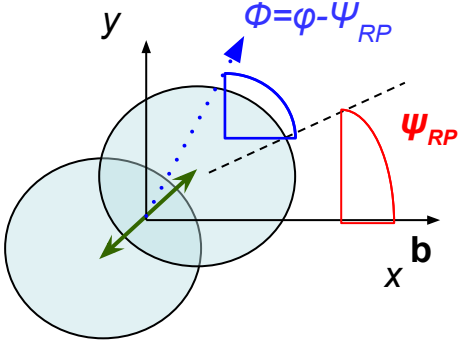
Исследование направленного потока протонов в ядро-ядерных столкновениях при энергиях E_{kin}=1.2 — 4 А ГэВ

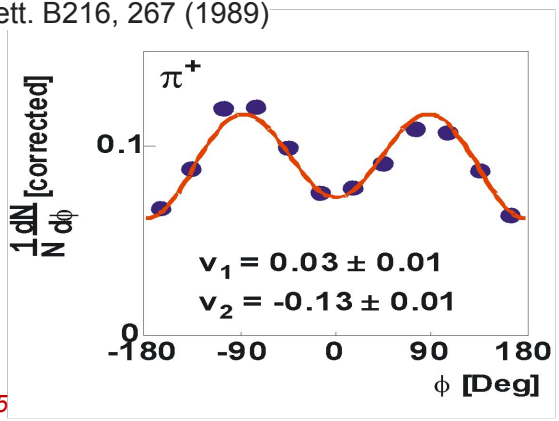
Мамаев Михаил Валерьевич, к. ф-м. н.
Тараненко Аркадий Владимирович

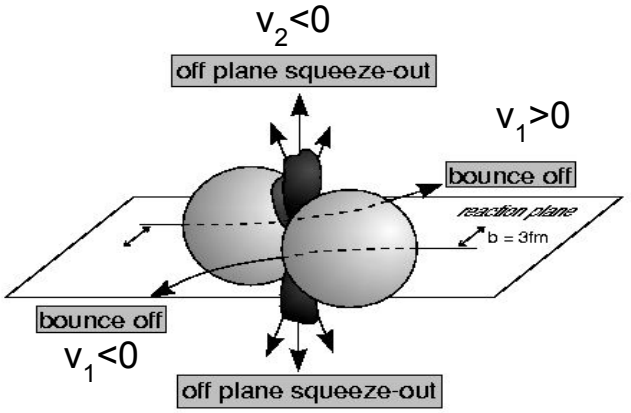
Лаборатория Физики Высоких Энергий имени Векслера и Балдина
ОИЯИ, 17/04/2026

Коллективные анизотропные потоки в ядро-ядерных столкновениях

Diogene, M. Demoulins et al., Phys. Lett. B241, 476 (1990)
Plastic Ball, H.H. Gutbrod et al., Phys. Lett. B216, 267 (1989)







S Voloshin, Y. Zhang, Z. Phys. C70,(1996), 665

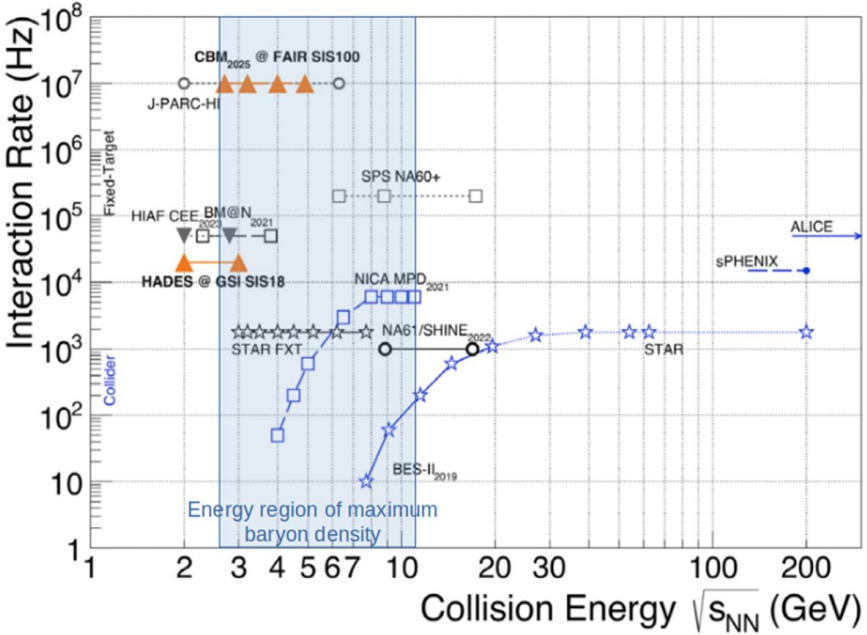
$$\frac{d^2N}{d\varphi d\Psi_{RP}} = \frac{N}{2\pi}(1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\phi - \Psi_{RP}))$$

Величина анизотропных потоков определяется коэффициентами ряда Фурье

$$v_n = \langle \cos n(\phi - \Psi_{RP}) \rangle$$

v_1 — направленный поток, v_2 — эллиптический, v_3 — треугольный

Эксперименты по изучению сжатой барионной материи



Эксперименты в области высоких барионных плотностей:

<u>Существующие:</u>

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

<u>Будущие:</u>

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)

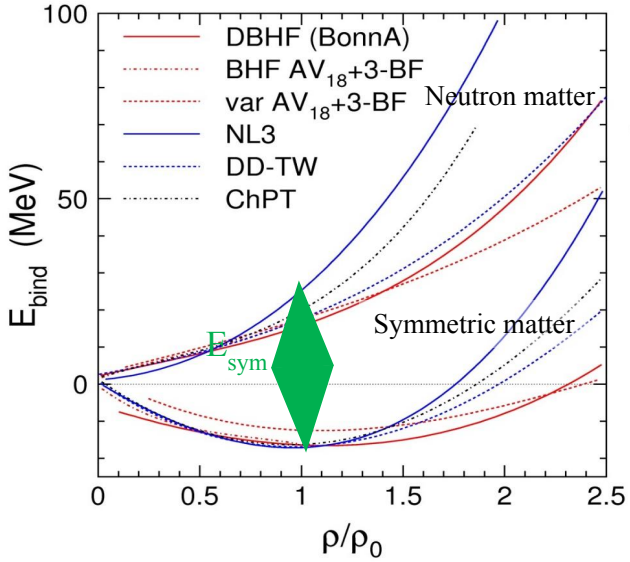
Method	μ_c (MeV)	T_c (MeV)
Holography + Bayesian	560 - 625	101 - 108
FRG/DSE	495 - 654	108 - 119
Lee-Yang edge singularities	500 - 600	100 - 105
Lattice QCD	$\mu_c/T_c > 3$	F. Karsch et al.
Summary	**495 - 654**	**100 - 119**

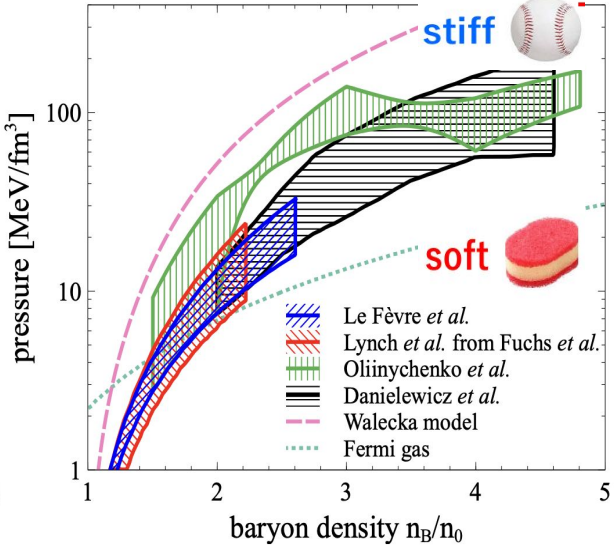
$(\mu_c, T_c) = (495 - 654, 100 - 119)$ MeV ➡ $3.5 < \sqrt{s_{NN}} < 4.9$ GeV

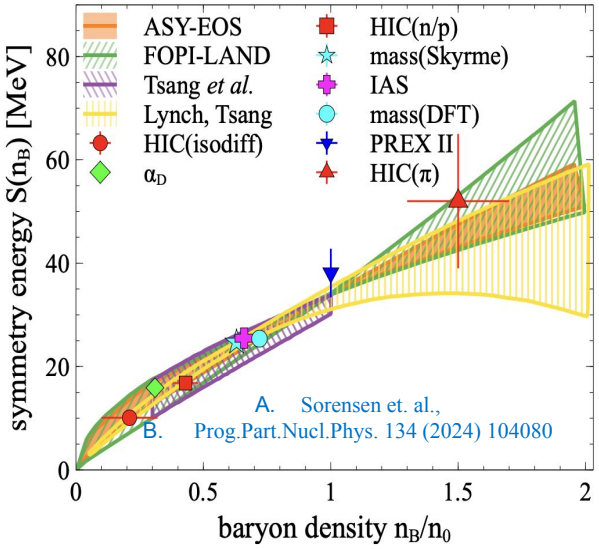
Уравнение состояние (EoS) сжатой барионной материи

Давление $P = n^2 \frac{\mathrm{d}(E/A)}{\mathrm{d}n_b}$ *Энергия на нуклон* $\frac{E}{A} = m_N + E_A(n_\mathrm{B}) + E_\mathrm{sym}(n_\mathrm{B}) \frac{(n_p - n_n)^2}{n_\mathrm{B}^2}$ Изоспиновая асимметрия $n_\mathrm{B} = n_p + n_n$

Симметричная материя **Энергия симметрии**



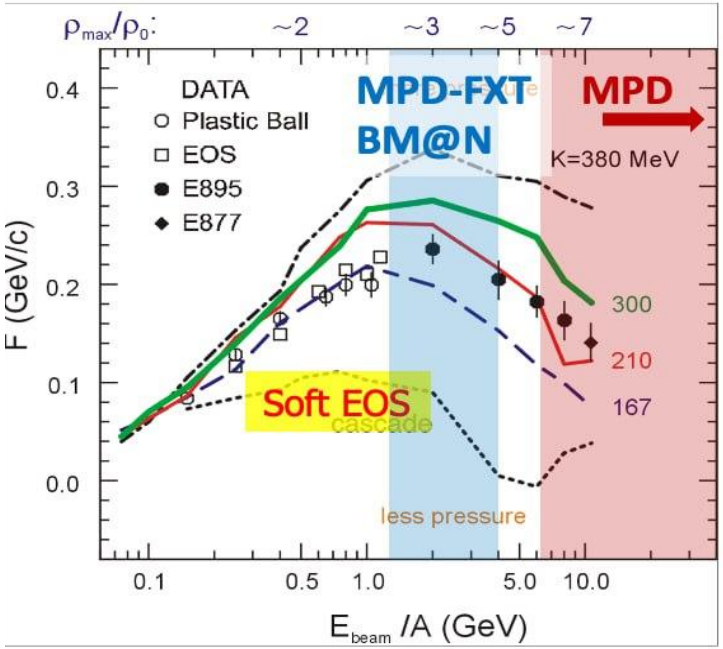


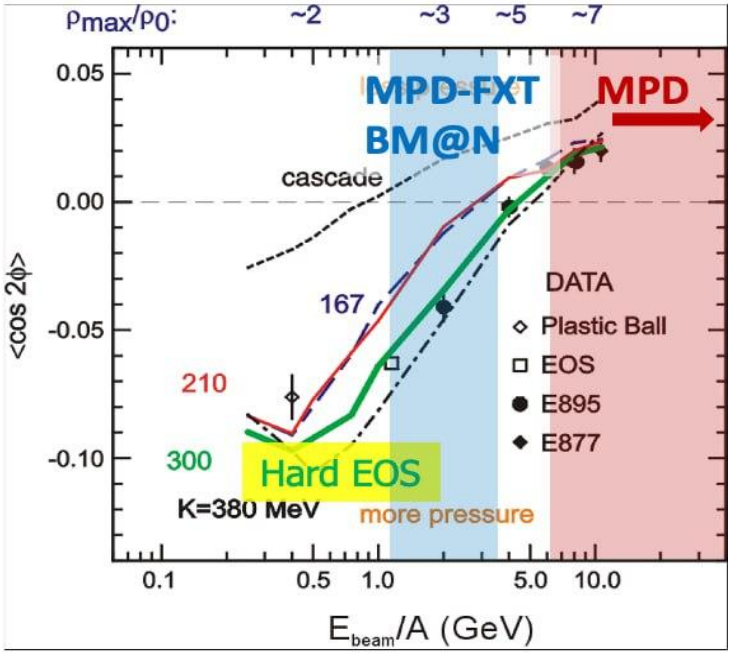


EOS описывает отношение между плотностью (n_B), давлением (P), температурой (T), энергией (E), и изоспиновой асимметрии $(n_p\text{-}n_n)/n_B$

Анизотропные потоки и уравнение состояния

P. DANIELEWICZ, R. LACEY, W. LYNCH 10.1126/science.1078070





- **Результаты старвнения ν_n с теоретическими предсказанимями неоднозначны:**
  - ν_1 предполагает коэффициент сжимаемости ядерного вещества K_{nm}~210 MeV а ν_2 предполагает K_{nm}~ 300 MeV
- **Необходимы новые измерения потоков v_1 и v_2, чтобы уточнить значение K_{nm}**

Разработанный метод измерения v_1

Мы используем метод предложенный Selyuzhenkov I., Voloshin S. Phys. Rev. C. — 2008. — Т. 77. — С. 034904

Из импульса каждой частицы определяется единичный вектор u_n:

$$\vec{u}_n = (\cos n\varphi, \sin n\varphi)$$

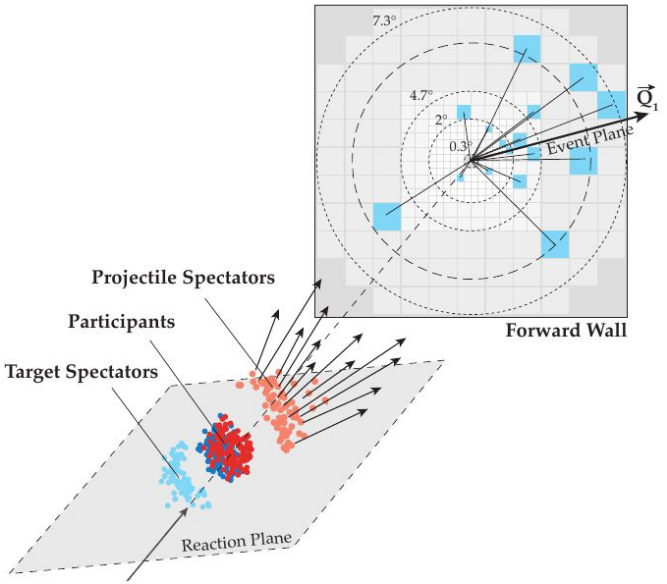
где φ — азимутальный угол импульса

$$\vec{Q}_n = \frac{\sum_{k=1}^{M} w_k u_n^k}{C} = \frac{|Q|}{C}(\cos n\Psi_n^{EP} \sin n\Psi_n^{EP})$$

Ψ_n^{EP} — угол плоскости симметрии (оценка угла плоскости реакции)

Величина направленного потока получаются с использованием методом скалярного произведения

$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1^{F1} \rangle}{R_1^{F1}} \quad R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$



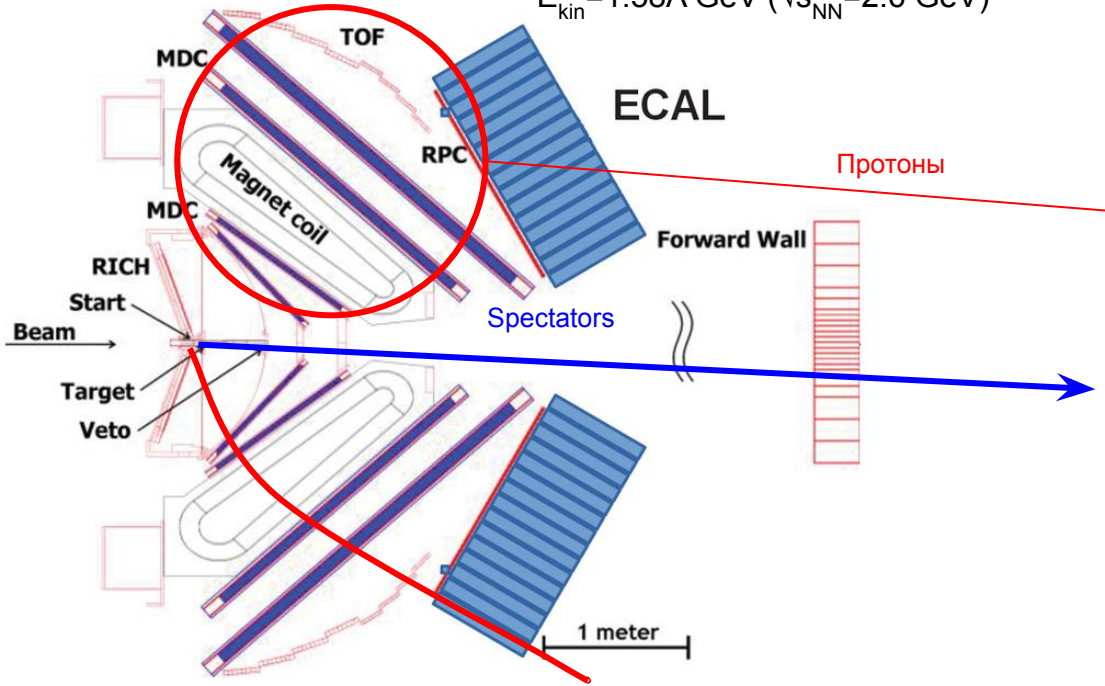
- Плоскость симметрии определятся при помощи спектаторов, которые отклоняются в плоскость реакции
- Большое разделение частиц по псевдобыстроте позволят минимизировать непотоковые корреляции

Эксперимент HADES на ускорителе SIS-18 (ГСИ, Дармштадт)

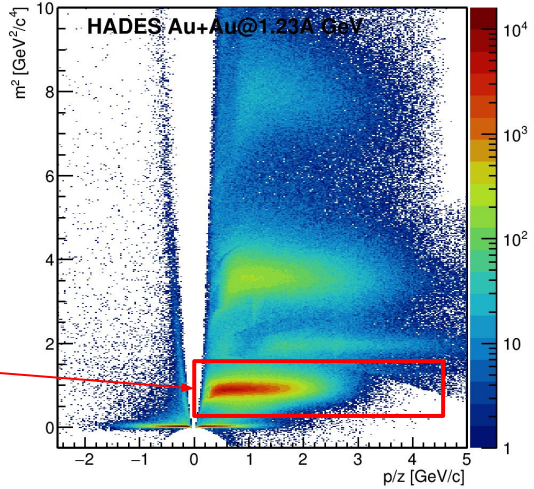
2012: Au+Au E_{kin}=1.23A GeV ($\sqrt{s_{NN}}$=2.4 GeV)

2019: Ag+Ag E_{kin}=1.23A GeV ($\sqrt{s_{NN}}$=2.4 GeV)

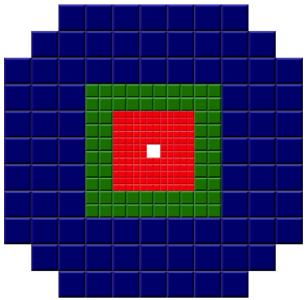
E_{kin}=1.58A GeV ($\sqrt{s_{NN}}$=2.6 GeV)



Протоны



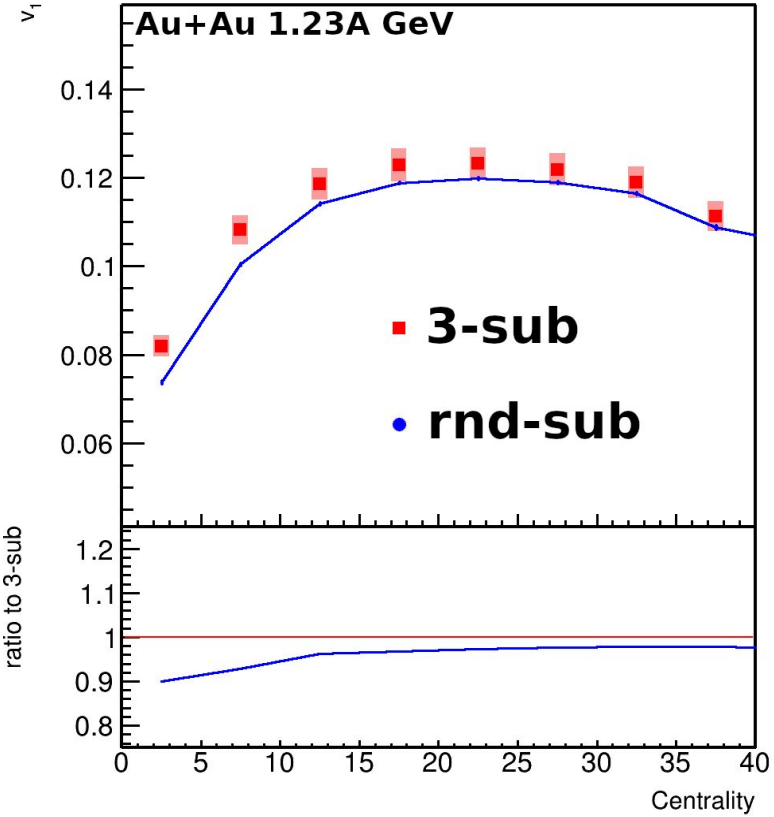
Eur.Phys.J.A41:243-277,2009



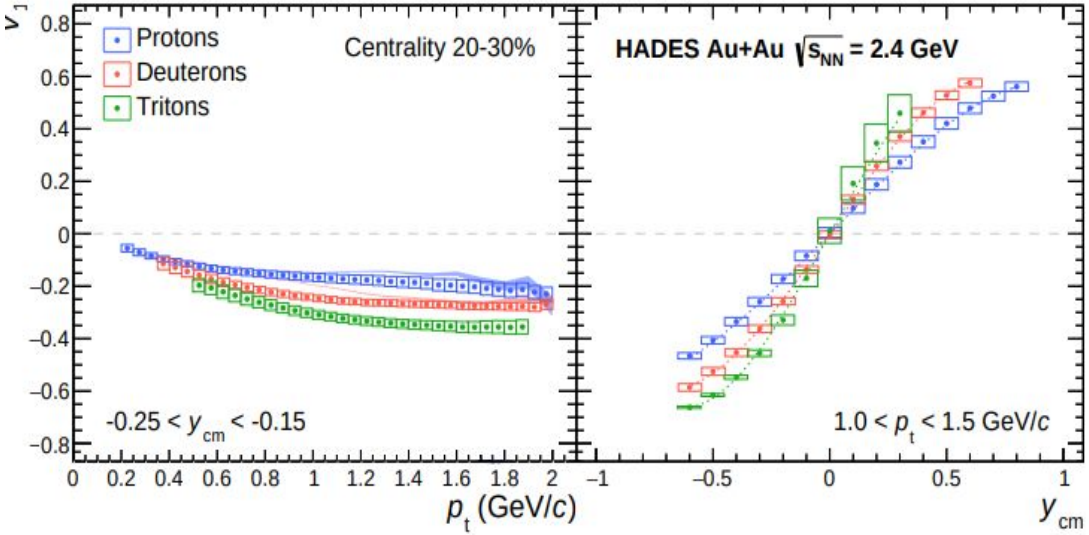
Forward Wall (FW) – определение плоскости события для измерения v_n

Сравнение методов измерения v_1 в эксперименте HADES

Adamczewski-Musch, et. al. ***Phys.Rev.Lett.*** 125 (2020) 262301
Mamaev et al. ***Physics of Particles and Nuclei***, 53 (2022) 277
Mamaev et al. ***Journal of Physics: CS***, 1690 (202) 012122



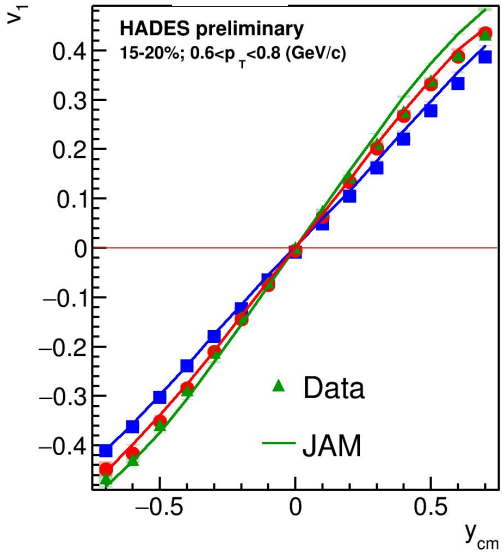
Оценка вклада непотоковых корреляций в измерения v_1 в эксперименте HADES

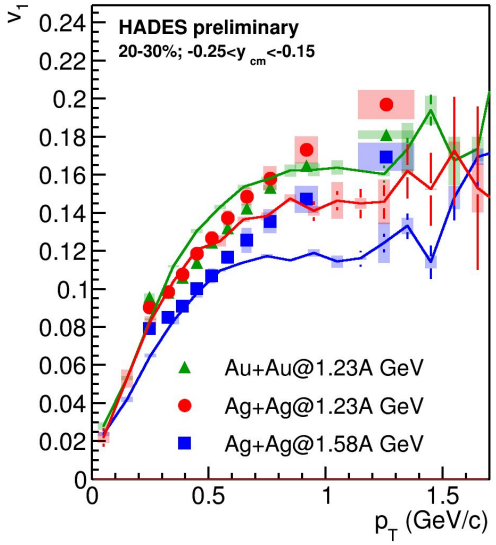


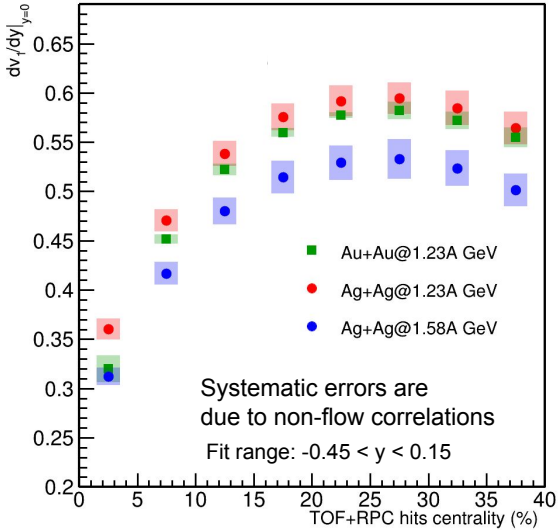
Сравнение различных методов определения v_1 позволяет определить систематическая ошибку 5-10% в столкновениях Au+Au

v_1 протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag

Mamaev, Physics of Particles and Nuclei Letters, 21 (2024) 661
Mamaev, Physics of Particles and Nuclei, 55 (2024) 832
Mamaev, Taranenko, Particles, 6 (2023) 622





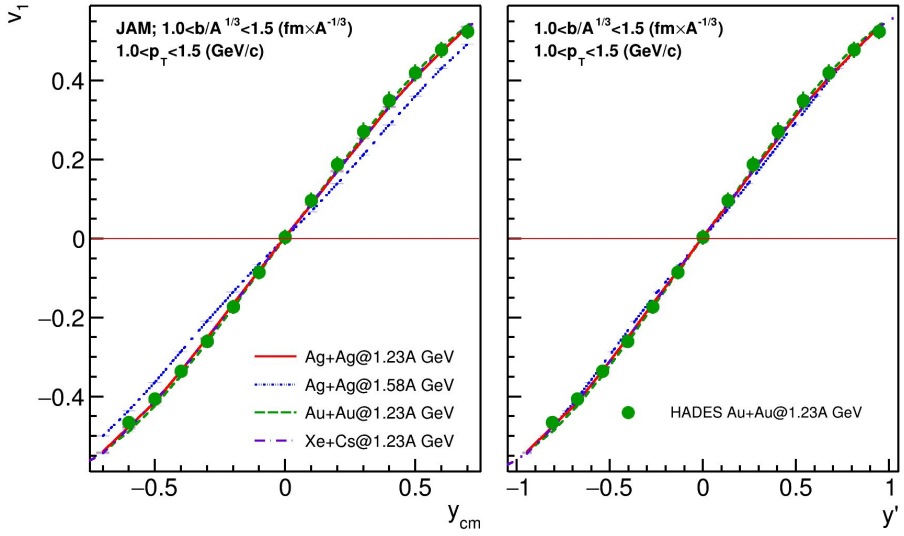


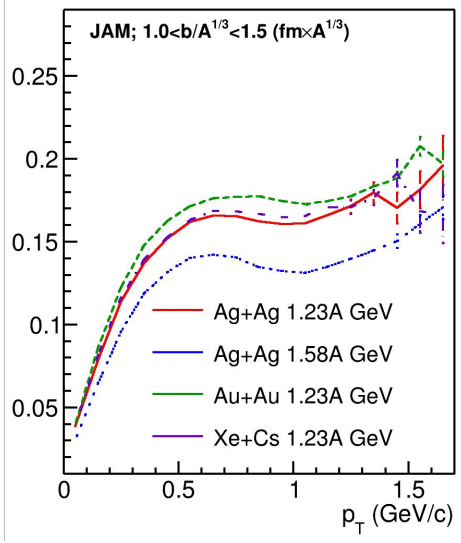
- Схожая зависимость v_1 протонов от быстроты (y_{cm}), поперечного импульса (p_T) и центральности для столкновений Ag+Ag и Au+Au

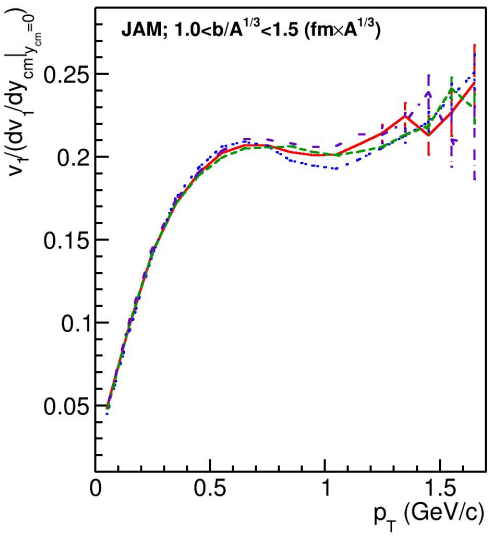
- Модель JAM-MF (с импульсно-зависимым средним полем) хорошо описывает зависимость v_1 от быстроты, но плохо описывает зависимость от импульса

JAM-MF: масштабирование v_1 с энергией и размером системы

Mamaev, M., Taranenko, A. ***Particles***, 2023, 6(2), pp. 622–637







- Наблюдается схожее масштабирование в модели JAM-MF

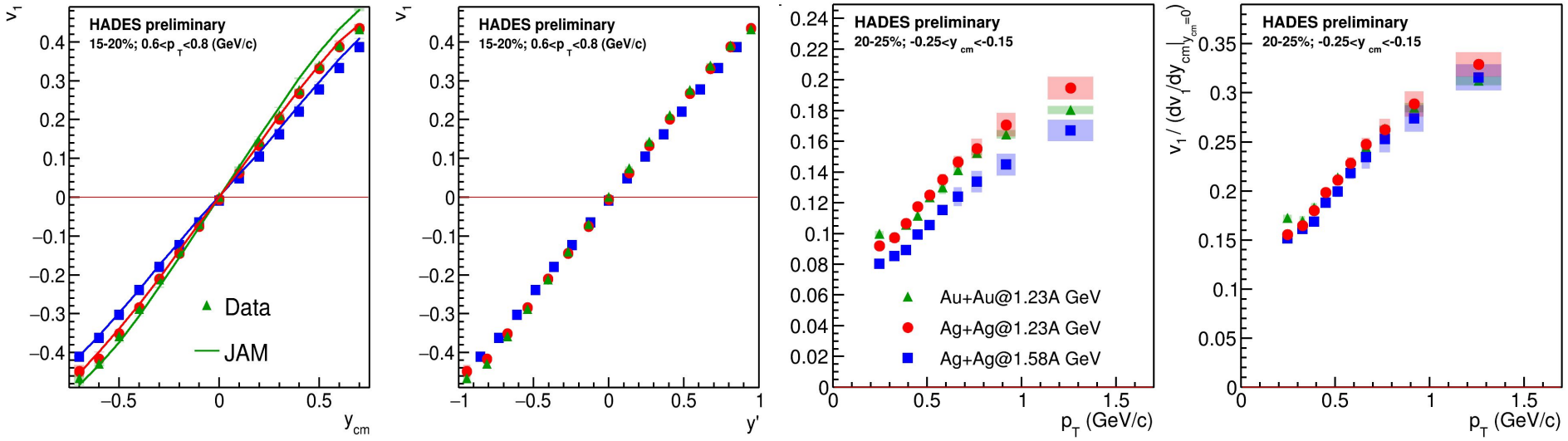
Масштабирование v_1 с энергией и геометрией столкновения

$t_{Au+Au@1.23A\ GeV}$ = 18 fm/c
$t_{Ag+Ag@1.23A\ GeV}$ = 15 fm/c
$t_{Ag+Ag@1.58A\ GeV}$ = 13 fm/c

Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — Т. 21, № 4. — С. 661—663.
Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — Т. 55, № 4. — С. 832—835.

$y_{CM} \rightarrow y' = y_{CM} / y_{beam}$

$v_1(p_T) \rightarrow v_1(p_T) / dv_1/dy$

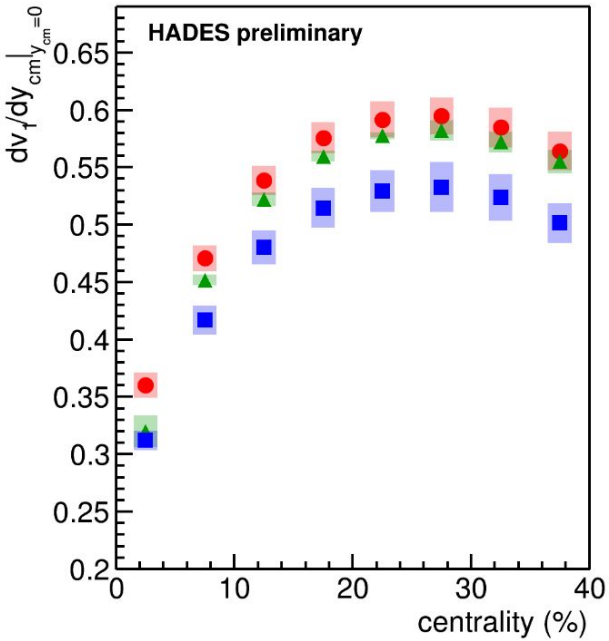


- Масштабированный v_1 не зависит от энергии столкновения и размера системы
  - Форма зависимости v_1 от p_T не меняется с энергией и размером системы

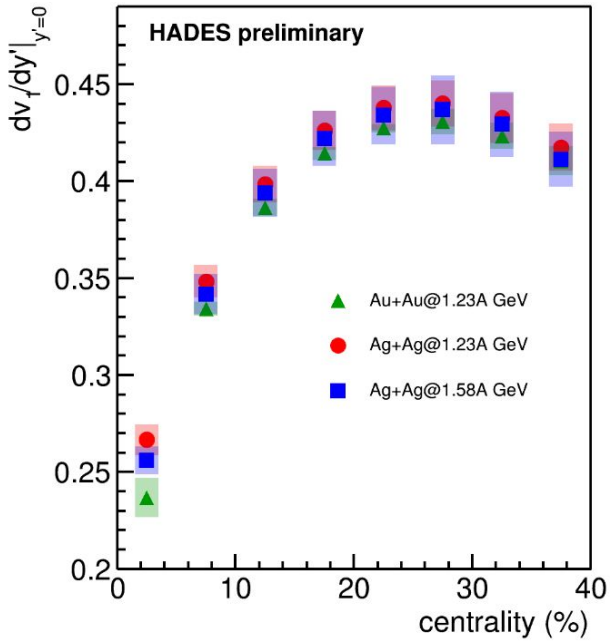
Масштабирование dv_1/dy с энергией и размером системы

Mamaev, Physics of Particles and Nuclei Letters, 21 (2024) 661
Mamaev, Physics of Particles and Nuclei, 55 (2024) 832

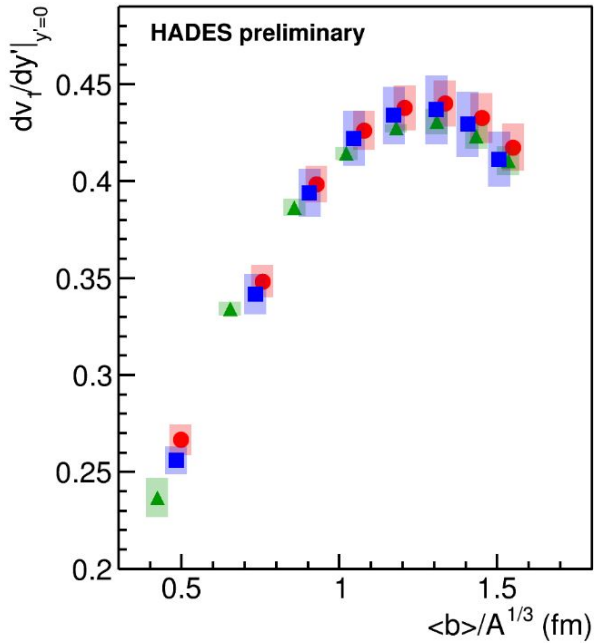
$t_{pass}=2R/\sinh(y_{beam})$



$y_{CM} \rightarrow y' = y_{CM} / y_{beam}$



Centrality → $\langle b \rangle / A^{1/3}$

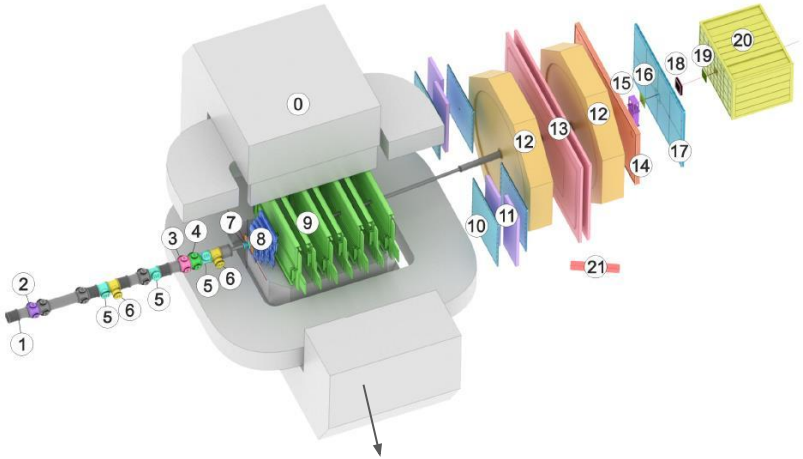


- После коррекции на время пролета двух ядер (y_{beam}) dv_1/dy' не зависит от размера сталкиваемых ядер и энергии столкновения и зависит только от относительное прицельного параметра ($\langle b \rangle / A^{1/3}$)

Эксперимент BM@N (“Барионная Материя на Нуклотроне”)

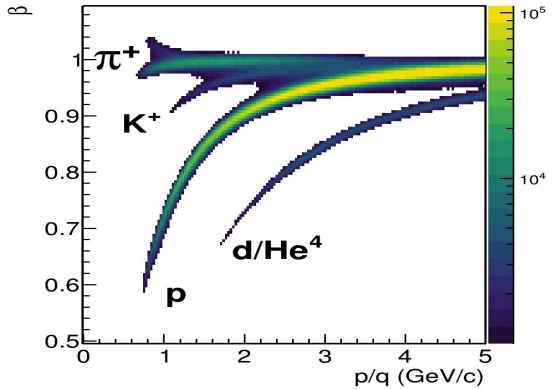
Xe+CsI столкновения при энергии E_{kin}=3.8 A ГэВ,
10 млн модельных (JAM, DCM-QGSM-SMM)
событий + GEANT4 + полная реконструкция

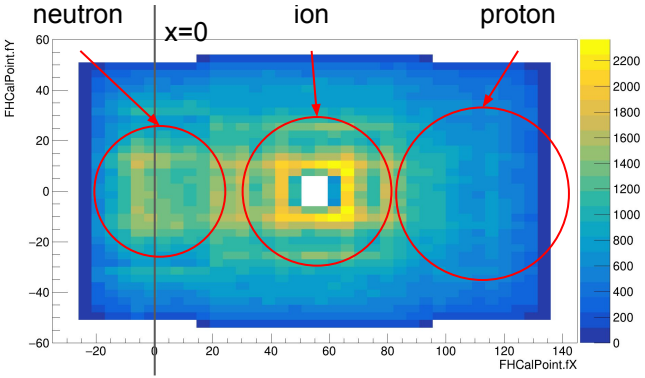
Nucl.Instrum.Meth.A 1065 (2024)



- Magnet SP-41 (0)
- Vacuum Beam Pipe (1)
- BC1, VC, BC2 (2-4)
- SiBT, SiProf (5, 6)
- Triggers: BD + SiMD (7)
- FSD, GEM (8, 9)
- CSC 1x1 m^2 (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC 2x1.5 m^2 (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH (19)
- FHCal (20)
- HGN (21)

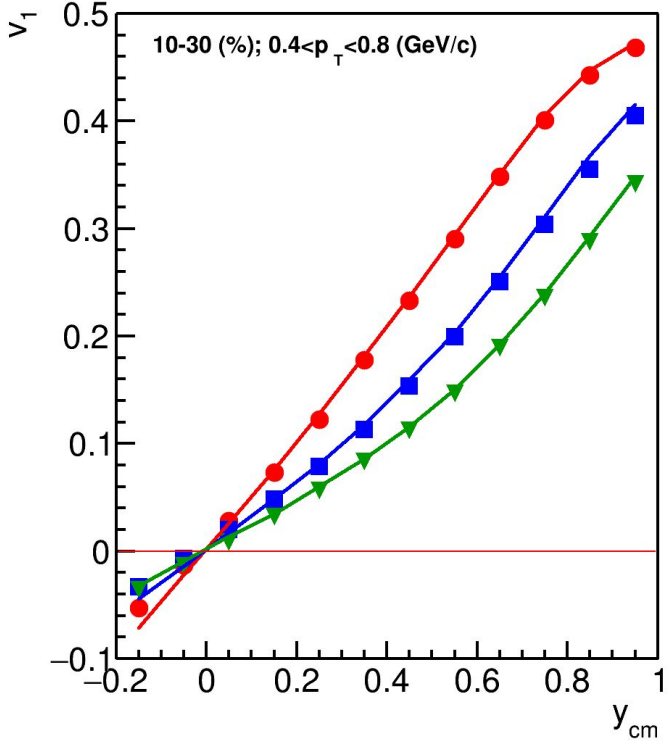
Трековая система внутри магнита

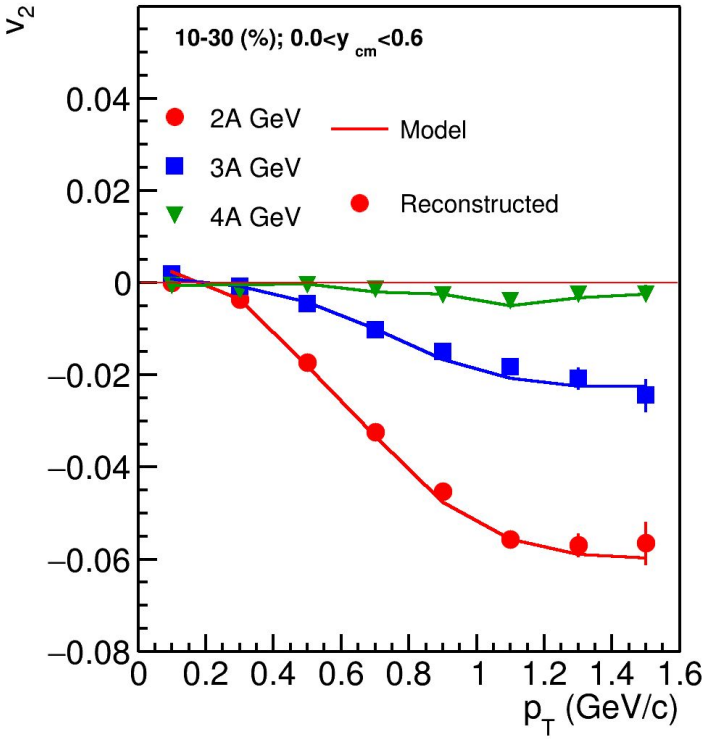




Плоскость симметрии определяется азимутальной асимметрией распределения энерговыделения в FHCal

Оценка эффективности эксперимента BM@N для измерения направленного и эллиптического потоков в столкновениях Xe+CsI





Mamaev, M.
Physics of Atomic Nuclei, 2023, 86(6), pp. 1346–1353

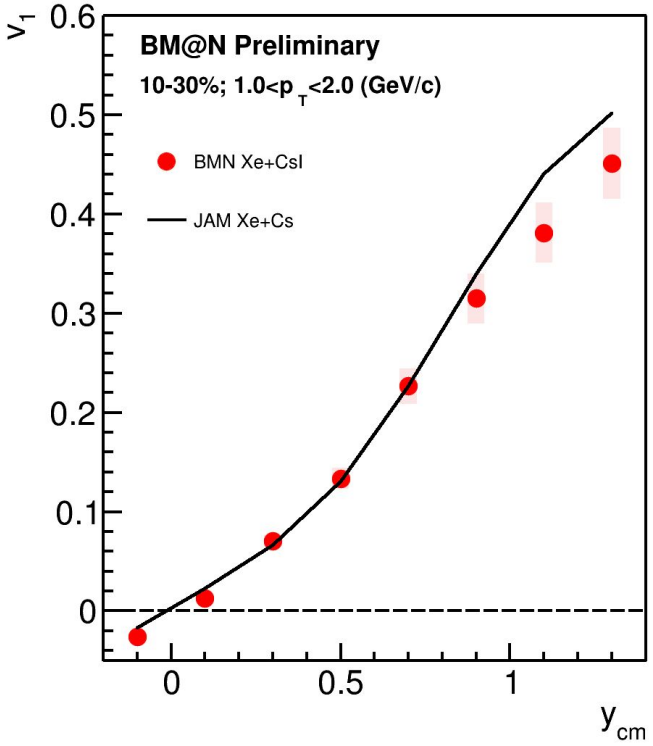
Mamaev, M.
Physics of Particles and Nuclei Letters, 2023, 20(5), pp. 1205–1208

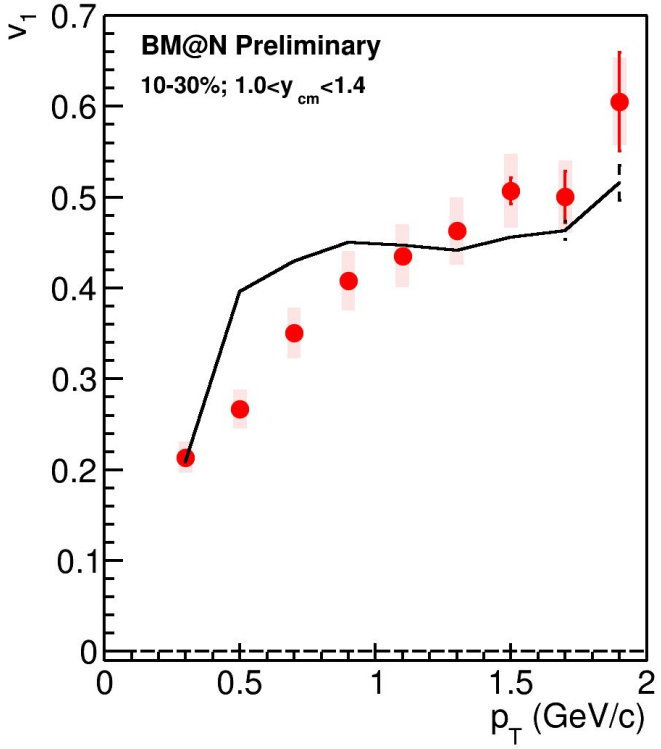
Mamaev, M., Taranenko, A.
Particles, 2023, 6(2), pp. 622–637

Хорошее согласие между реконструированными и модельными значениями V_n

Зависимость v_1 протонов от y_{cm} и p_T в экспериментальных данных Xe+CsI E_{kin}=3.8*A* ГэВ

Mamaev M. Int. J. Mod. Phys. E. 33 (2024) 2441009

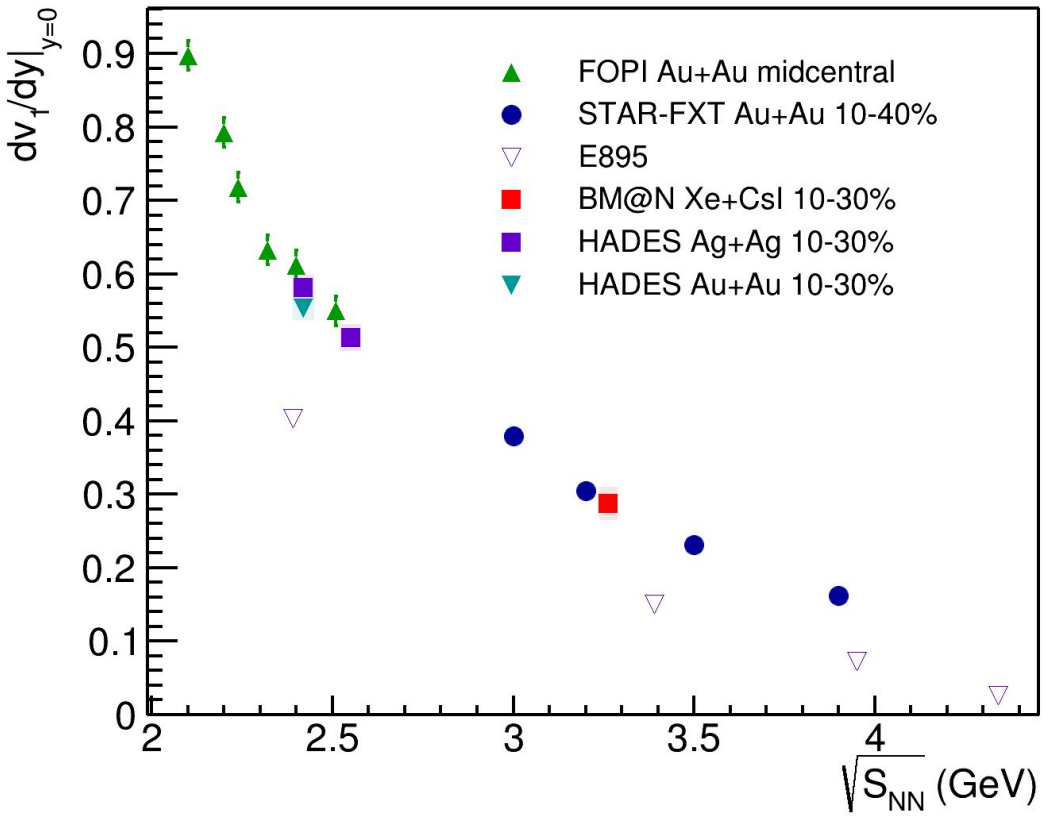




Модель JAM согласуется с экспериментом в пределах 8% при быстротах y_{cm}<1

dv_1/dy протонов в экспериментальных данных

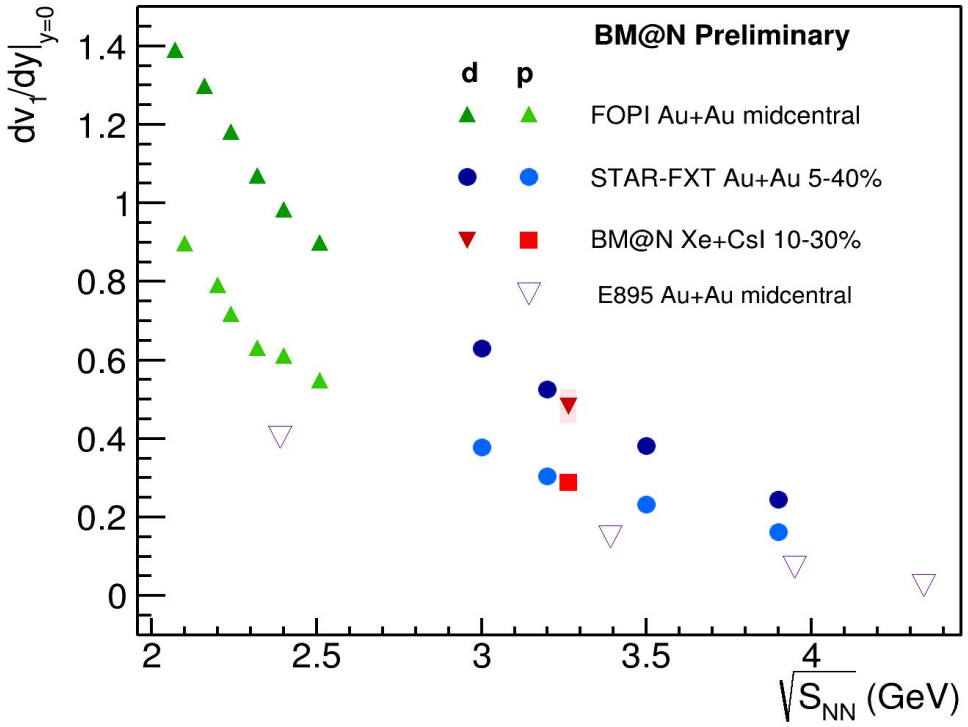
Mamaev, Int. J. Mod. Phys. E 33 (2024) 2441009.
Mamaev, Physics of Particles and Nuclei Letters 21 (2024) 661



- Полученные новые результату измерения направленного потока протонов (dv_1/dy) хорошо согласуются с результатами STAR и FOPI и противоречат результатам E895
- Уравнения состояния может быть более жестким в согласии с тенденциями следующими из описания v_2
- По представленным данным была защищена кандидатская диссертация

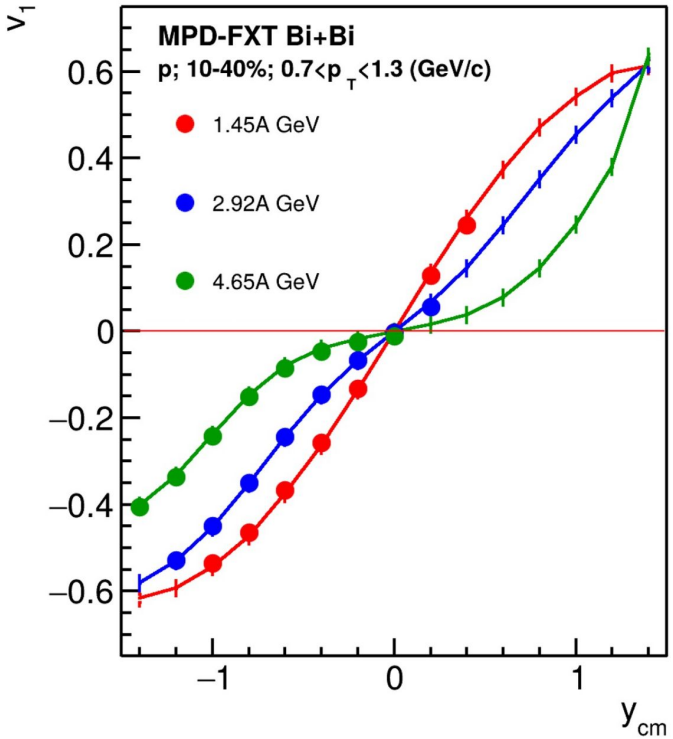
Дальнейшее применение методики

Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 4, 853-858



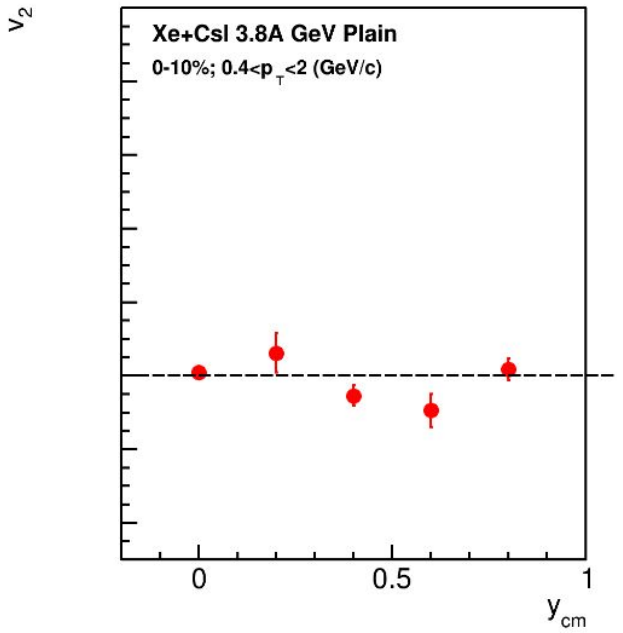
Исследование v_1 легких ядер в BM@N

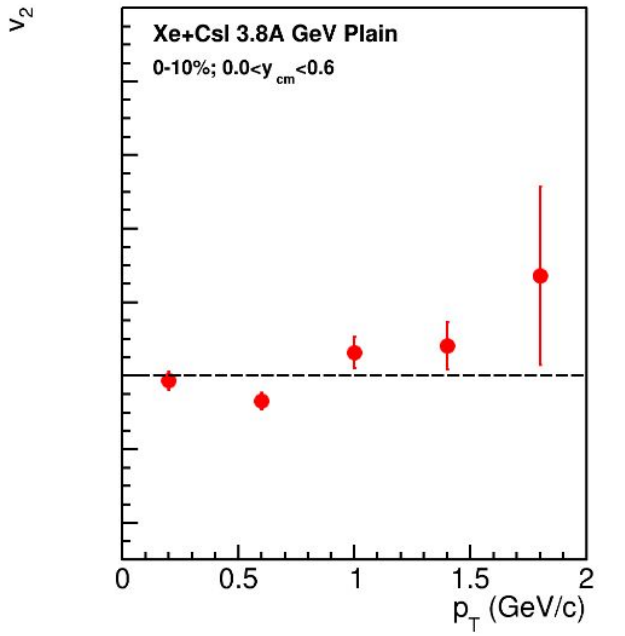
p

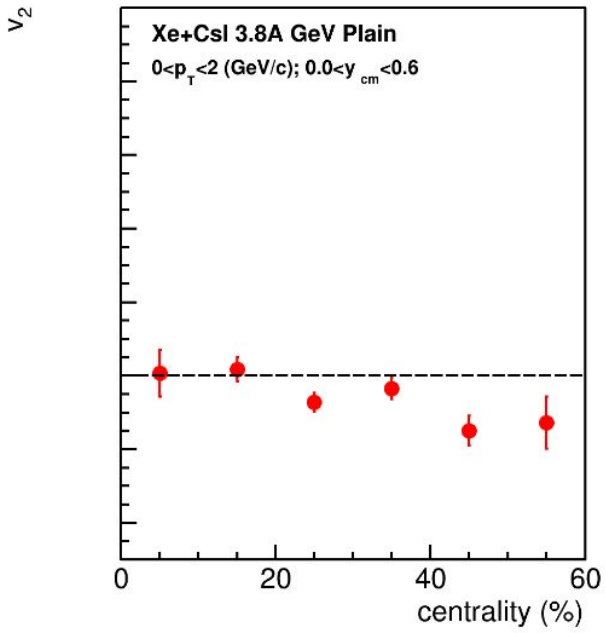


Исследование возможности измерения v_1 протонов в MPD

Планы на будущее







- Финализация результатов v_1 протонов и дейтронов
- Получение preliminary для результатов v_2 протонов

Публикации

1. Mamaev M., Golosov O., Selyuzhenkov I. Directed flow of protons with the event plane and scalar product methods in the HADES experiment at SIS18 // J. Phys. Conf. Ser. — 2020. — Т. 1690, № 1. — С. 012122.
2. Mamaev M., Golosov O., Selyuzhenkov I. Estimating Non-Flow Effects in Measurements of Anisotropic Flow of Protons with the HADES Experiment at GSI // Phys. Part. Nucl. — 2022. — Т. 53, № 2. — С. 277—281.
3. Mamaev M. Performance Towards Spectator Symmetry Plane Estimation Using Forwad Hadron Calorimeter in the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2023. — Т. 20, № 5. — С. 1205—1208.
4. Mamaev M., Taranenko A. Toward the System Size Dependence of Anisotropic Flow in Heavy-Ion Collisions at $sN\,N$ = 2–5 GeV // Particles. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 622—637.
5. Adamczewski-Musch J., Mamaev M., [HADES collaboration] Directed, Elliptic, and Higher Order Flow Harmonics of Protons, Deuterons, and Tritons in Au+Au Collisions at $\sqrt{sN\,N}$ = 2.4 GeV // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Т. 125. — С. 262301.
6. Mamaev M. Baryonic Matter @ Nuclotron: Upgrade and Physics Program Overview // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Т. 87, № 1. — С. 311—318.
7. Mamaev M. On the Azimuthal Flow of Protons in the Heavy Ion Collisions at $\sqrt{sN\,N}$ =2–4 GeV // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — Т. 21, № 4. — С. 661—663.
8. Mamaev M. On the Scaling Properties of the Directed Flow of Protons in Au + Au and Ag + Ag Collisions at the Beam Energies of 1.23 and 1.58A GeV // Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — Т. 55, № 4. — С. 832—835.
9. Mamaev M. Directed flow of protons in Xe+CsI collisions at the energy of 3.8AGeV at BM@N (NICA) // Int. J. Mod. Phys. E. — 2024. — Т. 33, №11. — С. 2441009.

https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221812005

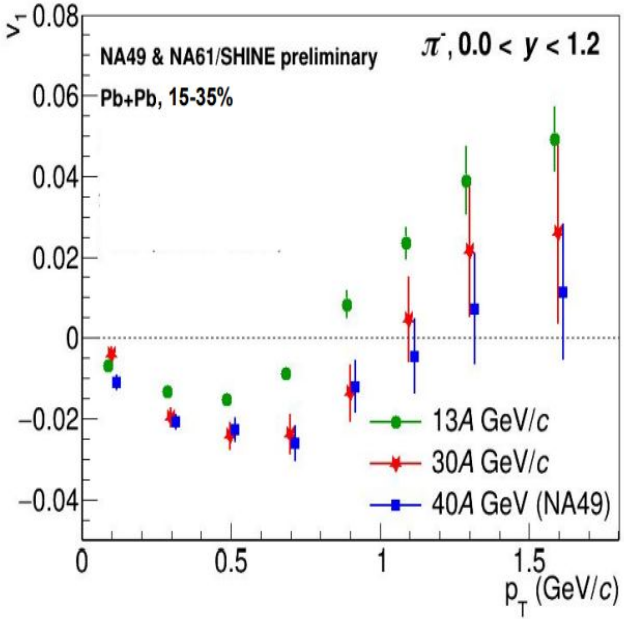
Заключение

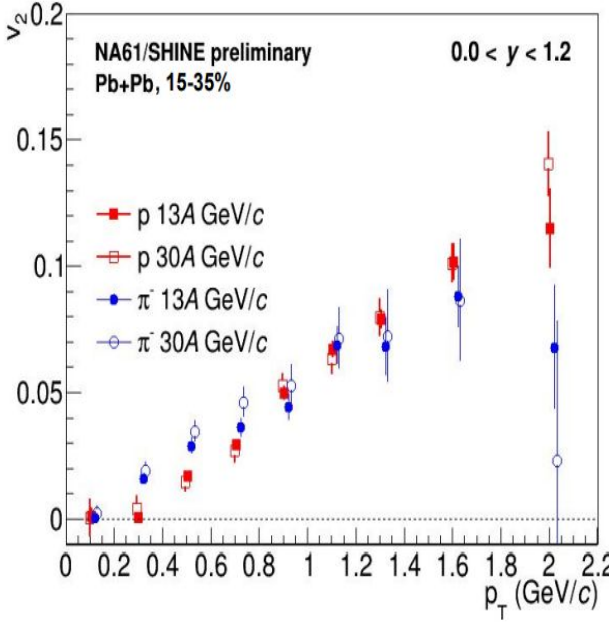
- Разработан метод учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц (непотоковых корреляций), и изучено их влияние на результаты измерения коллективных потоков в области энергий 1,2-4A ГэВ.
- Впервые получены зависимости v_1 протонов от быстроты и поперечного импульса, а также наклона $dv_1/dy_{cm}|_{ycm=0}$ в области средних быстрот в столкновениях Au+Au при энергии E_{kin}=1,23*A* ГэВ и Ag+Ag при энергиях E_{kin}=1,23*A* и E_{kin}=1,58*A* ГэВ в эксперименте HADES. Полученные новые результаты измерения v_1 протонов современными методами анализа являются принципиально важными для проверки и дальнейшего развития теоретических моделей ядро-ядерных столкновений.
- Обнаружено масштабирование направленного потока протонов с~временем пролета ядер t_{pass} и геометрией столкновения в области энергий E_{kin}=1,23*A* и E_{kin}=1,58*A* ГэВ, что позволяет оценить влияние спектаторов налетающего ядра на формирование направленного потока протонов.
- На основе моделирования установки детально изучены возможности измерения коллективных потоков протонов на экспериментальной установке BM@N (NICA), что позволило расширить существующую физическую программу эксперимента.

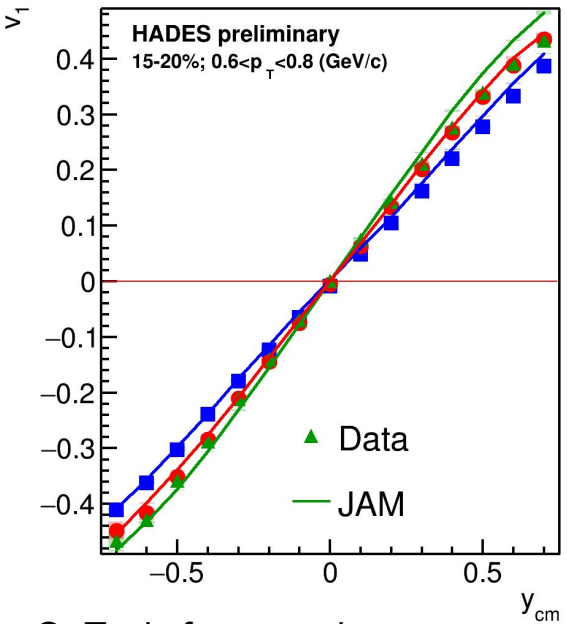
Разработанные автором методы измерения анизотропных потоков планируется применить для получения результатов v_1 для заряженных адронов, легких ядер и гиперонов в эксперименте BM@N и MPD.

BACKUP

QnTools framework







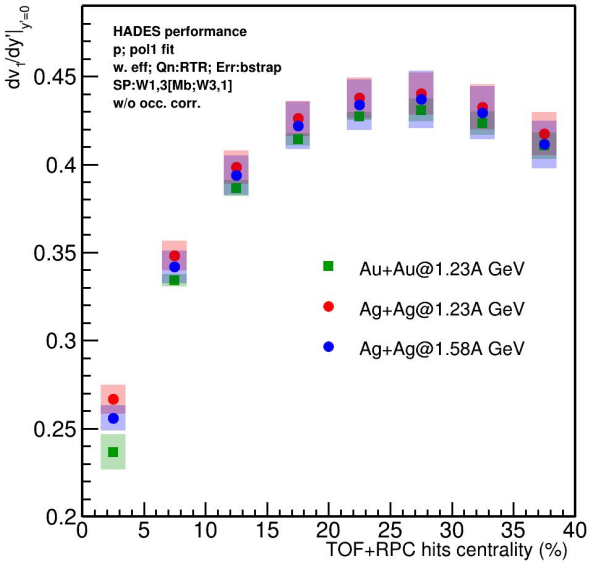
- All the methods used for performance study were carried out using QnTools framework: https://github.com/HeavyIonAnalysis/QnTools (well documented and well-tested)
- Methods for flow measurements in fixed-target experiments were tested on experimental data from NA61/SHINE, HADES and ALICE
- Tested and implemented in MPD root

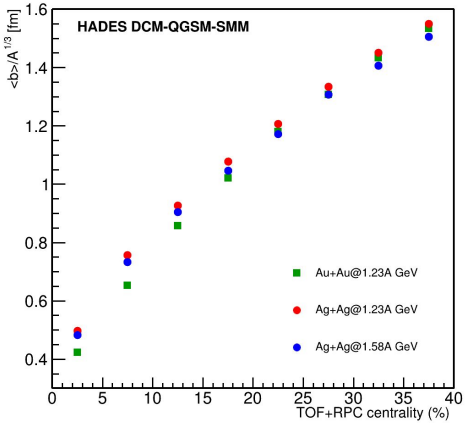
Масштабирование dv_1/dy с энергией столкновения и размером системы

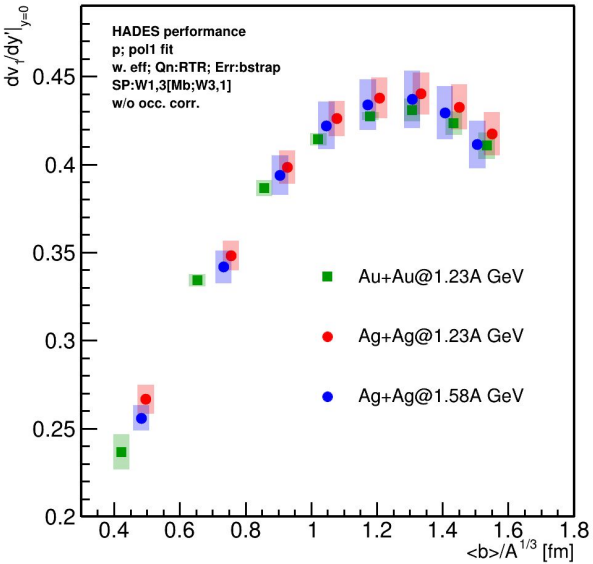
$y_{CM} \rightarrow y' = y_{CM} / y_{beam}$

центральность $\rightarrow$ $\langle b \rangle / A^{1/3}$

$y' = y_{CM}/y_{beam} + \langle b \rangle / A^{1/3}$

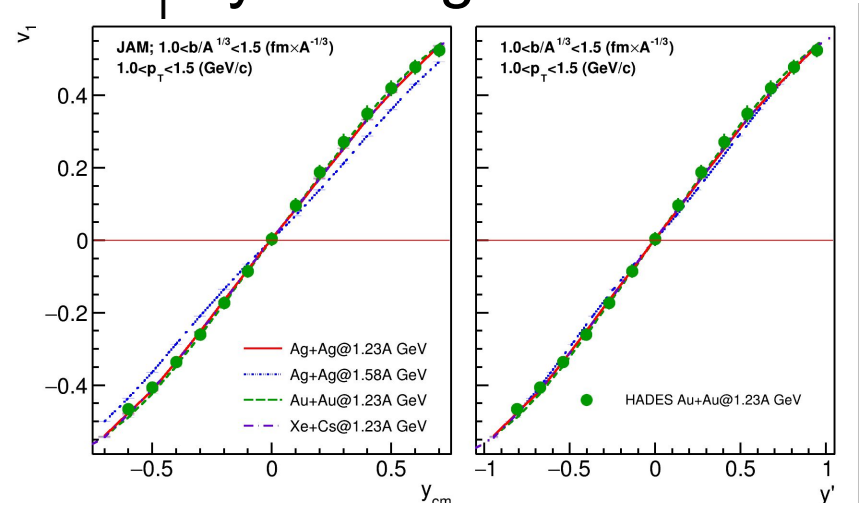


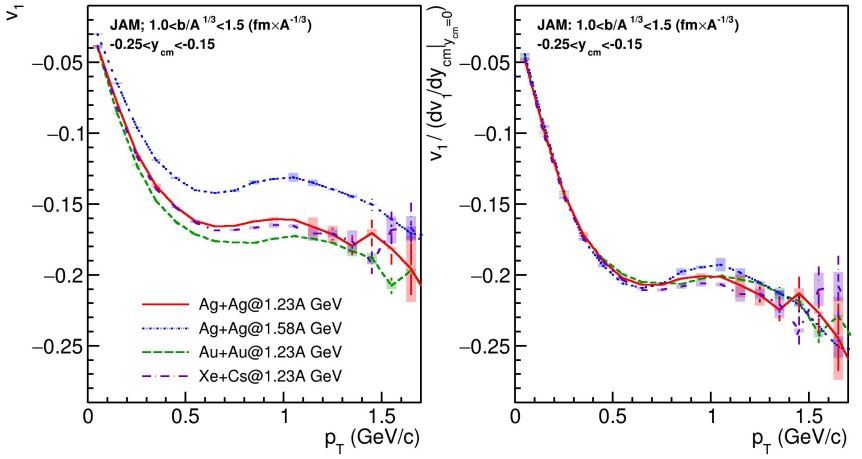




- После корректировки зависимости от времени пролета (y_{beam}) dv_1/dy' не зависит от размера сталкивающихся ядер и энергии столкновения, а зависит только от относительного прицельного параметра ($\langle b \rangle / A^{1/3}$)
- Замена центральности на $\langle b \rangle/A^{1/3}$ улучшает масштабирование dv_1/dy' в центральных столкновениях

dv_1/dy scaling with collision energy and system size





- Scaling with collision energy is observed in model and experimental data
- Scaling with system size is observed in model and experimental data
- We can compare the results with HIC-data from other experiments(e.g. STAR-FXT Au+Au

Flow vectors

From momentum of each measured particle define a u_n-vector in transverse plane:

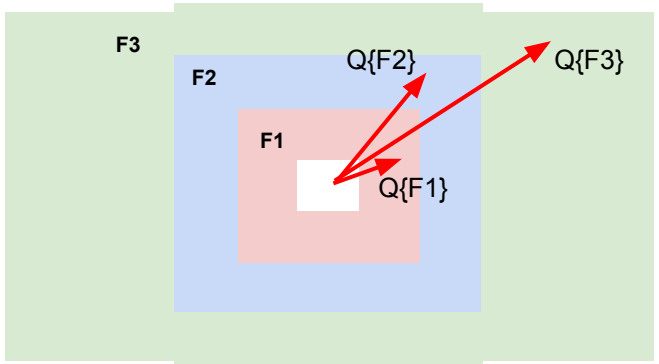
$$u_n = e^{in\phi}$$

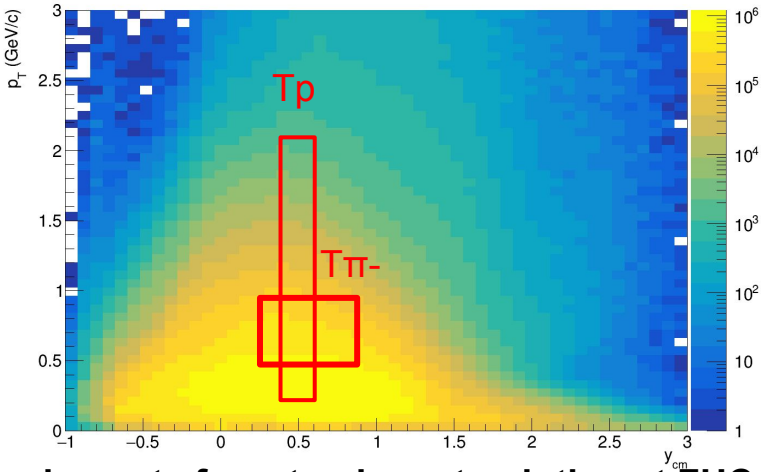
where φ is the azimuthal angle

Sum over a group of u_n-vectors in one event forms Q_n-vector:

$$Q_n = \frac{\sum_{k=1}^{N} w_n^k u_n^k}{\sum_{k=1}^{N} w_n^k} = |Q_n| e^{in\Psi_n^{EP}}$$

Ψ_n^{EP} is the event plane angle





Additional subevents from tracks not pointing at FHCal:
Tp: p; 0.4<y<0.6; 0.2 < p_T < 2 GeV/c; w=1/eff
Tπ: π-; 0.2<y<0.8; 0.1 < p_T < 0.5 GeV/c; w=1/eff
T-: all negative; 1.0<η<2.0; 0.1 < p_T < 0.5 GeV/c; w=1/eff

Flow methods for v_n calculation

Tested in HADES:

M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281
M Mamaev et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012122

Scalar product (SP) method:

$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1^{F1} \rangle}{R_1^{F1}} \qquad v_2 = \frac{\langle u_2 Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}{R_1^{F1} R_1^{F3}}$$

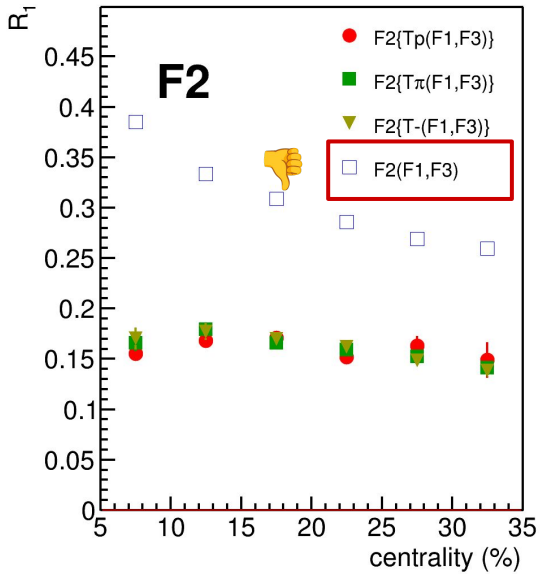
Where R_1 is the resolution correction factor

$$R_1^{F1} = \langle \cos(\Psi_1^{F1} - \Psi_1^{RP}) \rangle$$

Symbol “F2(F1,F3)” means R_1 calculated via (3S resolution):

$$R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$

Method helps to eliminate non-flow
Using 2-subevents doesn’t

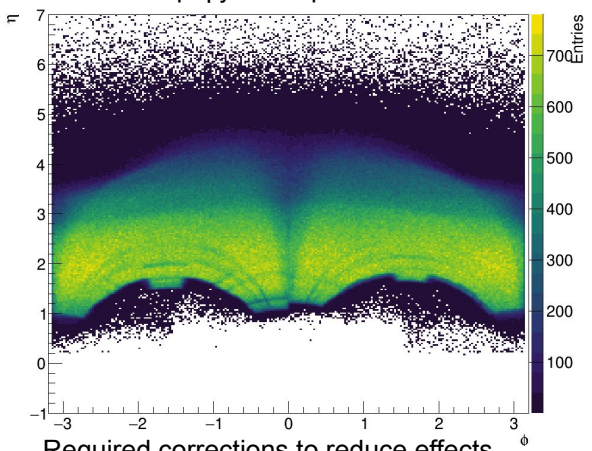


Symbol “F2{Tp}(F1,F3)” means R_1 calculated via (4S resolution):

$$R_1^{F2\{Tp\}(F1,F3)} = \langle Q_1^{F2} Q_1^{Tp} \rangle \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{Tp} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{Tp} Q_1^{F3} \rangle}}$$

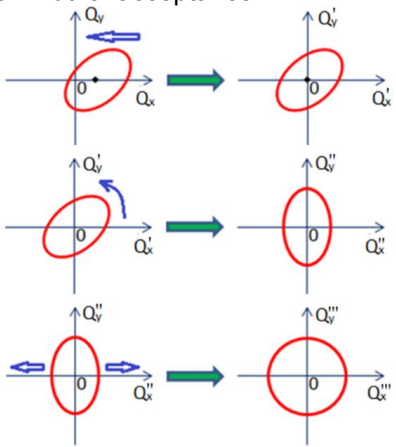
Azimuthal asymmetry of the BM@N acceptance

φ-η yield of protons

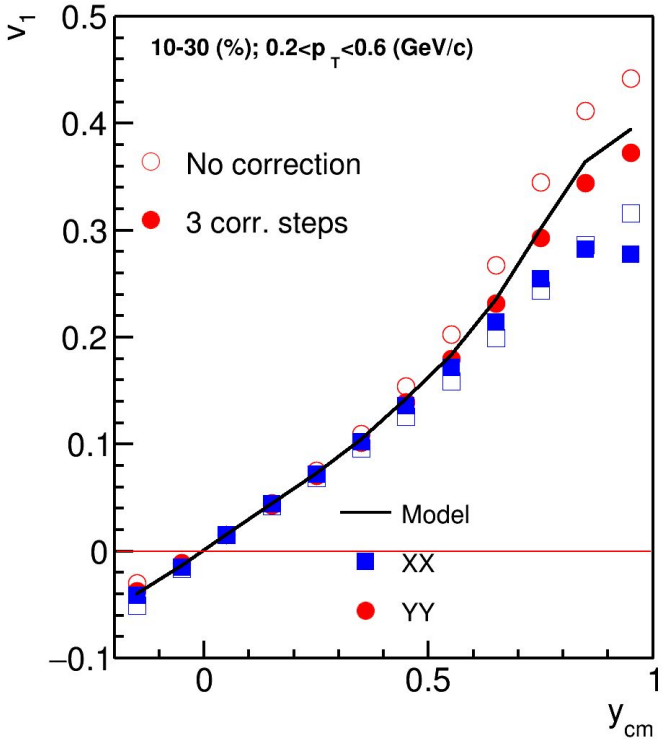


Required corrections to reduce effects of non-uniform azimuthal acceptance

1. Recentering
2. Twist
3. Rescaling

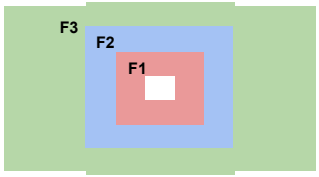


Corrections are based on method in:
I. Selyuzhenkov and S. Voloshin PRC77, 034904 (2008)

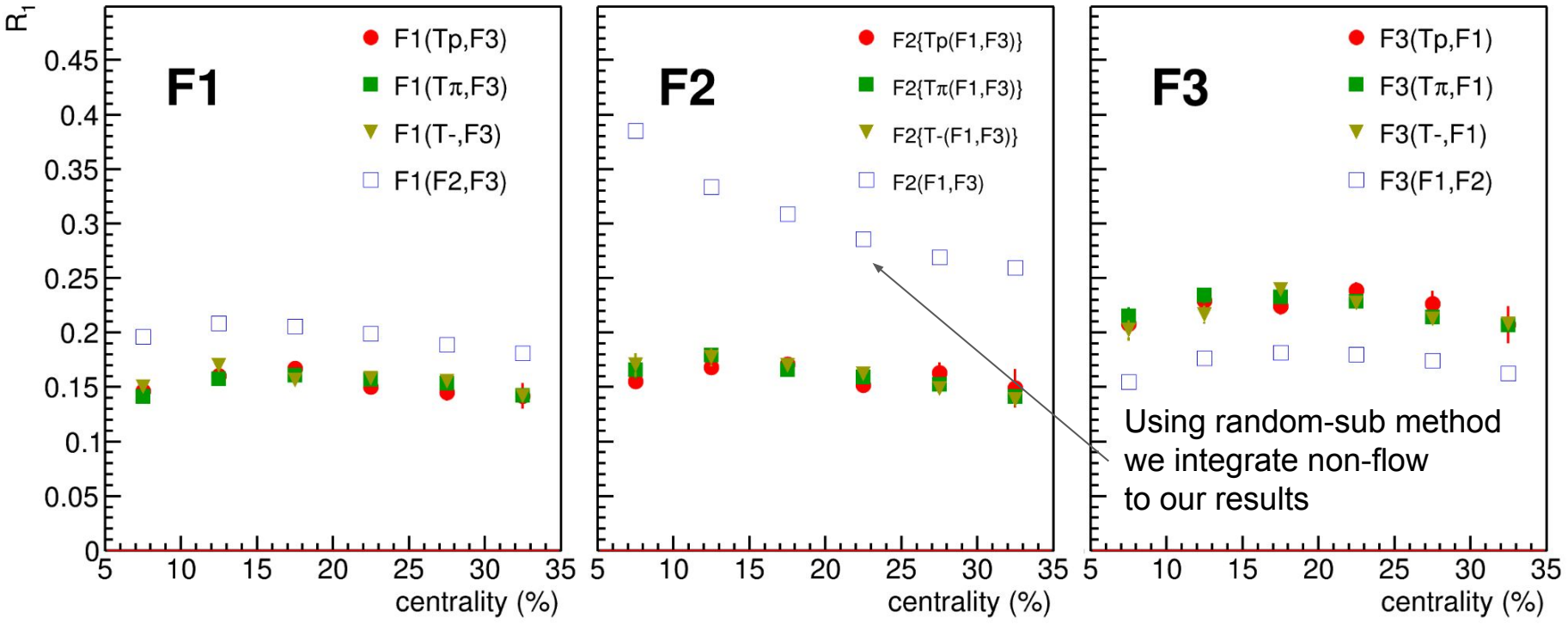


- Better agreement after rescaling for YY
- XX component has a large bias (due to magnetic field)

SP R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs@4A GeV



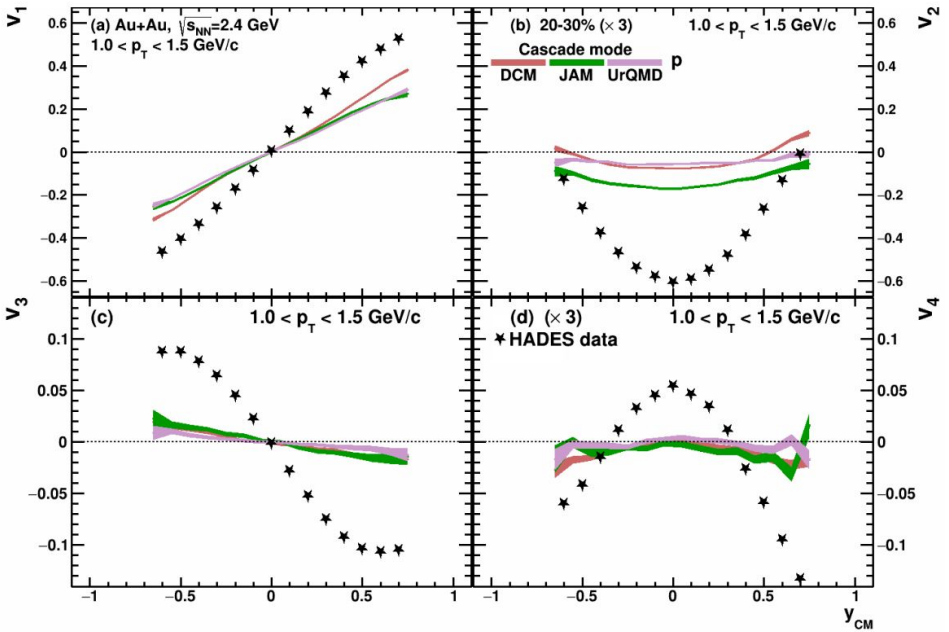
SP gives unbiased estimation of v_n (root-mean-square)
EP gives biased estimation (somewhere between mean and RMS)

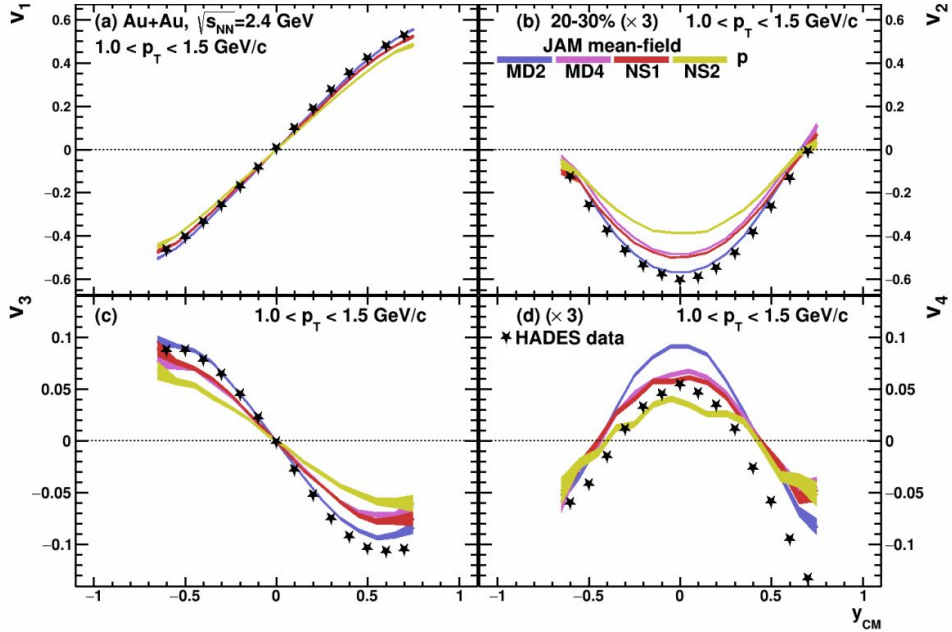


Using the additional sub-events from tracking provides a robust combination to calculate resolution

Models

P.Parfenov, Particles 5 (2022) 4, 561-579





- Cascade mode fail to reproduce flow signal
- Mean-Field models reproduce flow signal up to 4th harmonic

Simulation datasample

- Xe+Cs nuclei collisions
- DCMQGSM-SMM model (realistic yields of spectator fragments), describes flow poorly
- JAM model (realistic flow signal)
- Geant4 transport code (important for simulation of hadronic showers in the forward calorimeter)

- Realistic reconstruction

	2A GeV	3A GeV	4A GeV
DCMQGSM-SMM	6M	6M	2M
JAM MD2	3M	3M	5M

Flow vectors

From momentum of each measured particle define a u_n-vector in transverse plane:

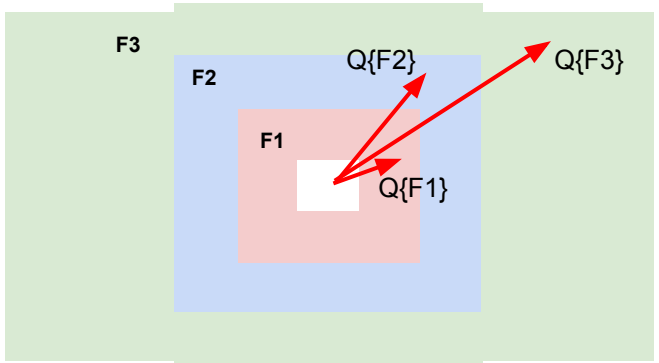
$$u_n = e^{in\phi}$$

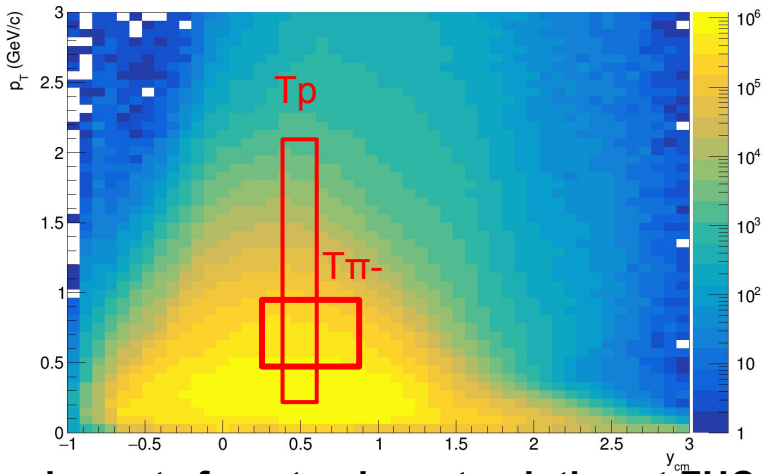
where φ is the azimuthal angle

Sum over a group of u_n-vectors in one event forms Q_n-vector:

$$Q_n = \frac{\sum_{k=1}^{N} w_n^k u_n^k}{\sum_{k=1}^{N} w_n^k} = |Q_n| e^{in\Psi_n^{EP}}$$

Ψ_n^{EP} is the event plane angle





Additional subevents from tracks not pointing at FHCal:

Tp: p; 0.4<y<0.6; 0.2 < p_T < 2 GeV/c; w=1/eff

Tπ: π-; 0.2<y<0.8; 0.1 < p_T < 0.5 GeV/c; w=1/eff

T-: all negative; 1.0<η<2.0; 0.1 < p_T < 0.5 GeV/c; w=1/eff

Flow methods for v_n calculation

Tested in HADES:

M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281
M Mamaev et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012122

Scalar product (SP) method:

$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1^{F1} \rangle}{R_1^{F1}} \qquad v_2 = \frac{\langle u_2 Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}{R_1^{F1} R_1^{F3}}$$

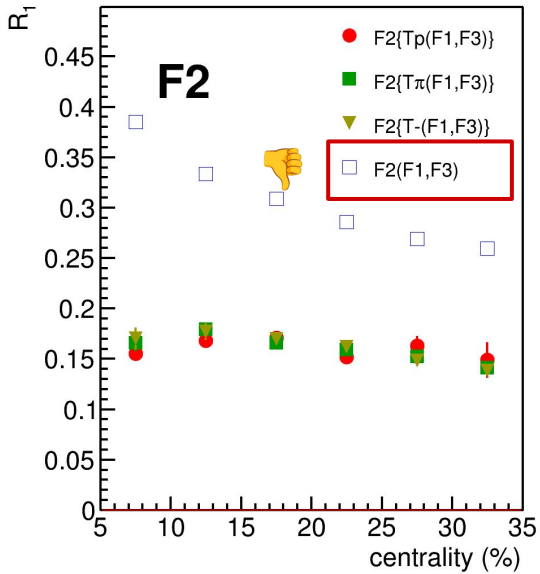
Where R_1 is the resolution correction factor

$$R_1^{F1} = \langle \cos(\Psi_1^{F1} - \Psi_1^{RP}) \rangle$$

Symbol “F2(F1,F3)” means R_1 calculated via (3S resolution):

$$R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$

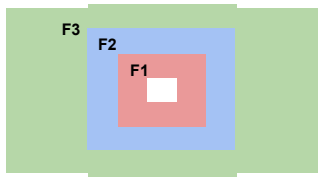
Method helps to eliminate non-flow
Using 2-subevents doesn’t

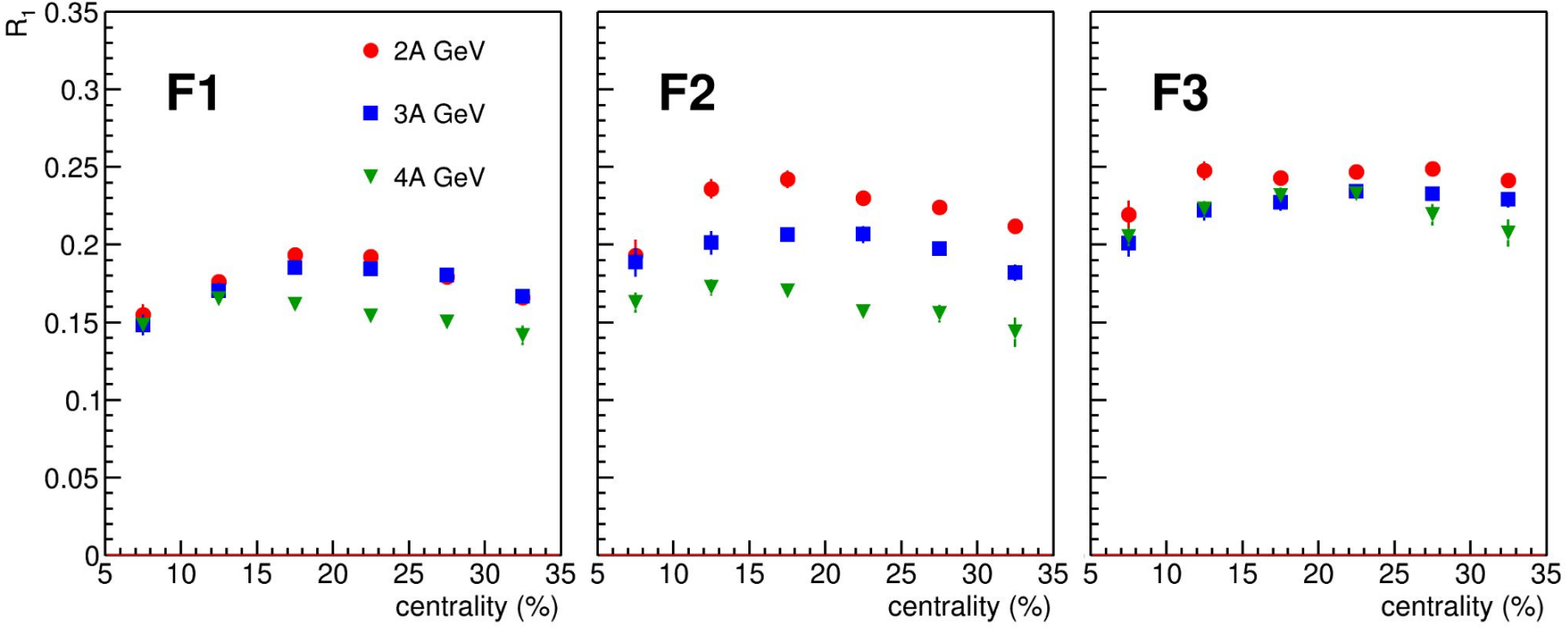


Symbol “F2{Tp}(F1,F3)” means R_1 calculated via (4S resolution):

$$R_1^{F2\{Tp\}(F1,F3)} = \langle Q_1^{F2} Q_1^{Tp} \rangle \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{Tp} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{Tp} Q_1^{F3} \rangle}}$$

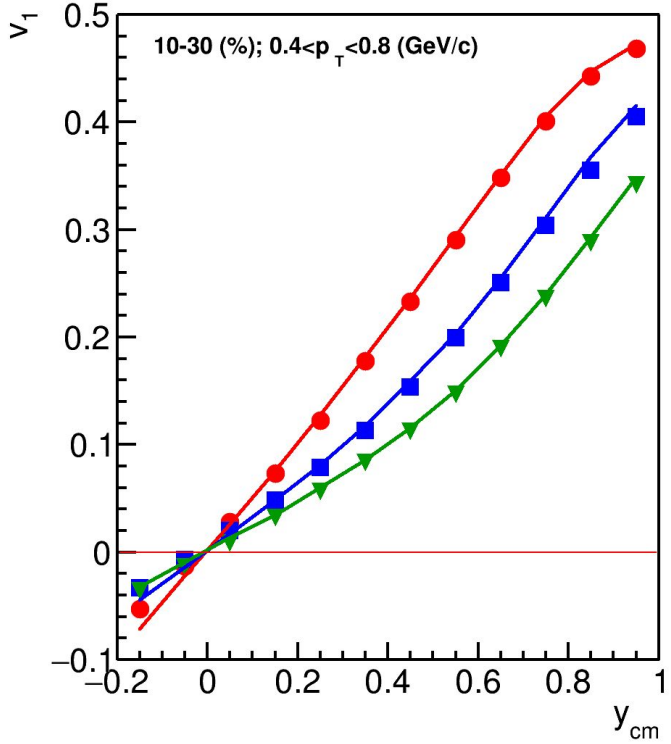
Rec R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs

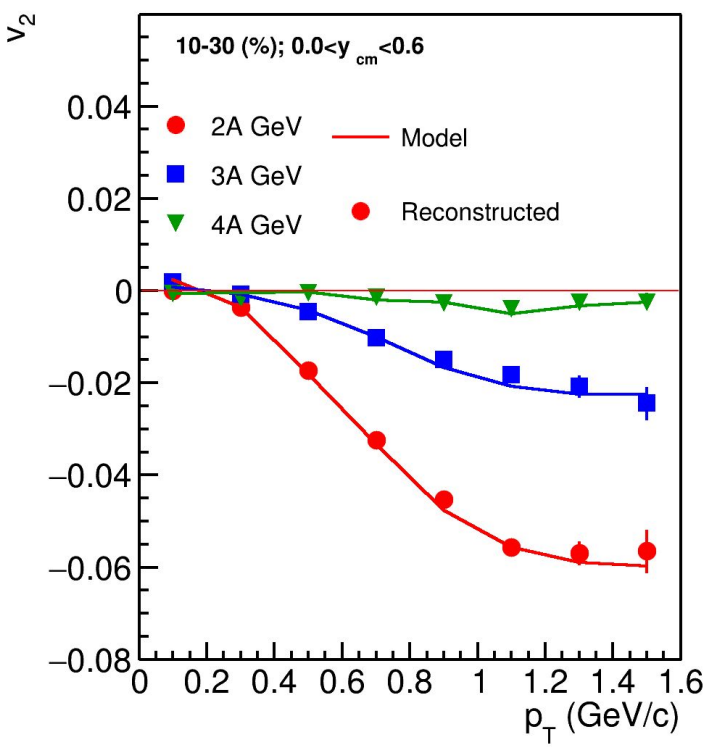




Resolution is lower for higher energies due to lower v_1

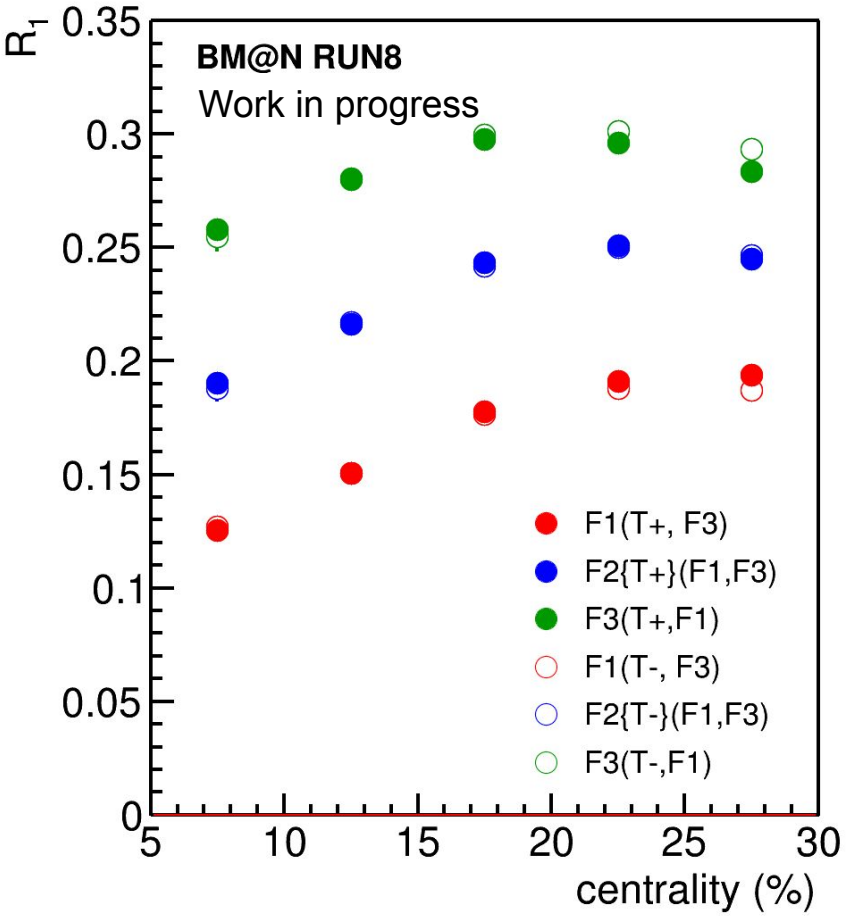
Directed and elliptic flow in Xe+Cs (JAM)

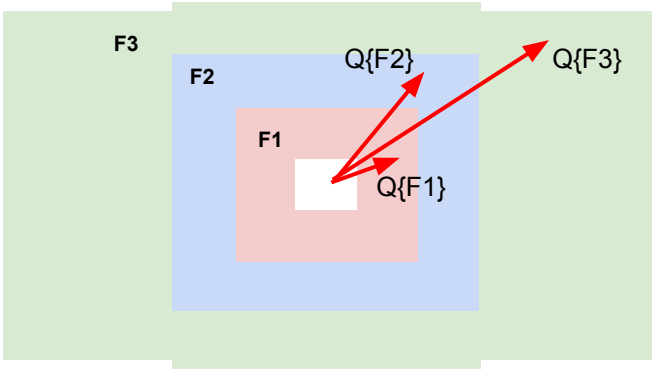




- Good agreement between reconstructed and pure model data for all three energies

R1: BM@N Run8 DATA: Xe+Cs@3.8A GeV



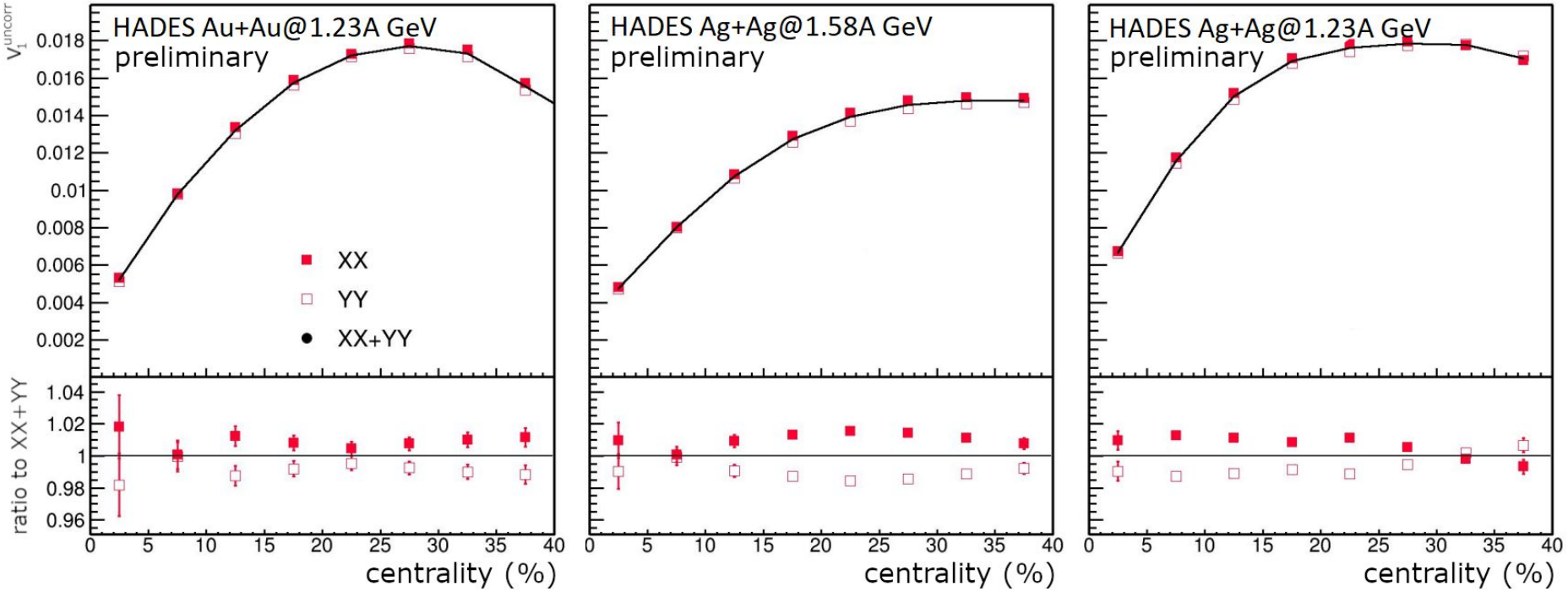


T-: all negatively charged particles with:
- $1.5 < \eta < 4$
- $p_T > 0.2$ GeV/c

T+: all positively charged particles with:
- $2.0 < \eta < 3$
- $p_T > 0.2$ GeV/c

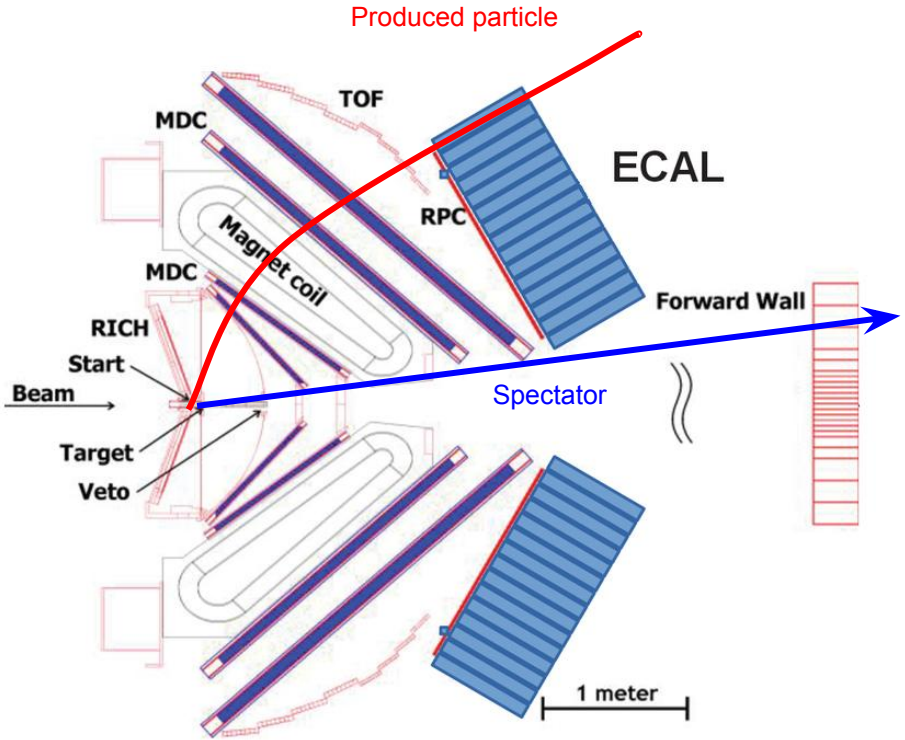
Results for v_1 and v_2 are in progress

Corrections due to non-uniform acceptance



Residual effect due to non-uniform acceptance is 2%

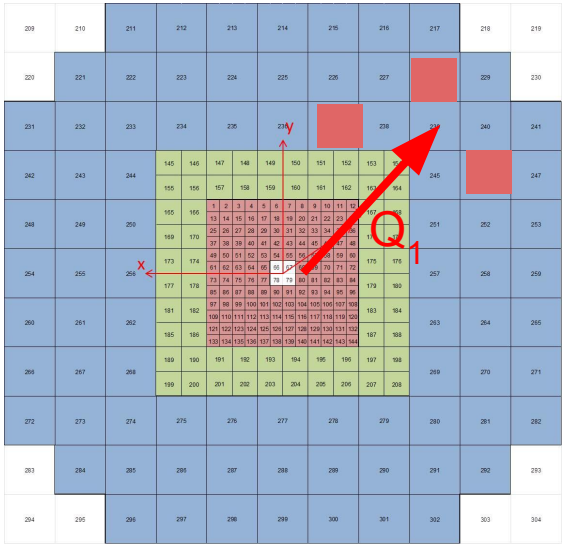
The HADES at SIS-18 accelerator (GSI, Germany)



2012: Au+Au @ E_{lab}=1.23A GeV ($\sqrt{s_{NN}}$=2.4 GeV)

2019: Ag+Ag @ E_{lab}=1.23A GeV ($\sqrt{s_{NN}}$=2.4 GeV)

@ E_{lab}=1.58A GeV ($\sqrt{s_{NN}}$=2.6 GeV)

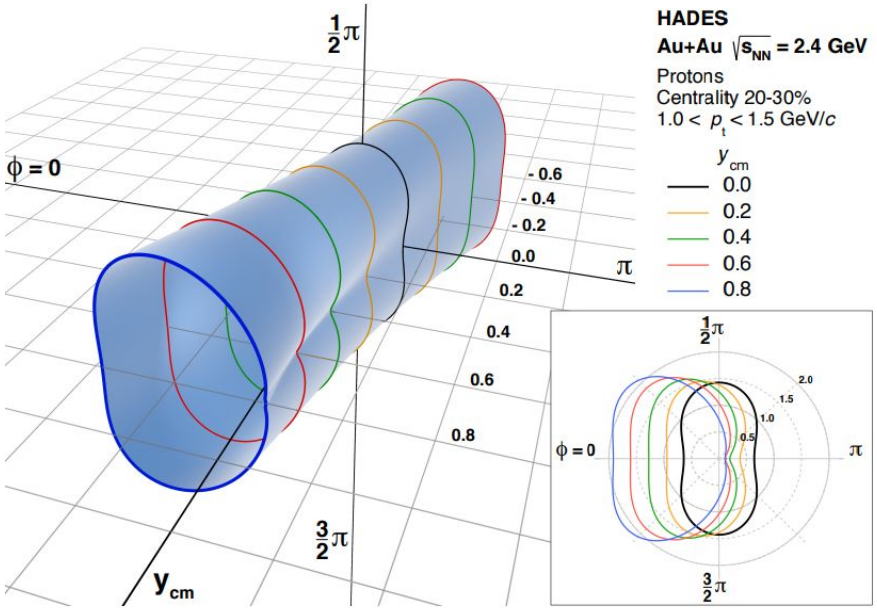


Reaction plane estimation using the deflection of projectile spectors

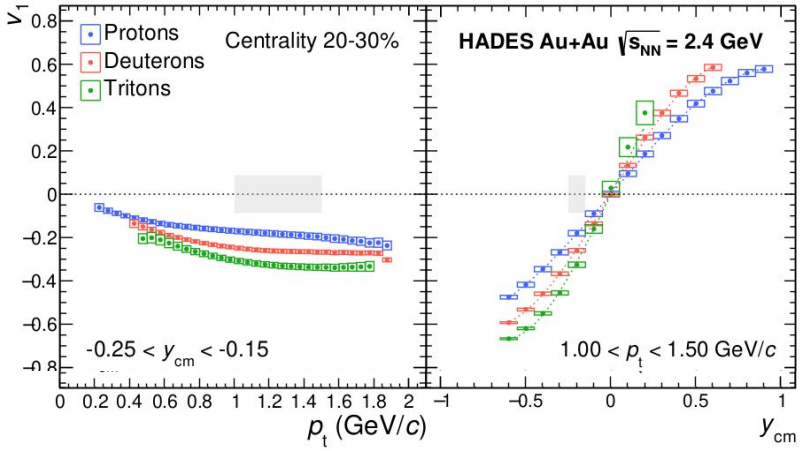
Systematic error table

	Неоднородность аксептанса	Непотоковые корреляции	Общая
Au+Au при E_{kin}=1.23*A* ГэВ	2%	2%	3%
Ag+Ag при E_{kin}=1.23*A* ГэВ	2%	5%	5%
Ag+Ag при E_{kin}=1.58*A* ГэВ	2%	5%	5%

Коллективные потоки в столкновения Au+Au E_{kin}=1.23*A* ГэВ



Adamczewski-Musch, … , Mamaev, et. al.
Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 262301



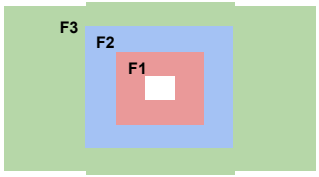
Коллективные потоки в Au+Au@1.23A ГэВ измерены до 6 гармоники

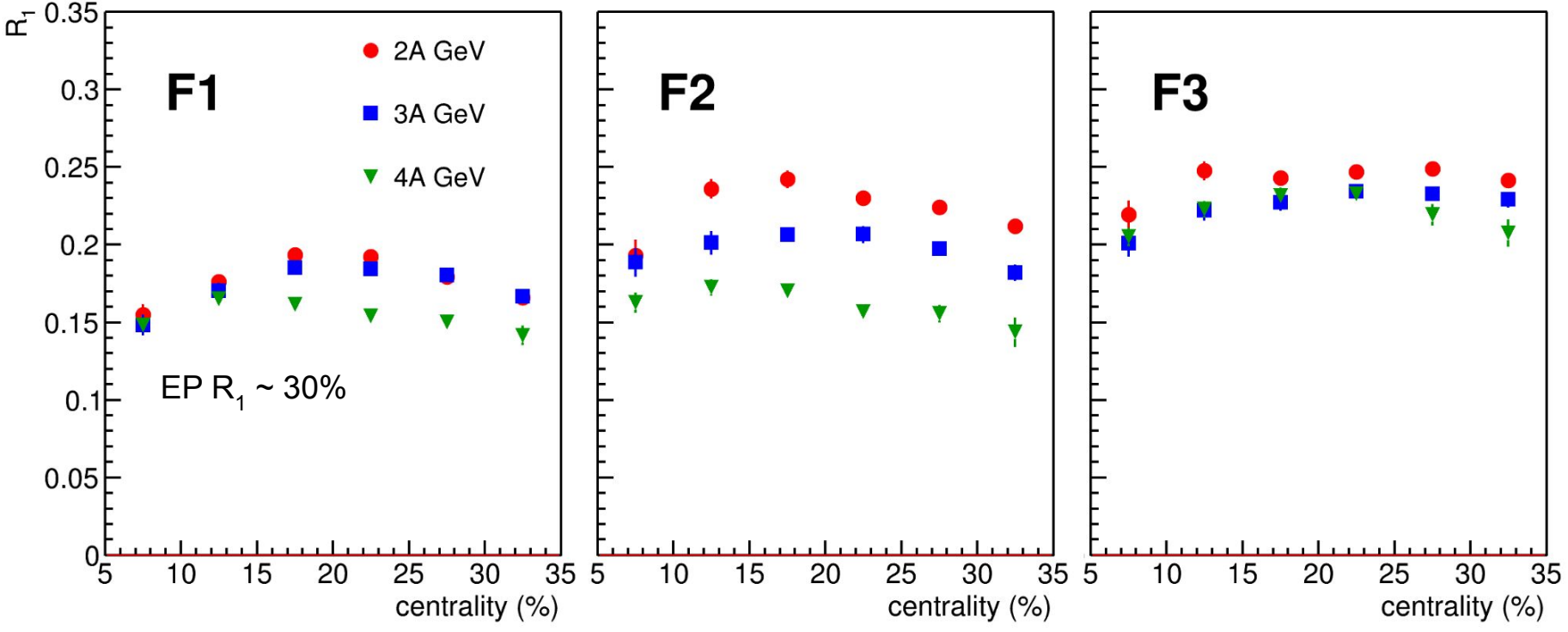
- Восстановлена трехмерная картина вылета частиц
- Опередена систематическая погрешность, связанная с методикой оценки плоскости реакции

Table for the systematic uncertainties

	Неоднородность аксептанса	Непотоковые корреляции	Общая
Xe+Cs при E_{kin}=2*A* ГэВ	3%	4%	5%
Xe+Cs при E_{kin}=3*A* ГэВ	3%	4%	5%
Xe+Cs при E_{kin}=4*A* ГэВ	3%	4%	5%

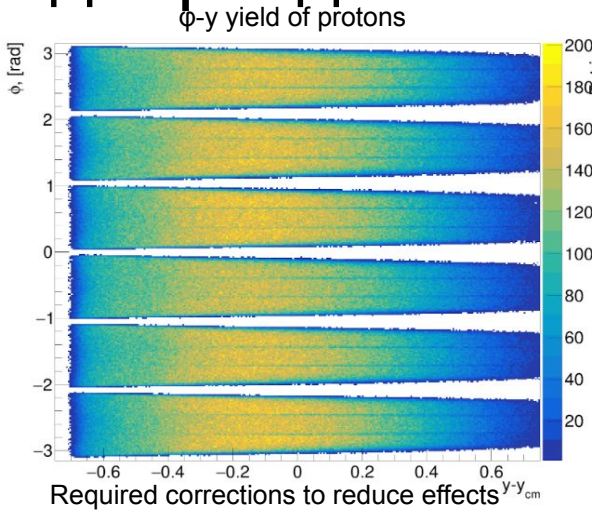
Rec R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs





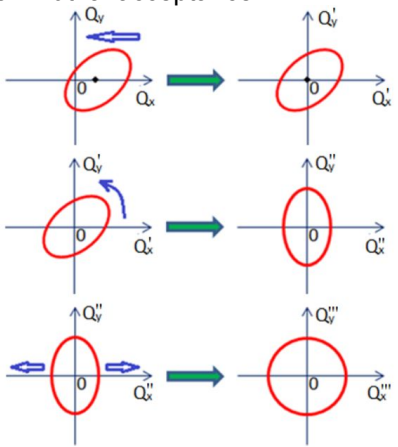
Для более высоких энергий R_1 ниже, поскольку ниже v_1

Неоднороснность азимутального аксептанса HADES

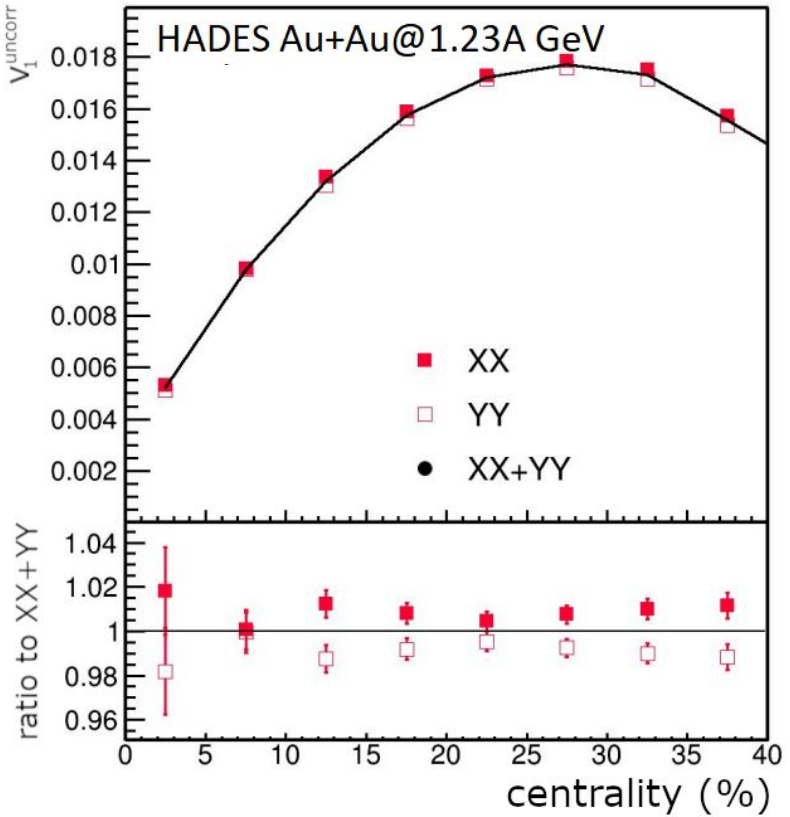


Required corrections to reduce effects of non-uniform azimuthal acceptance

1. Recentering
2. Twist
3. Rescaling

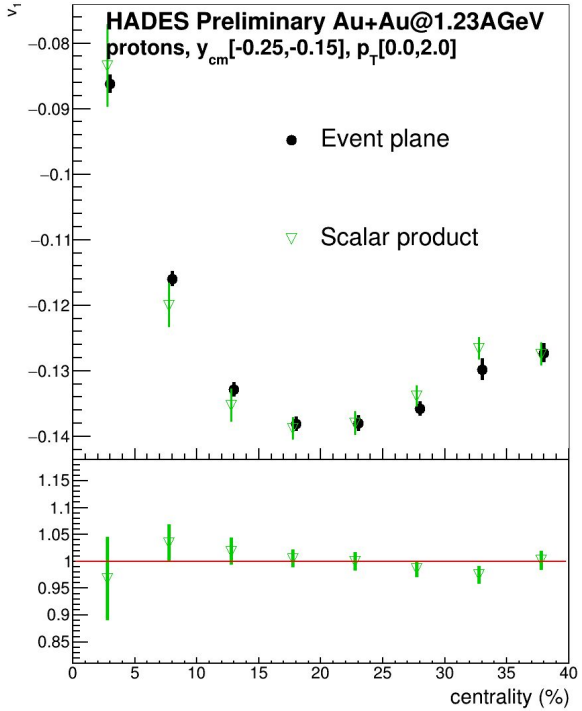


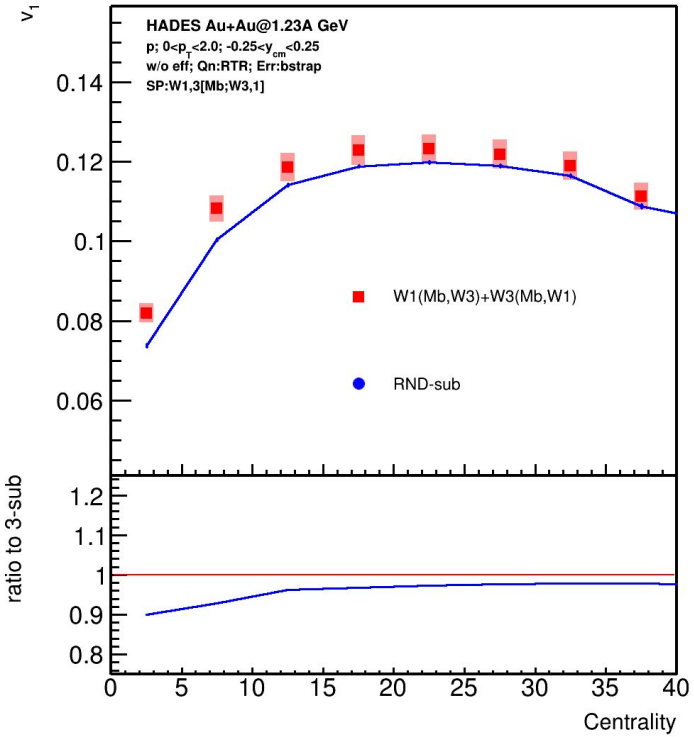
Corrections are based on method in:
I. Selvuzhenkov and S. Voloshin PRC77, 034904 (2008)



M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281

Сравнение методов измерения v_1 в эксперименте HADES



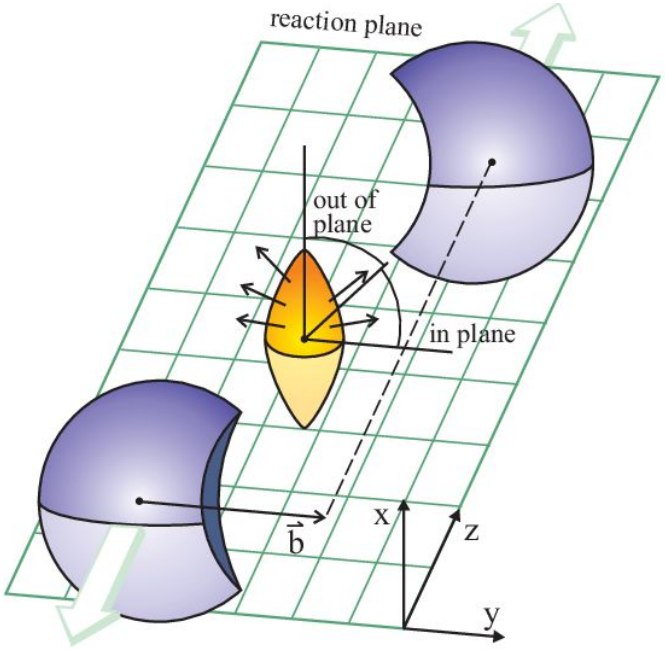


M.Mamaev et al. ***Physics of Particles and Nuclei***, 2022, 53(2), pp. 277–281

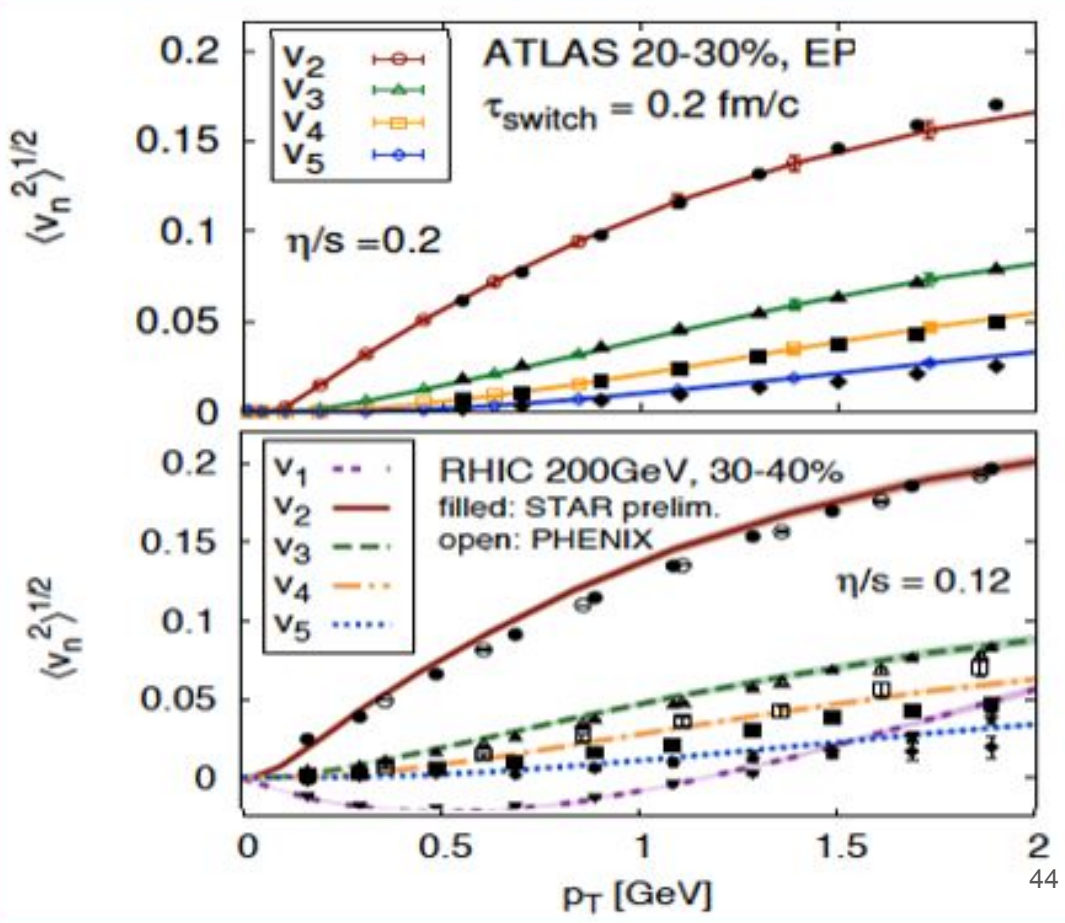
M.Mamaev et al. ***Journal of Physics: Conference Series***, 2020, 1690(1), 012122

Систематическая ошибка из-за метода измерениях v_1 менее 5% в среднецентральных столкновениях Au+Au

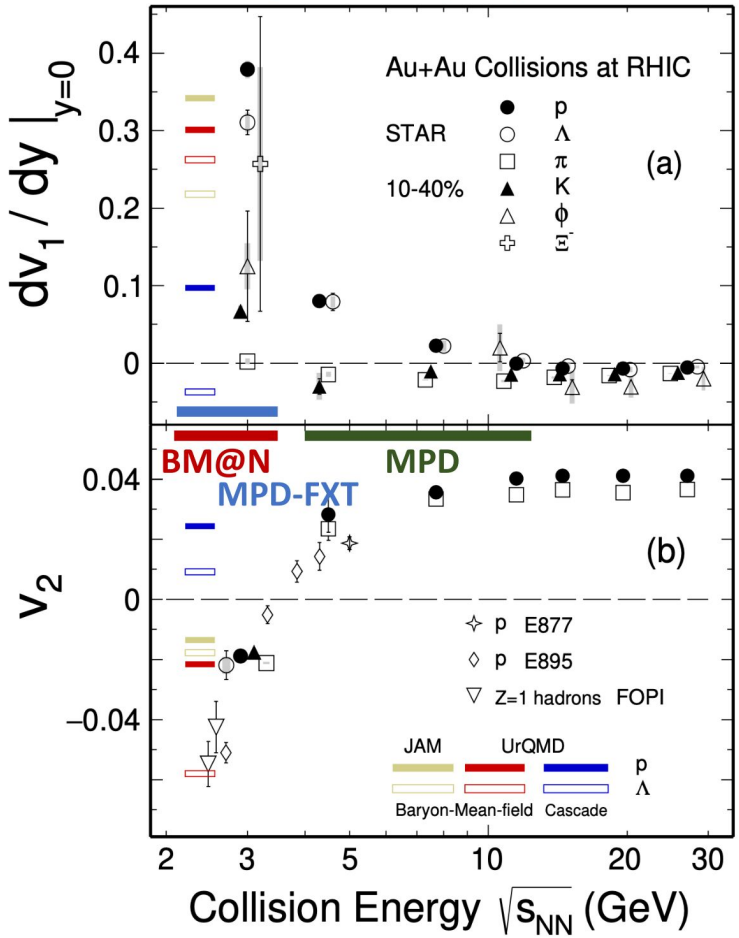
Роль анизотропных потоков в открытии КГМ

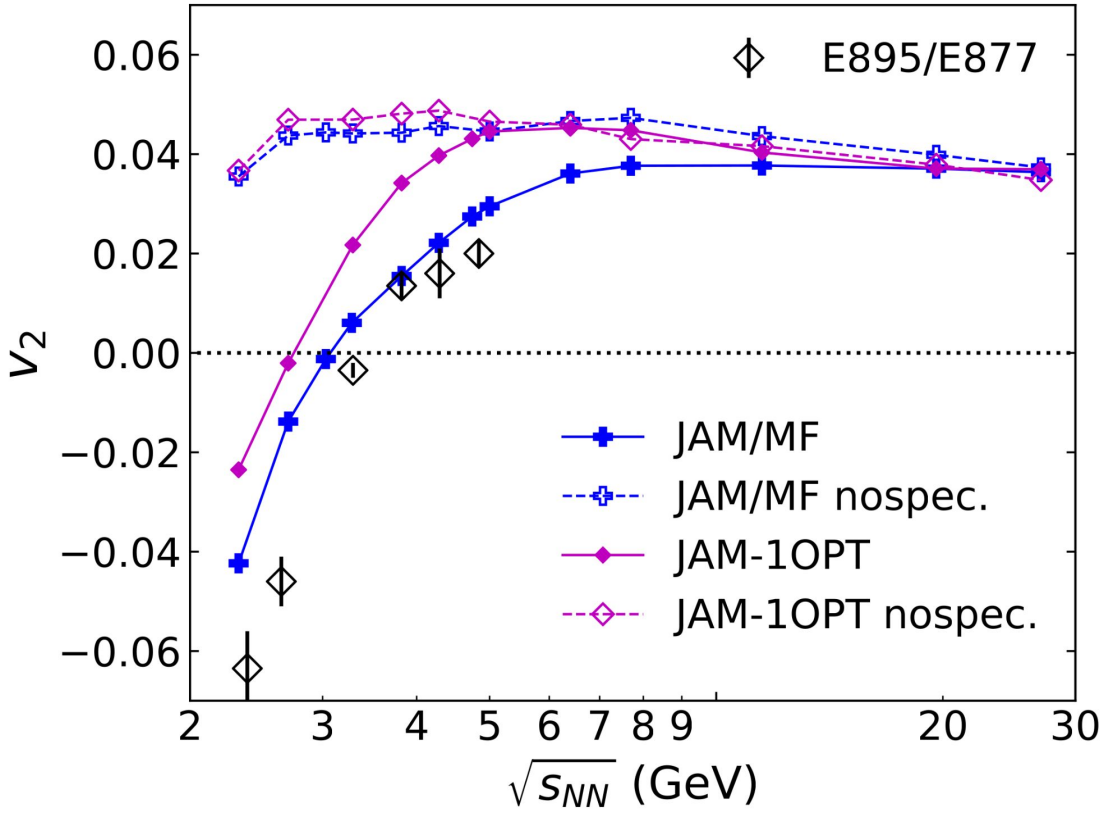


Сравнение гидродинамических расчетов для v_n с экспериментальными измерениями показывает самую низкую в природе η/s



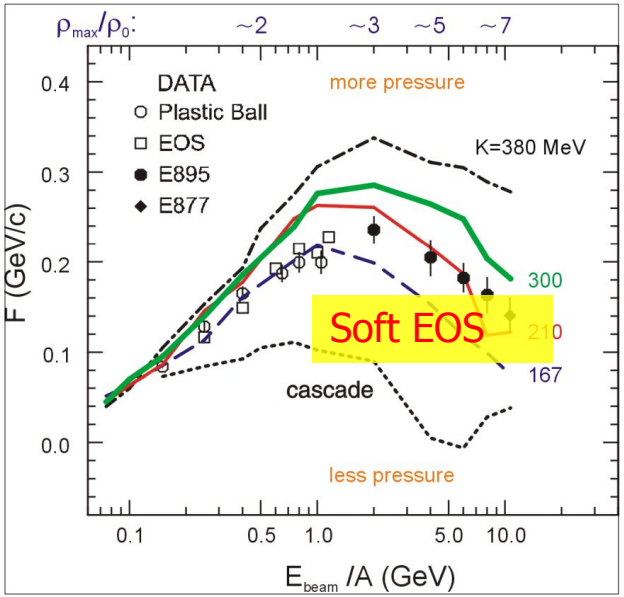
Влияние спектаторов на анизотропные потоки

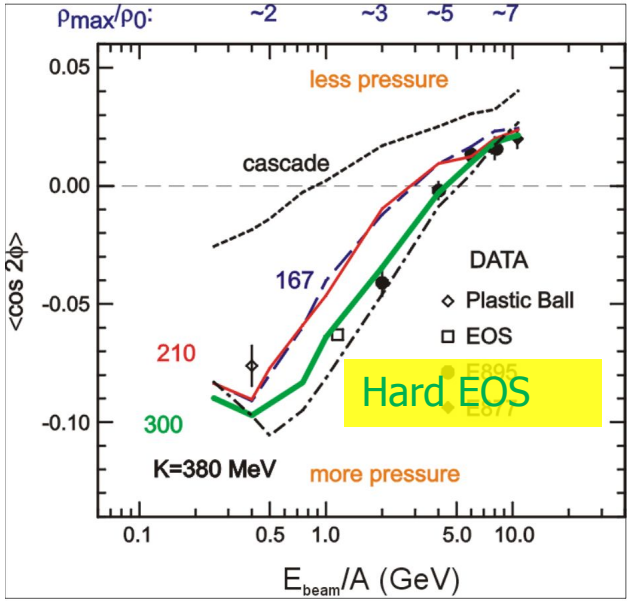


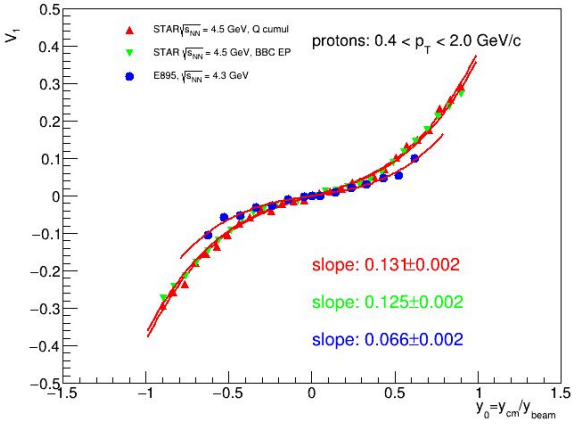


При энергиях $\sqrt{s_{NN}}$=2-10 GeV t_{pass}=22-5 фм/с:
сильное влияние спектаторов на анизотропные потоки

v_n протонов в столкновениях Au+Au при энергиях 2-8 АГэВ и уравнение состояния (EOS) симметричной ядерной материи







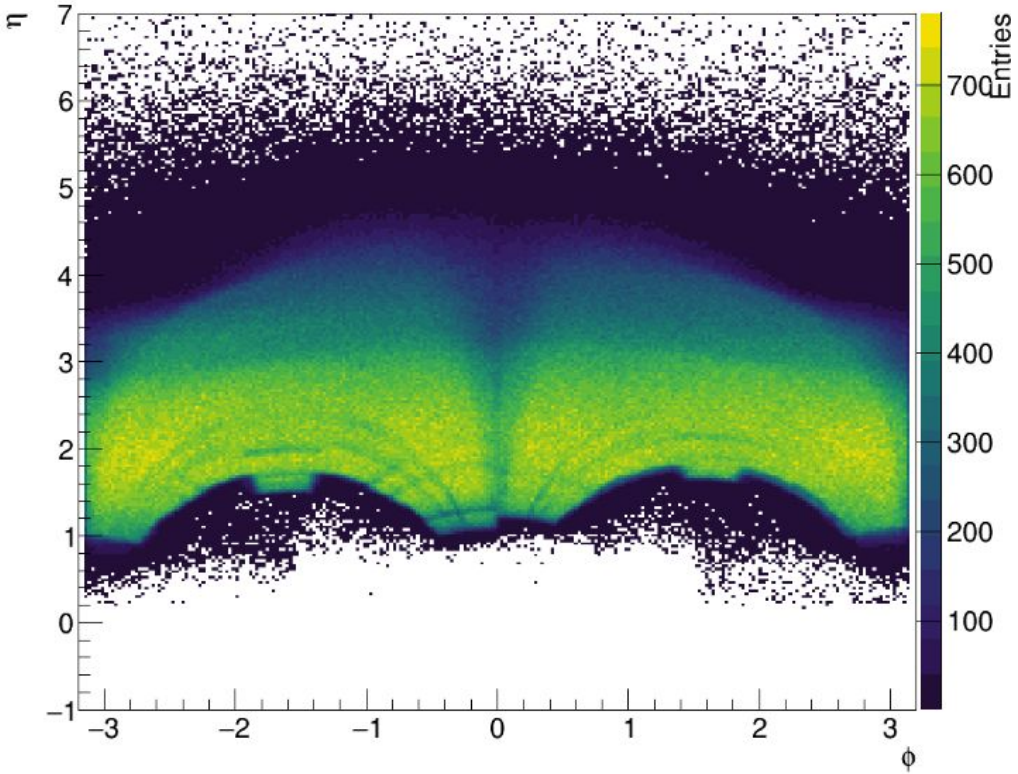
v_1 предполагает K_{mn}≈210 МэВ

v_2 предполагает K_{mn}≈300 МэВ

P. Danielewicz, R. Lacey, W.G. Lynch, Science 298 (2002) 1592

Разница в значениях несжимаемости ядерной материи K_{mn} может быть объяснена вкладом непотоковых корреляций в измерения v_n эксперимента E895 (AGS)

Влияние азимутального аксептанса



Уравнение состояния сильновзаимодействующей материи

Давление для постоянной температуры:

$$P = n_B^2 \frac{\partial (E/A)}{\partial n_B}$$

где E/A — энергия на нуклон, n_B — число барионов.

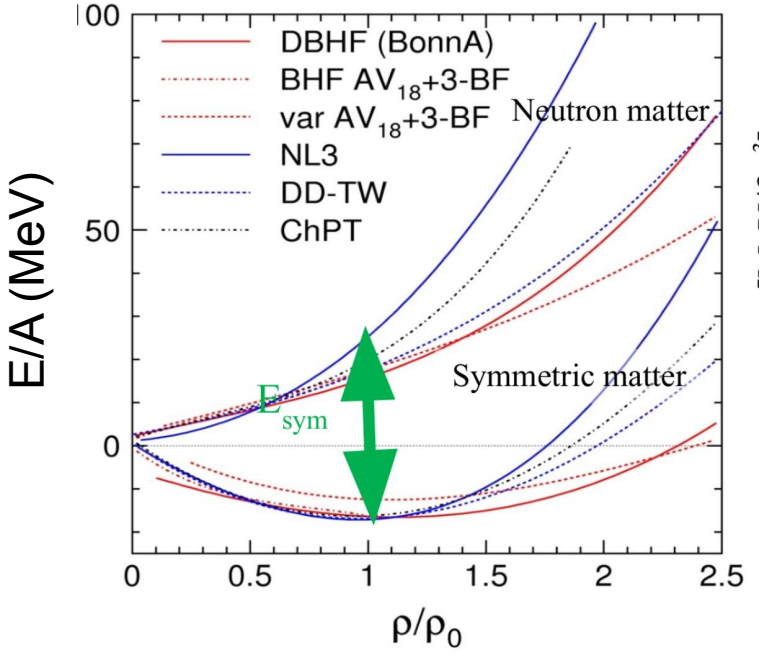
Энергия связи E/A определяется как:

$$E/A = E_A(n_B) + E_{\rm sym}(n_B) \frac{(n_p - n_n)^2}{n_B^2}$$

где E_A — энергия симметричной материи, E_{sym} — энергия симметрии.

Уравнение состояния ядерной материи может быть охарактеризован коэффициентом несжимаемости:

$$K = 9 n_B^2 \frac{\partial^2 (E/A)}{\partial n_B^2}$$



Систематические ошибки для данных Au+Au 1.23A ГэВ

Eur.Phys.J.A 59 (2023) 4, 80

Proton, deuteron and triton flow measurements in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$ GeV

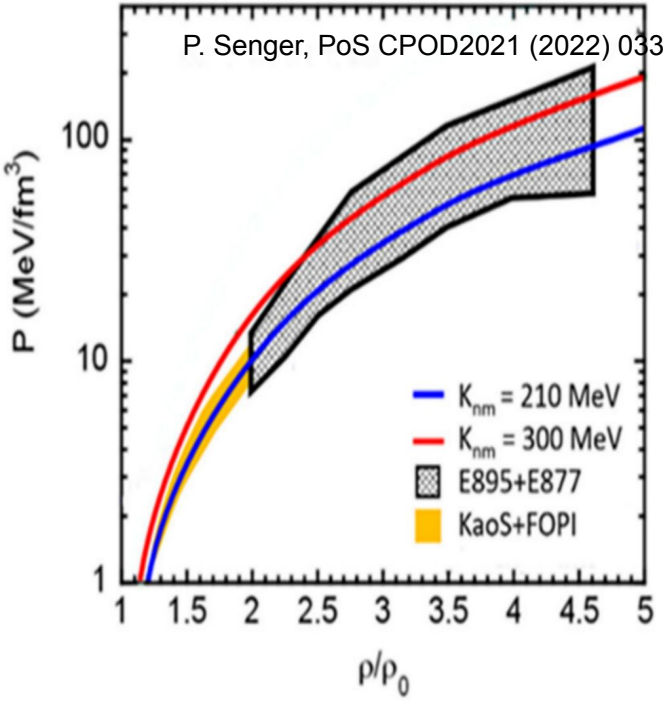
HADES collaboration

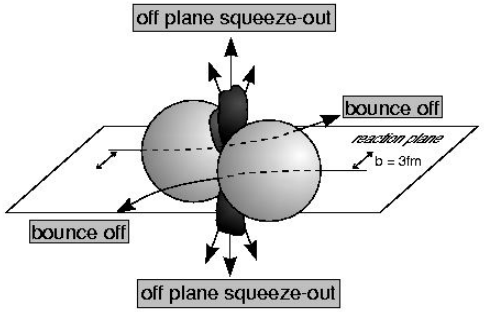
J. Adamczewski-Musch[5], O. Arnold[10,9], C. Behnke[8], A. Belounnas[13], J.C. Berger-Chen[10,9], A. Blanco[2], C. Blume[8], M. Böhmer[10], P. Bordalo[2], L. Chlad[14], I. Ciepal[3], C. Deveaux[11], J. Dreyer[7], E. Epple[10,9], L. Fabbietti[10,9], P. Filip[1], P. Fonte[2,a], C. Franco[2], J. Friese[10], I. Fröhlich[8], T. Galatyuk[6,5], J.A. Garzón[15], R. Gernhäuser[10], R. Greifenhagen[7,b,†], M. Gumberidze[5,6], S. Harabasz[6,4], T. Heinz[5], T. Hennino[13], S. Hlavac[1], C. Höhne[11,5], R. Holzmann[5], B. Kämpfer[7,b], B. Kardan[8], I. Koenig[5], W. Koenig[5], M. Kohls[8], B.W. Kolb[5], G. Korcyl[4], G. Kornakov[6], F. Kornas[6], R. Kotte[7], A. Kugler[14], T. Kunz[10], R. Lalik[4], K. Lapidus[10,9], L. Lopes[2], M. Lorenz[8], T. Mahmoud[11], L. Maier[10], A. Malige[4], A. Mangiarotti[2], J. Markert[5], T. Matulewicz[16], S. Maurus[10], V. Metag[11], J. Michel[8], D.M. Mihaylov[10,9], C. Müntz[8], R. Münzer[10,9], L. Naumann[7], K. Nowakowski[4], Y. Parpottas[18], V. Pechenov[5], O. Pechenova[5], K. Piasecki[16], J. Pietraszko[5], W. Przygoda[4], K. Pysz[3], S. Ramos[2], B. Ramstein[13], N. Rathod[4], P. Rodriguez-Ramos[14], P. Rosier[13], A. Rost[6], A. Rustamov[5], P. Salabura[4], T. Scheib[8], H. Schuldes[8], E. Schwab[5], F. Scozzi[6,13], F. Seck[6], P. Sellheim[8], I. Selyuzhenkov[5], J. Siebenson[10], L. Silva[2], U. Singh[4], J. Smyrski[4], Yu.G. Sobolev[14], S. Spataro[17], S. Spies[8], H. Ströbele[8], J. Stroth[8,5], C. Sturm[5], O. Svoboda[14], M. Szala[8], P. Tlusty[14], M. Traxler[5], H. Tsertos[12], V. Wagner[14], C. Wendisch[5], M.G. Wiebusch[5], J. Wirth[10,9], D. Wójcik[16], P. Zumbruch[5]

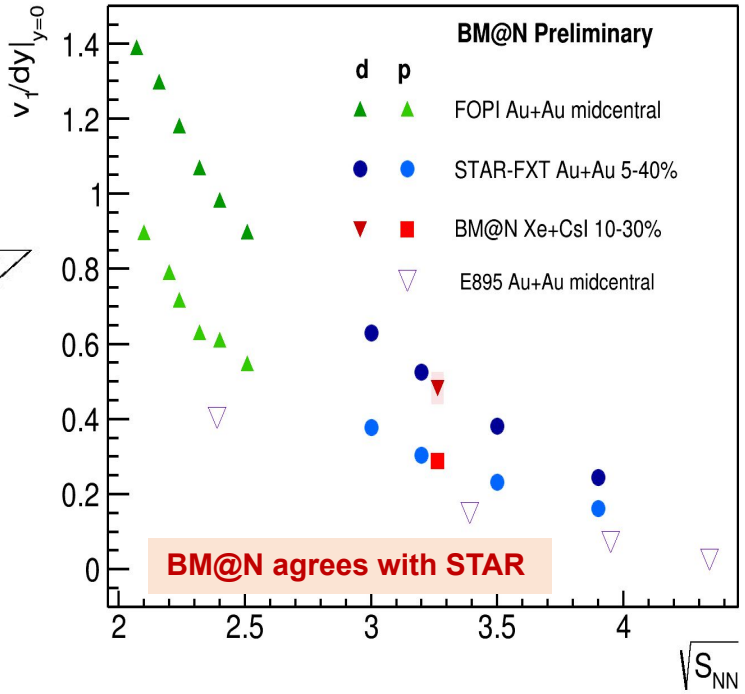
The main contribution to the global systematic uncertainty arises from the event-plane resolution. This is mainly caused by so-called “non-flow” correlations which can distort the event-plane determination. The magnitude of these systematic effects is evaluated using the three-sub-event method, i.e. by determining the event-plane resolution for combinations of different sub-events separated in rapidity. It is found to be below 5 % for the centralities $10 - 40$ % [36].

36. M. Mamaev, O. Golosov, and I. Selyuzhenkov (HADES), Phys. Part. Nucl. **53**, 277 (2022).

Directed flow of protons and EOS of symmetric matter





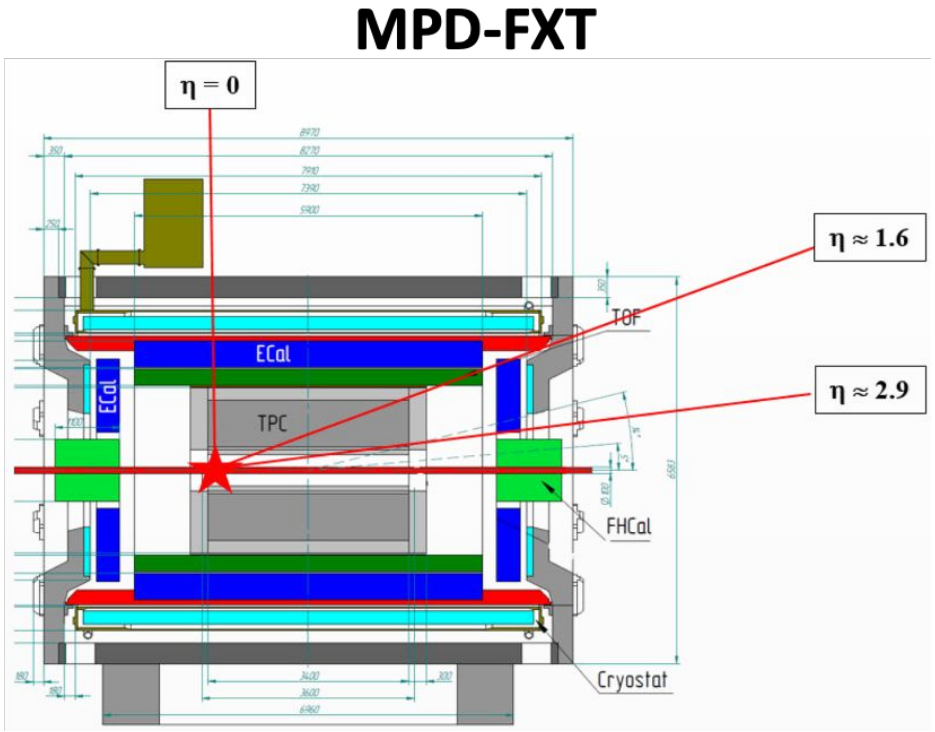


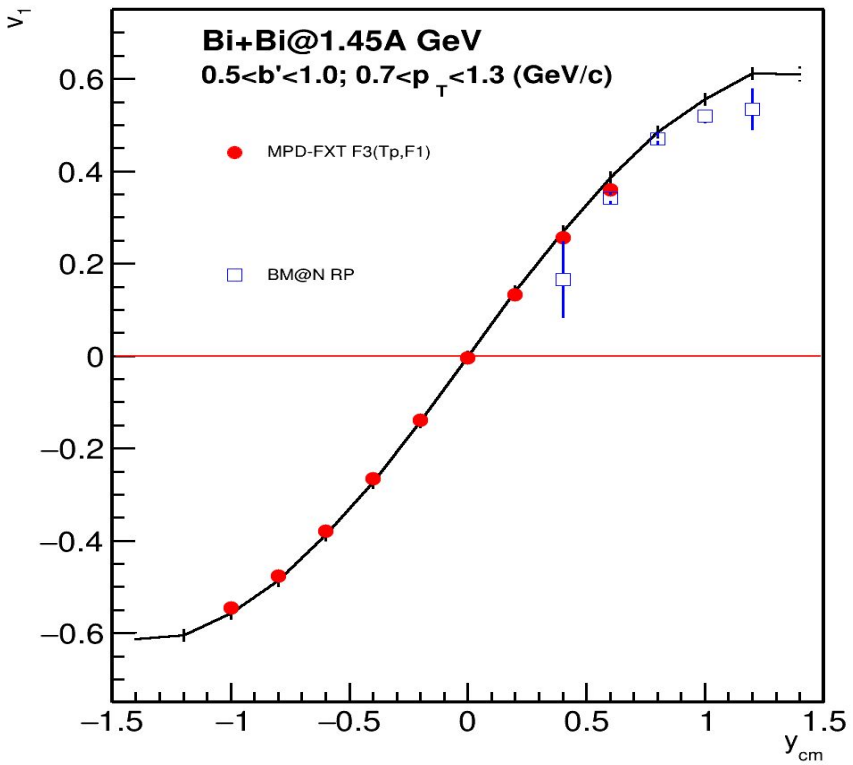
Nuclear incompressibility from collective proton flow

P. Danielewicz, R. Lacey, W.G. Lynch, Science 298 (2002) 1592

Both STAR and BM@N results for directed flow prefer stiff EOS

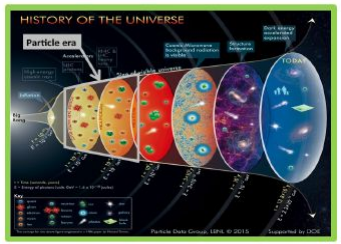
MPD in Fixed-Target Mode (FXT) vs BM@N



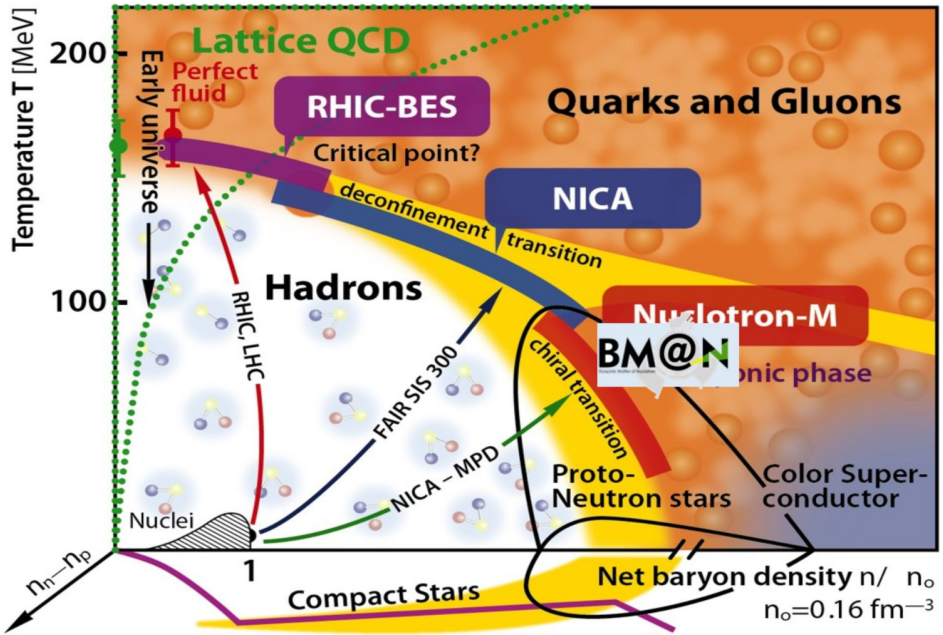


Please see Pater Parfenov talk at Nucleus-2024 – 02/07//2024

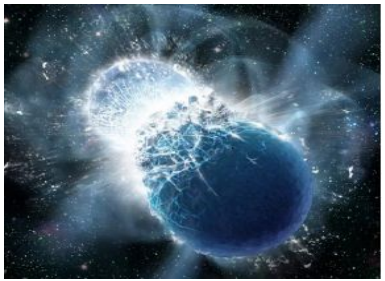
Исследование фазовой диаграммы КХД материи



Высокая температура: эволюция ранней Вселенной



Высокая барионная плотность: столкновения нейтронных звезд



2005 – Открытие Кварк-Глюонной Материи (КГМ) в столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 ГэВ в экспериментах на коллайдере RHIC (БНЛ). КГМ - сильно взаимодействующую жидкость с очень малой вязкостью

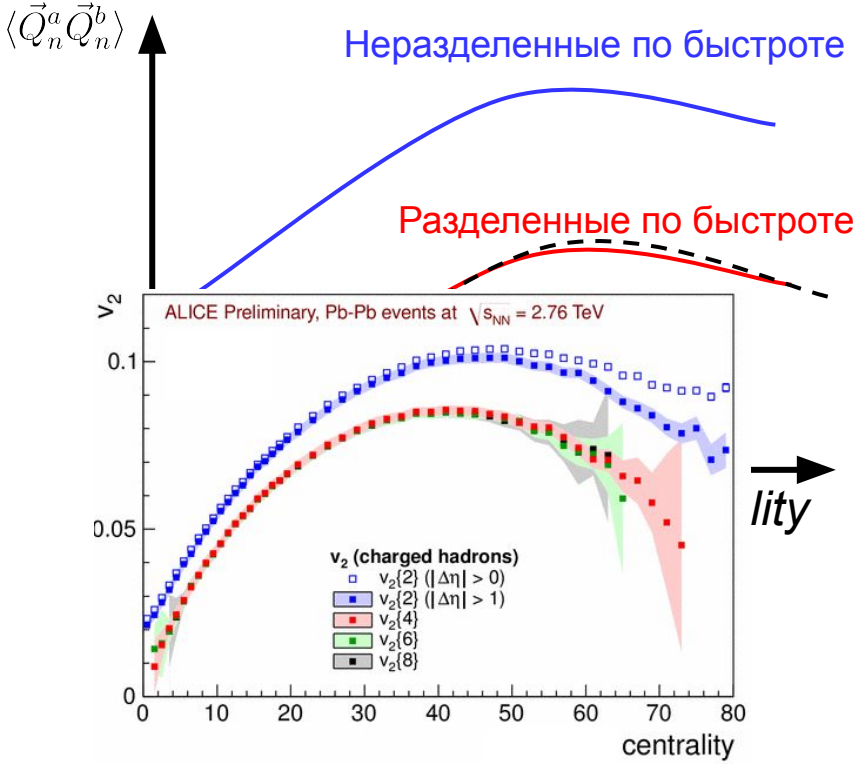
2010 - ….. Поиск сигналов деконфайнмента, фазового перехода первого рода и критической точки КХД материи - - основа для программ сканирования по энергии столкновения ядер в современных экспериментах на ускорителях: RHIC, SPS, Nuclotron, SIS18

Непотоковые корреляции

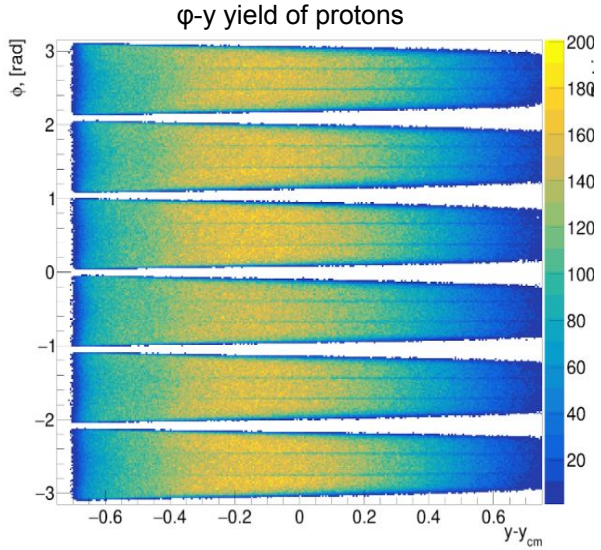
Корреляции не относящиеся к изначальному коллективному движению частиц называют непотоковыми:

- Фемтоскопические корреляции
- Закон сохранения импульса
- Корреляция продуктов распада
- Корреляции возникающие в материале детектора (адронный ливень, магнитное поле)

Основной способ подавить непотоковые корреляции — внести разделение по (псевдо-) быстроте между Q_n-векторами



Неоднороснность азимутального аксептанса HADES

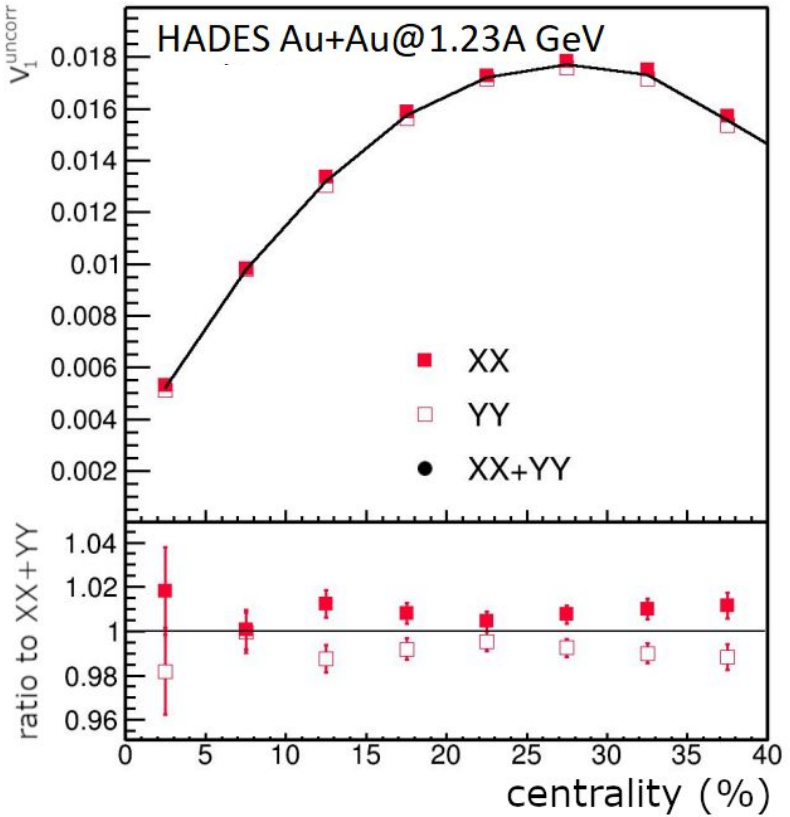


$$u_1 = (x_1, y_1) \quad Q_1 = (X_1, Y_1)$$

$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1 \rangle}{R_1} = 2\frac{\langle x_1 X_1 \rangle}{R_1^X} = 2\frac{\langle y_1 Y_1 \rangle}{R_1^Y}$$

$$R_1^X = \frac{\sqrt{\langle X^a X^b \rangle \langle X^a X^c \rangle}}{\sqrt{\langle X^b X^c \rangle}}$$

Corrections are based on method in:
I. Selvuzhenkov and S. Voloshin PRC77, 034904 (2008)



M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281

Предложенный метод измерения v_1

1. Измерения производятся относительно плоскости симметрии спектаторов, чтобы уменьшить вклад непотоковых корреляций
2. Измерения выполняются методом скалярного произведения, который дает более устойчивую оценку v_1
3. При помощи сравнения v_1, полученного с использованием двух компонент корреляции предлагается оценивать вклад остаточного влияния азимутальной неоднородности аксептанса
4. Сравнивая v_1, полученный относительно различных плоскостей симметрии предлагается оценивать вклад непотоковых корреляций в полученные значения азимутального потока

Векторы потока u_n и Q_n

Из импульса каждой частицы определяется единичный вектор u_n:

$$\vec{u}_n = (\cos n\varphi, \sin n\varphi)$$

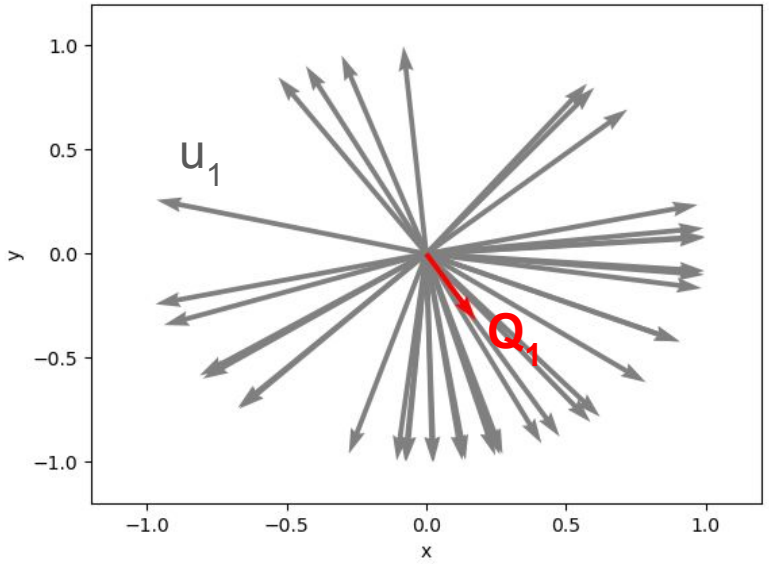
где φ — азимутальный угол импульса

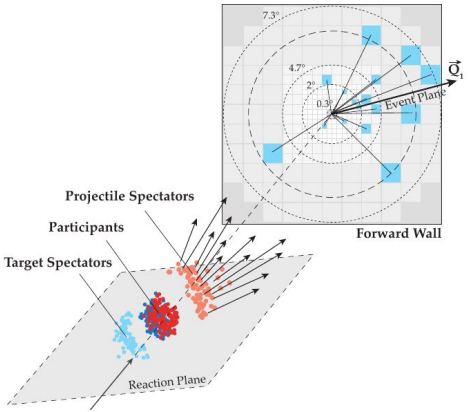
Сумма по группе частиц в одном событии даёт оценку угла плоскости реакции в событии:

$$\vec{Q}_n = \frac{\sum_{k=1}^{M} w_k u_n^k}{C} = \frac{|Q|}{C}(\cos n\Psi_n^{EP} \sin n\Psi_n^{EP})$$

Ψ_n^{EP} — угол плоскости симметрии (оценка угла плоскости реакции)

u_1-вектора, дающие в сумме Q_1-вектор





Разрешение плоскости симметрии

$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1^{F1} \rangle}{R_1^{F1}} \qquad v_2 = \frac{\langle u_2 Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}{R_1^{F1} R_1^{F3}}$$

Где R_1 — разрешение плоскости симметрии

$$R_1^{F1} = \langle \cos(\Psi_1^{F1} - \Psi_1^{RP}) \rangle$$

Метод трех подсобытий:

$$R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$

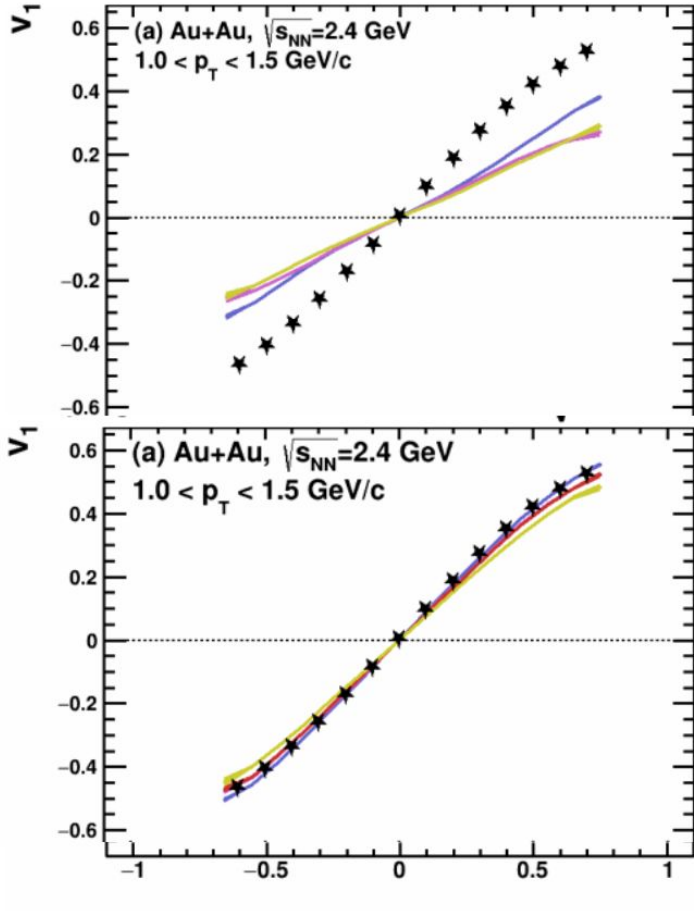
3 оценки для v_n
Можно оценить вклад непотоковых корреляций

Метод случайных подсобытий:

$$R_1 = \sqrt{\langle Q_1^a Q_1^b \rangle}$$

1 оценка для v_n
Невозможно оценить вклад непотоковых корреляций

Методика измерения азимутальных потоков

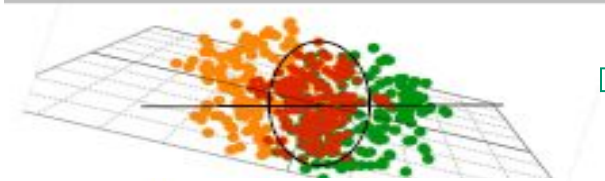


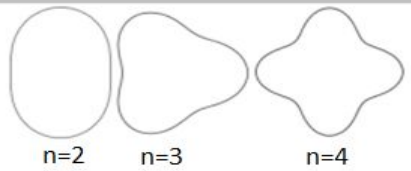
- Направленный поток достигает максимума в кинематической области спектаторов
- Для восстановления плоскости симметрии используются спектаторы, чтобы подавить вклад непотоковых корреляций

Цель работы

Экспериментальное исследование коллективной анизотропии протонов в ядро-ядерных столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях E_{kin}=1,23-1,58*A* ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}$=2,4-2,55 ГэВ) в эксперименте HADES (GSI), а также изучение возможности проведения измерений коллективной анизотропии в эксперименте BM@N (NICA).

Анизотропные потоки на RHIC и LHC

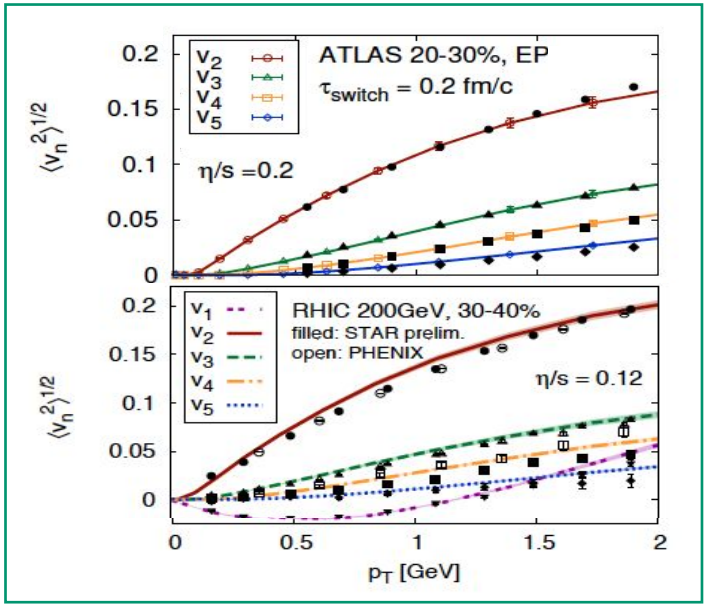




$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$

$$\frac{d^2N}{d\varphi d\Psi_{RP}} = \frac{N}{2\pi}(1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\phi - \Psi_{RP}))$$

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



- 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: $v_n \sim k_n \varepsilon_n$
- Анизотропные потоки на RHIC и LHC согласуются с гидродинамическими расчетами с η/s близкими к предсказанному минимуму η/s>1/4π

Непотоковые корреляции

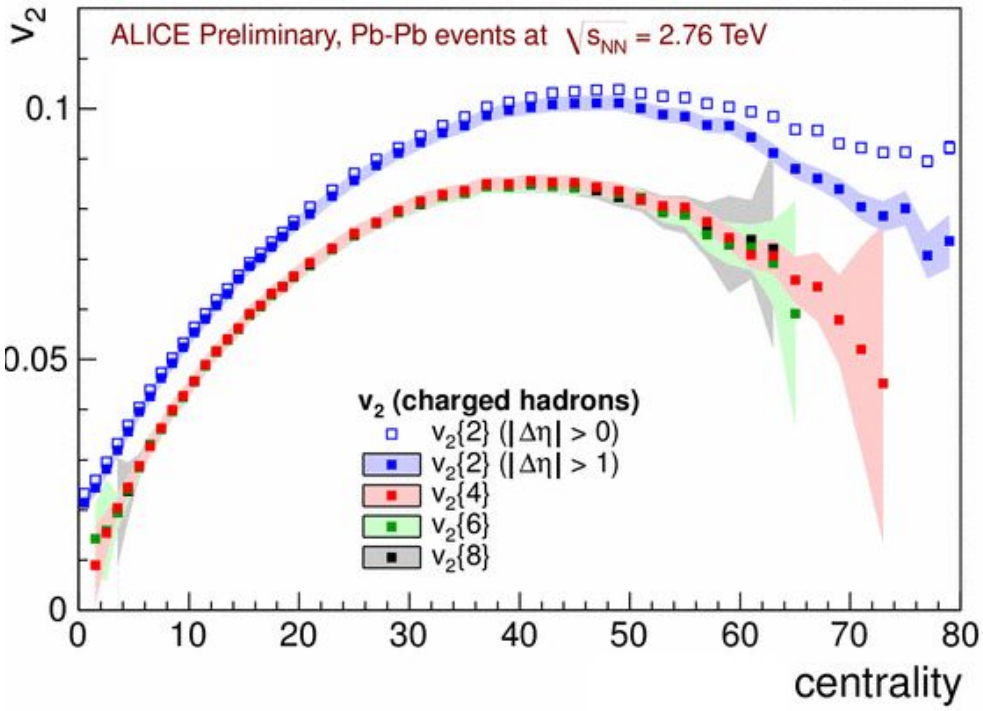
Существуют корреляции между частицами, не связанные с плоскостью реакции. Эти корреляции называются «непотоковыми»

Среди источников корреляций, не связанных с потоком:

- сохранение полного (поперечного) импульса при столкновении;
- распады резонансов в результате слабого взаимодействия
- корреляции ближнего действия (фемтоскопия, распад фрагментов ядер)

Эффекты детектора также могут вносить коррелированную ошибку в измерения потока:

- Разделение траектории одной частицы в результате реконструкции
- Слияние траекторий двух частиц в результате реконструкции
- Сигналы от пролёта одной и той же частицы в соседних модулях сегментированных детекторов



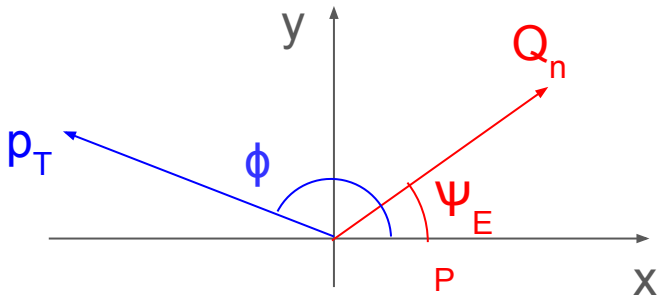
Как правило “непотоковые” корреляции оказывают существенное влияние только на частицы с близкими импульсами, их можно также подавить, увеличив интервал быстроты между частицами.

Метод плоскости события

$$\Psi_n^{EP} = \arctan \frac{Q_n^y}{Q_n^x} \qquad v_n = \frac{\langle \cos n(\phi - \Psi_n^{EP}) \rangle}{R_n}$$

$$\langle v_n \rangle < v_n < \sqrt{\langle v_n^2 \rangle}$$

Phys. Rev. C. — 2001. — Т. 64. — С. 054901



$$R_n = \sqrt{\langle \cos n(\Psi_n^A - \Psi_n^B) \rangle}$$

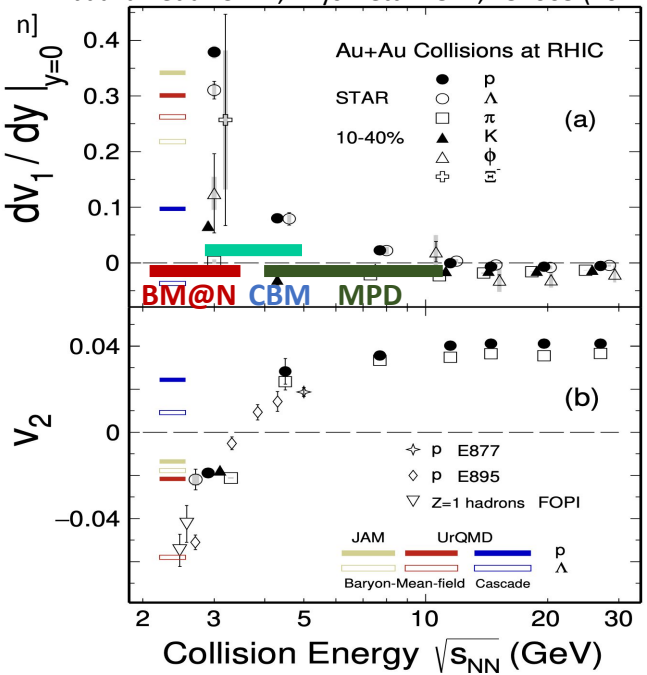
Ψ_n^A и Ψ_n^B — оценка по двум группам частиц (часто частицы разделяются в группы случайным образом)

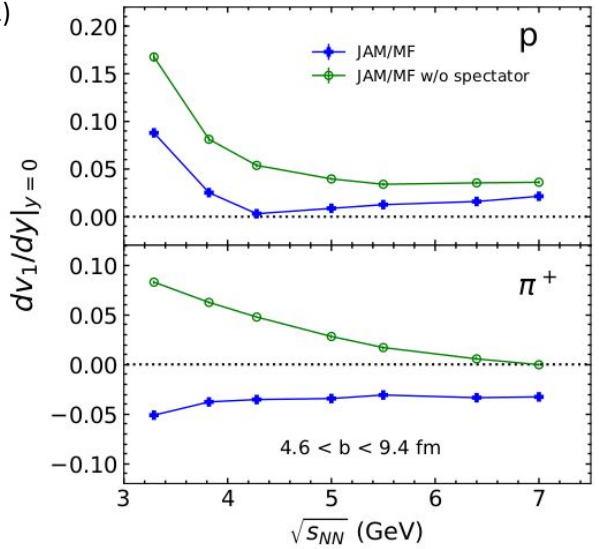
Метод более подвержен вкладу непотоковых корреляций и флуктуаций

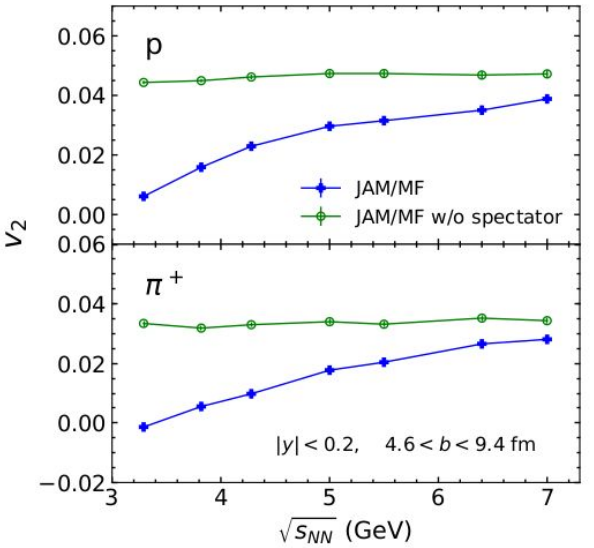
Центральность

Анизотропный поток в столкновениях тяжелых ионов при высокой барионной плотности

M. Abdallah et al. STAR, Phys. Lett. B 827, 137003 (2022)







Phys. Rev. C 97, 064913 (2018)

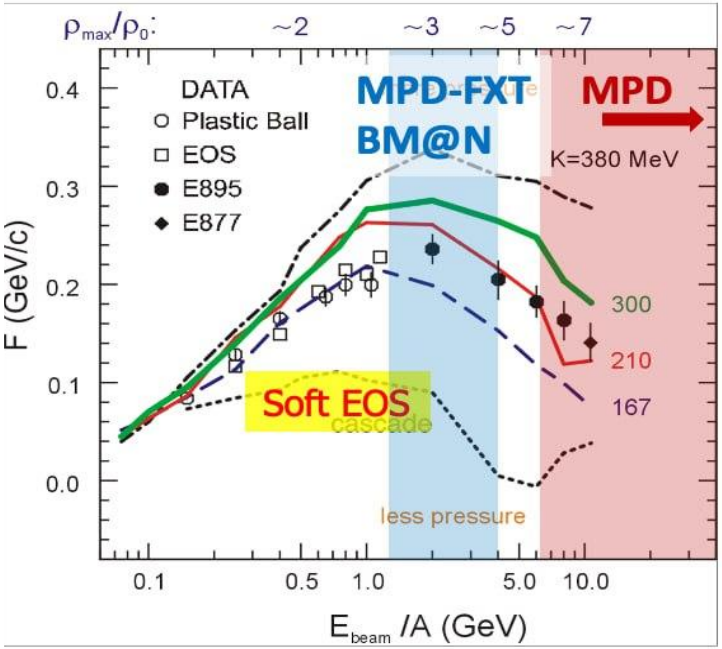
$\sqrt{s_{NN}}$=10 ГэВ: t_{pass} ~1 фм/с
$\sqrt{s_{NN}}$=2,4 ГэВ: t_{pass} ~20 фм/с

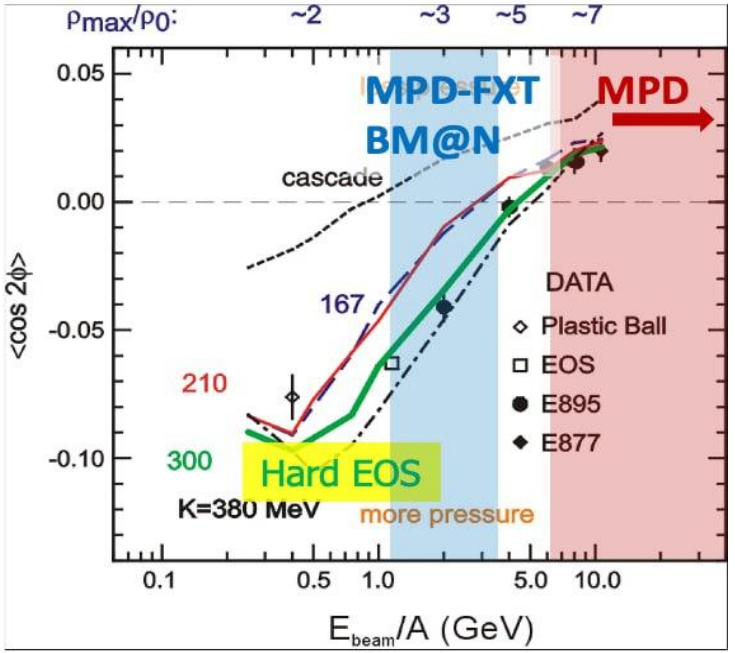
При энергиях HADES и BM@N на анизотропный поток влияют:

1. Время расширения области перекрытия: $t_{exp} = R/c_s, c_s = \sqrt{dp/d\varepsilon}$
2. Время пролета сталкивающихся ядер: $t_{pass} = 2R/\gamma_{\text{beam}}\beta_{\text{beam}}$

v_n при энергиях NUCLOTRON-NICA

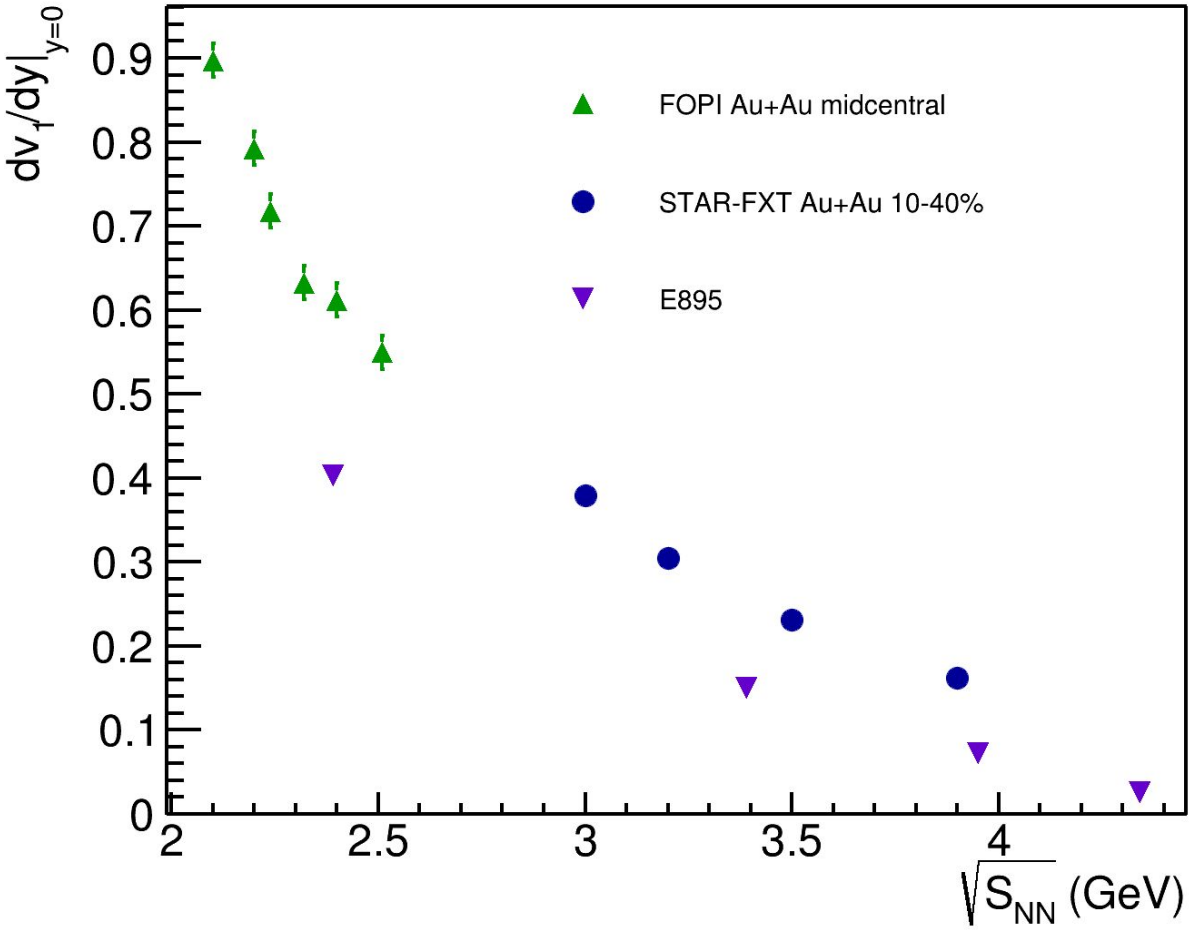
P. DANIELEWICZ, R. LACEY, W. LYNCH
10.1126/science.1078070





- **Результаты старвнения v_n с теоретическими предсказанимями неоднозначны:**
  - v_1 предполагает K_{nm}~210 MeV and v_2 предполагает K_{nm}~ 300 MeV
- **Необходимы дополнительные измерения, чтобы уточнить значение K_{nm}**

Необходимость новых измерений v_1



Различия экспериментальных значений dv_1/dy между E895 и STAR требуют новых измерений чтобы устранить неоднозначность

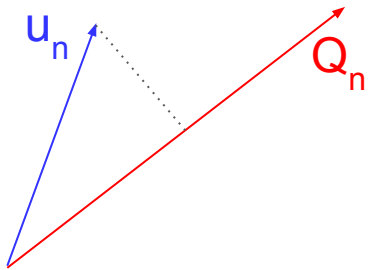
Метод скалярного произведения

Метод скалярного произведения:

$$v_n = \frac{\langle \vec{u}_n \vec{Q}_n \rangle}{R_n}$$

$$v_n \to \sqrt{\langle v_n^2 \rangle}$$

Phys. Rev. C. — 2001. — T. 64. — C. 054901



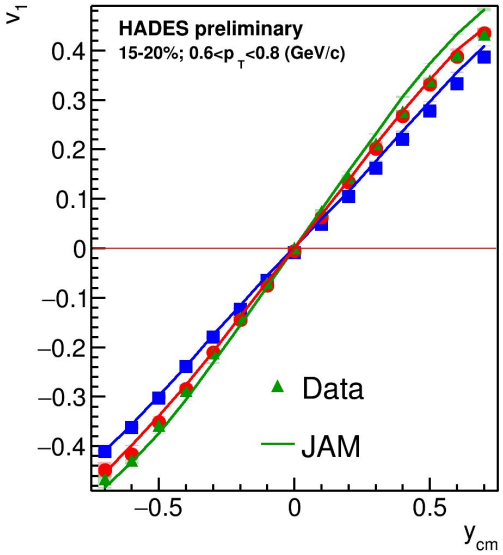
Метод трех подсобытий:

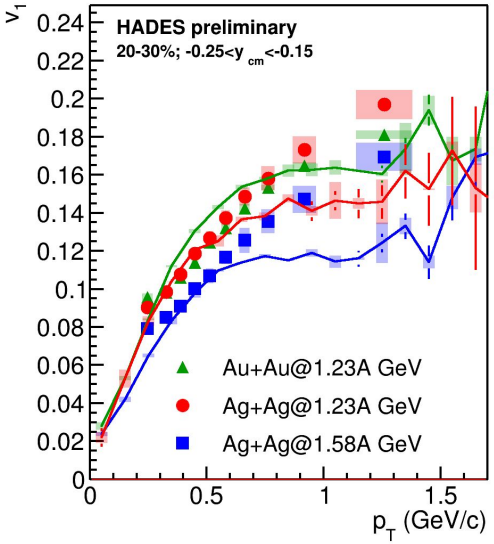
$$R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$

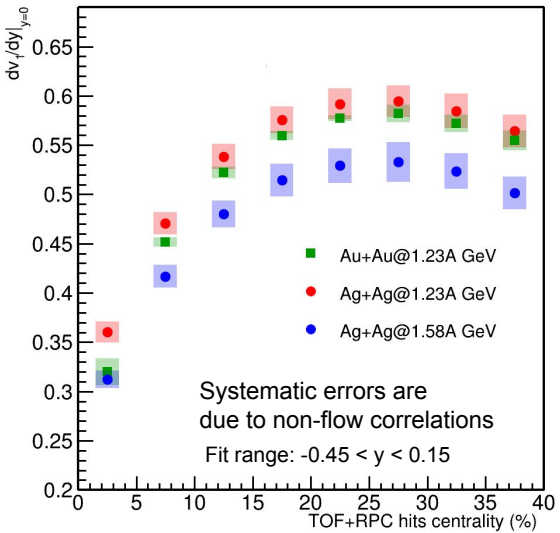
Метод даёт 3 оценки v_n, что позволяет оценивать вклад непотоковых корреляций

v_1 протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag

Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — Т. 21, № 4. — С. 661—663.
Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — Т. 55, № 4. — С. 832—835.





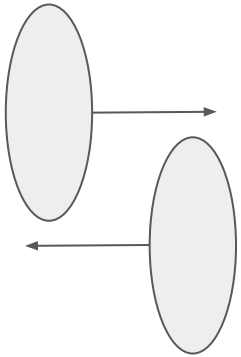


- Наблюдается похожая зависимость v_1 (dv_1/dy) протонов от быстроты (y_{cm}), поперечного импульса (p_T) и центральности для столкновений Ag+Ag и Au+Au при E_{kin}=1.23*A* ГэВ
- Модель JAM-MF (с импульсно зависимым среднем полем) довольно хорошо описывает зависимость v_1 от быстроты

Mamaev, M., Taranenko, A. Particles, 2023, 6(2), pp. 622–637

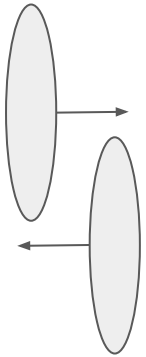
Масштабирование dv_1/dy с энергией и размером системы

Меньшая энергия



Более длинное время пролета

Большая энергия



Более короткое время пролета

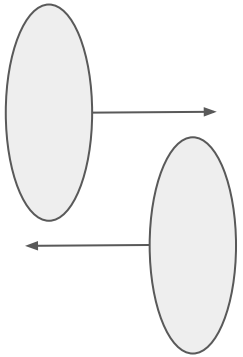
Во время пролета двух ядер t_{pass}:

- Протоны в области перекрытия смешиваются с холодной спектаторной материей
- Расширение материи в области перекрытия отклоняет протоны в плоскости реакции ⇨ положительный v_1 протонов

$dv_1/dy|_{y=0}$ пропорционален времени пролета $t_{pass}=2R/\sinh(y_{beam})$ ⇨ ожидается масштабирование с y_{beam}

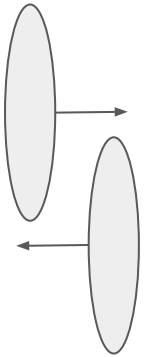
Масштабирование dv_1/dy с энергией и размером системы

Меньшая энергия



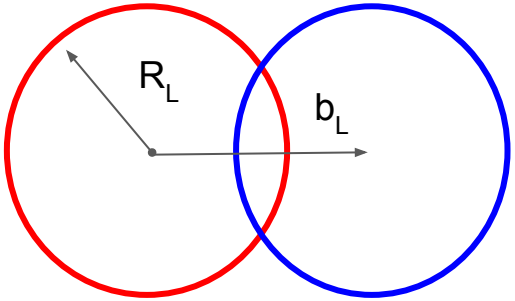
Более длинное время пролета

Большая энергия

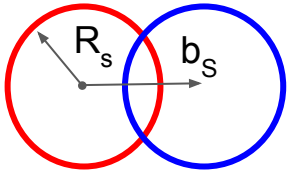


Более короткое время пролета

Большие ядра



Малые ядра



v_1 отражает изначальную асимметрию области перекрытия ⇨ ожидается похожий v_1 для одного относительного прицельного параметра b/R

$$b_L/R_L = b_s/R_s$$

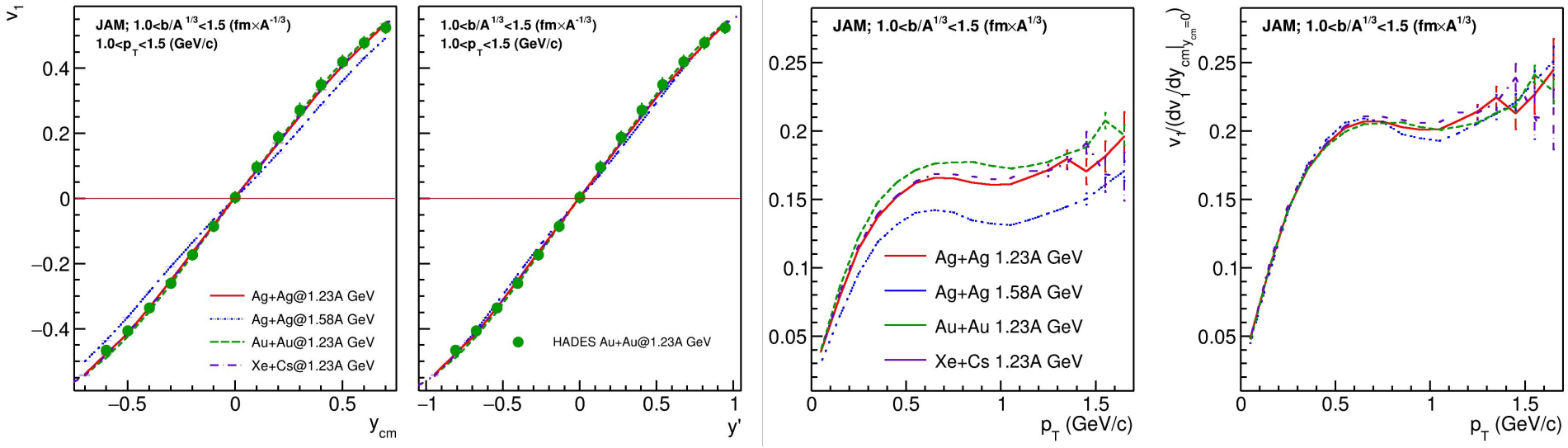
Во время пролета двух ядер:

- Протоны в области перекрытия смешиваются с холодной спектаторной материей
- Расширение материи в области перекрытия отклоняет протоны в плоскости реакции ⇨ положительный v_1 протонов

$dv_1/dy|_{y=0}$ пропорционален времени пролета $t_{pass}=2R/\sinh(y_{beam})$ ⇨ ожидается масштабирование с y_{beam}

JAM-MF: масштабирование v_1 с энергией и размером системы

Mamaev, M., Taranenko, A. ***Particles***, 2023, 6(2), pp. 622–637



- Наблюдается схожее масштабирование в модели JAM-MF

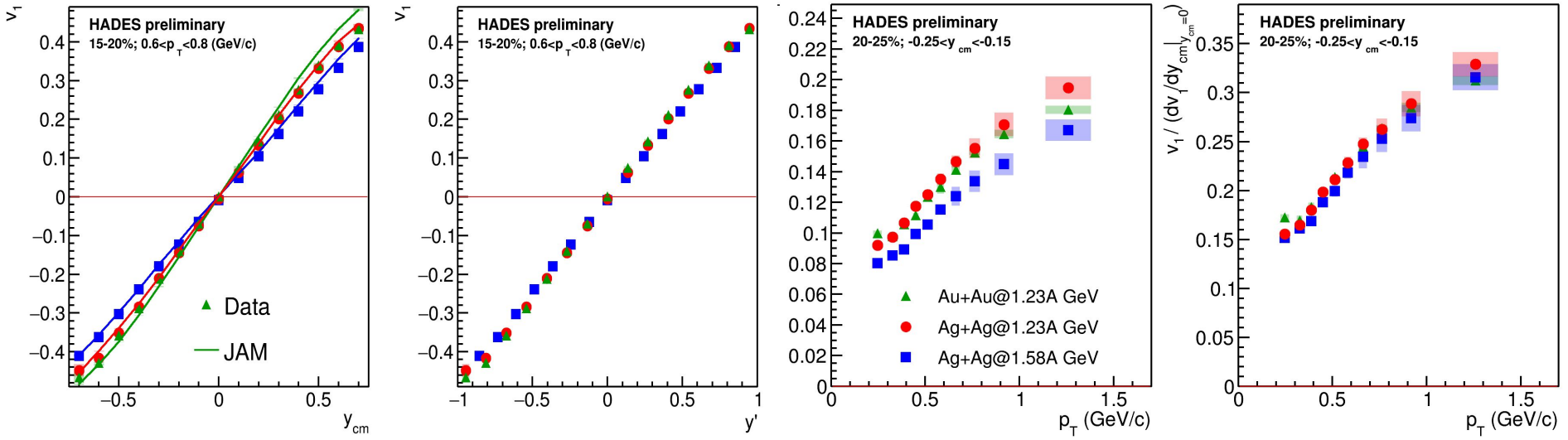
Масштабирование v_1 с энергией и геометрией столкновения

$t_{Au+Au@1.23A\ GeV}$ = 18 fm/c
$t_{Ag+Ag@1.23A\ GeV}$ = 15 fm/c
$t_{Ag+Ag@1.58A\ GeV}$ = 13 fm/c

Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — Т. 21, № 4. — С. 661—663.
Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — Т. 55, № 4. — С. 832—835.

$y_{CM} \rightarrow y' = y_{CM} / y_{beam}$

$v_1(p_T) \rightarrow v_1(p_T) / dv_1/dy$



- Масштабированный v_1 не зависит от энергии столкновения и размера системы
  - Форма зависимости v_1 от p_T не меняется с энергией и размером системы

Eur. Phys. J. A (2023) 59:80
https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-00936-6

THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL A

Regular Article - Experimental Physics

Proton, deuteron and triton flow measurements in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$ GeV

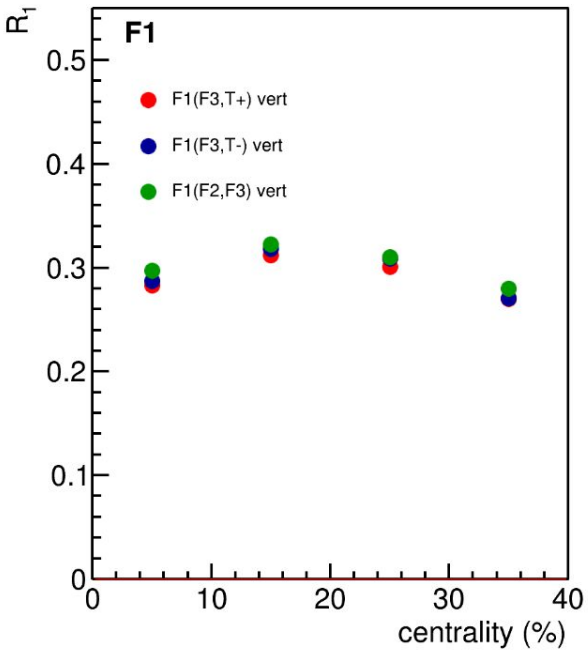
HADES collaboration

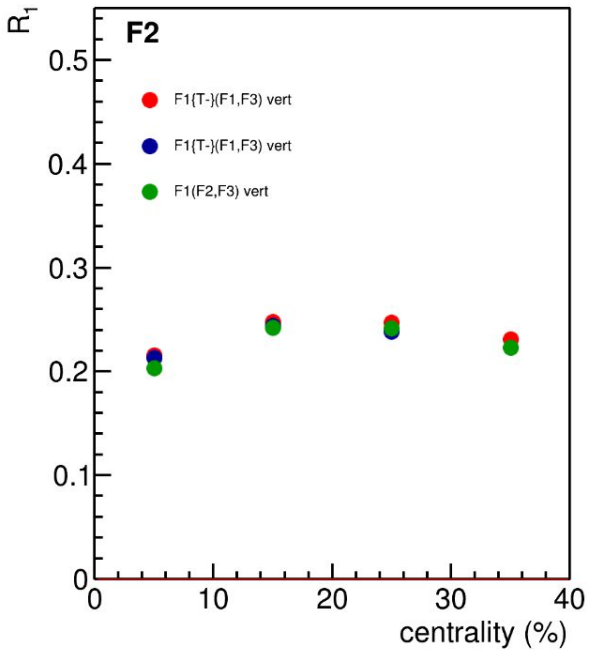
J. Adamczewski-Musch[5], O. Arnold[9,10], C. Behnke[8], A. Belounnas[13], J. C. Berger-Chen[9,10], A. Blanco[2], C. Blume[8], M. Böhmer[10], P. Bordalo[2], L. Chlad[14], I. Ciepal[3], C. Deveaux[11], J. Dreyer[7], E. Epple[9,10], L. Fabbietti[9,10], P. Filip[1], P. Fonte[2,b], C. Franco[2], J. Friese[10], I. Fröhlich[8], T. Galatyuk[5,6], J. A. Garzón[15], R. Gernhäuser[10], R. Greifenhagen[7,c†], M. Gumberidze[5,6], S. Harabasz[4,6], T. Heinz[5], T. Hennino[13], S. Hlavac[1], C. Höhne[5,11], R. Holzmann[5], B. Kämpfer[7,c], B. Kardan[8], I. Koenig[5], W. Koenig[5], M. Kohls[8], B. W. Kolb[5], G. Korcyl[4], G. Kornakov[6], F. Kornas[6], R. Kotte[7], A. Kugler[14], T. Kunz[10], R. Lalik[4], K. Lapidus[9,10], L. Lopes[2], M. Lorenz[8], T. Mahmoud[11], L. Maier[10], A. Malige[4], A. Mangiarotti[2], J. Markert[5], T. Matulewicz[16], S. Maurus[10], V. Metag[11], J. Michel[8], D. M. Mihaylov[9,10], C. Müntz[8], R. Münzer[9,10], L. Naumann[7], K. Nowakowski[4], Y. Parpottas[18], V. Pechenov[5], O. Pechenova[5], K. Piasecki[16], J. Pietraszko[5], W. Przygoda[4], K. Pysz[3], S. Ramos[2], B. Ramstein[13], N. Rathod[4], P. Rodriguez-Ramos[14], P. Rosier[13], A. Rost[6], A. Rustamov[5], P. Salabura[4], T. Scheib[8], H. Schuldes[8], E. Schwab[5], F. Scozzi[6,13], F. Seck[6], P. Sellheim[8], I. Selyuzhenkov[5], J. Siebenson[10], L. Silva[2], U. Singh[4], J. Smyrski[4], Yu. G. Sobolev[14], S. Spataro[17], S. Spies[8], H. Ströbele[8], J. Stroth[5,8], C. Sturm[5], O. Svoboda[14], M. Szala[8], P. Tlusty[14], M. Traxler[5], H. Tsertos[12], V. Wagner[14], C. Wendisch[5], M. G. Wiebusch[5], J. Wirth[9,10], D. Wójcik[16], P. Zumbruch[5]

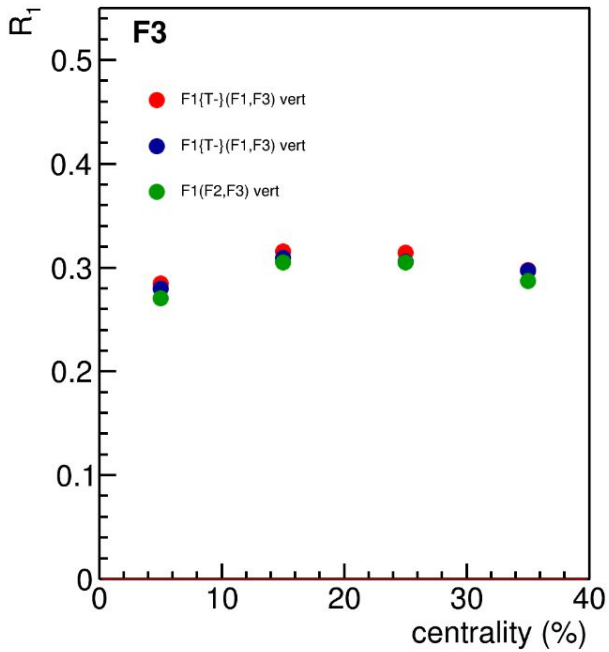
The main contribution to the global systematic uncertainty arises from the event plane resolution. This is mainly caused by so-called "non-flow" correlations which can distort the event plane determination. The magnitude of these systematic effects is evaluated using the three-sub-event method, i.e. by determining the event plane resolution for combinations of different sub-events separated in rapidity. It is found to be below 5 % for the centralities $10 - 40$ % [36].

35. R. Brun, F. Bruyant, F. Carminati, S. Giani, M. Maire, A. McPherson, G. Patrick, and L. Urban, *GEANT Detector Description and Simulation Tool* (1994).
36. M. Mamaev, O. Golosov, and I. Selyuzhenkov (HADES), Phys. Part. Nucl. **53**, 277 (2022).
37. A. Andronic *et al.* (FOPI), Phys. Rev. **C64**, 041604 (2001).

Скалярное произведение: зависимость разрешения плоскости событий R_1 от центральности (экспериментальные данные BM@N: Xe+Cs(I) E_{kin} = 3.8 АГэВ)







Все оценки разрешения плоскости событий R_1 находятся в хорошем согласии друг с другом

Текст диссертации и автореферата

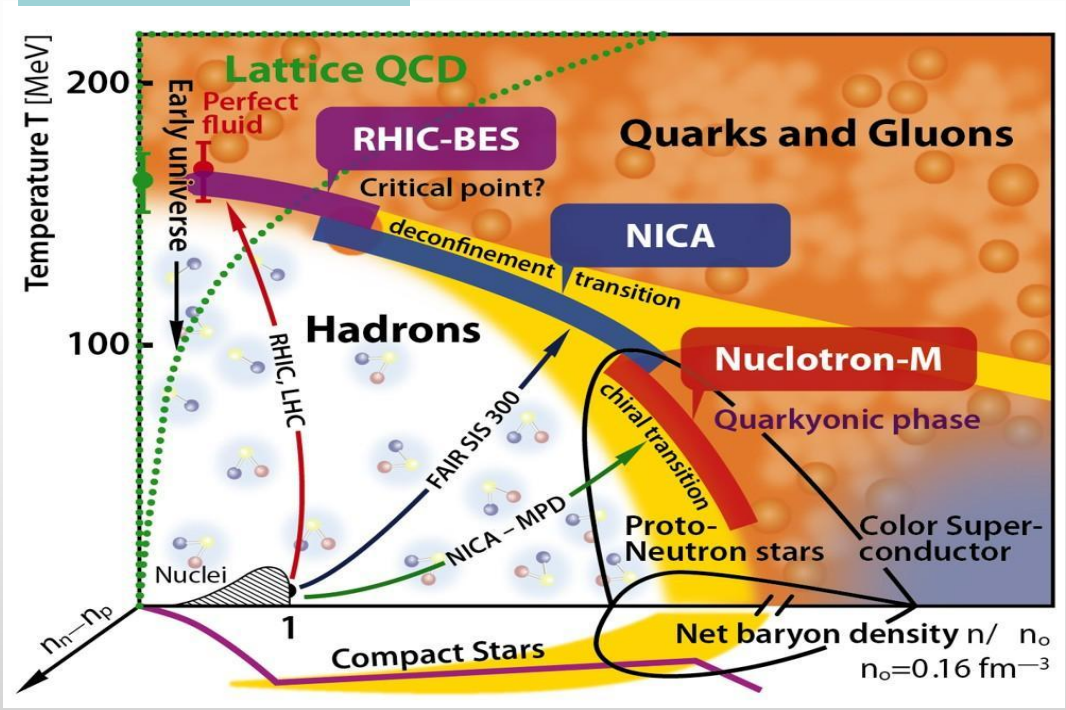
Диссертация:
https://www.inr.ru/rus/referat/mamaev/dis.pdf

Автореферат:
https://github.com/mam-mih-val/phd_thesis/blob/master/synopsis.pdf



Critical Temperature
$T_c \approx 156$ +/- 9 MeV

[PRD 90 094503 (2014)]



Столкновения релятивистских тяжелых ионов

В 2005 году 4 эксперимента (STAR, PHENIX, BRAHMS, PHOBOS) на коллайдере RHIC объявили об открытии кварк-глюонной материи (КГМ) со свойствами идеальной жидкости в столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}$=200 ГэВ
В 2010 году эксперименты (ALICE, ATLAS, CMS) на LHC подтвердили наблюдение КГМ в столкновениях Pb+Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 ТэВ

Плавный переход (кроссовер) из адронных в кварковые степени свободы при нулевой барионной плотности

Векторы потока u_n и Q_n

Из импульса каждой частицы определяется единичный вектор u_n:

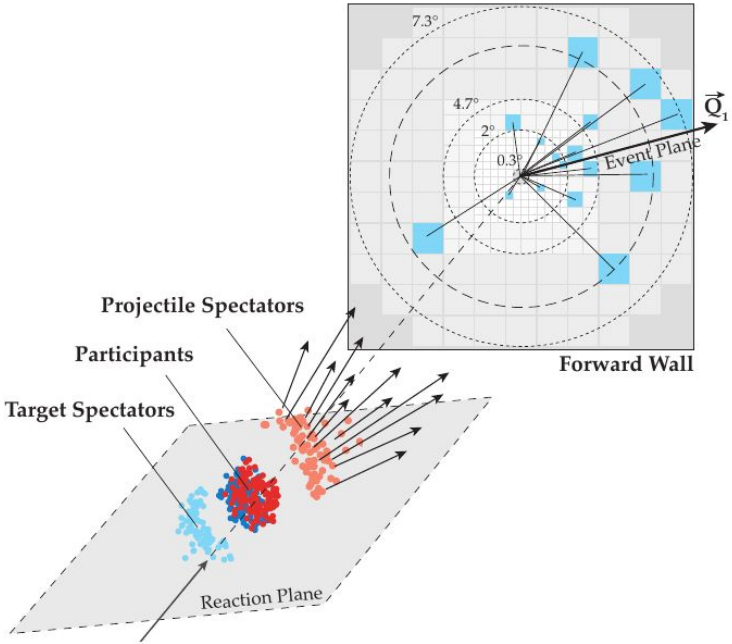
$$\vec{u}_n = (\cos n\varphi, \sin n\varphi)$$

где φ — азимутальный угол импульса

Сумма по группе частиц в одном событии даёт оценку угла плоскости реакции в событии:

$$\vec{Q}_n = \frac{\sum_{k=1}^{M} w_k u_n^k}{C} = \frac{|Q|}{C}(\cos n\Psi_n^{EP} \sin n\Psi_n^{EP})$$

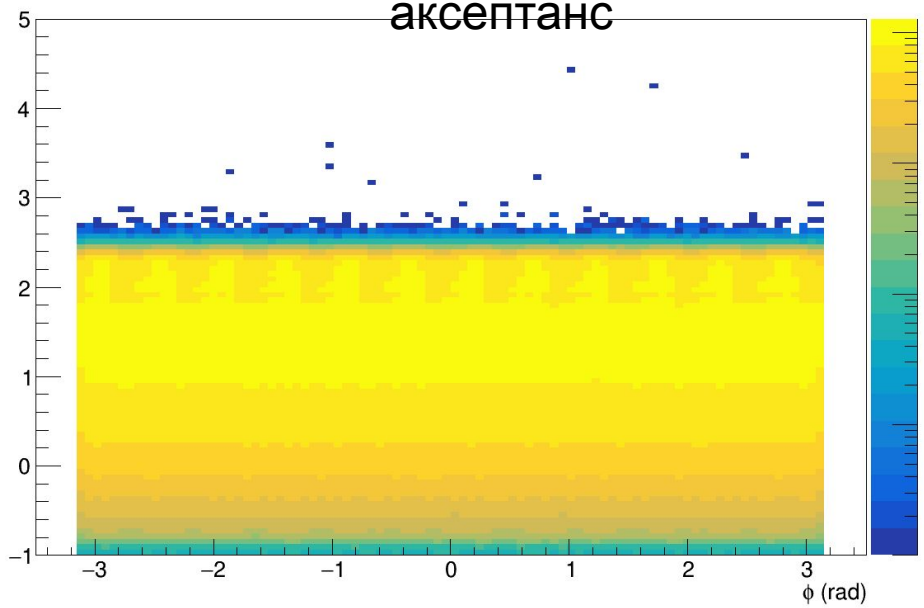
Ψ_n^{EP} — угол плоскости симметрии (оценка угла плоскости реакции)



- Плоскость симметрии определятся при помощи спектаторов, которые отклоняются в плоскость реакции
- Большое разделение по быстроте позволят минимизировать непотоковые корреляции

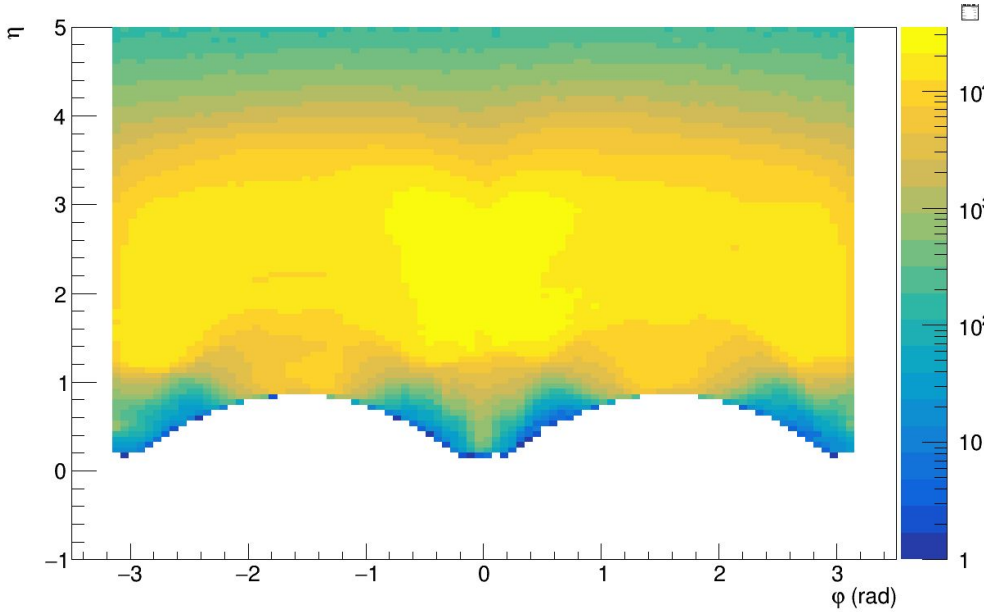
Влияние азимутального аксептанса на v_n

Однородный азимутальный аксептанс



$$\frac{\langle u_n^x Q_n^x \rangle}{R_n^x} = \frac{\langle u_n^y Q_n^y \rangle}{R_n^y}$$

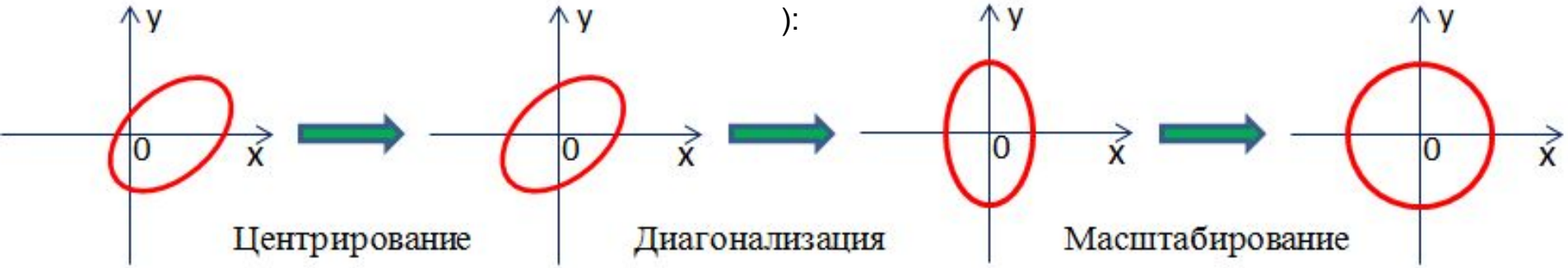
Неоднородный азимутальный аксептанс



$$\frac{\langle u_n^x Q_n^x \rangle}{R_n^x} \neq \frac{\langle u_n^y Q_n^y \rangle}{R_n^y}$$

Коррекция азимутальной неоднородности аксептанса

Коррекции на азимутальную неоднородность аксептанса (Selyuzhenkov I., Voloshin S. Phys. Rev. C. — 2008. — Т. 77. — С. 034904)):



Оригинальный программный код разработанный для коллайдерных экспериментов был адаптирован для экспериментов с фиксированной мишенью:
https://github.com/mam-mih-val/qntools_macros

Методы вычисления v_n

Метод скалярного произведения (SP)

$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1^{F1} \rangle}{R_1^{F1}} \qquad v_2 = \frac{\langle u_2 Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}{R_1^{F1} R_1^{F3}}$$

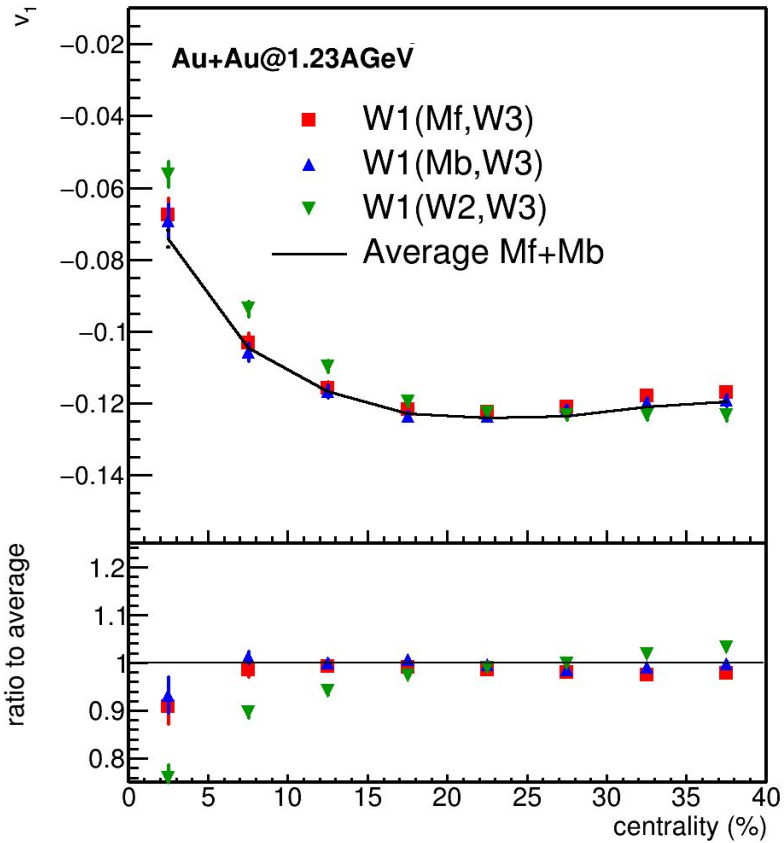
Где R_1 — разрешение плоскости симметрии

$$R_1^{F1} = \langle \cos(\Psi_1^{F1} - \Psi_1^{RP}) \rangle$$

Обозначение “F2(F1,F3)” раскрывается как R_1 вычисленный следующим образом:

$$R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$

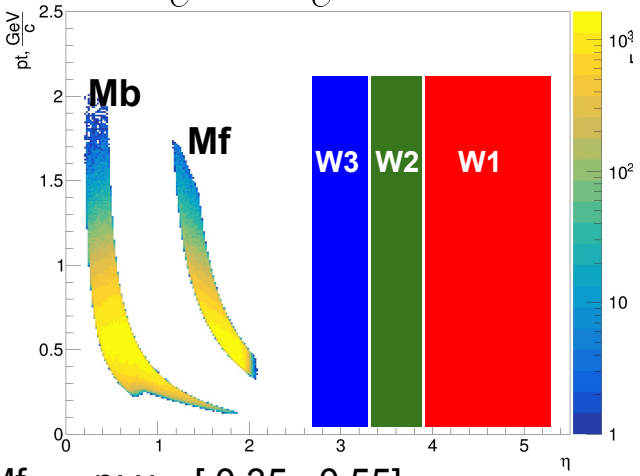
M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281
M Mamaev et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012122



Остаточный вклад непотоковых корреляций < 5%

Векторы потока

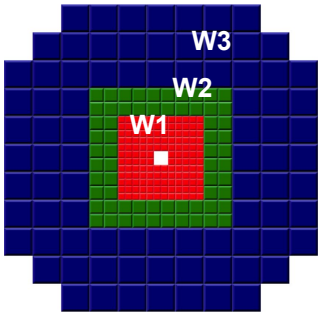
$$\vec{Q}_n = \frac{\sum_{k=1}^{M} w_k u_n^k}{C} = \frac{|Q|}{C}(\cos n\Psi_n^{EP} \sin n\Psi_n^{EP})$$



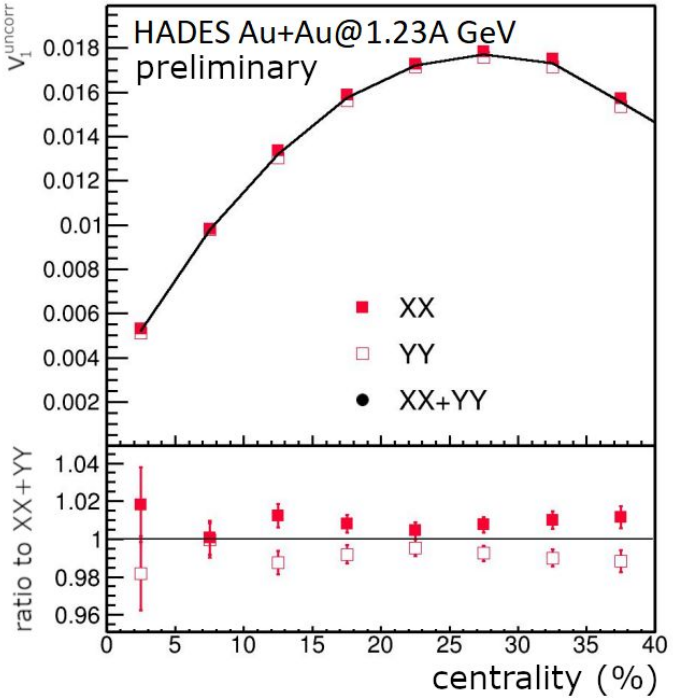
Mf — p; y_{cm} [0.35, 0.55]
Mb — p; y_{cm} [-0.55, -0.35]

Заряженные фрагменты:

W1: 3.77 < η < 5.38
W2: 3.28 < η < 3.88
W3: 2.68 < η < 3.35



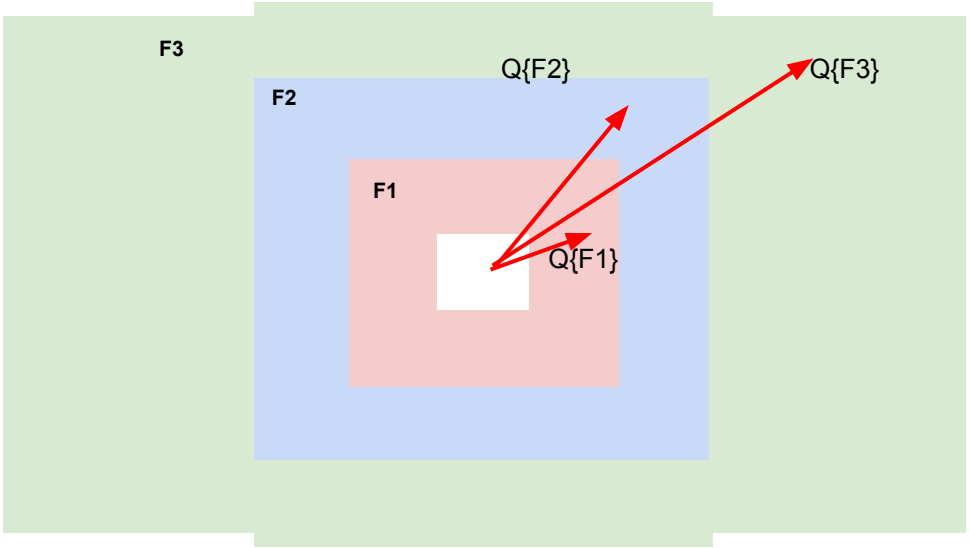
$$\frac{\langle u_n^x Q_n^x \rangle}{R_n^x} = \frac{\langle u_n^y Q_n^y \rangle}{R_n^y}$$

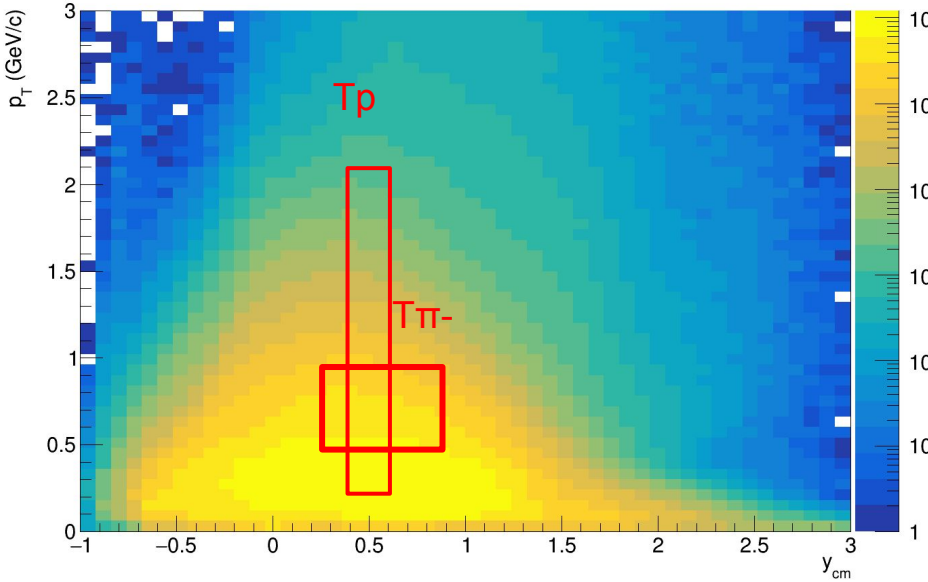


Вклад из-за азимутальной неоднородности акцетанса < 2%

Q-вектора из FHCal и треков заряженных частиц

Mamaev, M., Taranenko, A. Particles, 2023, 6(2), pp. 622–637





3 вектора из FHCal:

F1: 4.4 < η < 5.5; w=E_{kin}

F2: 3.9 < η < 4.4; w=E_{kin}

F3: 3.1 < η < 3.9; w=E_{kin}

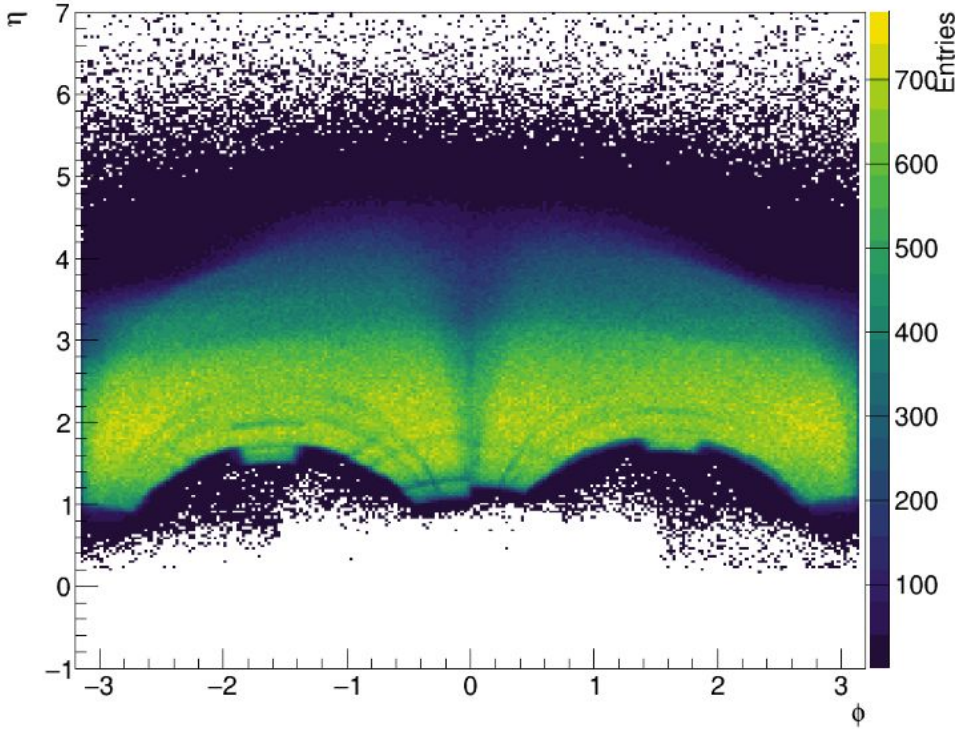
Дополнительные подсобытия из рожденных частиц:

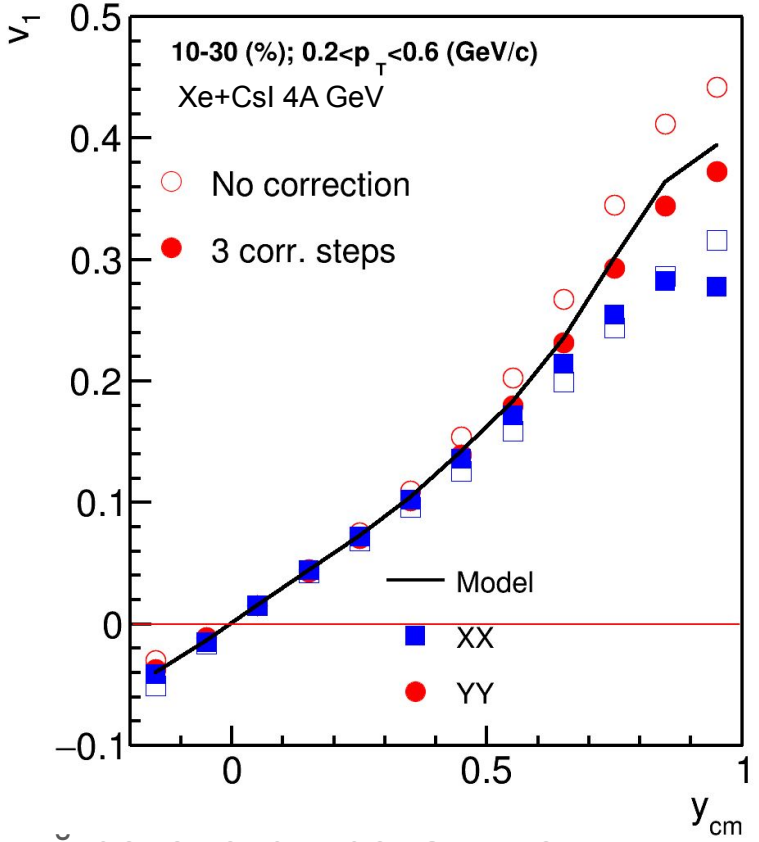
Tp: p; 0.4<y<0.6; 0.2 < p_T < 2 GeV/c; w=1/eff

Tπ: π-; 0.2<y<0.8; 0.1 < p_T < 0.5 GeV/c; w=1/eff

T-: all negative; 1.0<η<2.0; 0.1 < p_T < 0.5 GeV/c;

Коррекции на неоднородный аксептанс BM@N

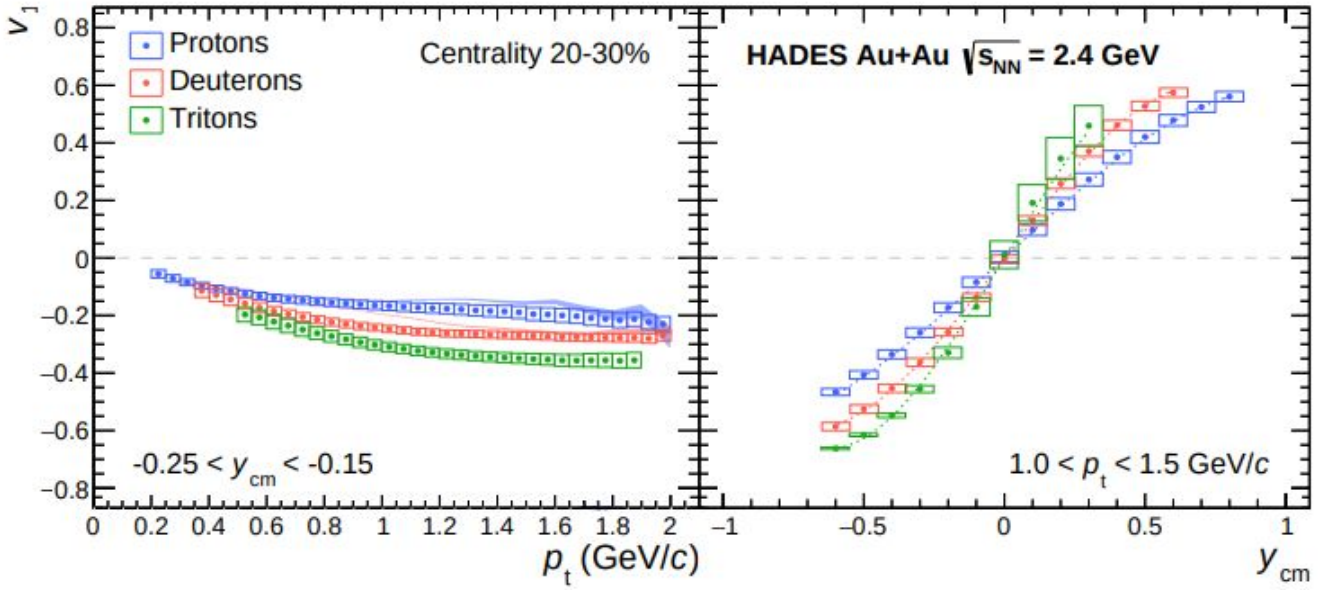




После применения коррекций реконструированные и модельные данные v_1 сходятся

Разработанный метод измерения v_n

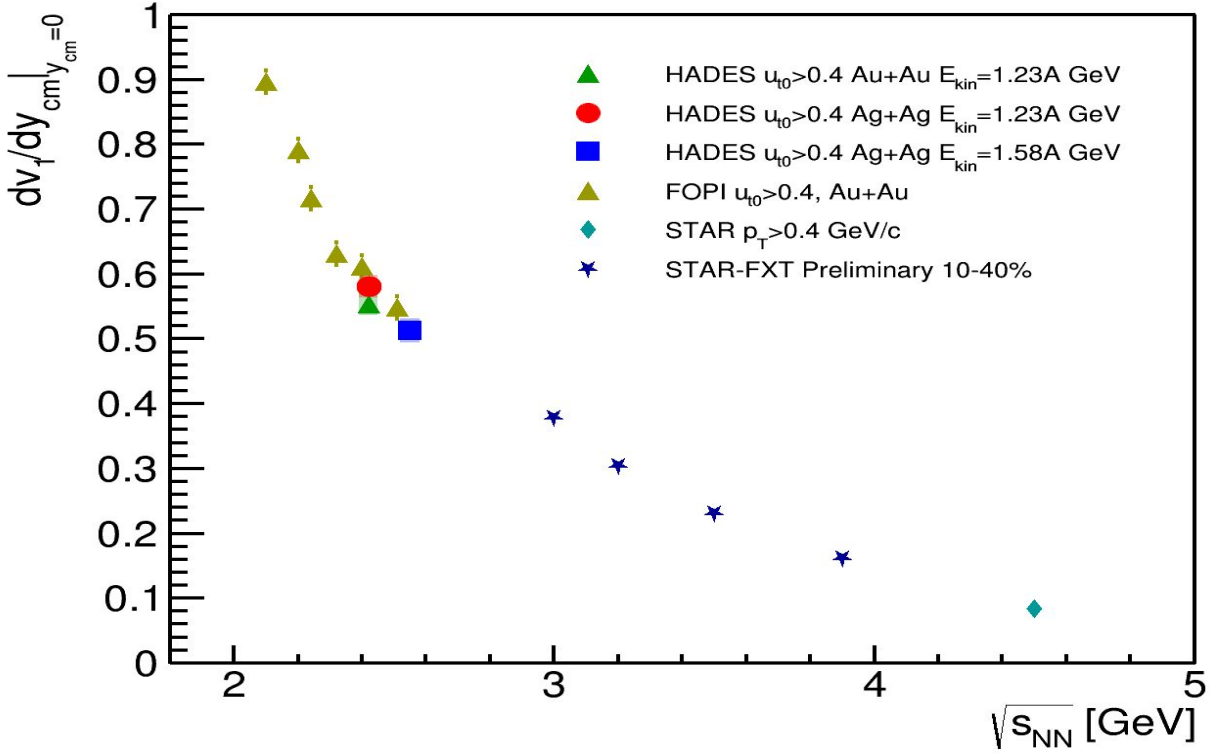
Коллективные потоки в столкновениях Au+Au при E_{kin}=1.23*A* ГэВ



Первые детальные измерения коллективных потоков v_n (до 6 гармоники) в столкновениях Au+Au при энергии 1.23 АГэВ ($\sqrt{s_{NN}}$ = 2.4 ГэВ)

Вклад автора в работу: сравнение методов измерения v_n и оценка вклада непотоковых корреляций

Сравнение результатов с существующими мировыми данными



Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — Т. 21, № 4. — С. 661—663.

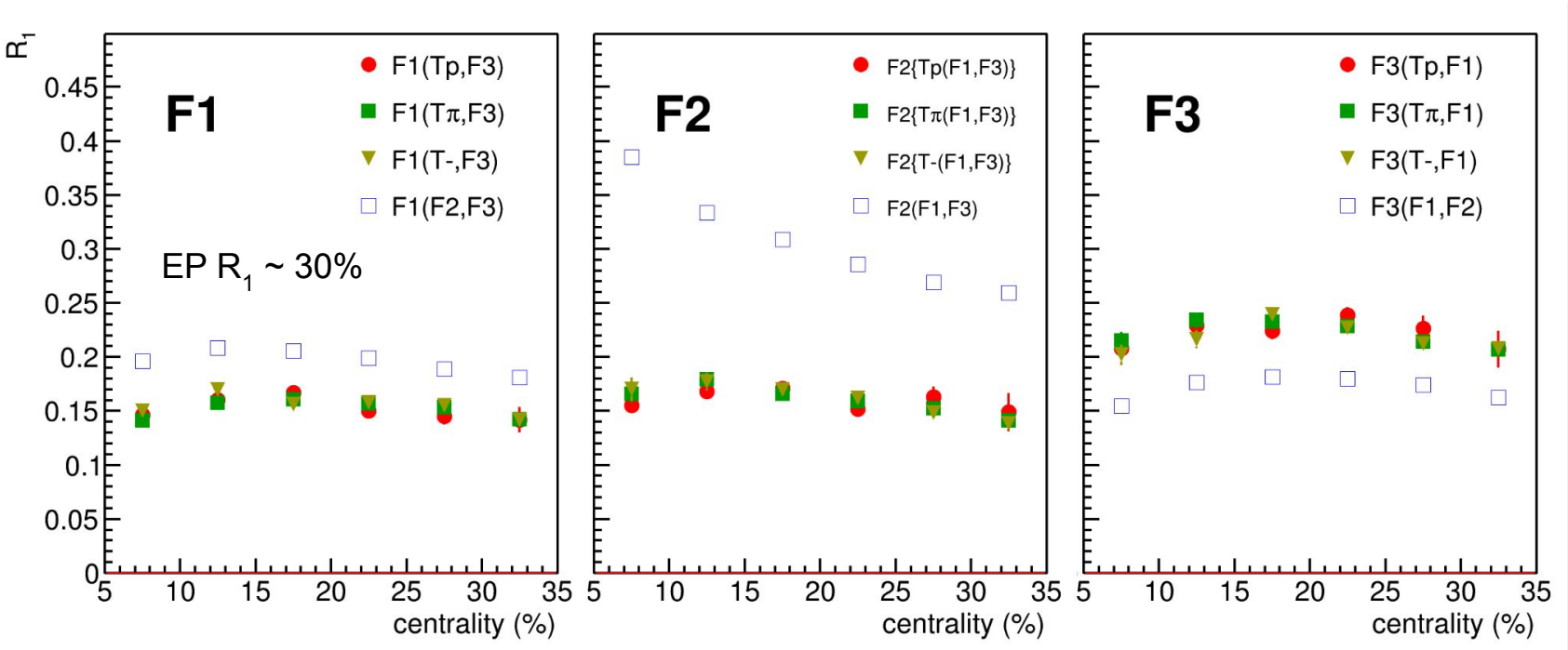
Измеренные значения dv_1/dy протонов хорошо согласуются с данными других экспериментов

Результаты анализа анизотропных потоков на HADES

- Разработан метод учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц (непотоковых корреляций), и изучено их влияние на результаты измерения коллективных потоков в области энергий 1,2-4A ГэВ.
- Впервые получены зависимости v_1 протонов от быстроты и поперечного импульса, а также наклона $dv_1/dy_{cm}|_{ycm=0}$ в области средних быстрот в столкновениях Au+Au при энергии E_{kin}=1,23*A* ГэВ и Ag+Ag при энергиях E_{kin}=1,23*A* и E_{kin}=1,58*A* ГэВ в эксперименте HADES. Полученные новые результаты измерения v_1 протонов современными методами анализа являются принципиально важными для проверки и дальнейшего развития теоретических моделей ядро-ядерных столкновений.
- Обнаружено масштабирование направленного потока протонов с~временем пролета ядер t_{pass} и геометрией столкновения в области энергий E_{kin}=1,23*A* и E_{kin}=1,58*A* ГэВ, что позволяет оценить влияние спектаторов налетающего ядра на формирование направленного потока протонов.

Скалярное произведение: зависимость разрешения плоскости событий R_1 от центральности (модельные данные Xe+Cs(I) E_{kin} = 3.8 АГэВ)

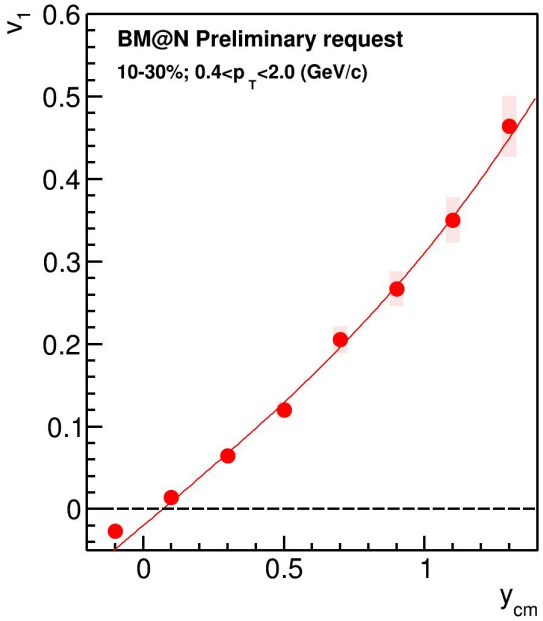
Mamaev M. Phys. Part. Nucl. Lett. — 2023. — Т. 20, № 5. — С. 1205—1208.

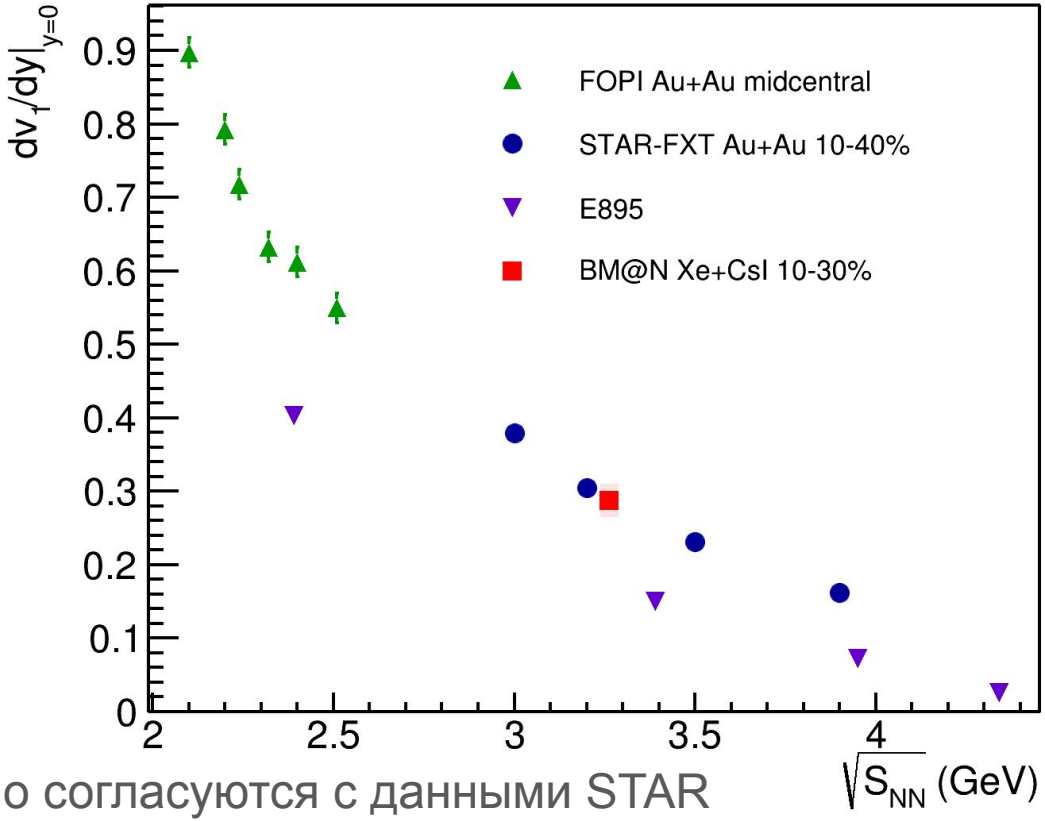


Использование дополнительных подсобытий из треков заряженных частиц даёт согласованные значения для разрешения плоскости симметрии R_1

dv_1/dy протонов в экспериментальных данных Xe+CsI E_{kin}=3.8*A* ГэВ

Mamaev M. Int. J. Mod. Phys. E. — 2024. — Т. 33, №11. — С. 2441009.

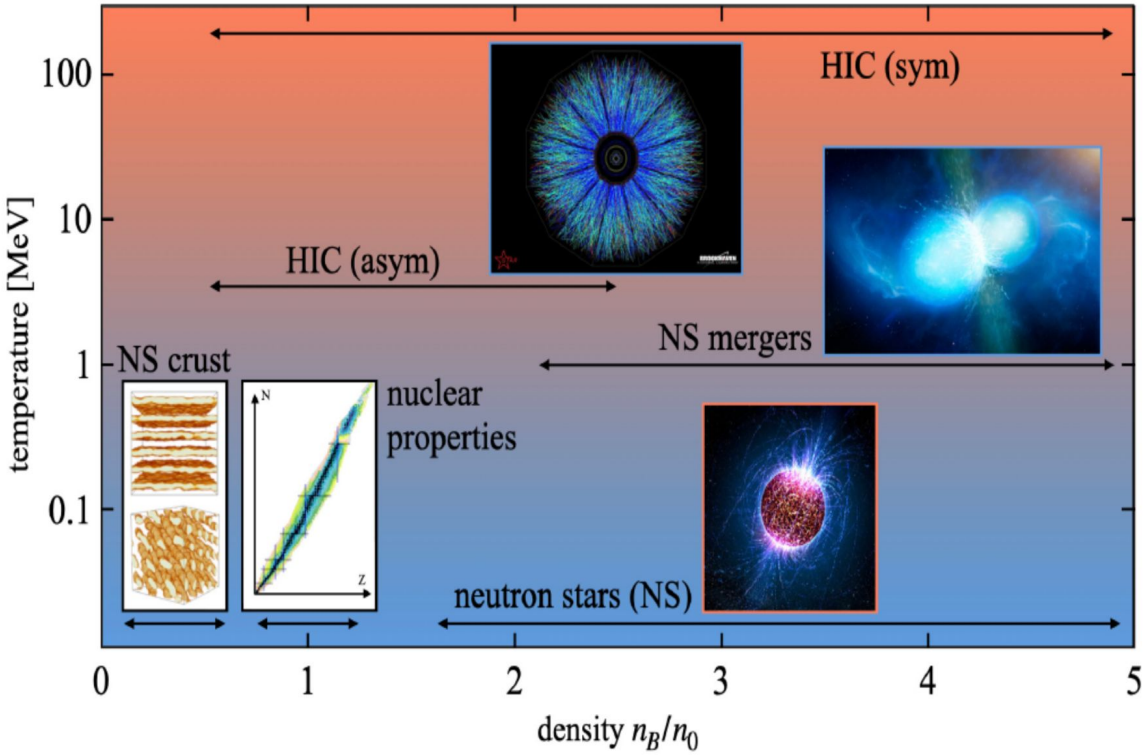


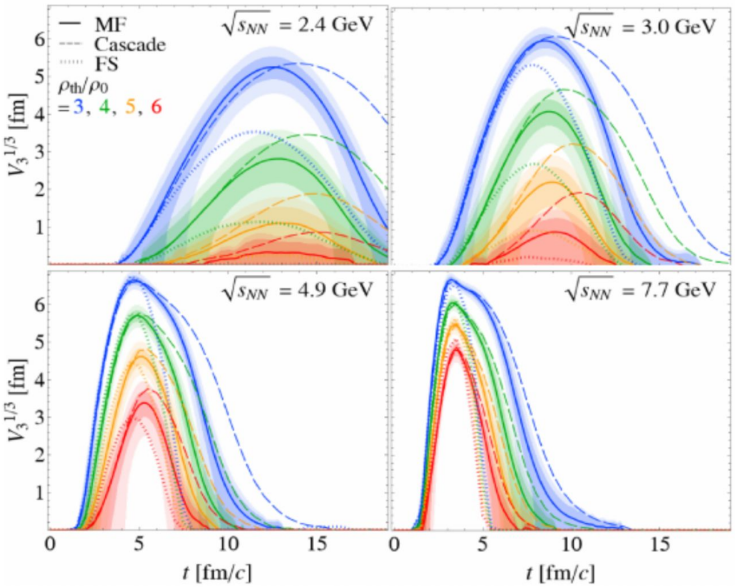


dv_1/dy хорошо согласуются с данными STAR

Сжатая барионная материя в столкновениях релятивистких ядер и астрофизике

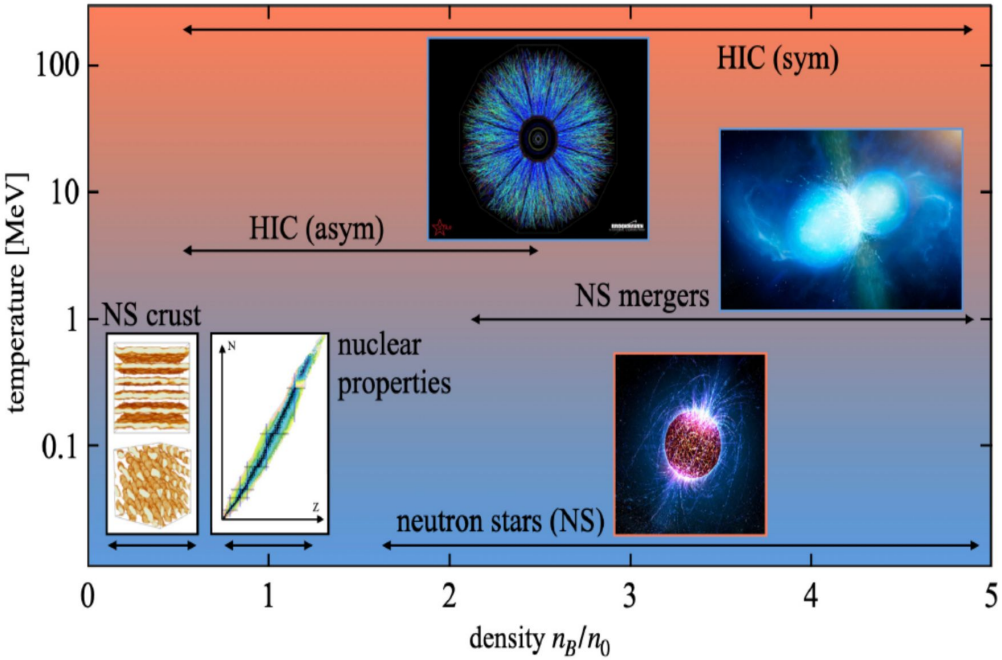
J.Subatomic Part.Cosmol. 3 (2025) 100015

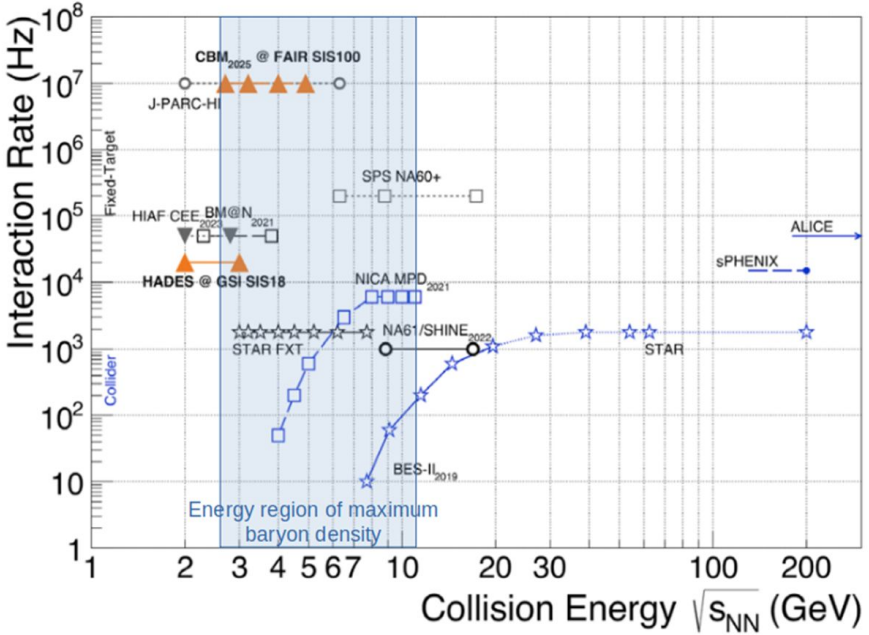




Сжатая барионная материя в столкновениях релятивистких ядер и астрофизике

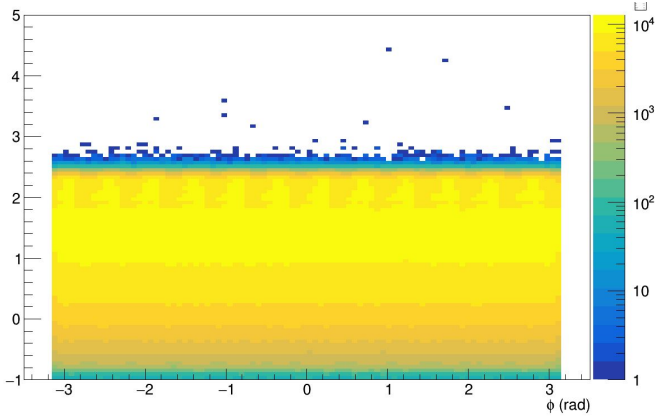
J.Subatomic Part.Cosmol. 3 (2025) 100015



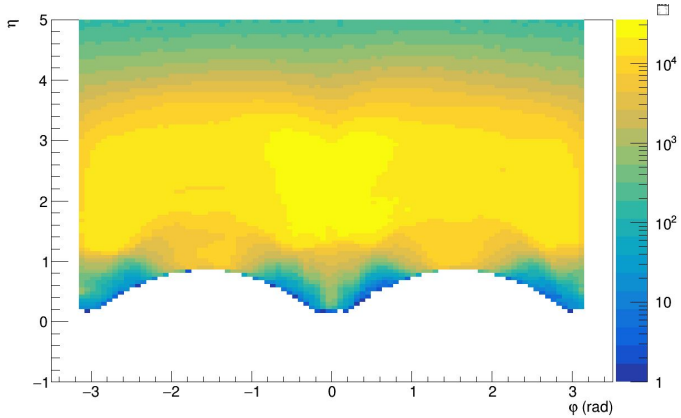


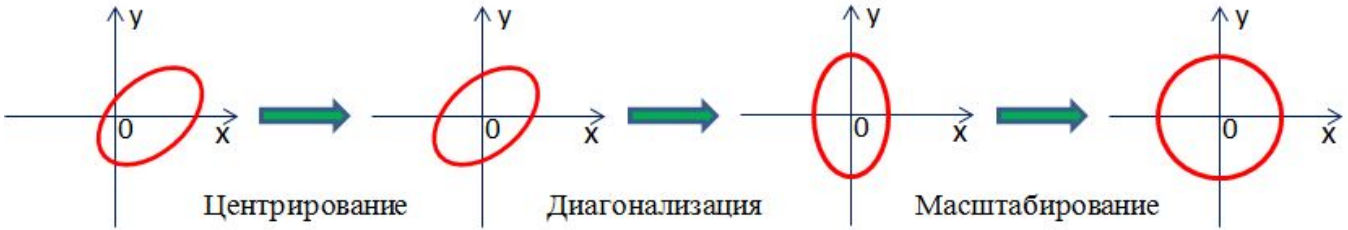
Влияние азимутального аксептанса на v_n

Однородный азимутальный аксептанс



Неоднородный азимутальный аксептанс





Коррекции на азимутальную неоднородность аксептанса (Selyuzhenkov I., Voloshin S. Phys. Rev. C. — 2008. — Т. 77. — С. 034904)

Адаптирован для экспериментов с фиксированной мишенью: https://github.com/mam-mih-val/qntools_macros