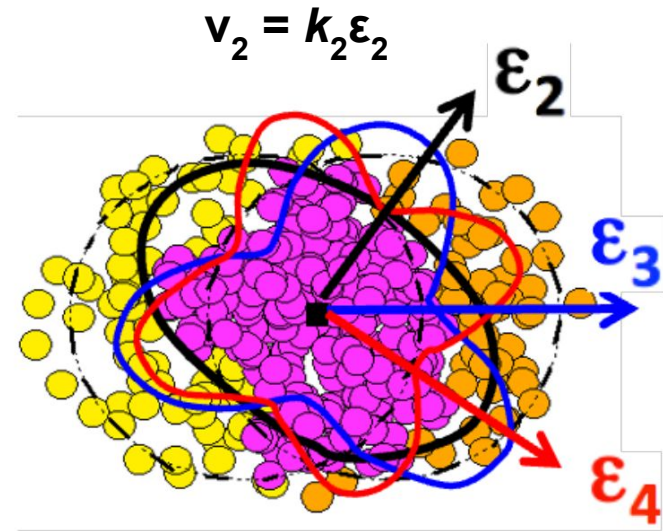
$v_2\{4\}/v_2\{2\} \approx 1$: small v_2 fluctuations

$v_2\{4\}/v_2\{2\} \ll 1$: large v_2 fluctuations



v_2 fluctuations at $\sqrt{s_{NN}} = 11.5 - 39$ GeV
observed in STAR:

- Weak dependence on collision energy



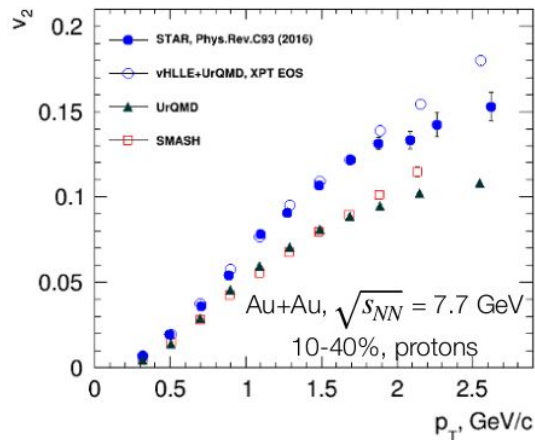
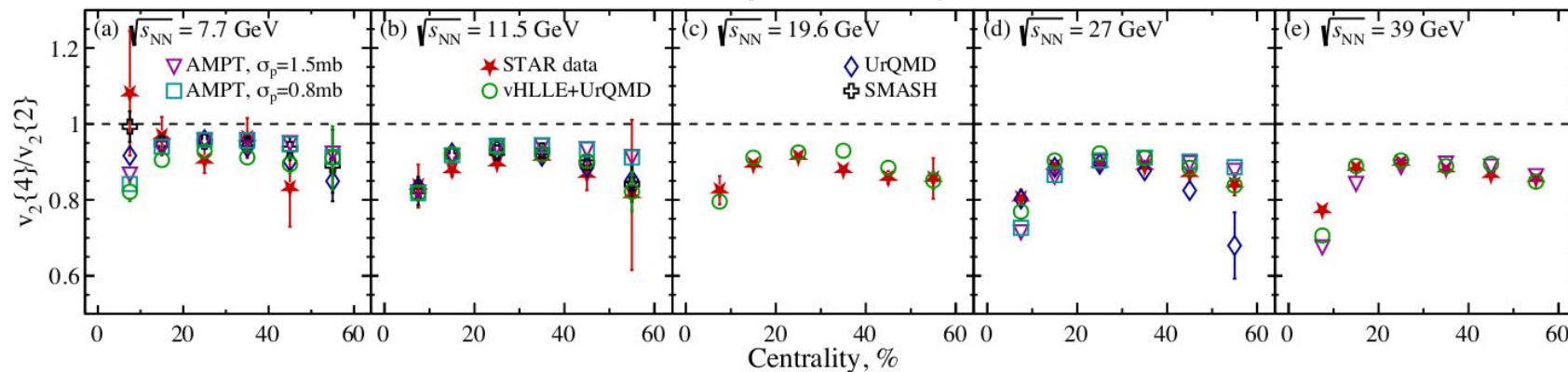
- Indicate a dominated initial state driven fluctuations $\sigma\epsilon_2$
- Provide constraints for IS models and shear viscosity $\eta(T/s)$

How about v_2 fluctuations at NICA energies?

v_2 fluctuations at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 39$ GeV

Au+Au, charged hadrons, $|\eta| < 1$

Particles 2023, 6(1), 17-29;



- At $\sqrt{s_{NN}} > 7.7$ GeV pure string/cascade models without QGP phase underestimate v_2
- v_2 fluctuations observed in STAR can be reproduced by model either with or without partonic phase description
 - v_2 fluctuations dominated by ϵ_2 fluctuations
 - $v_2\{4\}/v_2\{2\}$: direct probe for the initial state conditions

What about v_2 fluctuations at lower energies?

Methods for v_n measurements

- **u_n и Q_n vectors:** $u_{n,j} = e^{in\varphi_j} = (\cos n\varphi_j, \sin n\varphi_j)$

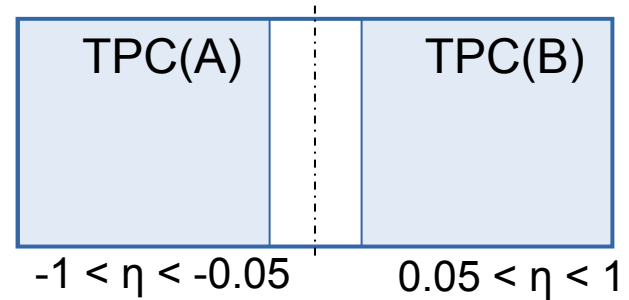
$$Q_n = \sum_{j=1}^M w_j u_{n,j},$$

- **Event plane (EP) method:** $\Delta\eta=0.1$ is applied between 2 sub-events A, B to suppress non-flow

$$Q_n \cos n\Psi_n = Q_{n,x} = \sum_i w_i \cos n\varphi_i,$$

$$Q_n \sin n\Psi_n = Q_{n,y} = \sum_i w_i \sin n\varphi_i,$$

$$\Psi_n = \left(\tan^{-1} \frac{Q_{n,y}}{Q_{n,x}} \right) / n.$$



$$v_n\{\Psi_{n,\text{TPC}}\} = \frac{\left\langle \cos \left[n \left(\varphi_i^{\text{a(b)}} - \Psi_n^{\text{b(a)}} \right) \right] \right\rangle}{R_n\{\Psi_{n,\text{TPC}}\}}, \text{ where } R_n\{\Psi_{n,\text{TPC}}\} = \sqrt{\langle \cos[n(\Psi_n^{\text{a}} - \Psi_n^{\text{b}})] \rangle}$$

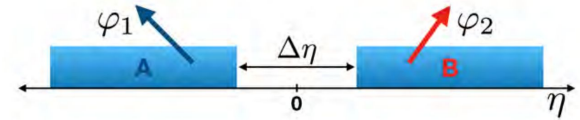
- **Scalar product (SP) method:** $v_n^{\text{SP}}\{Q_{n,\text{TPC}}\} = \left\langle u_{n,i}^{\text{a(b)}} Q_n^{\text{*b(a)}} \right\rangle / \sqrt{\langle Q_n^{\text{a}} Q_n^{\text{b}*} \rangle}$

Methods for v_n measurements

- **Sub-event 2-particle Q-cumulants $v_2\{2\}$:** $\Delta\eta=0.1$ is applied between 2 sub-events A, B to suppress non-flow

$$Q_n = \sum_{i=1}^M e^{in\phi} \quad \langle 2 \rangle_{a|b} = \frac{Q_{n_a} Q_{n,b}^*}{M_a M_b}$$

$$v_2\{2\} = \sqrt{\langle \langle 2 \rangle \rangle_{a|b}}$$

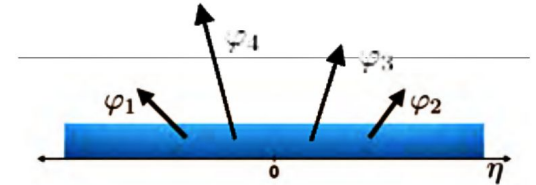


- **4-particle Q-cumulants $v_2\{4\}$**

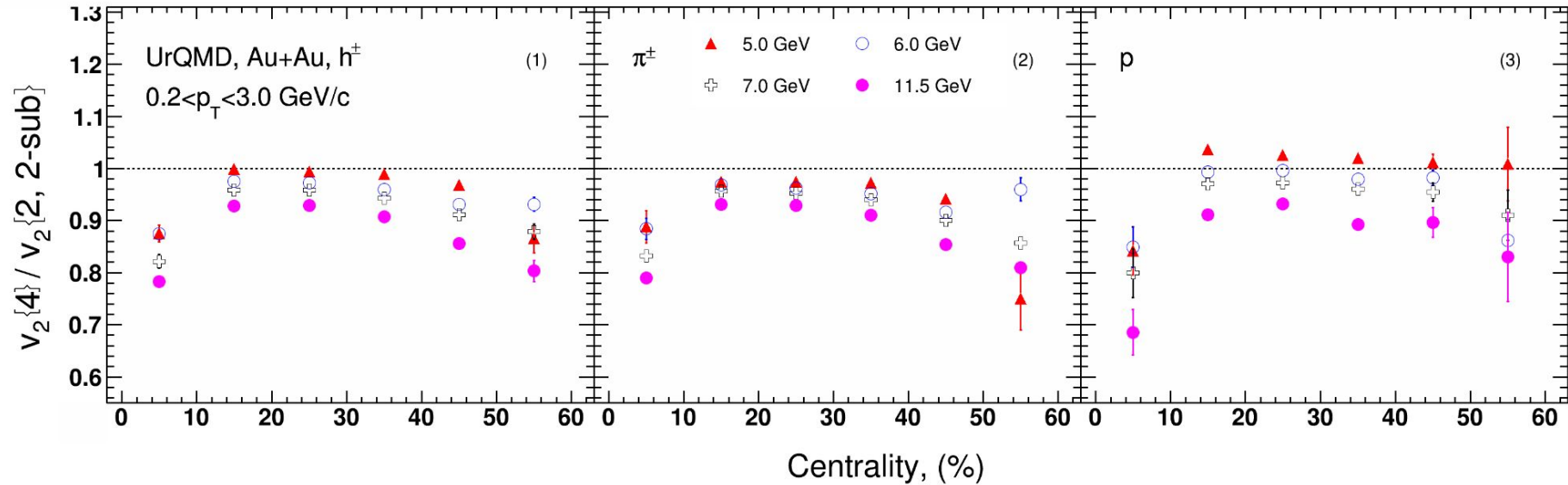
$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)}$$

$$\langle 4 \rangle = \frac{|Q_n|^4 + |Q_{2n}|^2 - 2\Re[Q_{2n} Q_n^* Q_n^*] - 4(M-2)|Q_n|^2 - 2M(M-3)}{M(M-1)(M-2)(M-3)}$$

$$v_2\{4\} = \sqrt[4]{2 \langle \langle 2 \rangle \rangle^2 - \langle \langle 4 \rangle \rangle}$$



v_2 fluctuations at $\sqrt{s_{NN}} = 5 - 11.5$ GeV



- v_2 fluctuations decrease with decreasing energy at NICA energy range at $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{-}11.5$ GeV
- The ratio $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ has particle dependence

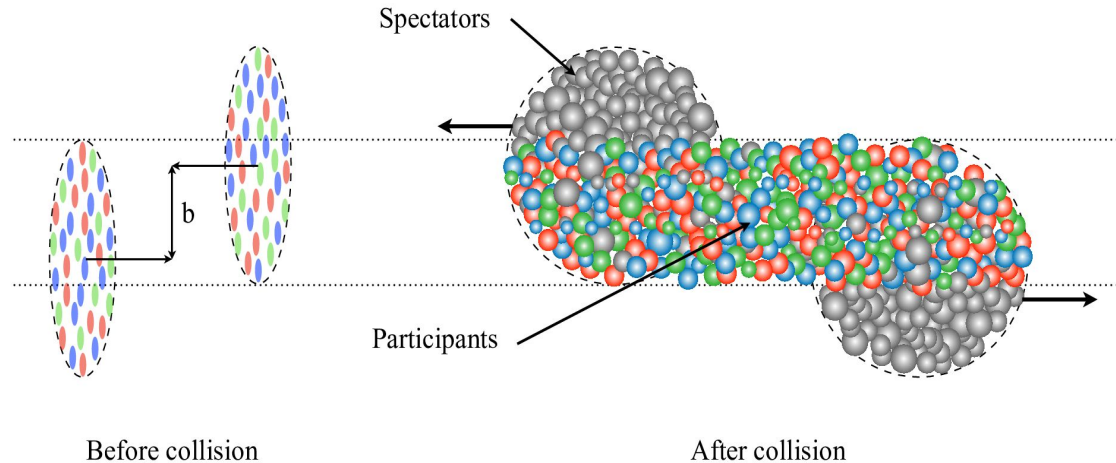
Motivation for centrality determination

- Evolution of matter produced in heavy-ion collisions depends on its initial geometry
- Impact parameters (**b**) - one of the important collision parameters
 - impossible to measure experimentally
- **Goal of centrality determination:** map (on average) the collision geometry parameters to experimental observables (centrality estimators)

Centrality class S_1 - S_2 :

group of events corresponding to a given fraction (in %) of the total cross section:

$$C_S = \frac{1}{\sigma_{inel}^{AA}} \int_{S_1}^{S_2} \frac{d\sigma}{dS} dS$$



QA Run-by-Run: runs rejection

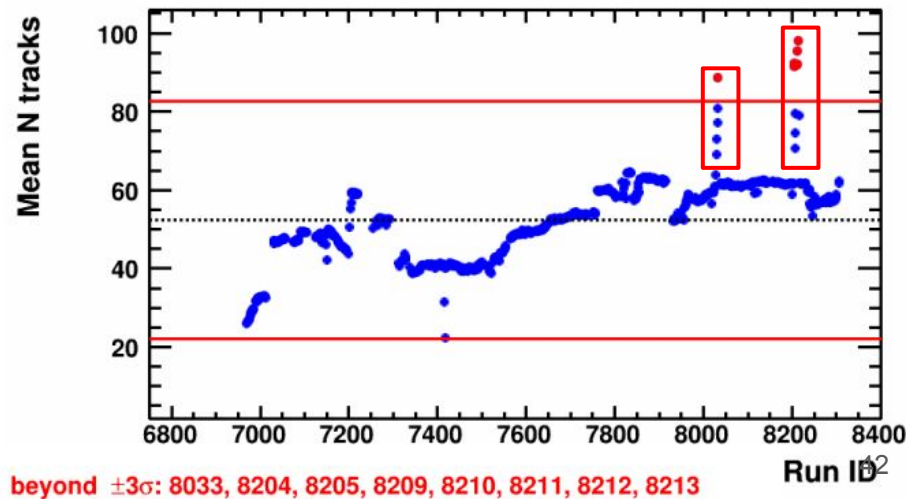
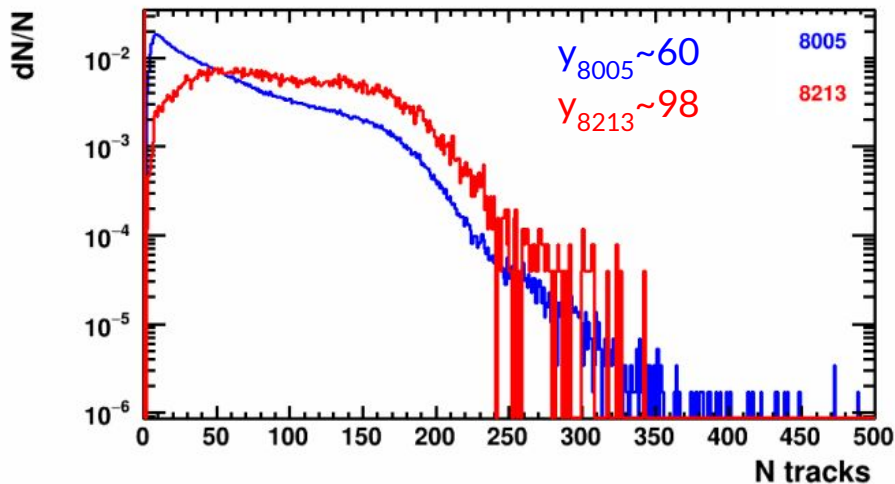
- Physical runs
- CCT2
- More than 1 track in vertex reconstruction

Procedure:

- Averaged (or fit parameters) observables are calculated for each run
- the mean (μ) and standard deviation (σ) are calculated as a function of RunId

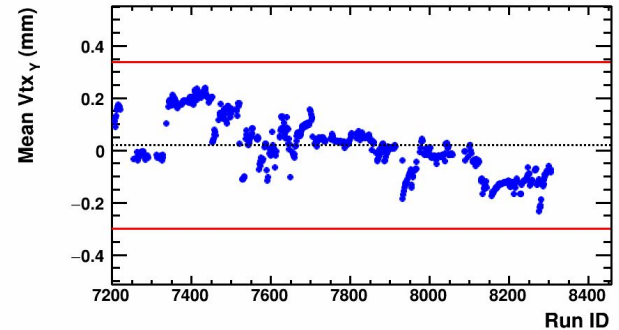
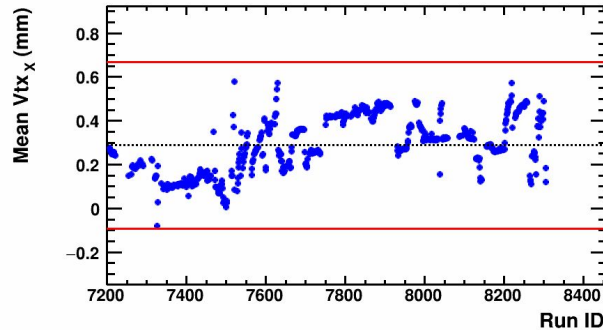
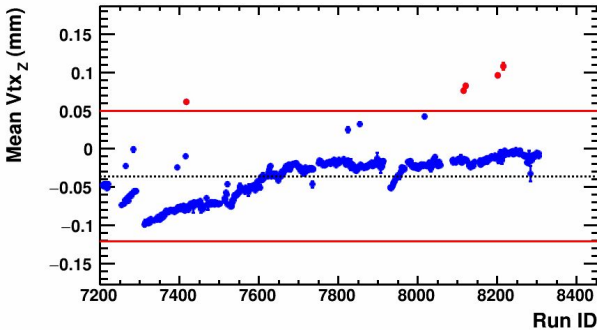
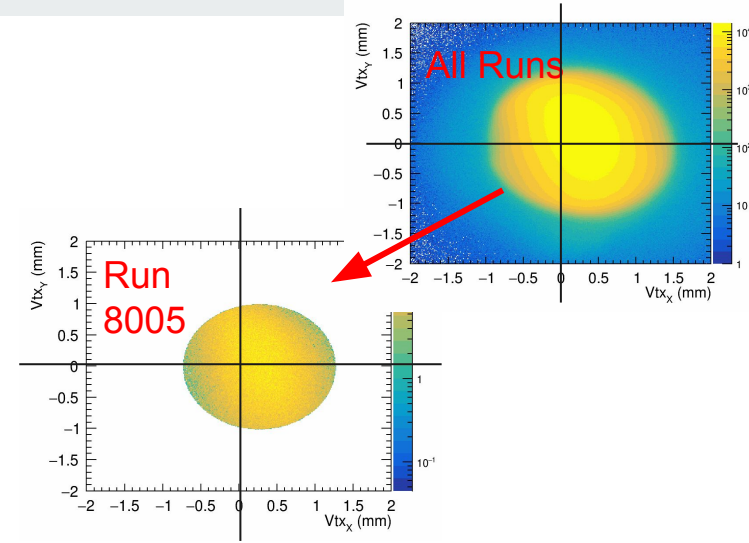
$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \mu)^2}{N}} \quad , \text{ where } i - \text{RunId number and } N - \text{total numbers of runs}$$

- beyond $\pm 3\sigma$ away from global means - bad runs



Event selection

- Xe+Cs 3.8 GeV
- Production= last
- Triggers: CCT2
- Remove BadRuns
- Corrected on $\langle VtxX \rangle$, $\langle VtxY \rangle$, $\langle VtxZ \rangle$ for each RunId
- Event selection:
 - Physical runs
 - More than 1 track in vertex reconstruction
 - $VtxR < 1.0 \text{ cm}$ ($\sqrt{VtxY_{corr}^2 + VtxX_{corr}^2} < 1 \text{ cm}$)
 - $VtxZ < 0.2 \text{ cm}$ ($< 0.2 \text{ cm}$, $< 0.5 \text{ cm}$, $< 1.0 \text{ cm}$)
 - Apply graphics cuts to remove pileup



Centrality determination based on Monte-Carlo sampling of produced particles

For **multiplicity
of produced particles**
used in HADES, CBM, NA61/SHINE

Get $(b, N_{\text{part}}, N_{\text{coll}})$ from MC-Glauber

Evaluate number of ancestors
(sources of produced particles)

$$N_a = f N_{\text{part}} + (1-f) N_{\text{coll}}$$

Sample multiplicity of produced particles (S_i) N_a times
from $\text{NBD}(\mu, \mathbf{k})$

Multiplicities from two collision events are randomly
superimposed with the probability $\mathbf{p}$ ("pileup" events)

Result: total S_{tot}

MC-Glauber
distribution

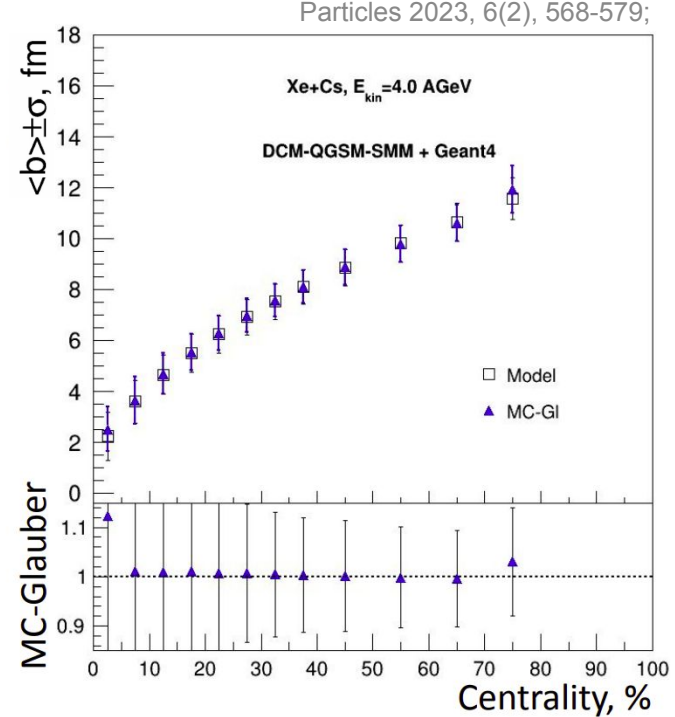
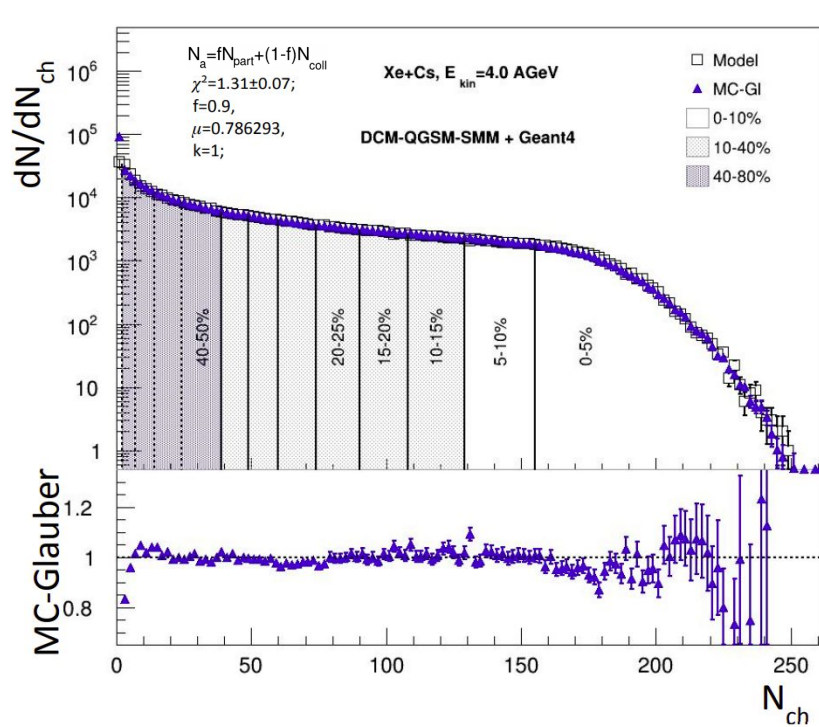
Full Monte-Carlo (real
data) distribution

Evaluate χ^2
between $N/dN_{\text{MC/data}}$ and N/dN_{Gl}

Scan phase space of parameters
to find their values for minimum of χ^2

Extract relation between geometry
parameters and centrality estimator

MC-Glauber fit result Xe-Cs



- Good agreement between model data and fit
- Impact parameter distributions in different centrality classes reproduces ones from DCM-QGSM-SMM

The Bayesian inversion method (Γ -fit)

Relation between multiplicity N_{ch} and impact parameter b is defined by the fluctuation kernel:

$$P(N_{ch}|c_b) = \frac{1}{\Gamma(k(c_b))\theta^k} N_{ch}^{k(c_b)-1} e^{-N_{ch}/\theta}$$

$$\frac{\sigma^2}{\langle N_{ch} \rangle} = \theta \approx const, k = \frac{\langle N_{ch} \rangle}{\theta}$$

$$c_b = \int_0^b P(b') db' \quad - \text{centrality based on impact parameter}$$

Mean multiplicity as a function of c_b can be defined as follows:

$$\langle N_{ch} \rangle = N_{knee} \exp\left(\sum_{j=1}^3 a_j c_b^j\right) \quad N_{knee}, \theta, a_j - 5 \text{ parameters}$$

Fit function for N_{ch} distribution: $P(N_{ch}) = \int_0^1 P(N_{ch}|c_b) dc_b$

b-distribution for a given N_{ch} range: $P(b|n_1 < N_{ch} < n_2) = P(b) \frac{\int_{n_1}^{n_2} P(N_{ch}|b) dN_{ch}}{\int_{n_1}^{n_2} P(N_{ch}) dN_{ch}}$

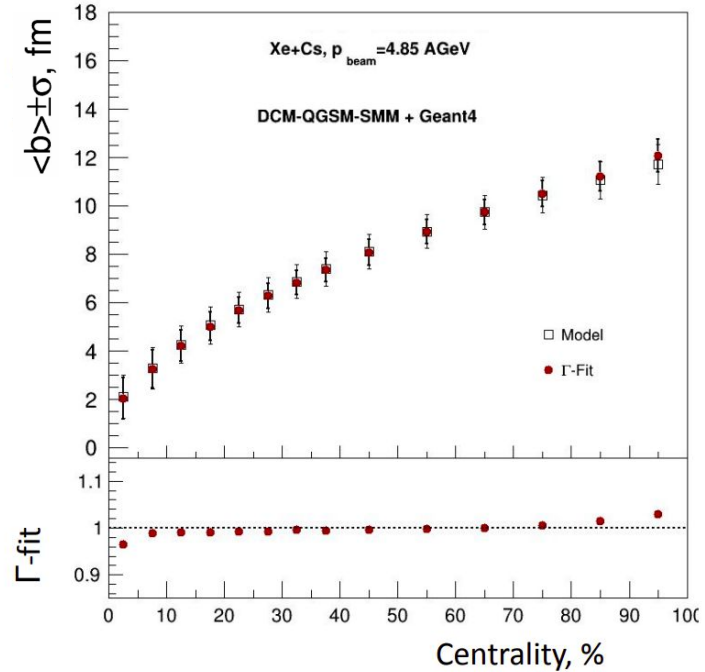
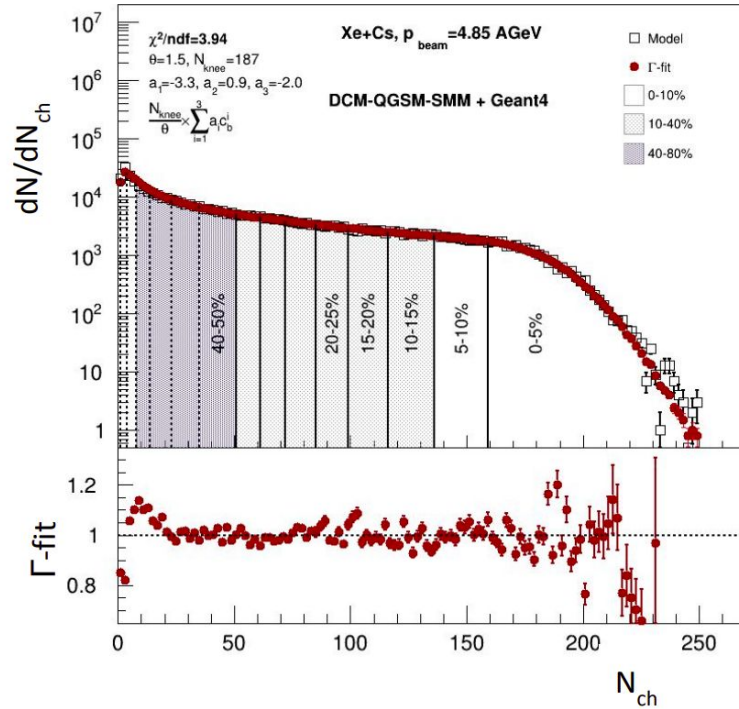
2 main steps of the method:

Fit experimental (model) distribution with $P(N)$



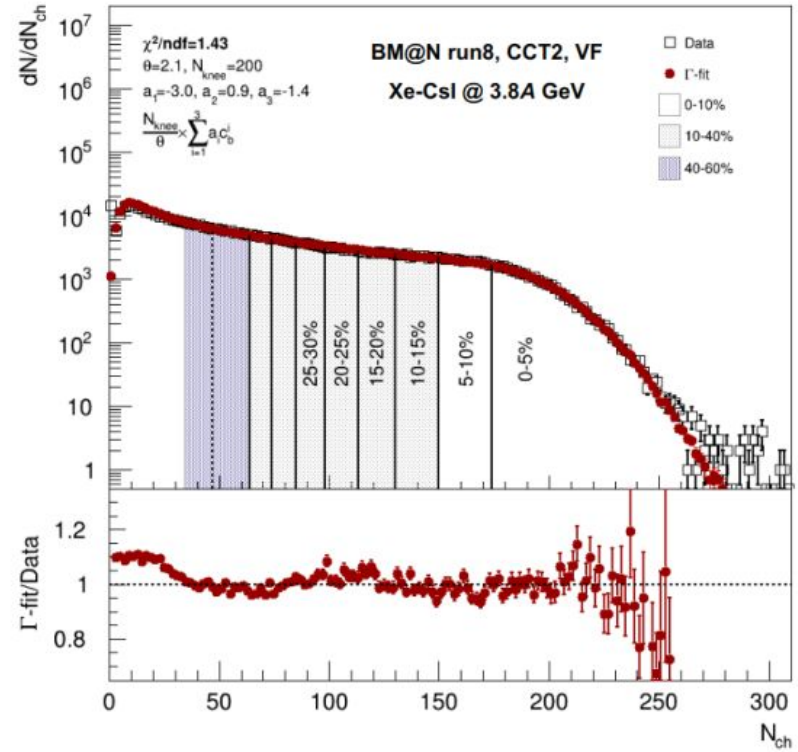
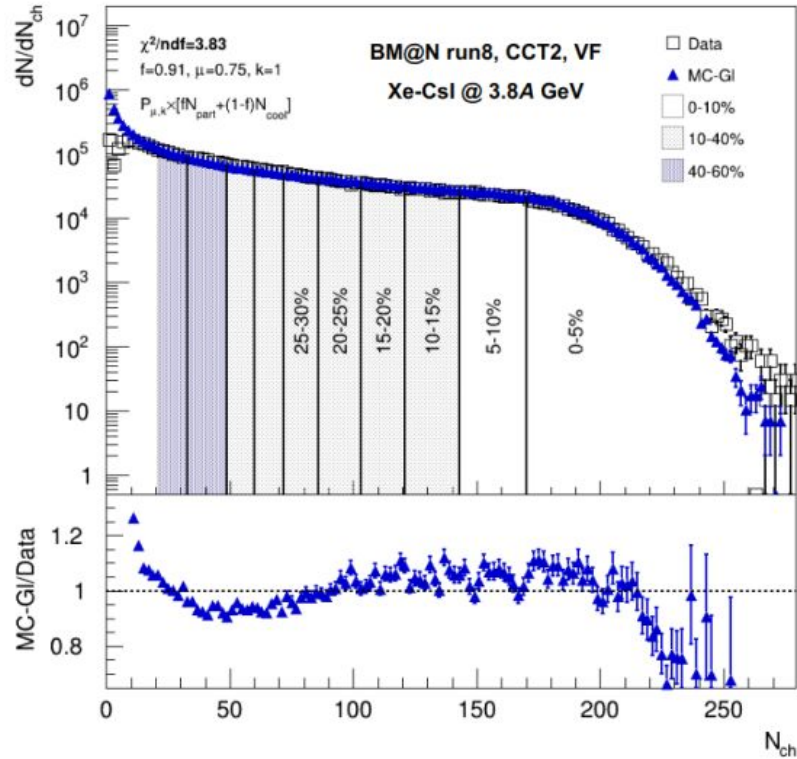
Construct $P(b|N)$ using Bayes' theorem:
 $P(b|N) = P(b)P(N|b)/P(N)$

Γ -fit result Xe-Cs

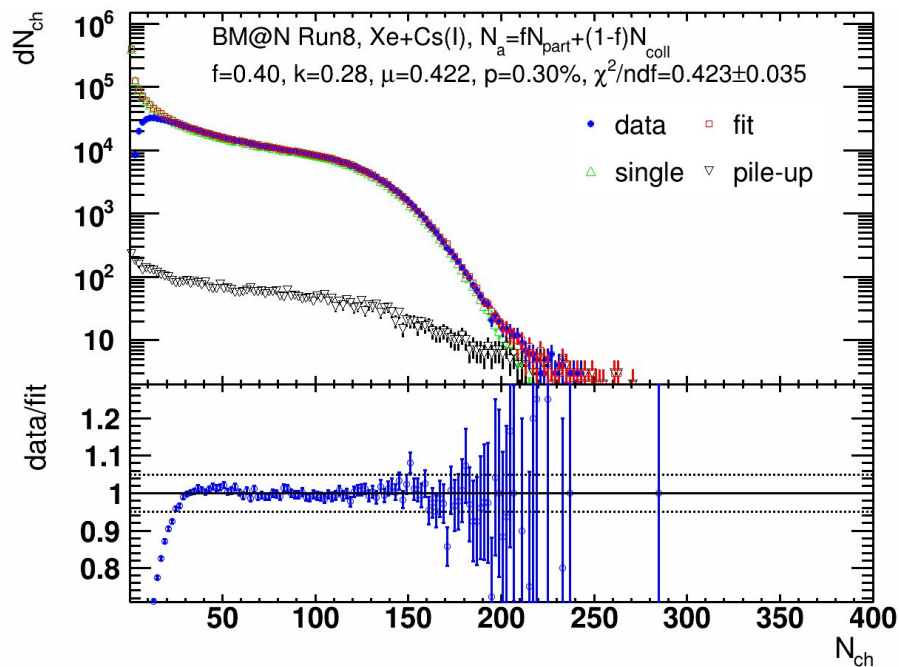
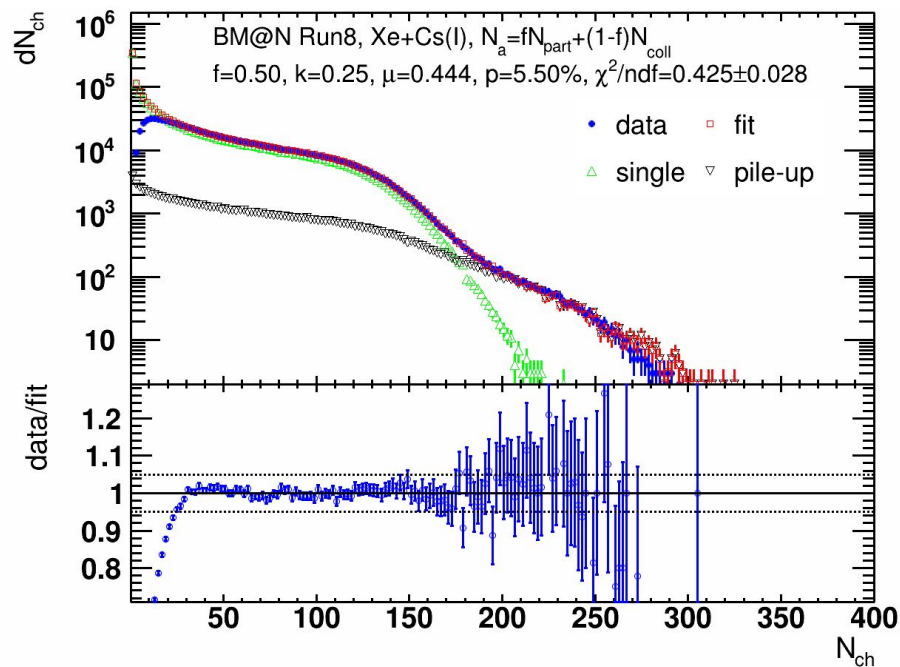


- Good agreement between model data and fit
- Impact parameter distributions in different centrality classes reproduces ones from DCM-QGSM-SMM

Centrality determination



Centrality determination after remove “pileup”

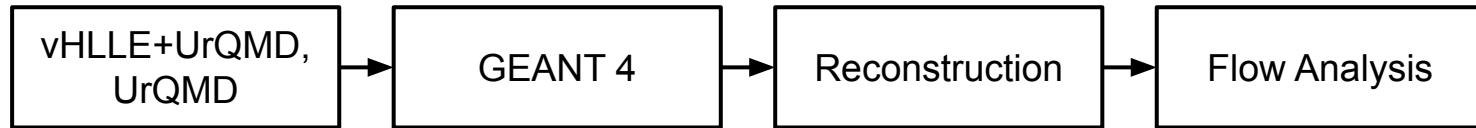


Change fit result

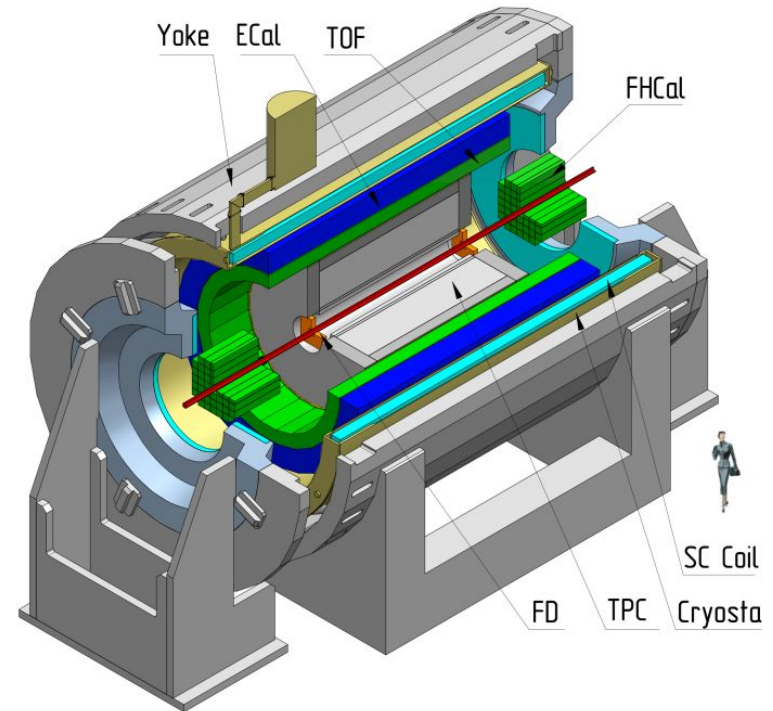
- $f: 0.5 \rightarrow 0.4$
- $k: 0.25 \rightarrow 0.28$
- $\mu: 0.44 \rightarrow 0.42$
- pileup: $5.5\% \rightarrow 0.3\%$

After pileup rejection the “pileup” events contribution is less 1%

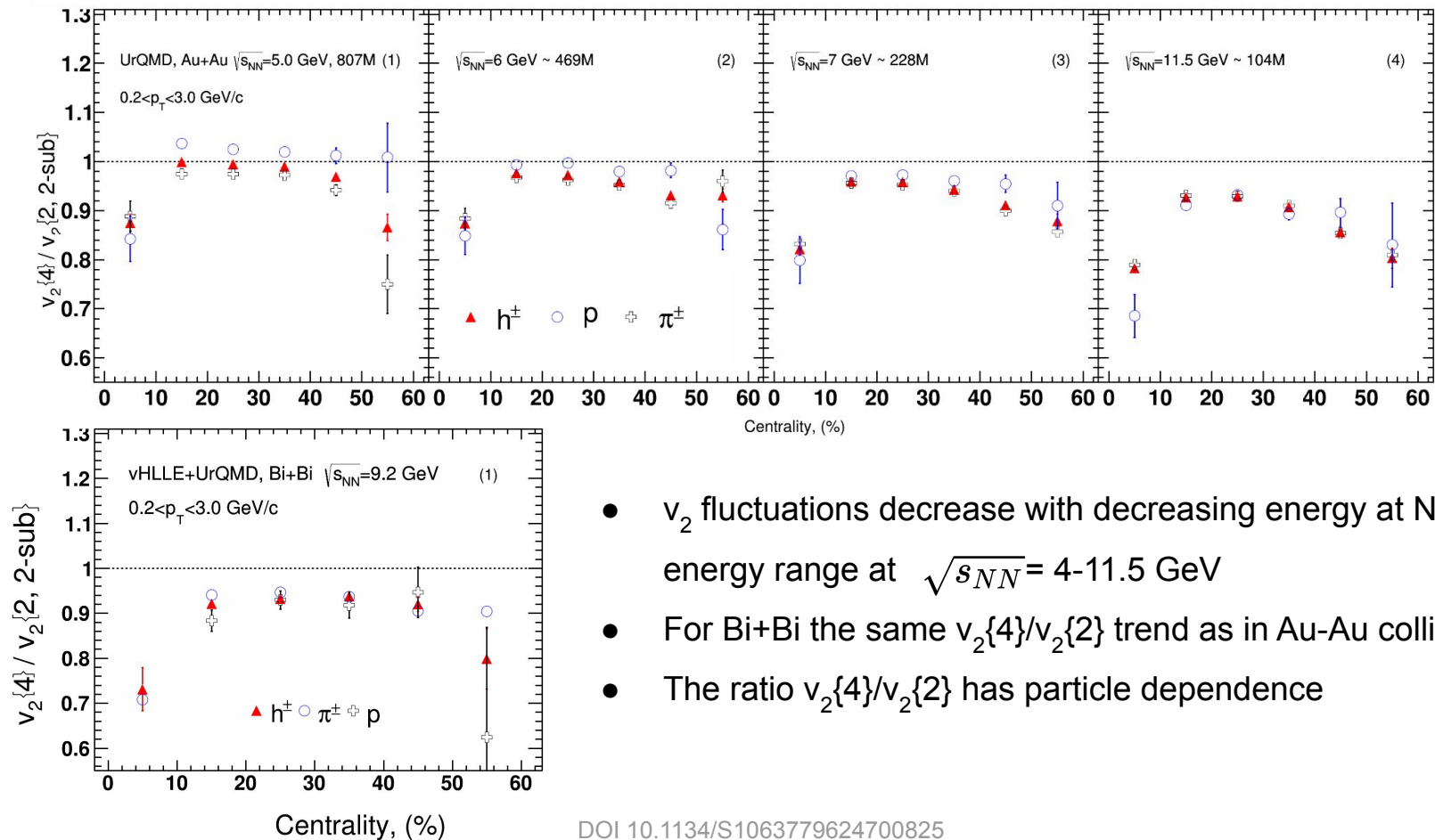
MPD experiment at NICA



- Colliding system: Au-Au, Bi-Bi
- Colliding energy: $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 9.2$ GeV
- Centrality determination: b-based
- Track selection:
 - $N_{\text{hits}}^{\text{TPC}} > 16$
 - $|\text{DCA}| < 2\sigma$
 - $0.2 < p_T < 3.0$ GeV/c
 - $|\eta| < 1.5$
 - PID based on PDG-code



Relative v_2 fluctuations of identified hadrons



- v_2 fluctuations decrease with decreasing energy at NICA energy range at $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11.5$ GeV
- For Bi+Bi the same $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ trend as in Au-Au collisions
- The ratio $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ has particle dependence