

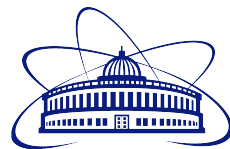
Directed flow at heavy-ion collisions with BM@N

M.Mamaev
MEPhI, JINR

The work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project "Fundamental and applied research at the NICA (JINR) megascience experimental complex" № FSWU-2025-0014

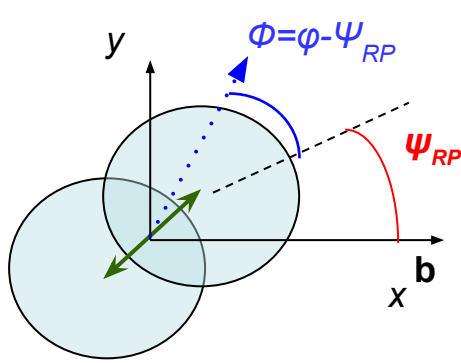


29th International Scientific Conference of Young Scientists and
Specialists (AYSS-2025)
27/10/2025

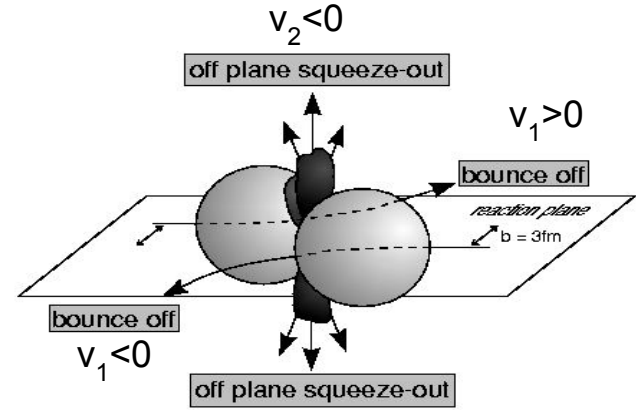
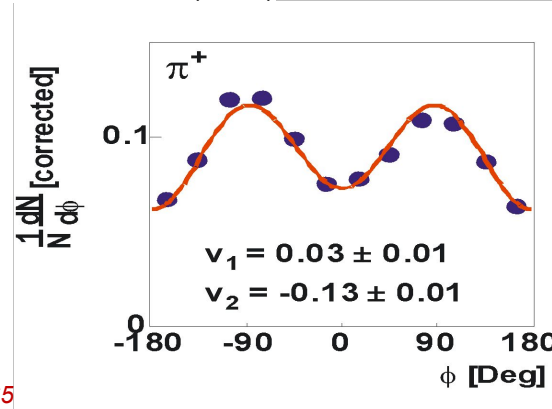


Azimuthal anisotropic flow 1989-2000

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



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

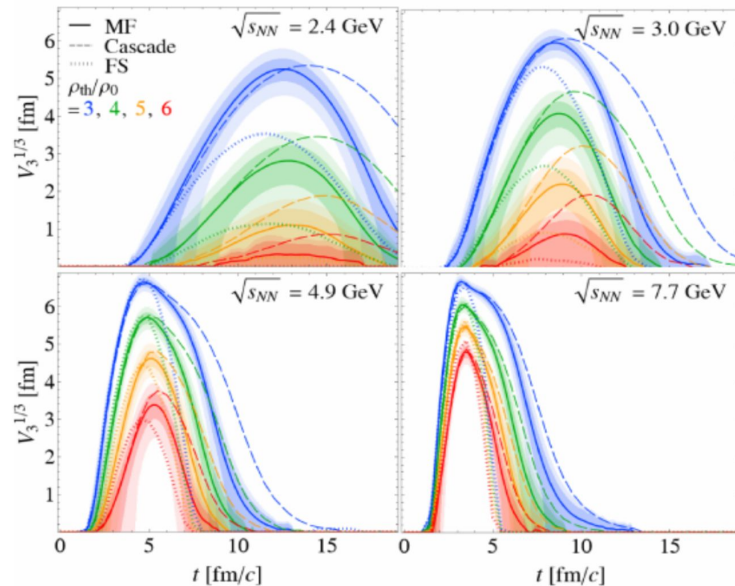
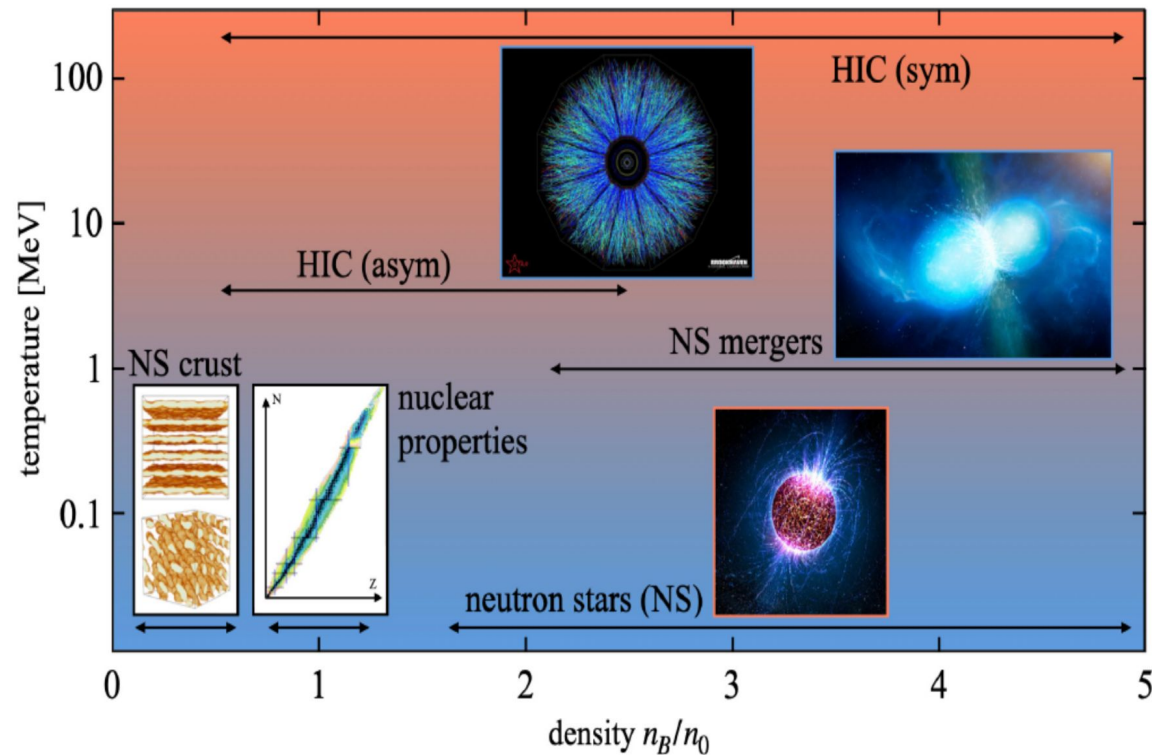
The anisotropy is quantified by decomposing the azimuthal distribution in a Fourier series

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

v_1 is directed flow, v_2 — elliptics and v_3 — triangular

Compressed baryonic matter at the laboratory and in astrophysics

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



Equation of state (EoS) of compressed baryonic matter

Pressure

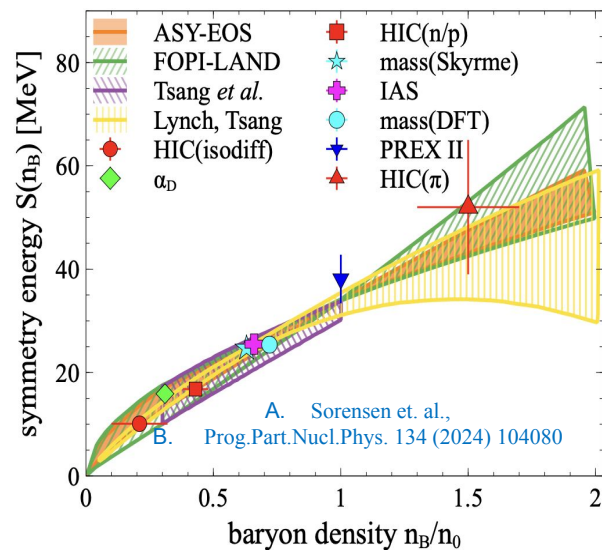
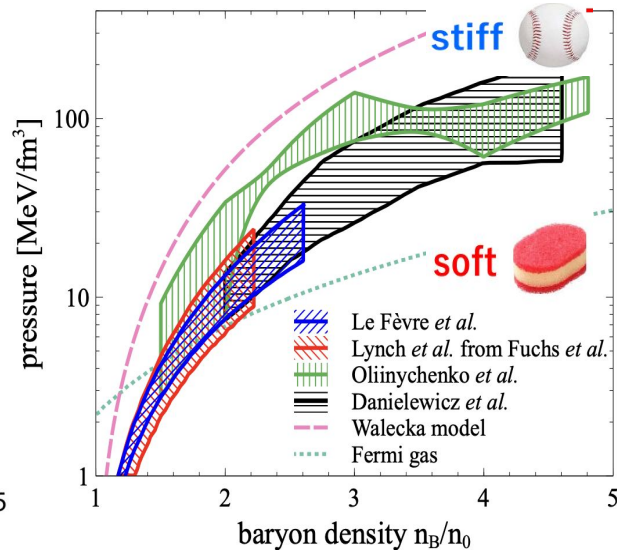
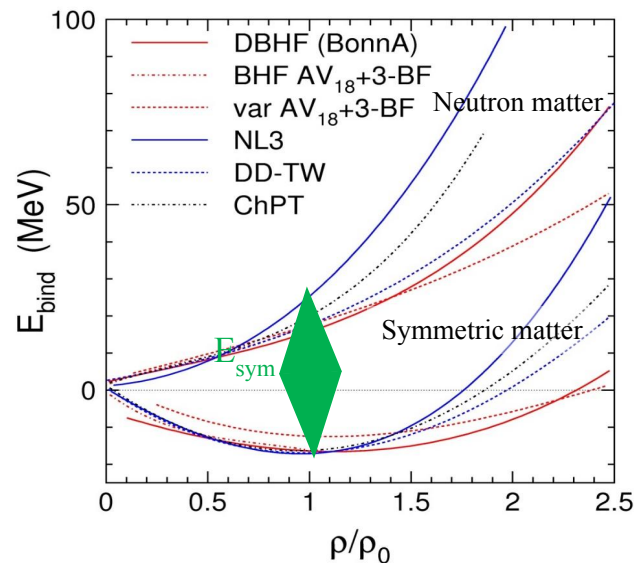
$$P = n^2 \frac{d(E/A)}{dn_b}$$

Energy per nucleon $\rightarrow \frac{E}{A} = m_N + E_A(n_B) + E_{\text{sym}}(n_B) \frac{(n_p - n_n)^2}{n_B^2}$

Isospin asymmetry $n_B = n_p + n_n$

Isospin-symmetric matter

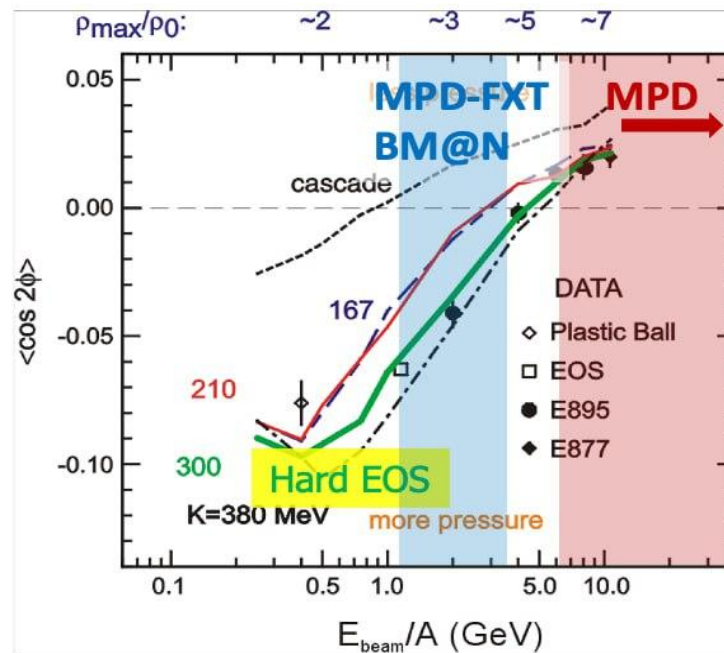
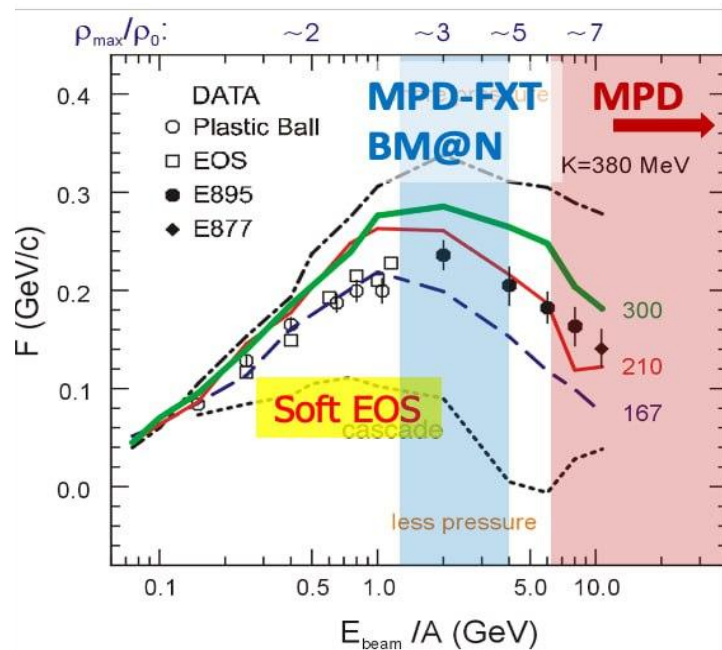
Symmetry energy



EOS relates the density (n_B), pressure (P), temperature (T), energy (E), and isospin asymmetry $(n_p - n_n)/n_B$

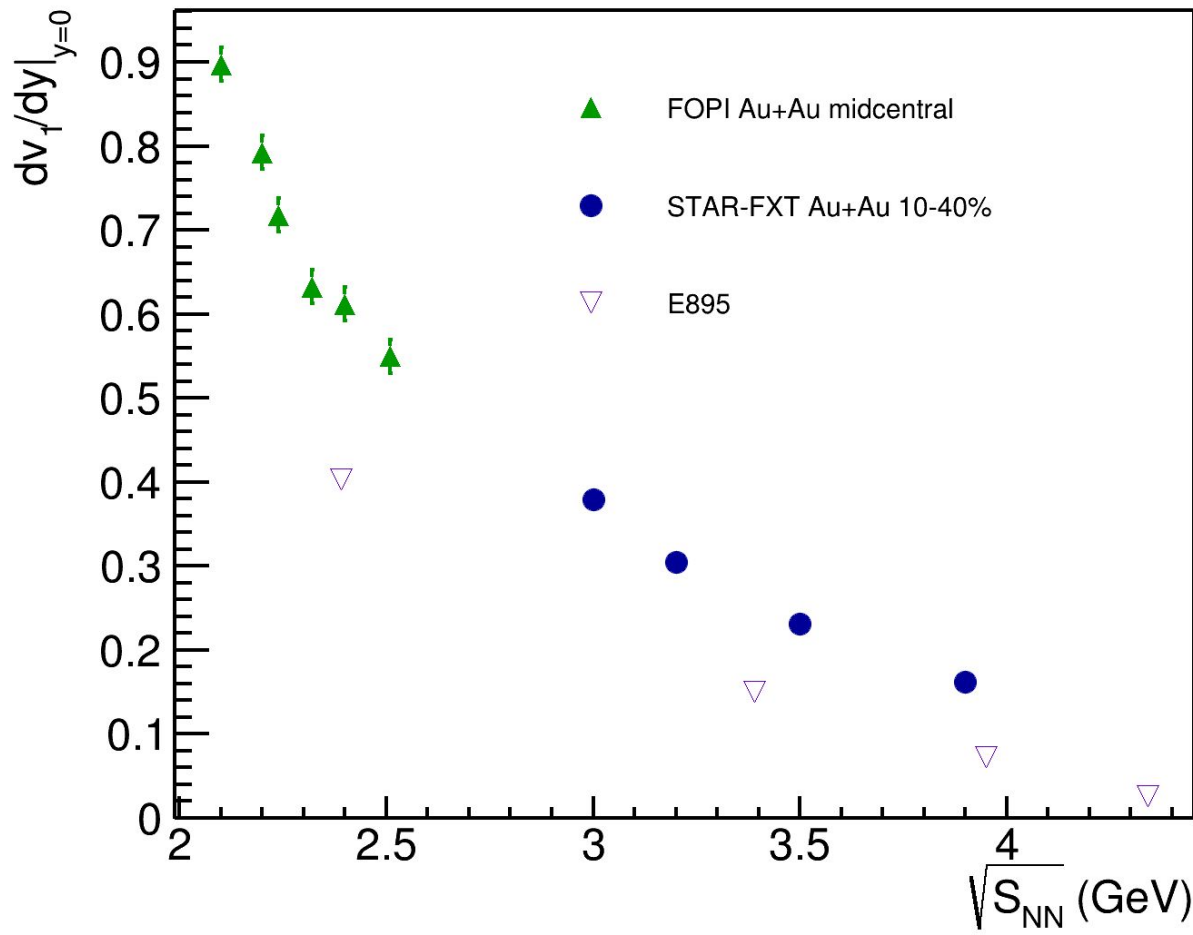
v_n at the energy of NUCLOTRON-NICA

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



- **Ambiguity of comparing experimental v_n with theoretical predictions:**
 - v_1 suggests $K_{\text{nm}} \sim 210$ MeV and v_2 suggests $K_{\text{nm}} \sim 300$ MeV
- **Additional measurements are needed to address the discrepancy of K_{nm}**

Need for a new measurements for ν_1



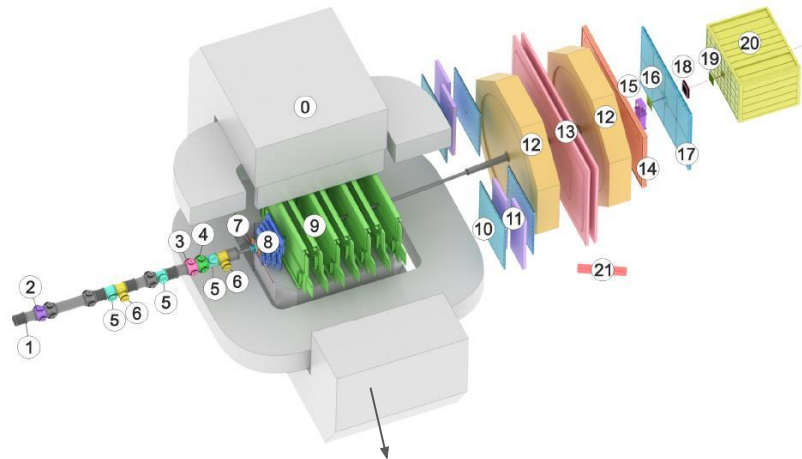
The new results are needed to address the discrepancy of dv_1/dy measured by E895 and STAR

FOPI: Nucl.Phys.A 876 (2012)
STAR: Phys.Lett.B 827 (2022)
E895: Phys.Rev.Lett. 84 (2000)

The BM@N experiment (“Baryonic matter at Nuclotron”)

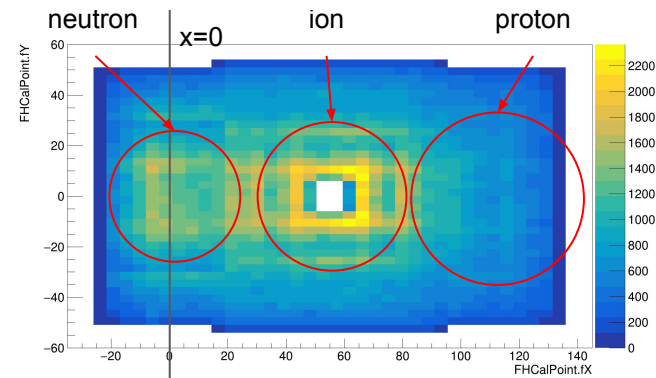
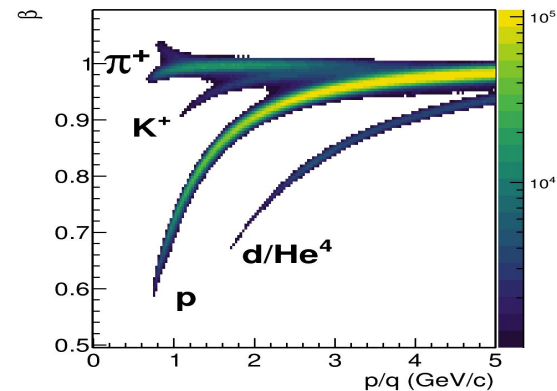
500M of Xe+Csl at $E_{\text{kin}}=3.8A$ GeV were collected in the early 2023

Nucl.Instrum.Meth.A 1065 (2024)



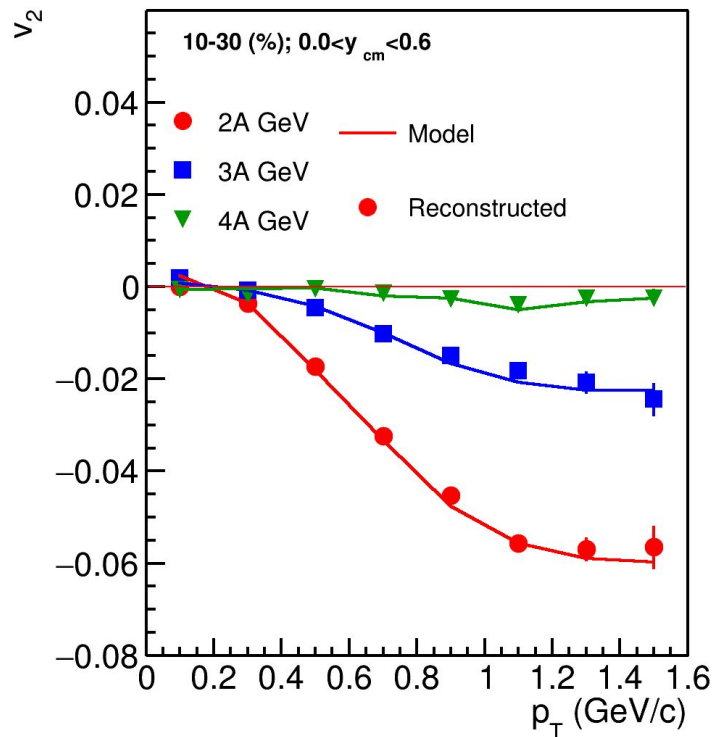
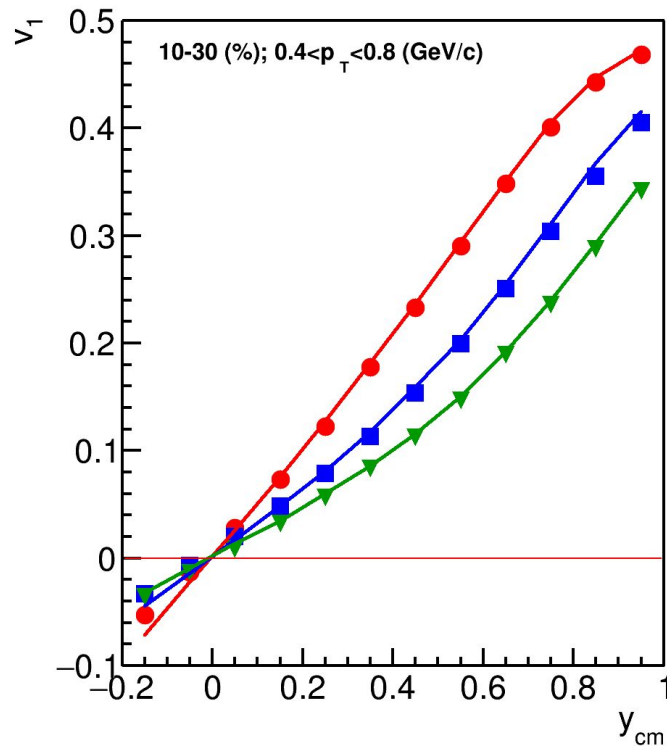
Central tracked inside the analysing magnet

- 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 m² (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC 2x1.5 m² (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH (19)
- FHCaI (20)
- HGN (21)



The symmetry plane is estimated using the azimuthal asymmetry of the spectator fragment energy deposition in FHCaI

Performance study of the BM@N experiment for measuring v_1 and v_2 in Xe+CsI collisions at the energies 2A, 3A and 4A GeV



A good agreement between reconstructed and model v_n is observed

[Mamaev, M.](#)

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

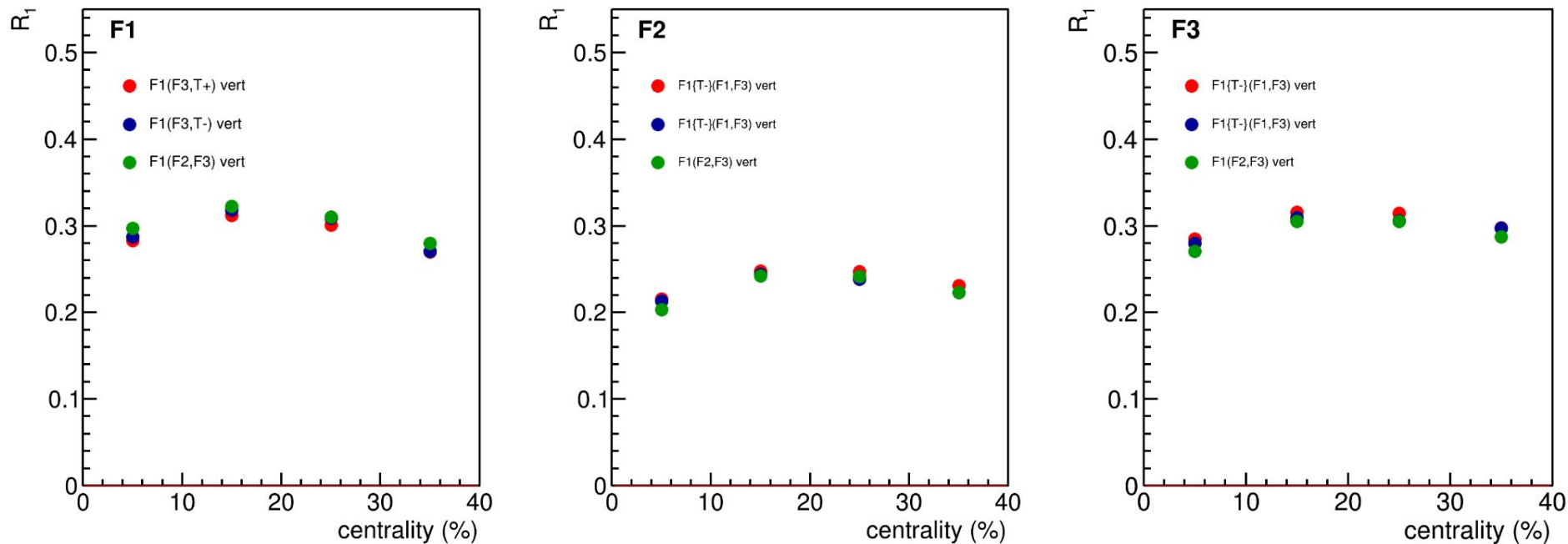
[Mamaev, M.](#)

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

[Mamaev, M.](#), [Taranenko, A.](#)

Particles, 2023, 6(2), pp.
622–637

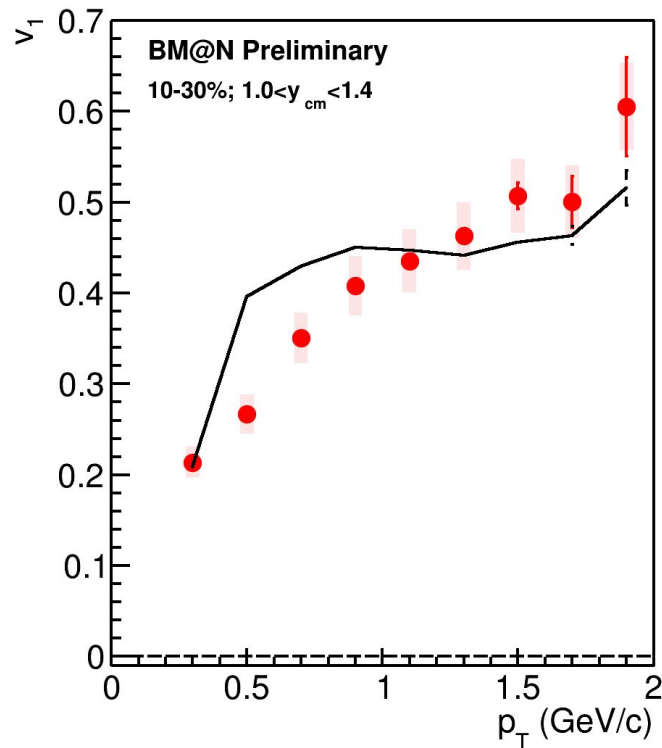
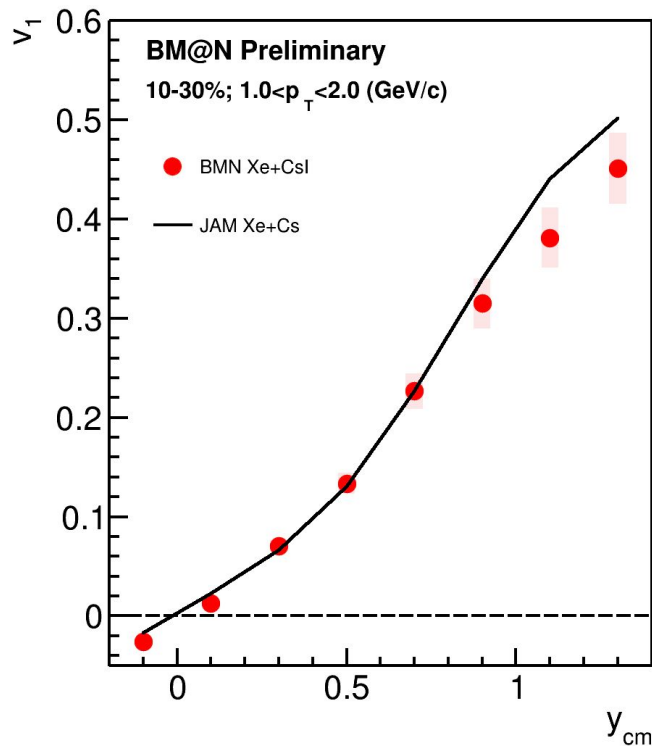
Symmetry plane resolution in Xe+CsI at $E_{\text{kin}}=3.8A$ GeV



All the R_1 estimations are in a good agreement which suggests low non-flow contribution

Proton v_1 vs rapidity and transverse momentum

Mamaev M. Int. J. Mod. Phys. E. — 2024. — T. 33, №11. — C. 2441009.



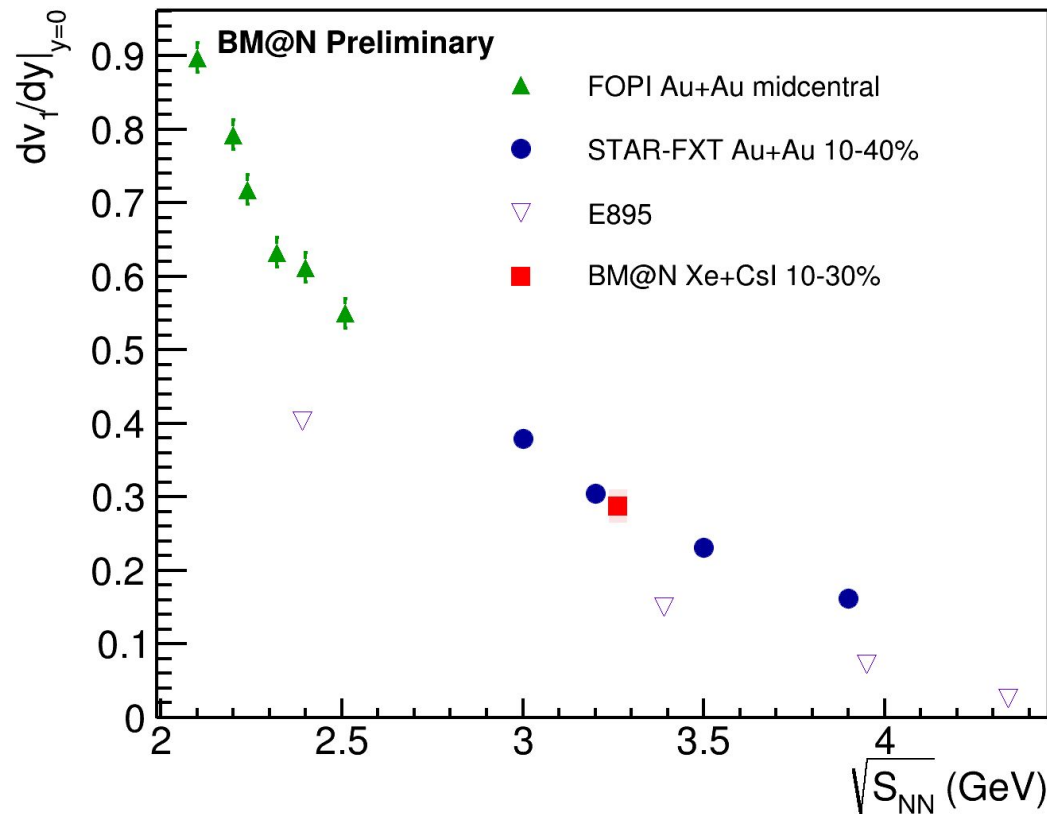
JAM agrees with experimental data within 8% at rapidities $y_{cm} < 1$

$dv_1/dy|_{y=0}$ vs collision energy

FOPI: Nucl.Phys.A 876 (2012)

STAR: Phys.Lett.B 827 (2022)

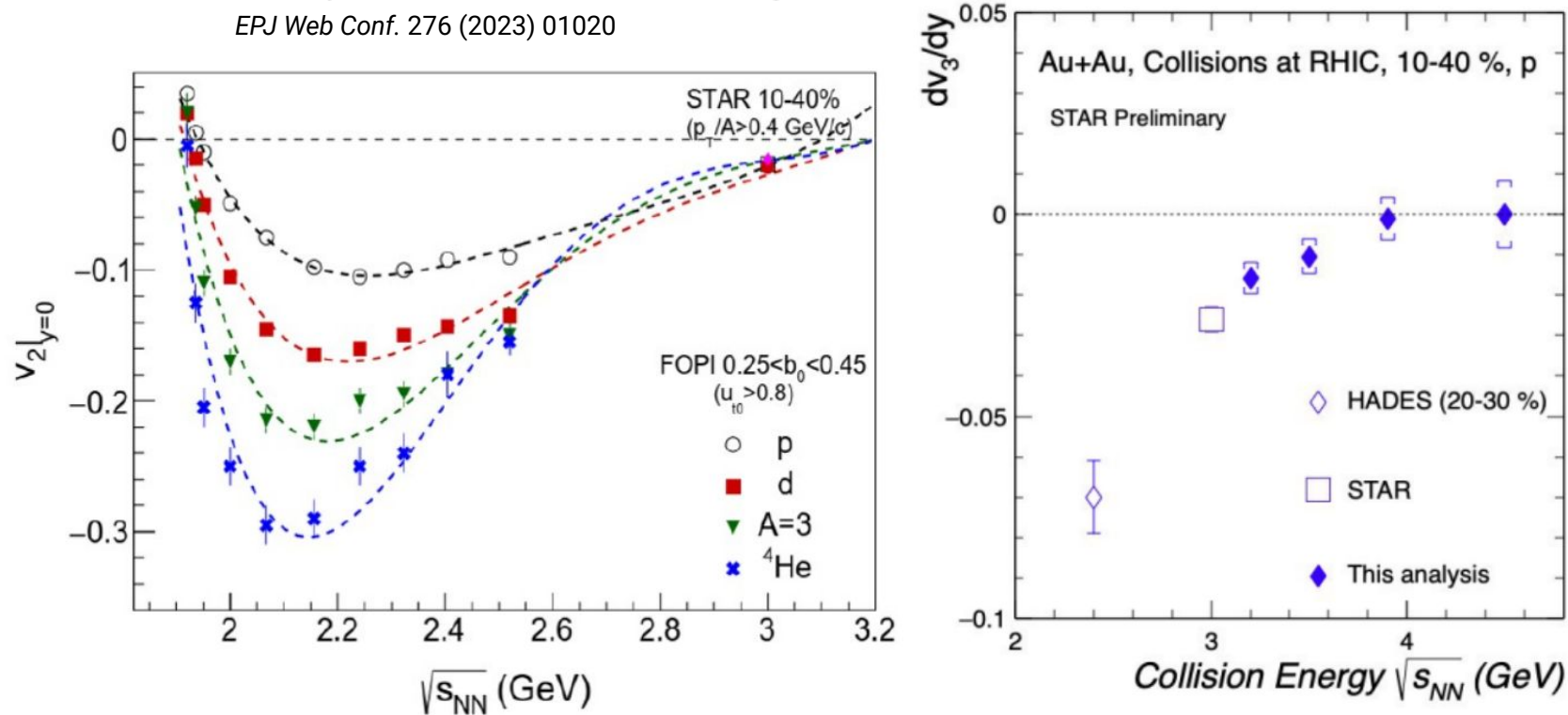
E895: Phys.Rev.Lett. 84 (2000)



- Proton data from BM@N agree with STAR measurements
- Higher directed flow of proton in BM@N and STAR data suggests more hard equation of state

BES program in the BM@N experiment

EPJ Web Conf. 276 (2023) 01020



- There are no available measurements of v_n in the region $\sqrt{s_{NN}} = 2.5 - 3.0 \text{ GeV}$
 - The upcoming BM@N BES aims to cover this energy range

BACKUP

Flow vectors

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

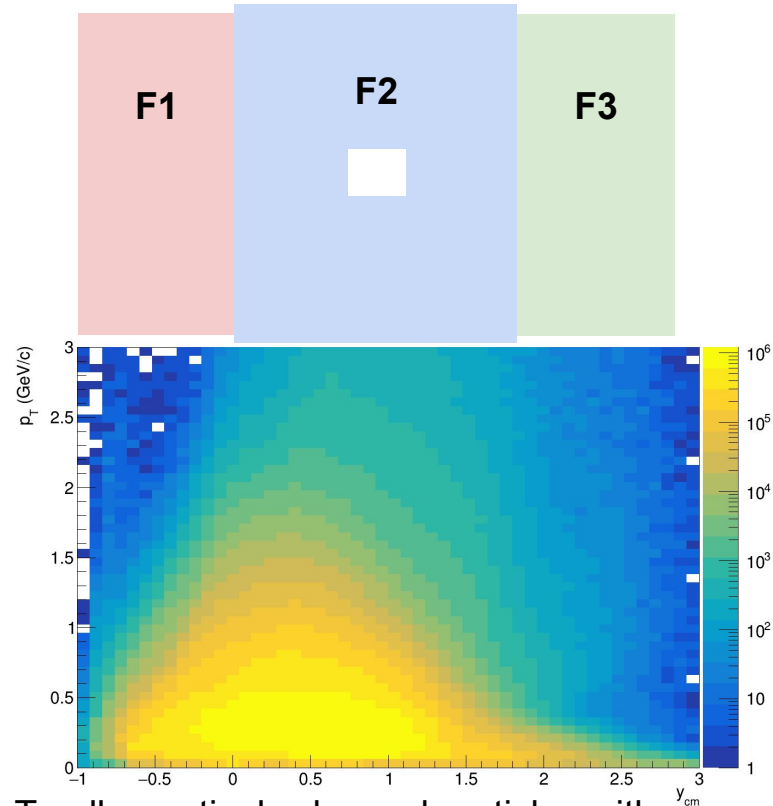
$$u_n = e^{in\phi}$$

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



T-: all negatively charged particles with:

- $1.5 < \eta < 4$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV/c}$

T+: all positively charged particles with:

- $2.0 < \eta < 3$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV/c}$

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:

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

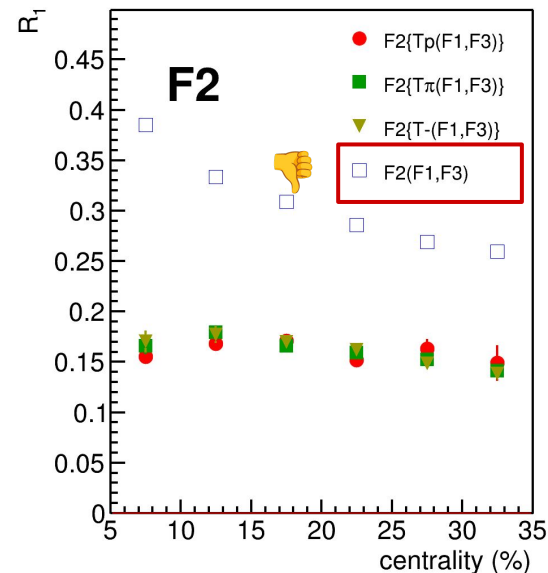
Where R_1 is the resolution correction factor

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

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

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

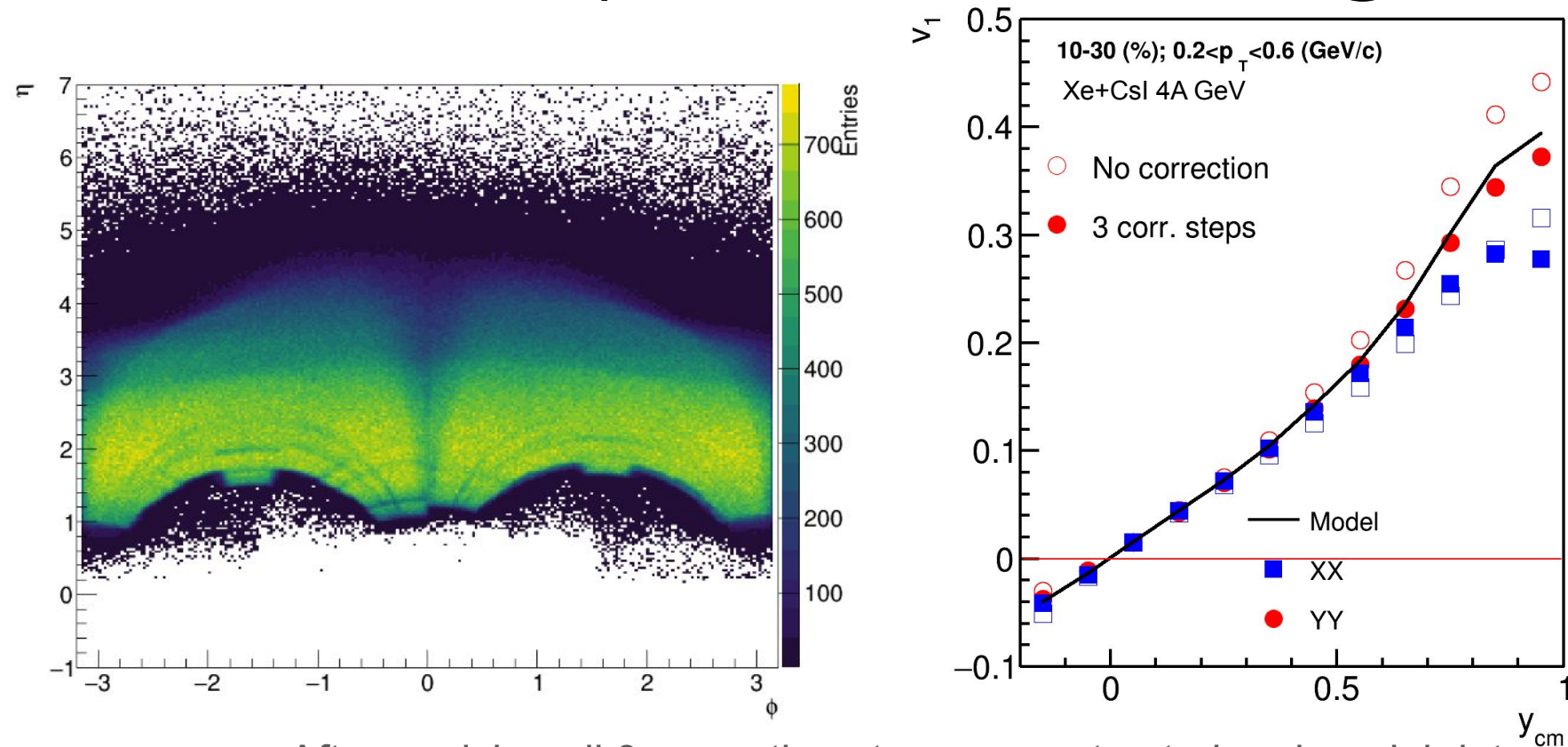
Method helps to eliminate non-flow
Using 2-subevents doesn't



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

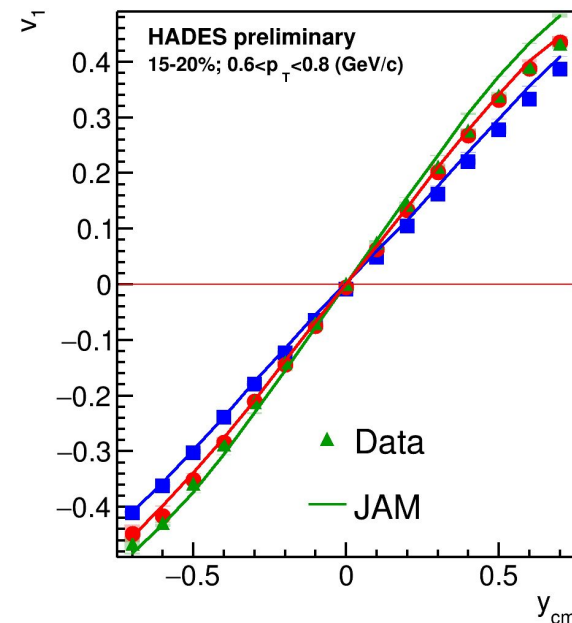
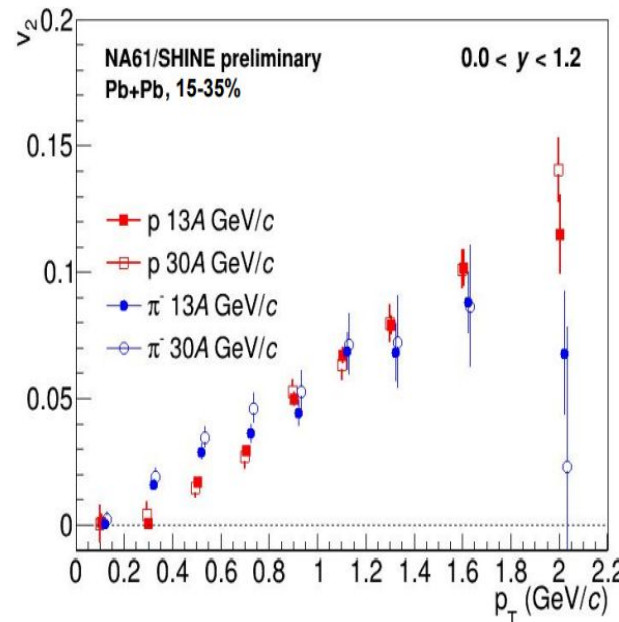
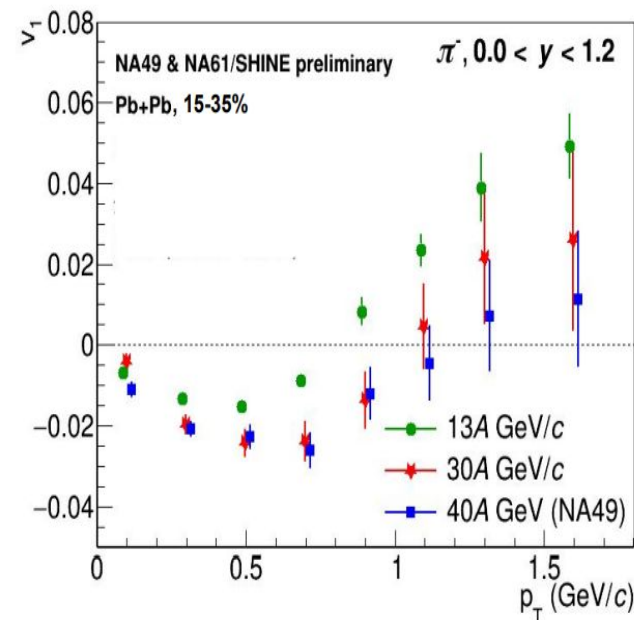
$$R_1^{F2\{Tp\}(F1,F3)} = \langle Q_1^{F2} Q_1^{Tp} \rangle \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{Tp} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{Tp} Q_1^{F3} \rangle}}$$

Non-uniform acceptance corrections in BM@N



After applying all 3 correction steps reconstructed and model data are in agreement

QnTools framework



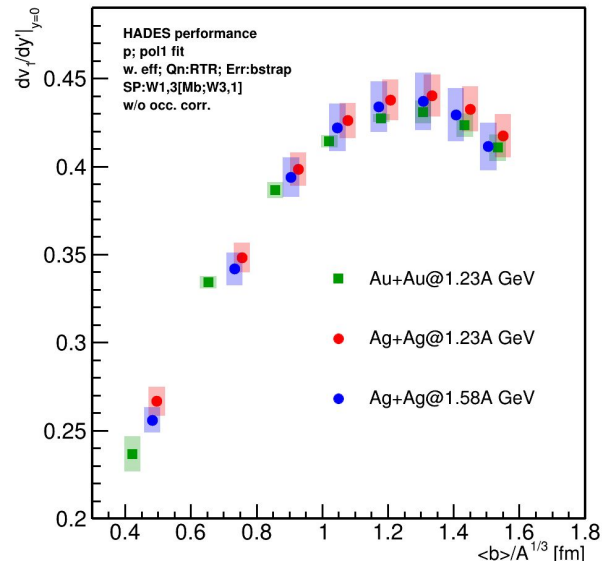
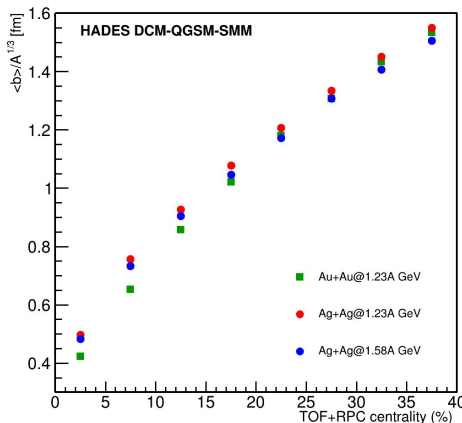
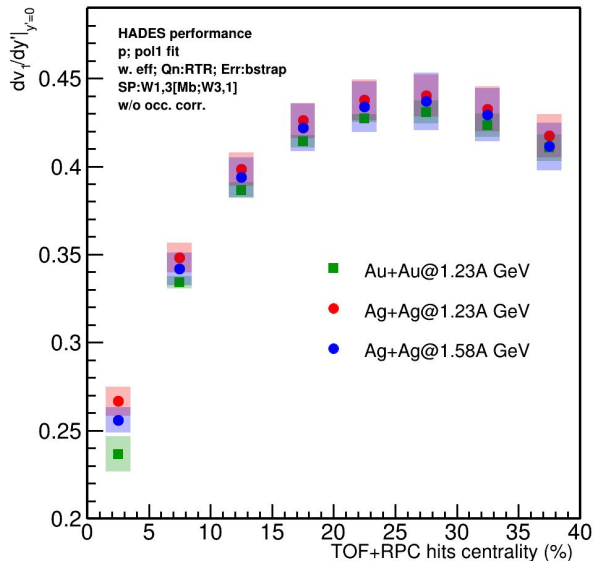
- All the methods used for performance study were carried out using QnTools framework: <https://github.com/HeavyIonAnalysis/QnTools> (well documented and well-tested)
- Methods for flow measurements in fixed-target experiments were tested on experimental data from NA61/SHINE, HADES and ALICE
- Tested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

Масштабирование dv_1/dy с энергией столкновения и размером системы

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

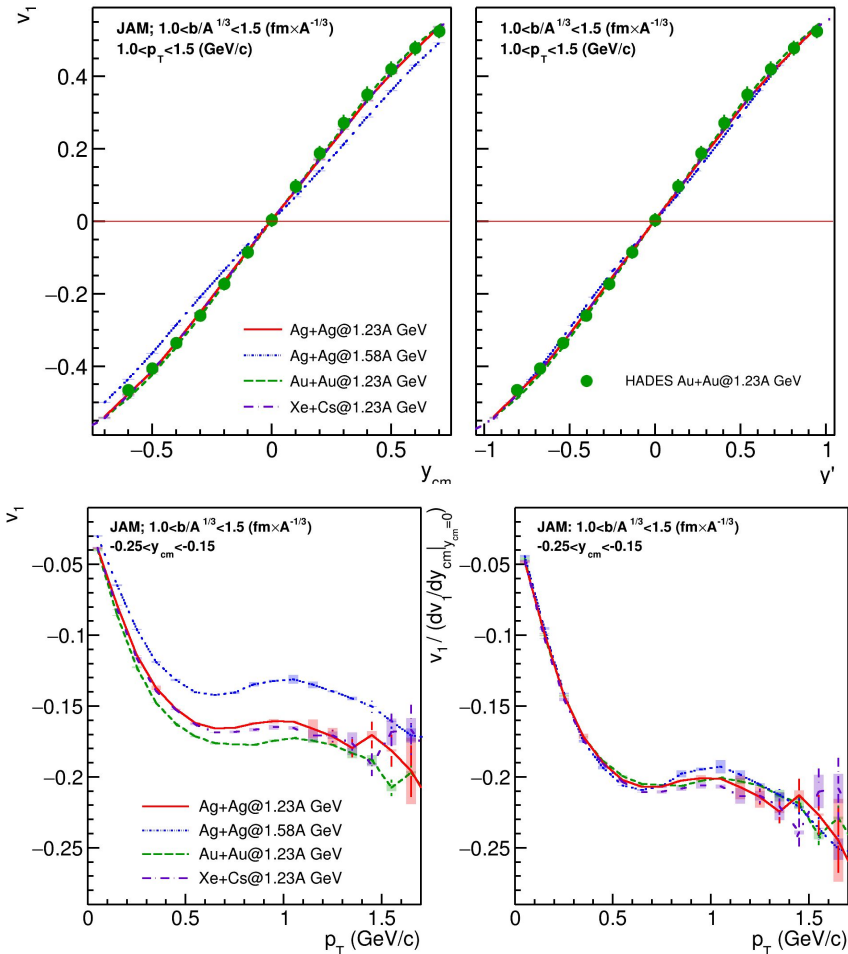
$$\text{центральность} \rightarrow \langle b \rangle / A^{1/3}$$

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



- 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:

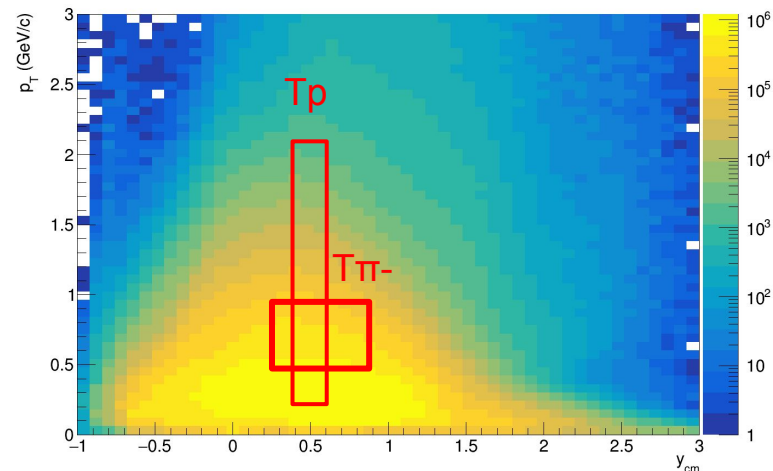
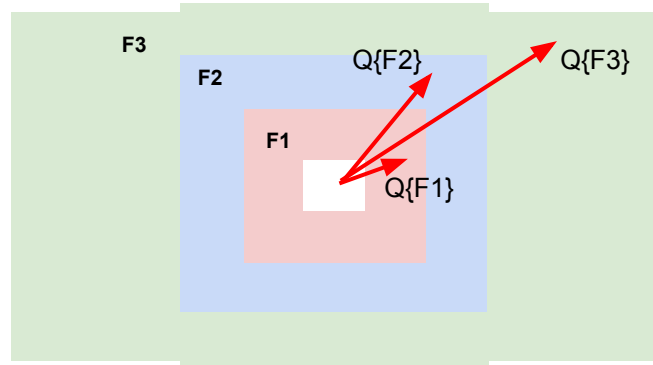
$$u_n = e^{in\phi}$$

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; $w=1/\text{eff}$

T π^- : π^- ; $0.2 < y < 0.8$; $0.1 < p_T < 0.5$ GeV/c; $w=1/\text{eff}$

T-: all negative; $1.0 < \eta < 2.0$; $0.1 < p_T < 0.5$ GeV/c; $w=1/\text{eff}$ ²⁰

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:

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

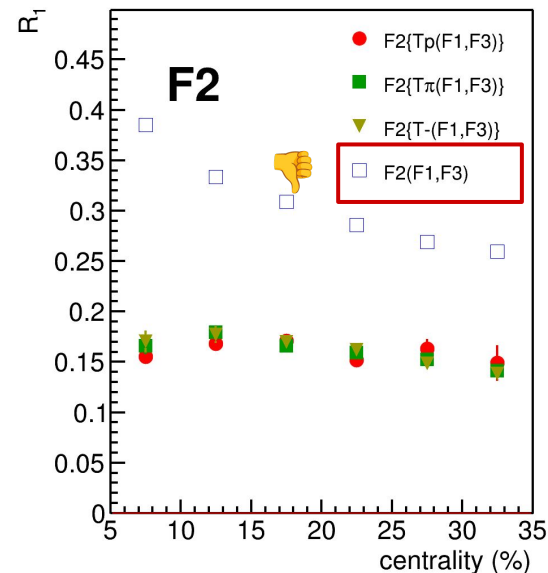
Where R_1 is the resolution correction factor

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

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

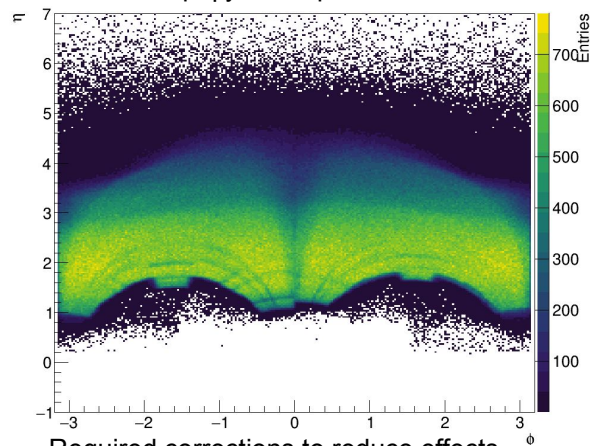


Symbol “F2{Tp}(F1,F3)” means R_1 calculated via (4S resolution):

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

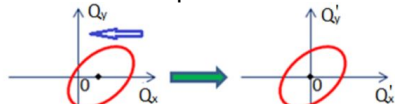
Azimuthal asymmetry of the BM@N acceptance

ϕ - η yield of protons

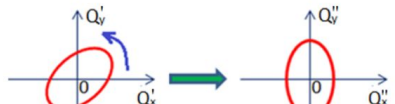


Required corrections to reduce effects of non-uniform azimuthal acceptance

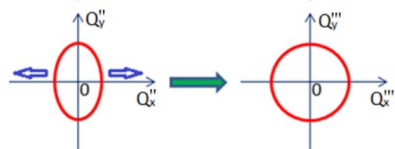
1. Recentering



2. Twist

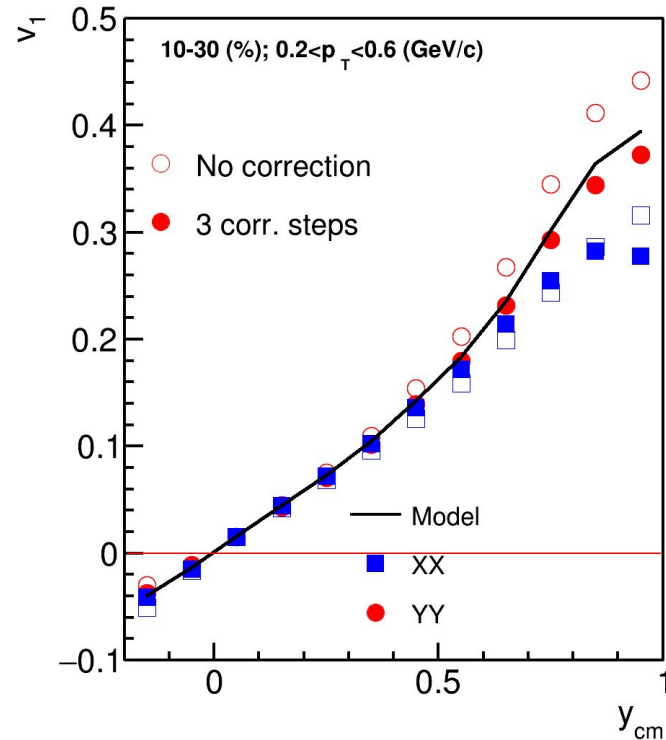


3. Rescaling



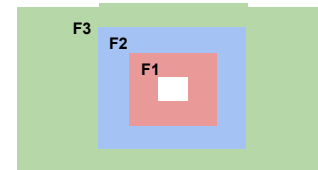
Corrections are based on method in:

I. Selyuzhenkov and S. Voloshin PRC77, 034904 (2008)



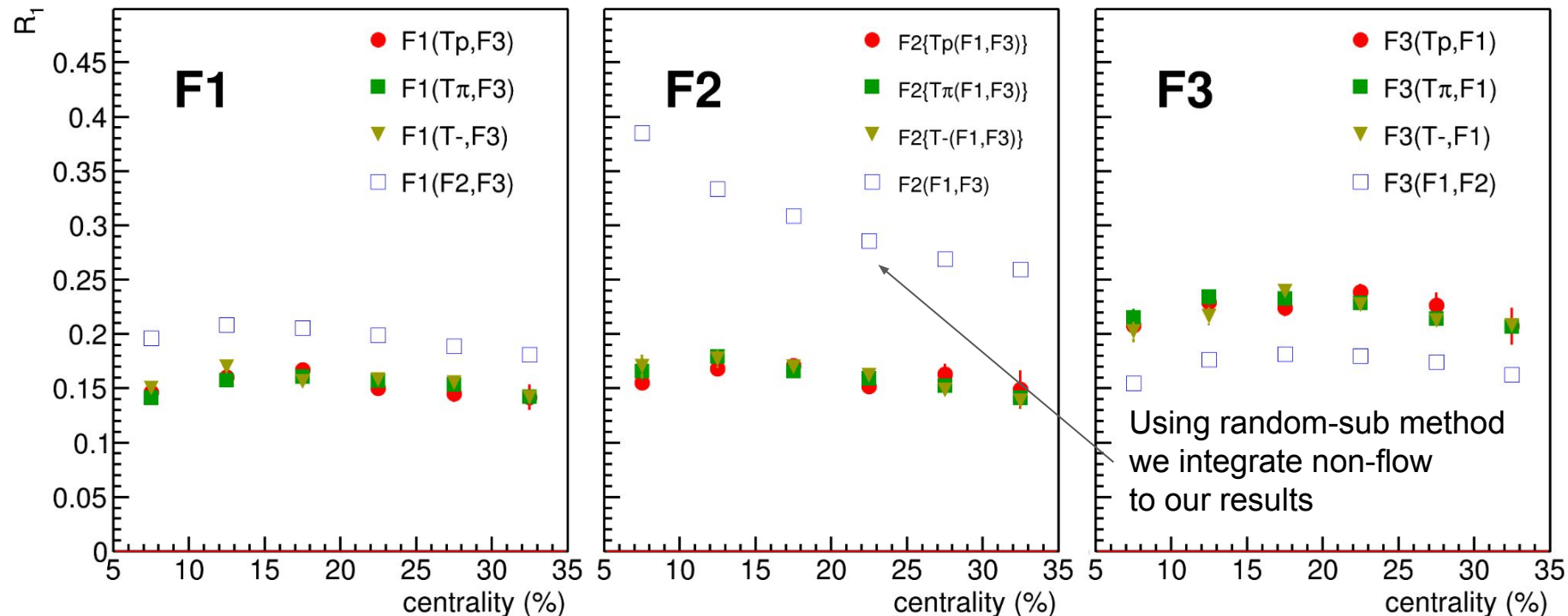
- Better agreement after rescaling for YY
- XX component has a large bias (due to magnetic field)

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



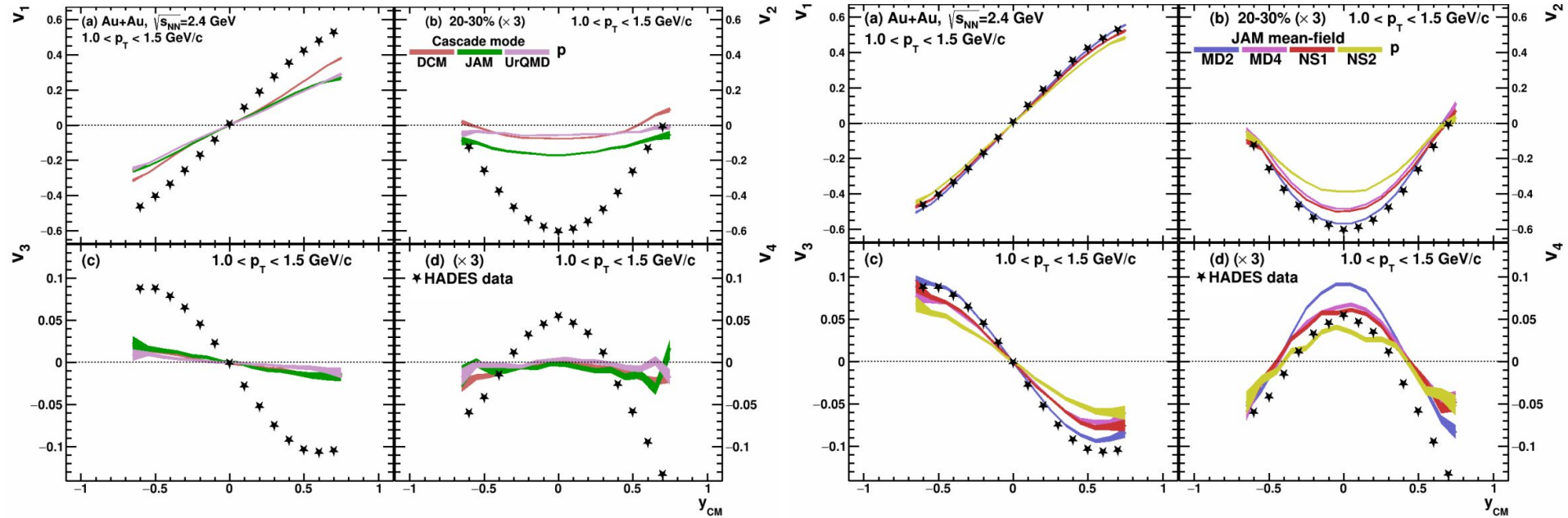
SP gives unbiased estimation of v_n (root-mean-square)

EP gives biased estimation (somewhere between mean and RMS)



Using the additional sub-events from tracking provides a robust combination to calculate resolution ²³

Models



- 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:

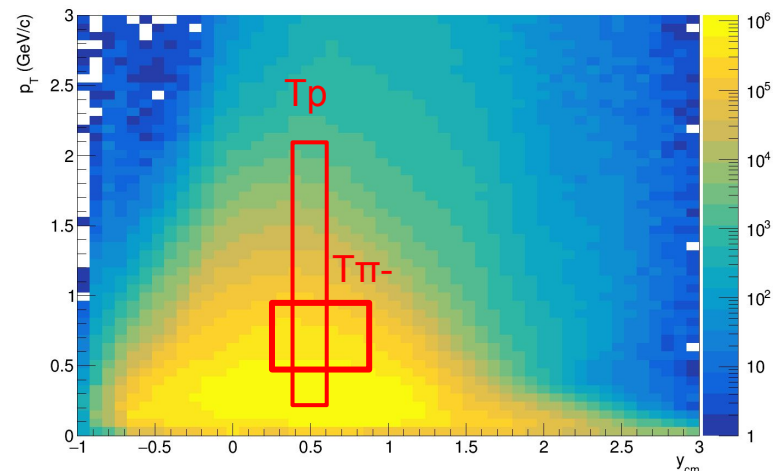
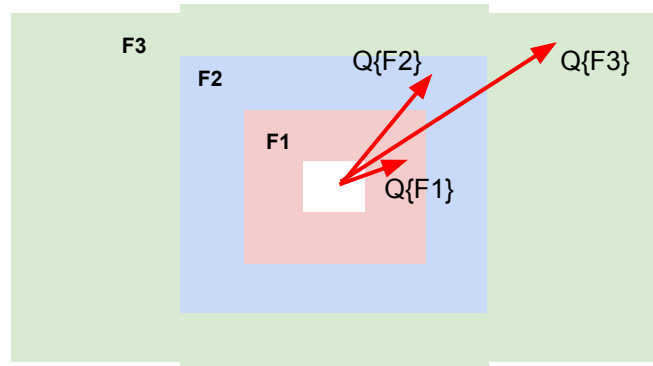
$$u_n = e^{in\phi}$$

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; $w=1/\text{eff}$

Tπ-: π-; $0.2 < y < 0.8$; $0.1 < p_T < 0.5$ GeV/c; $w=1/\text{eff}$

T-: all negative; $1.0 < \eta < 2.0$; $0.1 < p_T < 0.5$ GeV/c; $w=1/\text{eff}$ ²⁶

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:

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

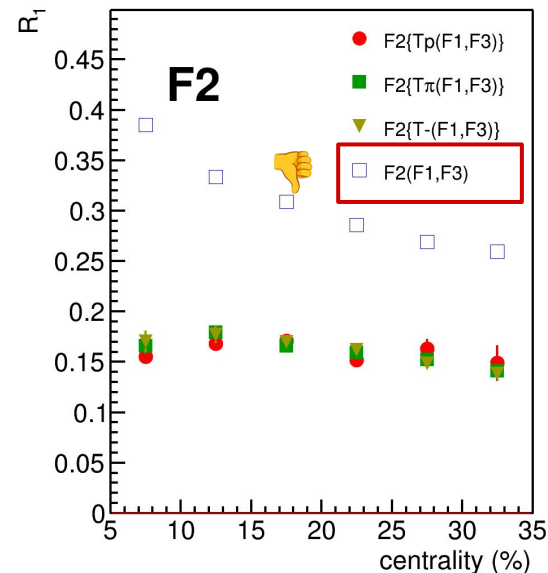
Where R_1 is the resolution correction factor

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

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

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

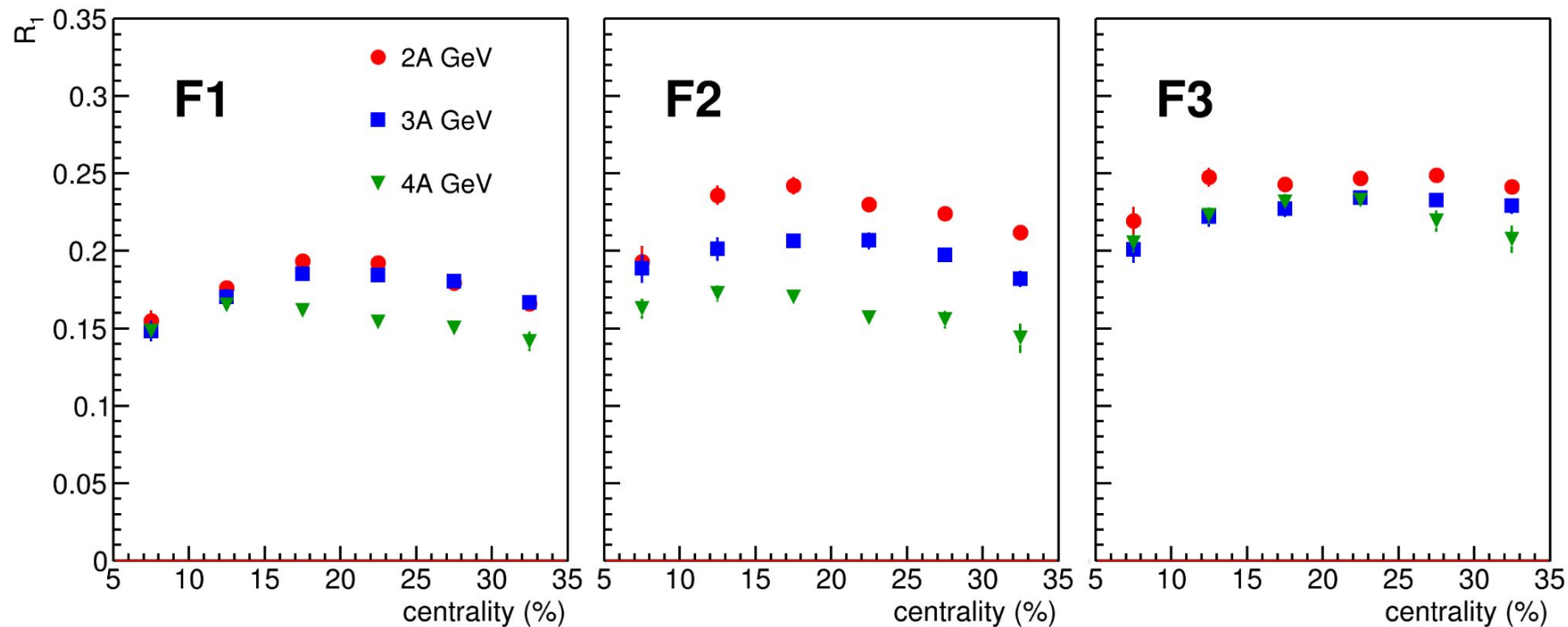
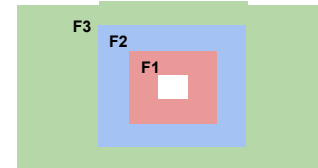
Method helps to eliminate non-flow
Using 2-subevents doesn't



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

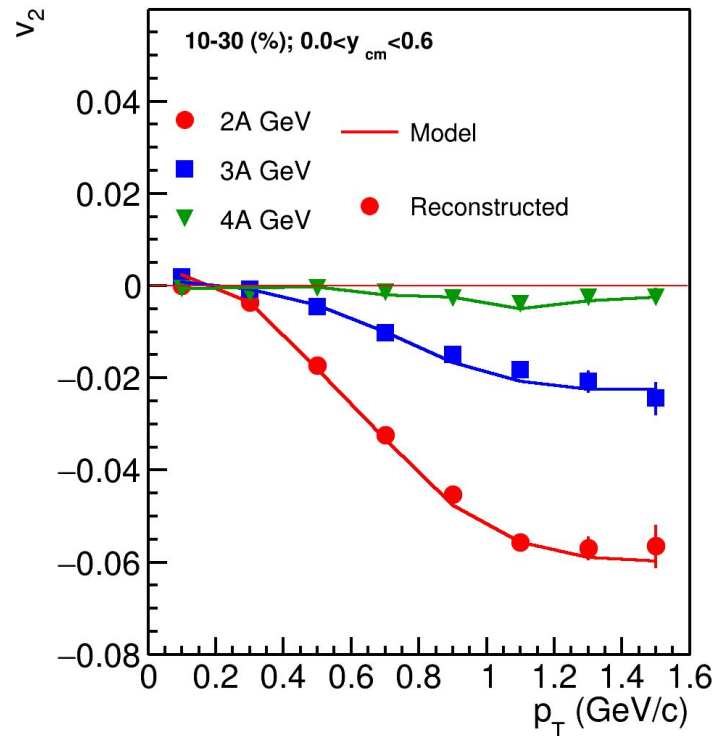
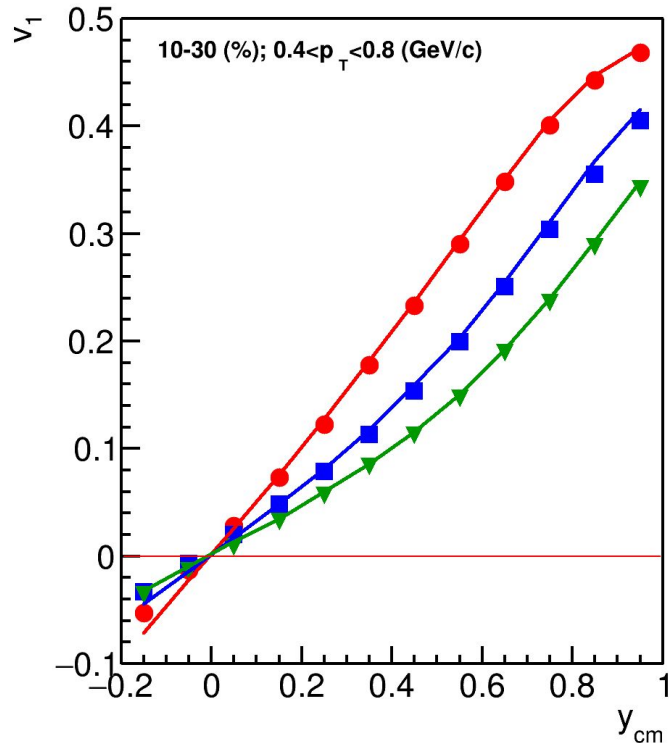
$$R_1^{F2\{Tp\}(F1,F3)} = \langle Q_1^{F2} Q_1^{Tp} \rangle \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{Tp} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{Tp} Q_1^{F3} \rangle}}$$

Rec R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs



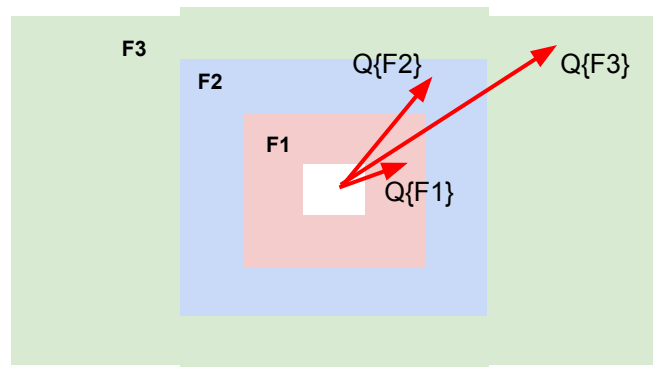
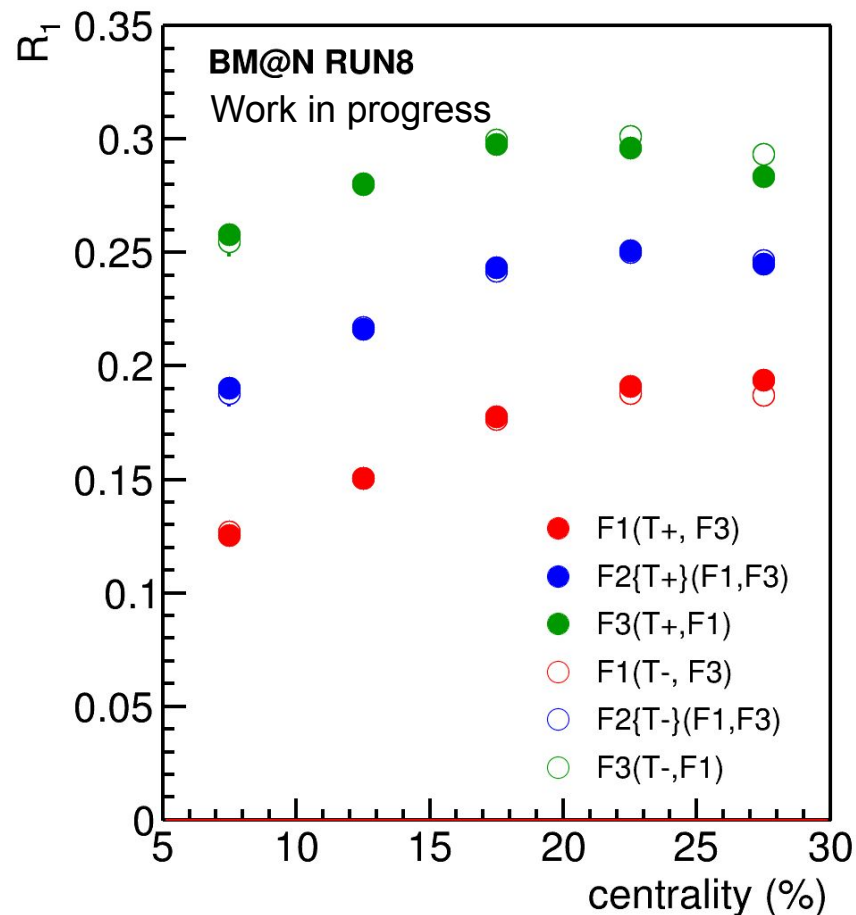
Resolution is lower for higher energies due to lower v_1

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:

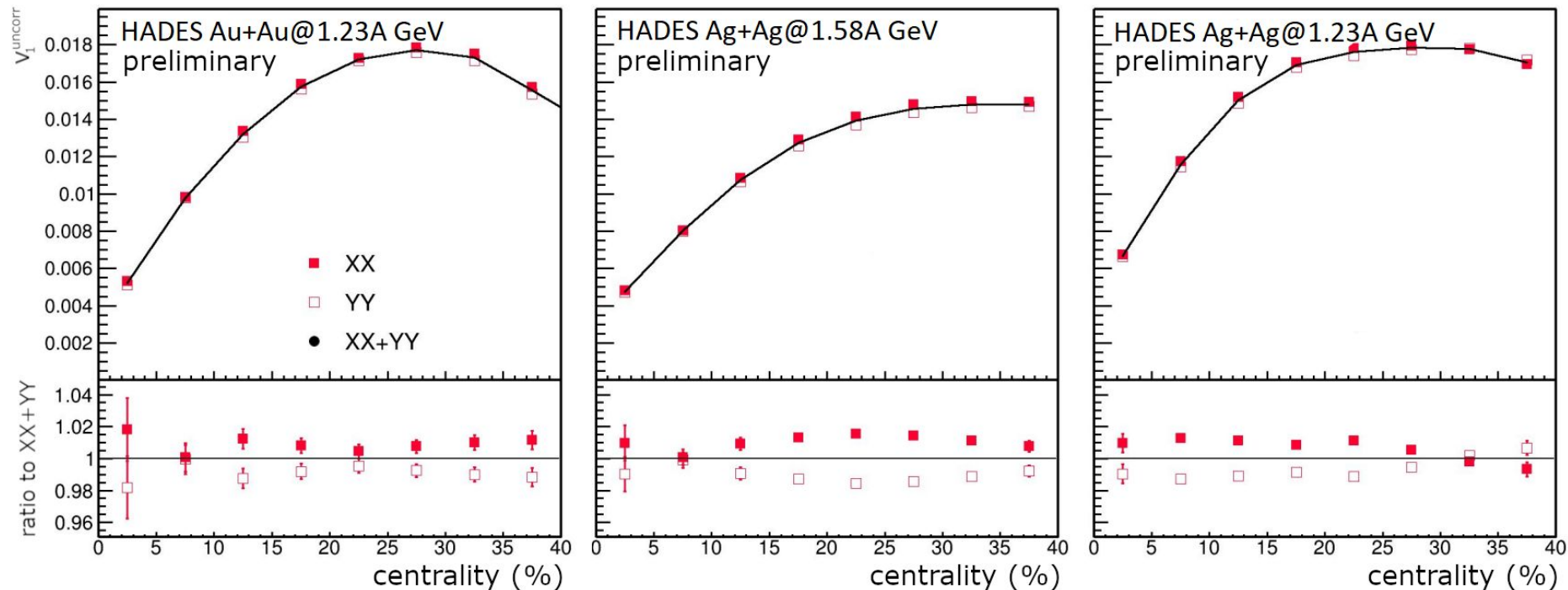
- $1.5 < \eta < 4$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV/c}$

T+: all positively charged particles with:

- $2.0 < \eta < 3$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV/c}$

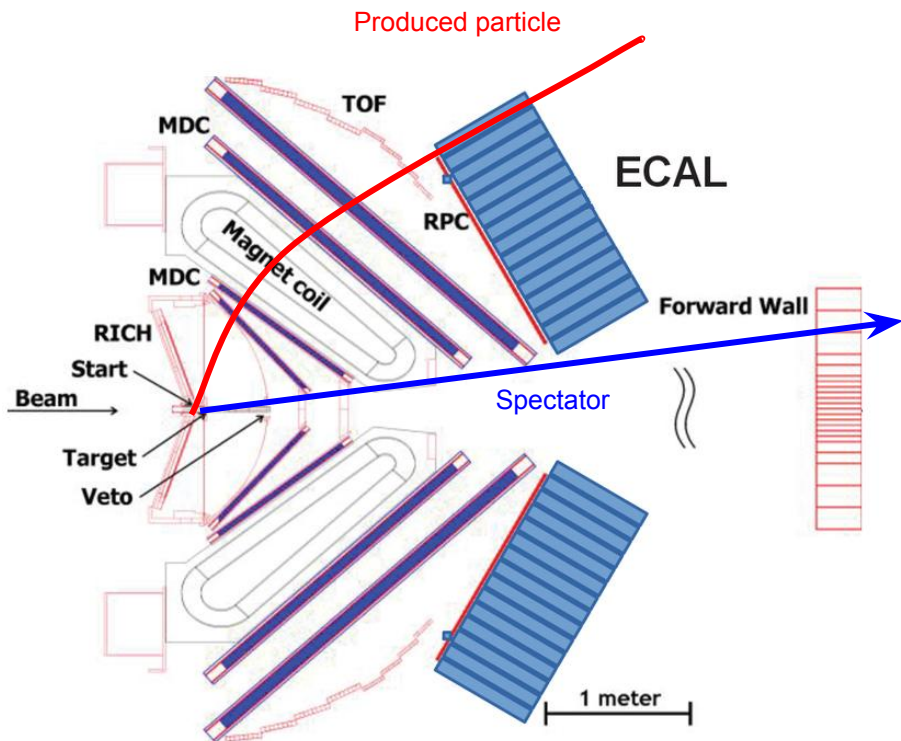
Results for v_1 and v_2 are in progress

Corrections due to non-uniform acceptance



Residual effect due to non-uniform acceptance is 2%

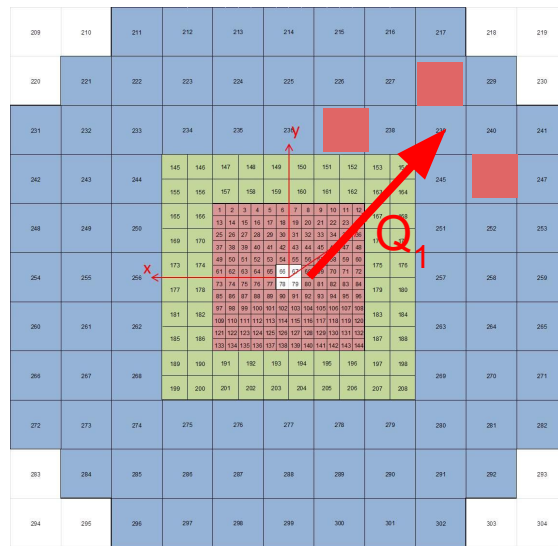
The HADES at SIS-18 accelerator (GSI, Germany)



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

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

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

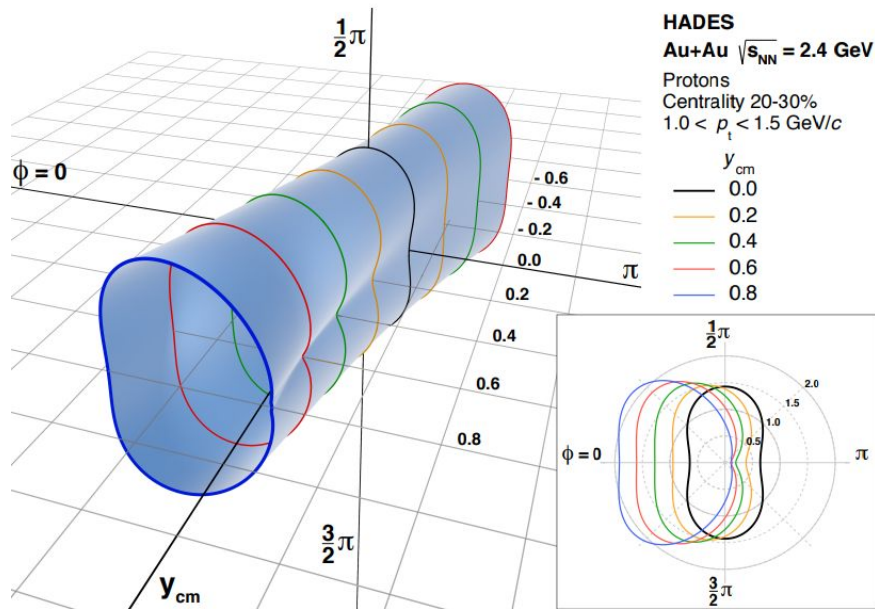


Reaction plane estimation using the deflection of projectile spectators

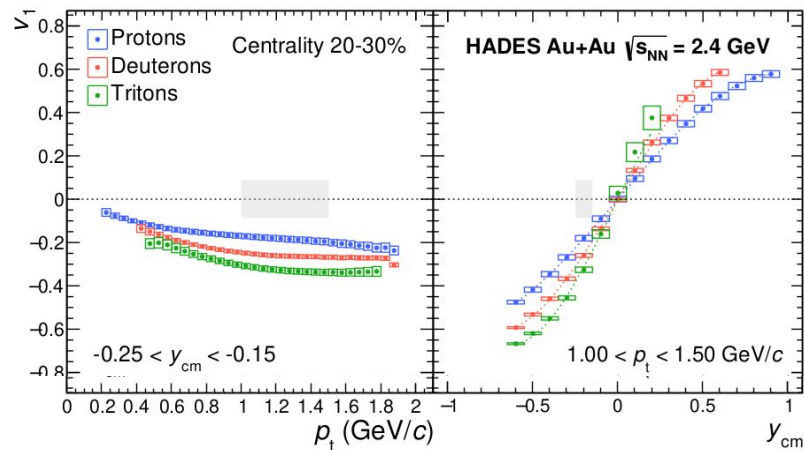
Systematic error table

	Неоднородность аксептанса	Непотоквые корреляции	Общая
Au+Au при $E_{\text{kin}} = 1.23 \text{ A ГэВ}$	2%	2%	3%
Ag+Ag при $E_{\text{kin}} = 1.23 \text{ A ГэВ}$	2%	5%	5%
Ag+Ag при $E_{\text{kin}} = 1.58 \text{ A ГэВ}$	2%	5%	5%

Коллективные потоки в столкновениях Au+Au $E_{\text{kin}} = 1.23A$ ГэВ



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



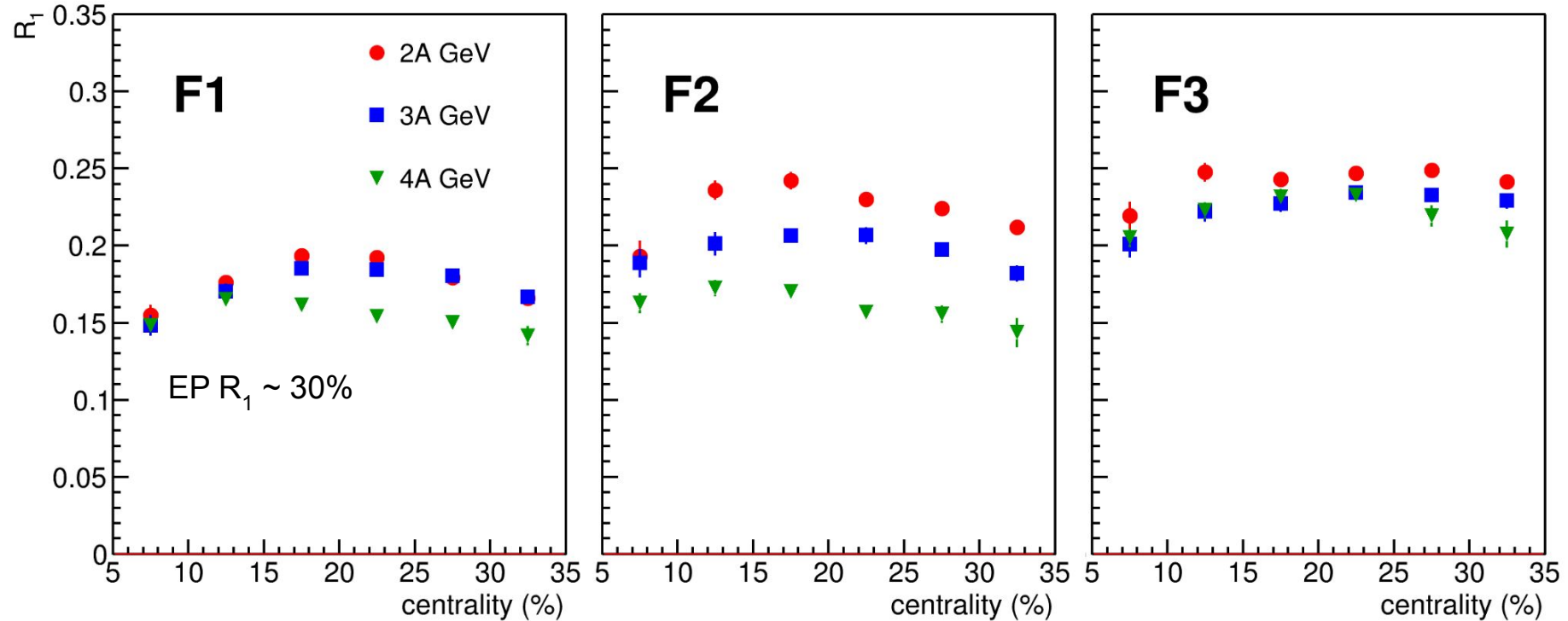
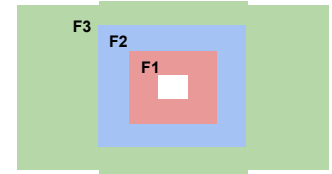
Коллективные потоки в Au+Au@1.23A ГэВ измерены до 6 гармоник

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

Table for the systematic uncertainties

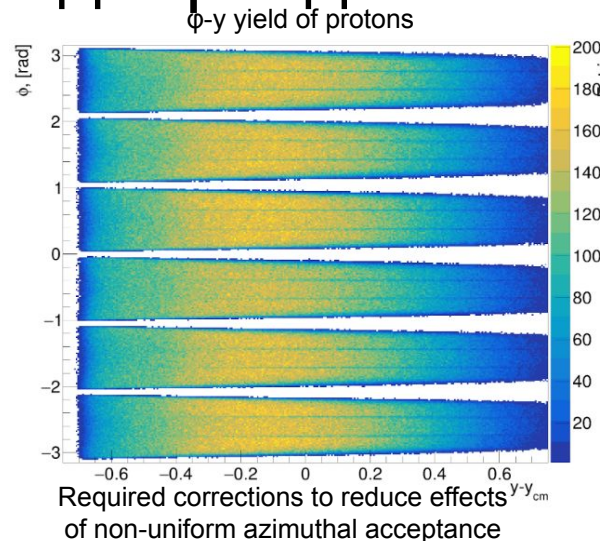
	Неоднородность аксептанса	Непоточковые корреляции	Общая
Хе+Cs при $E_{\text{kin}}=2\text{А ГэВ}$	3%	4%	5%
Хе+Cs при $E_{\text{kin}}=3\text{А ГэВ}$	3%	4%	5%
Хе+Cs при $E_{\text{kin}}=4\text{А ГэВ}$	3%	4%	5%

Rec R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs

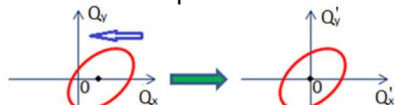


Для более высоких энергий R_1 ниже, поскольку ниже v_1

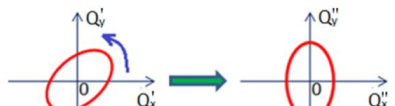
Неоднородность азимутального акцептанса HADES



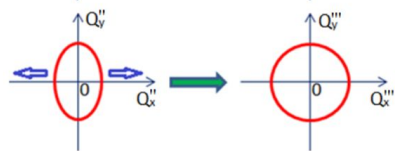
1. Recentering



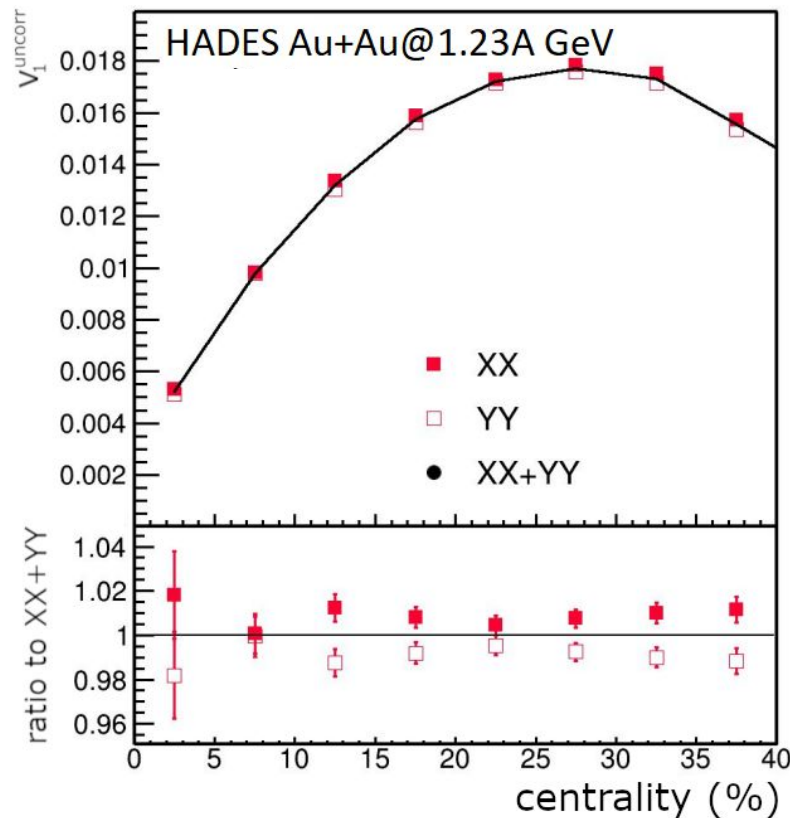
2. Twist



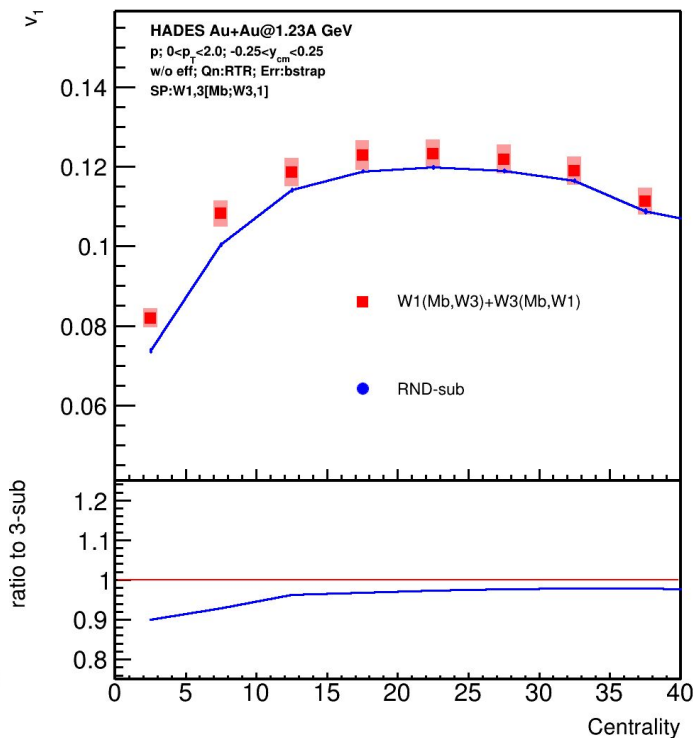
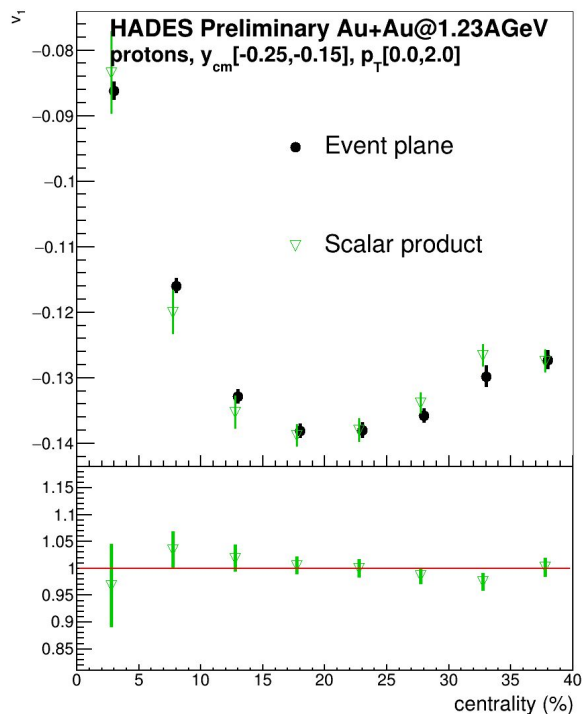
3. Rescaling



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



Сравнение методов измерения v_1 в эксперименте HADES

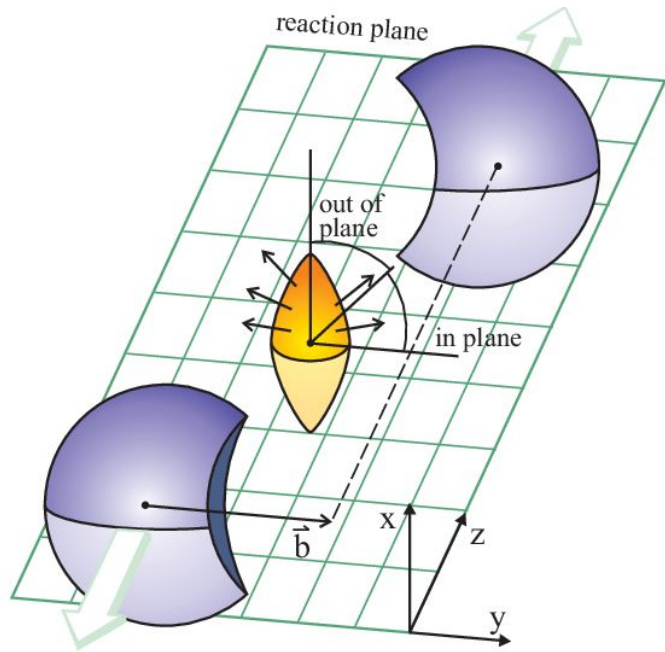


M.Mamaev et al. *Physics of Particles and Nuclei*, 2022, 53(2), pp. 277–281

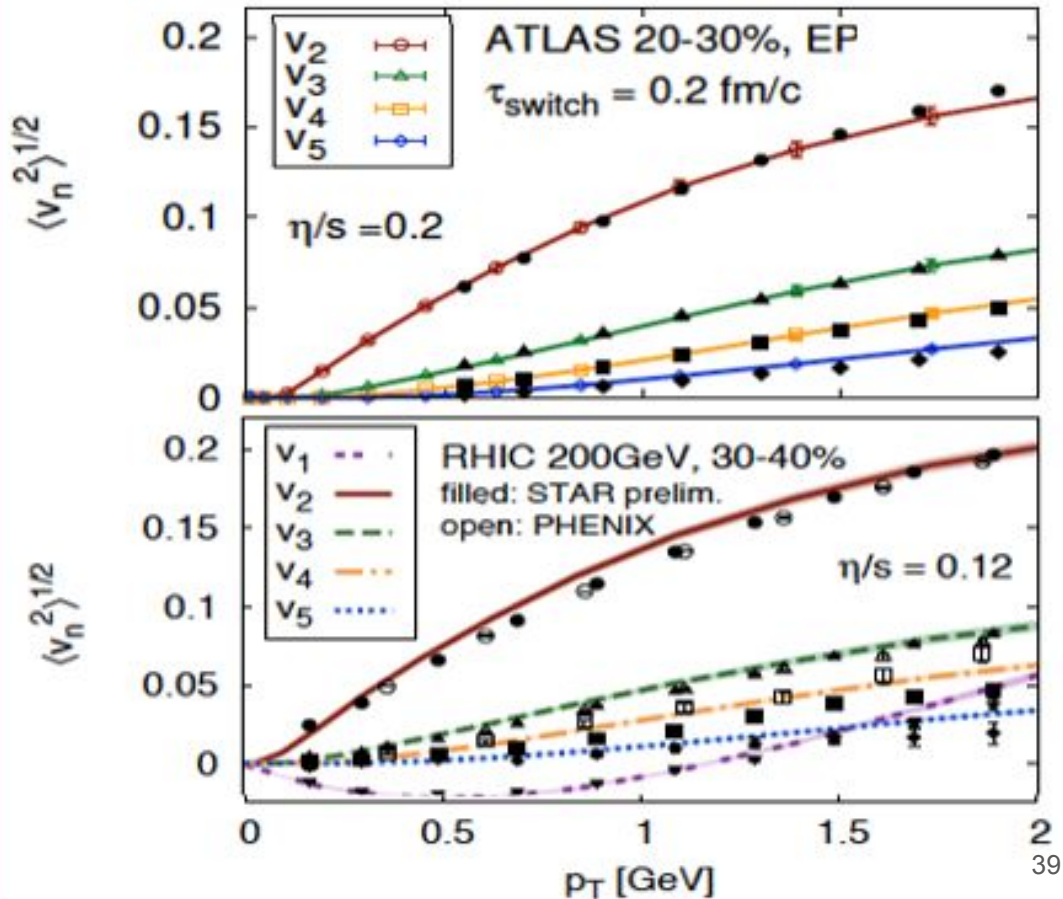
M.Mamaev et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1690(1), 012122

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

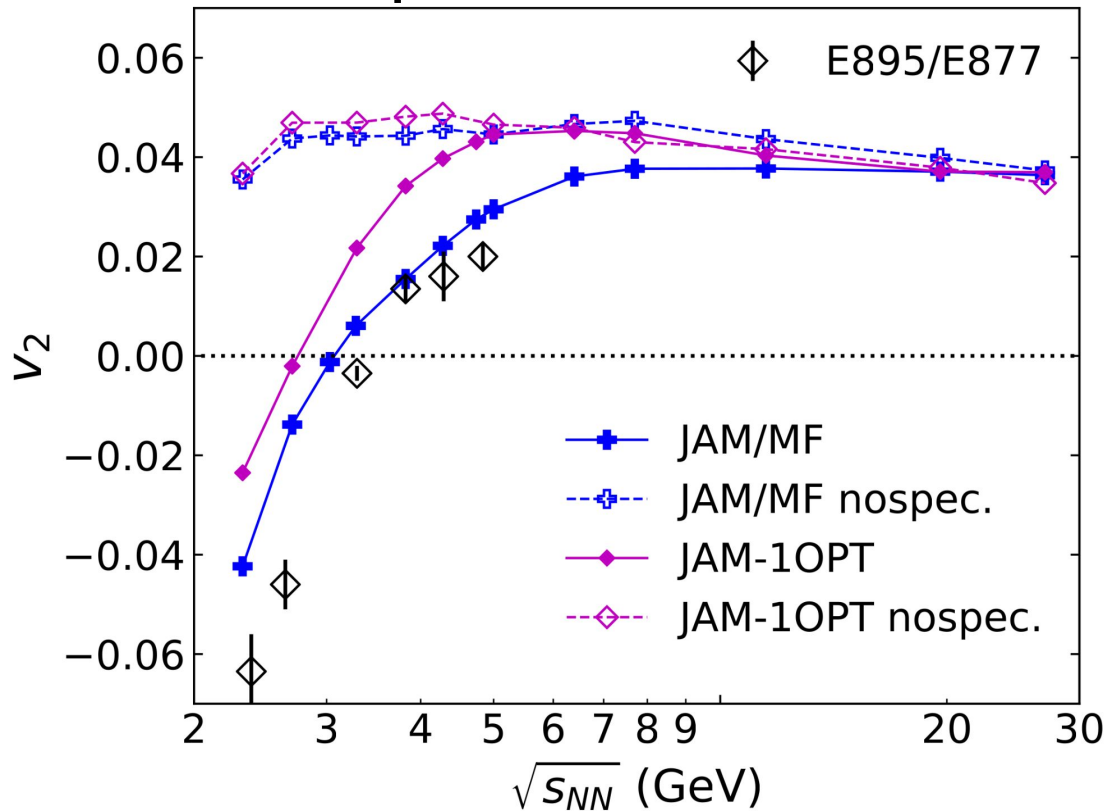
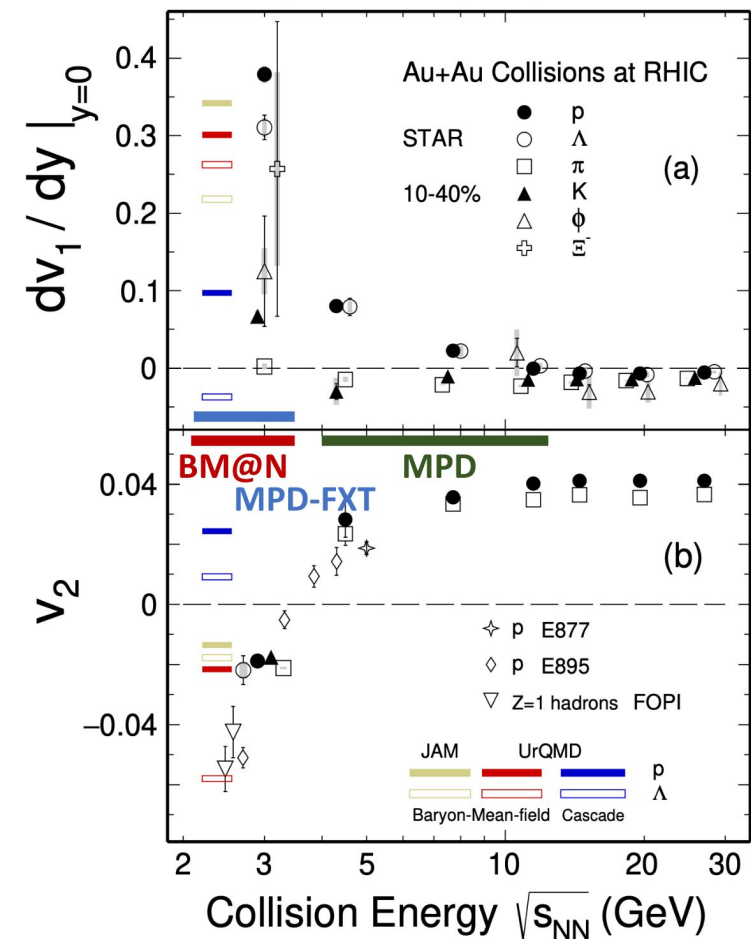
Роль анизотропных потоков в открытии КГМ



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

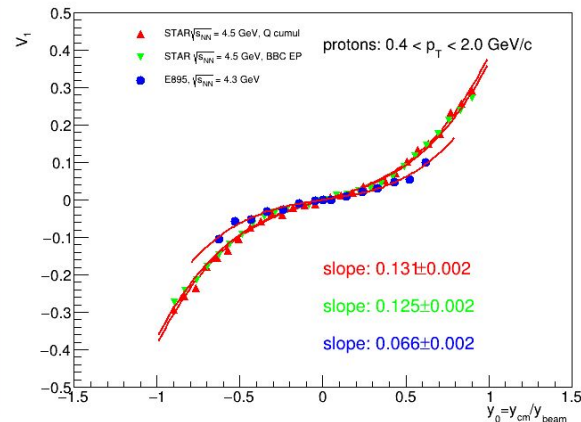
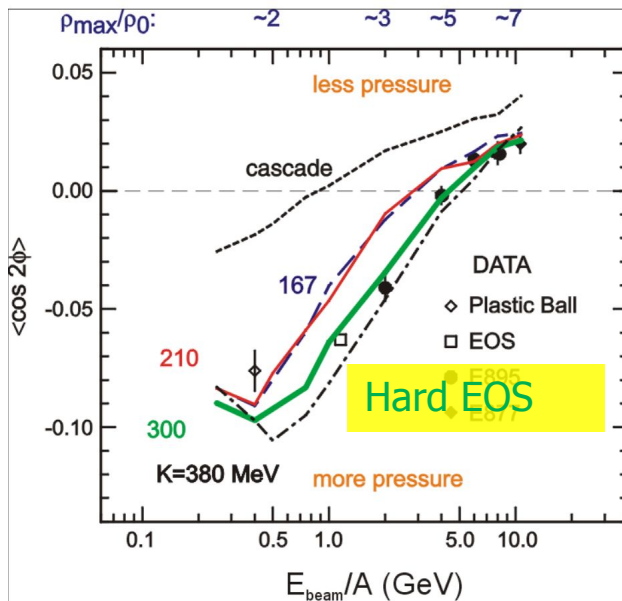
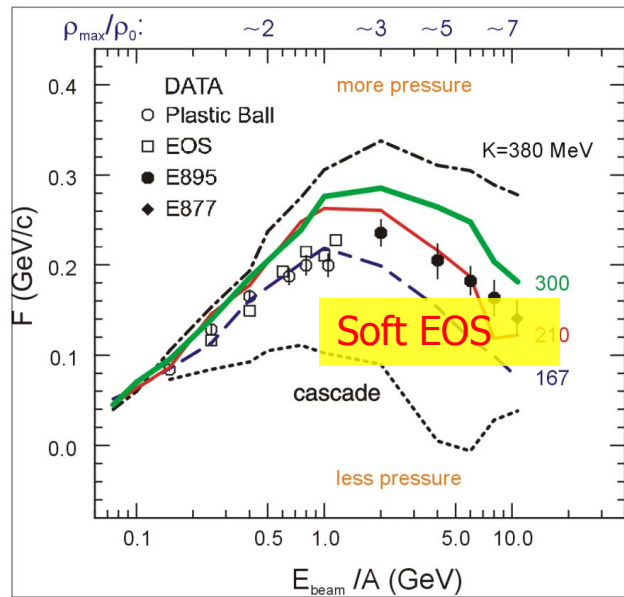


Влияние зрителей на анизотропные потоки



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

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



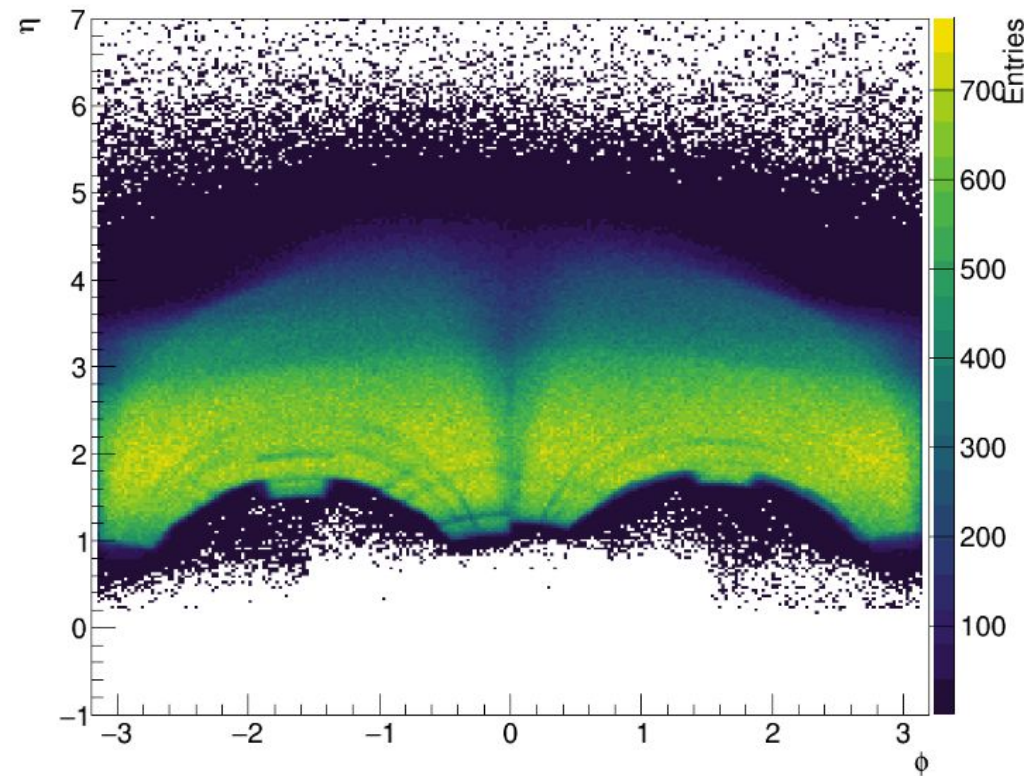
v_1 предполагает $K_{mn} \approx 210$ МэВ

v_2 предполагает $K_{mn} \approx 300$ 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.

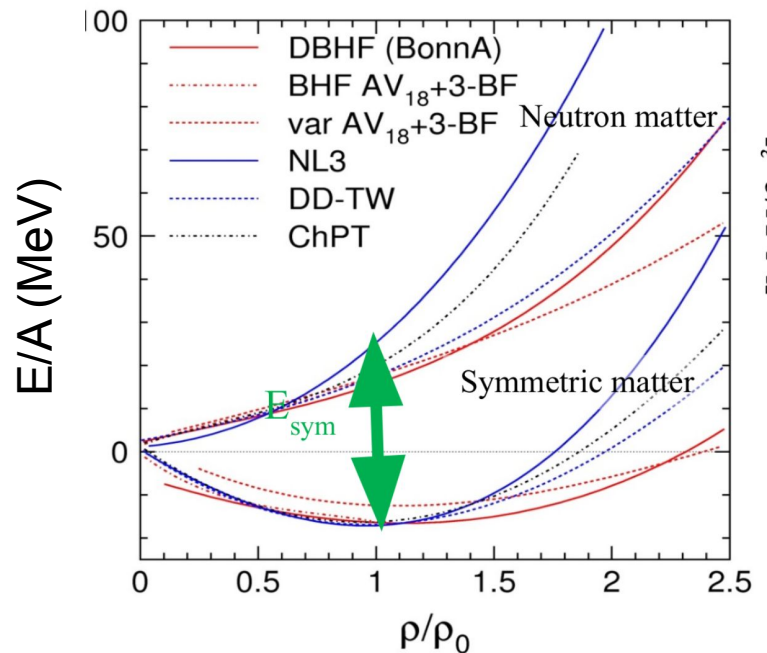
Энергия связи E/A определяется как:

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

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

Уравнение состояния ядерной материи может быть охарактеризован коэффициентом несжимаемости:

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



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 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.4$ GeV

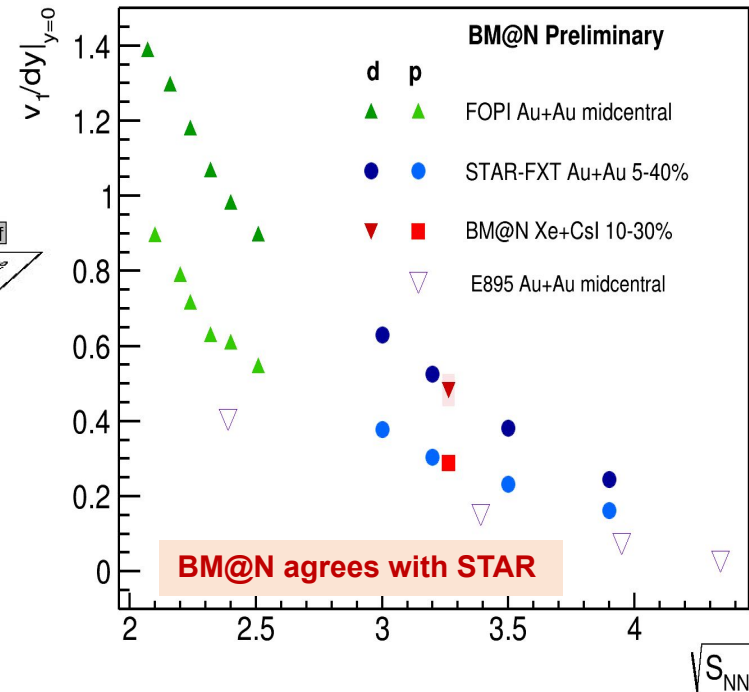
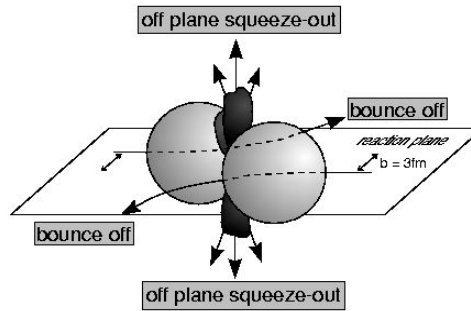
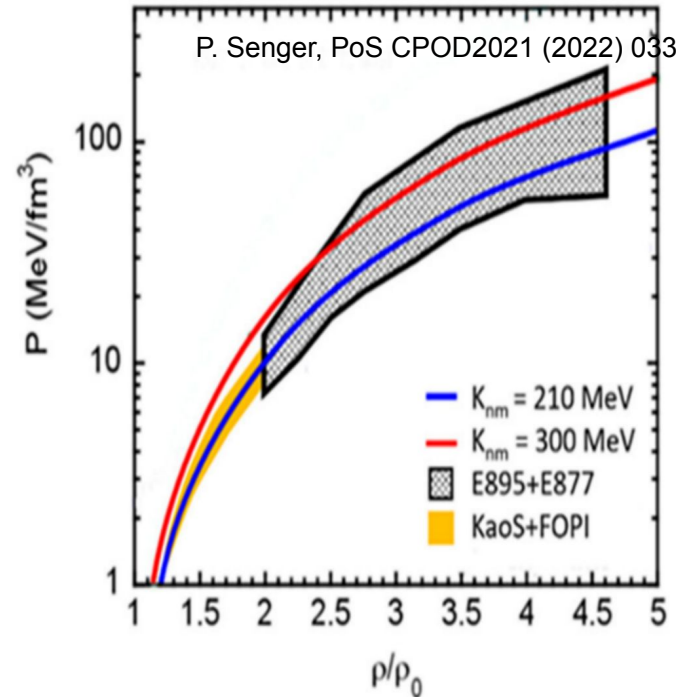
HADES collaboration

J. Adamczewski-Musch⁵, O. Arnold^{10,9}, C. Behnke⁸, A. Belounnas¹³, J.C. Berger-Chen^{10,9}, A. Blanco², C. Blume⁸, M. Böhmer¹⁰, P. Bordalo², L. Chlad¹⁴, I. Ciepal¹³, C. Deveaux¹¹, J. Dreyer⁷, E. Eppe^{10,9}, L. Fabbietti^{10,9}, P. Filip¹, P. Fonte^{2,a}, C. Franco², J. Friese¹⁰, I. Fröhlich⁸, T. Galatyuk^{6,5}, J.A. Garzón¹⁵, R. Gernhäuser¹⁰, R. Greifehnagen^{7,b,i}, M. Gumberidze^{5,6}, S. Harabasz^{6,4}, T. Heinz⁵, T. Hennino¹³, S. Hlavac¹, C. Höhne^{11,5}, R. Holzmann⁵, B. Kämpfer^{7,b}, B. Kardan⁸, I. Koenig⁵, W. Koenig⁵, M. Kohls⁸, B.W. Kolb⁵, G. Korcyl⁴, G. Kornakov⁶, F. Kornas⁶, R. Kotte⁷, A. Kugler¹⁴, T. Kunz¹⁰, R. Lalik⁴, K. Lapidus^{10,9}, L. Lopes², M. Lorenz⁸, T. Mahmoud¹¹, L. Maier¹⁰, A. Malige⁴, A. Mangiarotti², J. Markert⁵, T. Matulewicz¹⁶, S. Maurus¹⁰, V. Metag¹¹, J. Michel⁸, D.M. Mihaylov^{10,9}, C. Müntz⁸, R. Münzer^{10,9}, L. Naumann⁷, K. Nowakowski⁴, Y. Parpottas¹⁸, V. Pechenov⁵, O. Pechenova⁵, K. Piasecki¹⁶, J. Pietraszkowski⁵, W. Przygoda⁴, K. Pysz³, S. Ramos², B. Ramstein¹³, N. Rathod⁴, P. Rodriguez-Ramos¹⁴, P. Rosier¹³, A. Rost⁶, A. Rustamov⁵, P. Salabura⁴, T. Scheib⁸, H. Schuldes⁸, E. Schwab⁵, F. Scozzi^{6,13}, F. Seck⁶, P. Sellheim⁸, I. Selyuzhenkov⁵, J. Siebenson¹⁰, L. Silva², U. Singh⁴, J. Smyrski⁴, Yu.G. Sobolev¹⁴, S. Spataro¹⁷, S. Spies⁸, H. Ströbele⁸, J. Stroth^{8,5}, C. Sturm⁵, O. Svoboda¹⁴, M. Szala⁸, P. Tlusty¹⁴, M. Traxler⁵, H. Tsertos¹², V. Wagner¹⁴, C. Wendisch⁵, M.G. Wiebusch⁵, J. Wirth^{10,9}, D. Wójcik¹⁶, P. Zumbach⁵

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

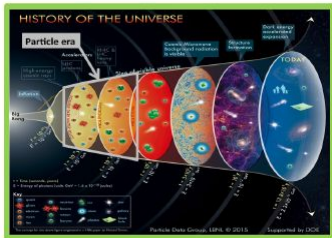
P. Danielewicz, R. Lacey, W.G. Lynch, Science 298 (2002) 1592

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

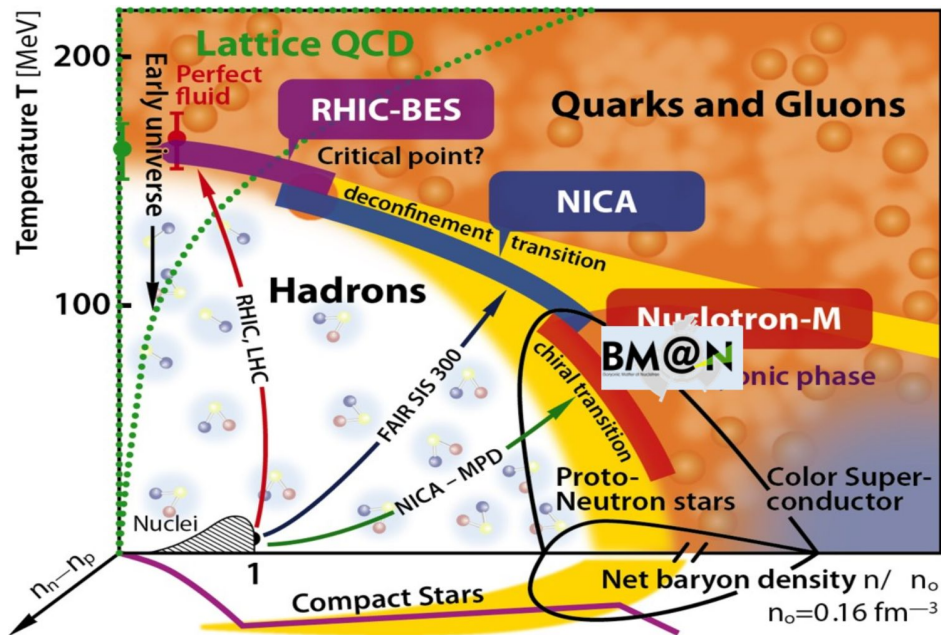
MPD-FXT



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

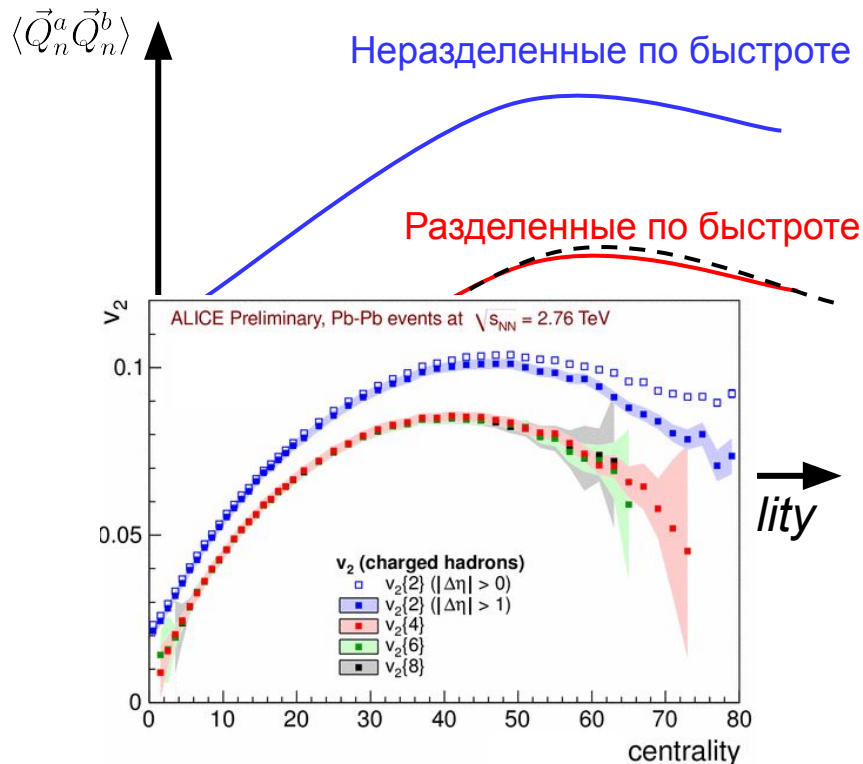
2010 - Поиск сигналов деконфайнмента, фазового перехода первого рода и критической точки КХД материи - основа для программ сканирования по энергии столкновения ядер в современных экспериментах на ускорителях: RHIC, SPS, Nuclotron, SIS18

Непотокковые корреляции

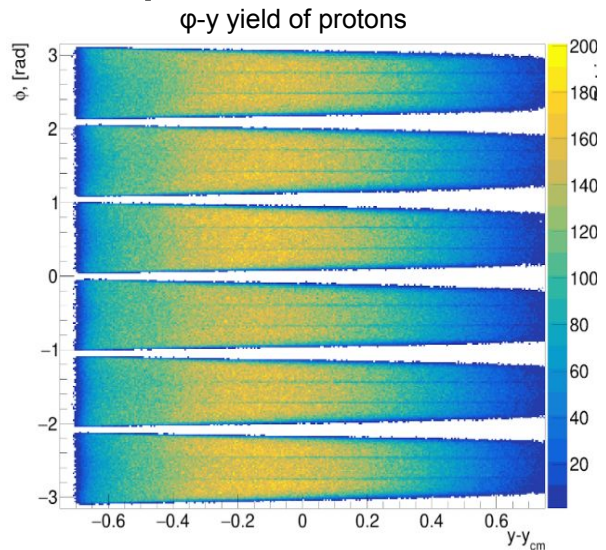
Корреляции не относящиеся к изначальному коллективному движению частиц называют непотокковыми:

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

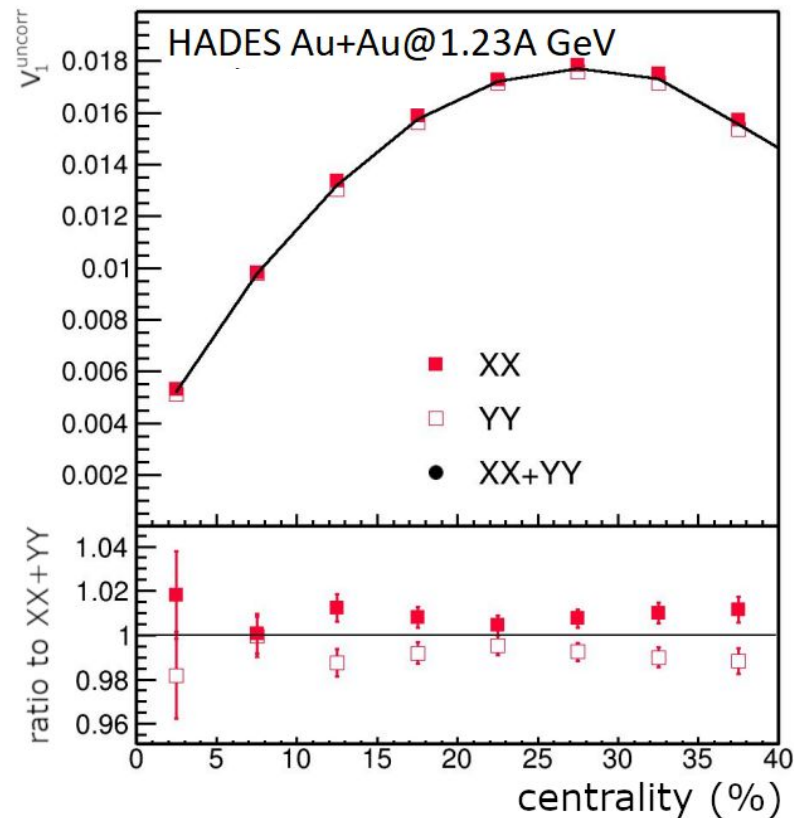
Основной способ подавить непотокковые корреляции — внести разделение по (псевдо-) быстроте между Q_n -векторами



Неоднородность азимутального акцептанса HADES



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



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

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

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

Векторы потока u_n и Q_n

Из импульса каждой частицы
определяется единичный вектор u_n :

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

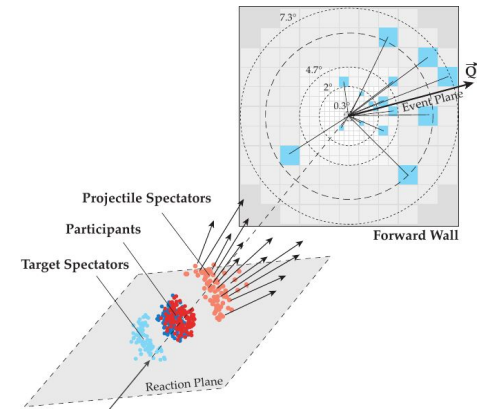
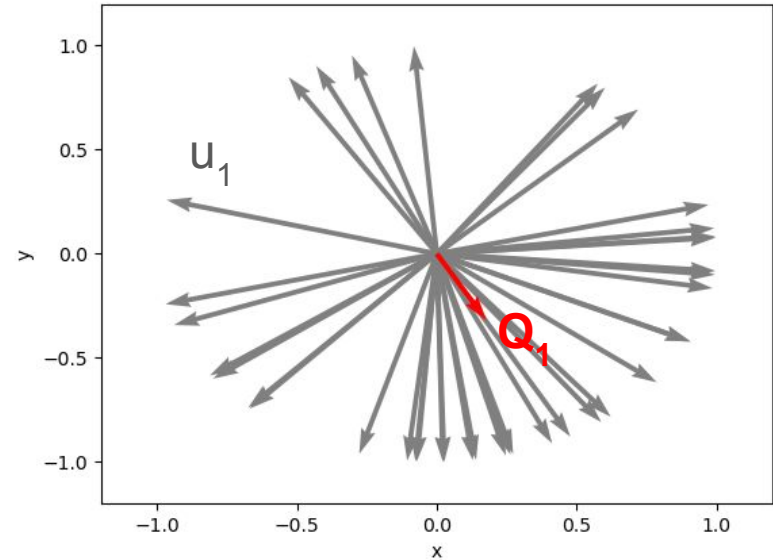
где φ — азимутальный угол импульса

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

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

Где R_1 — разрешение плоскости симметрии

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

Метод трех подсобытий:

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

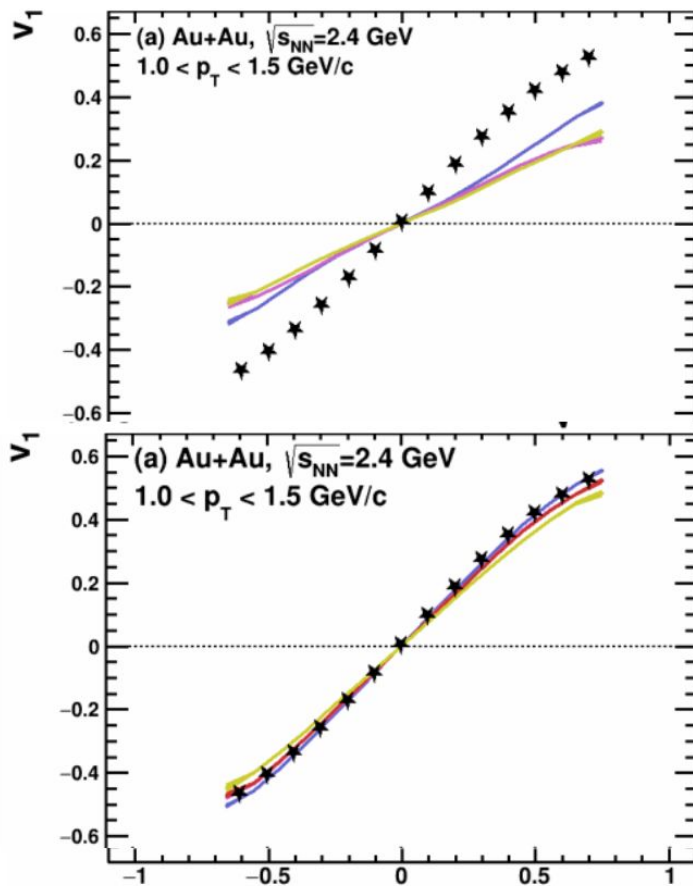
3 оценки для v_n
Можно оценить вклад
непоточковых корреляций

Метод случайных подсобытий:

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

1 оценка для v_n
Невозможно оценить вклад
непоточковых корреляций

Методика измерения азимутальных потоков



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

Непоточковые корреляции

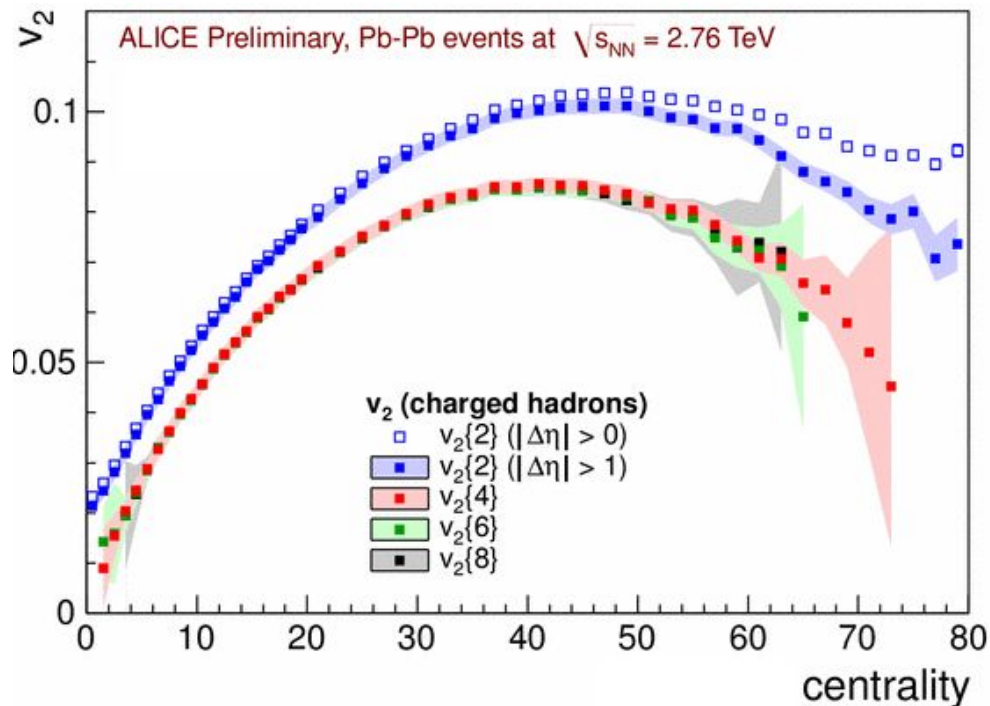
Существуют корреляции между частицами, не связанные с плоскостью реакции. Эти корреляции называются «непоточковыми»

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 «непоточковые» корреляции оказывают существенное влияние только на частицы с близкими импульсами, их можно также подавить, увеличив интервал быстроты между частицами.

Векторы потока u_n и Q_n

Из импульса каждой частицы
определяется единичный вектор u_n :

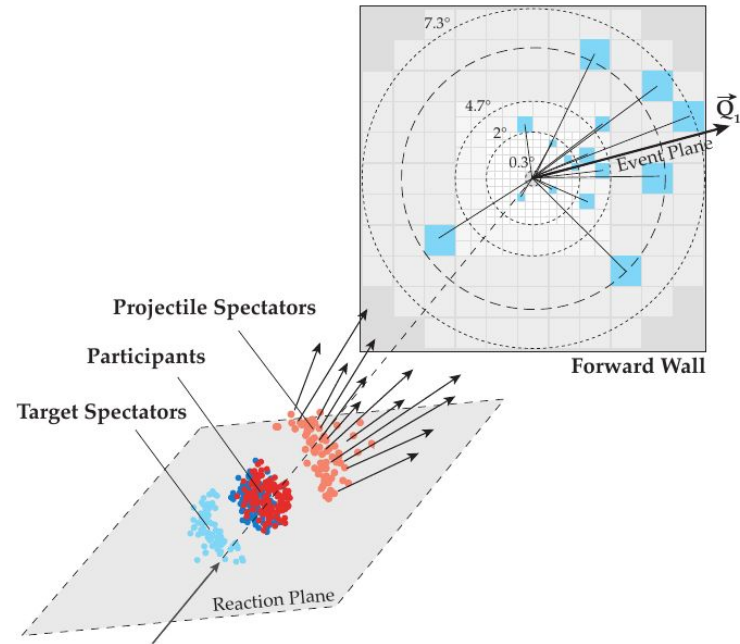
$$\vec{u}_n = (\cos n\varphi, \sin n\varphi)$$

где φ — азимутальный угол импульса

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

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

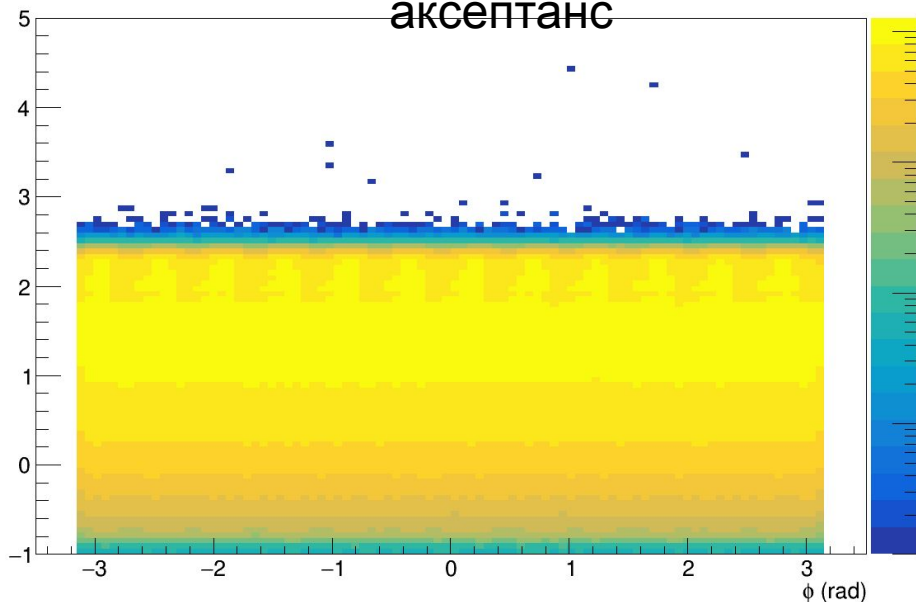
Ψ_n^{EP} — угол плоскости симметрии
(оценка угла плоскости реакции)



- Плоскость симметрии определяется при помощи спектаторов, которые отклоняются в плоскость реакции
- Большое разделение по скорости позволяют минимизировать непотоковые корреляции

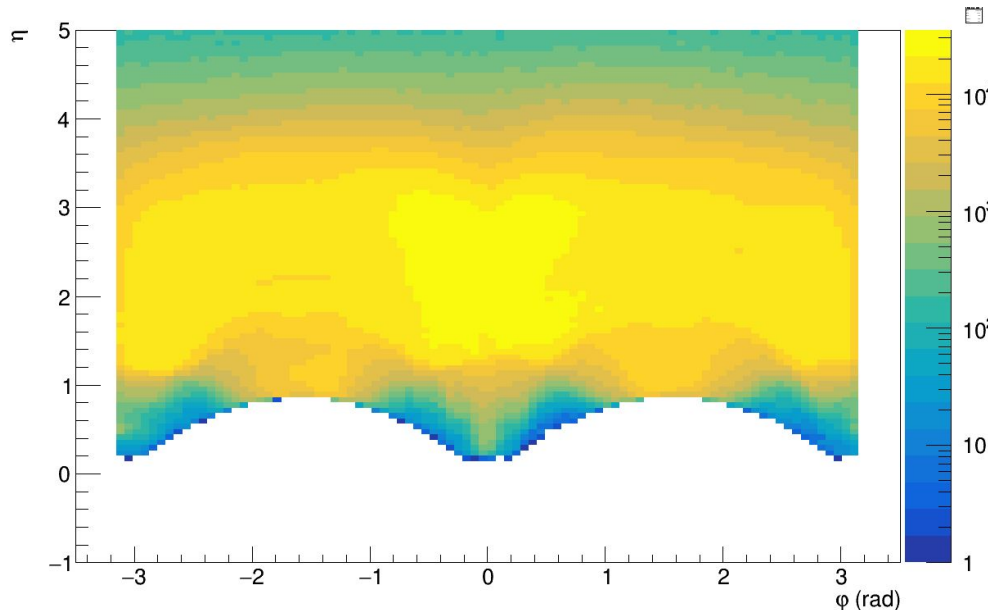
Влияние азимутального акцептанса на v_n

Однородный азимутальный акцептанс



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

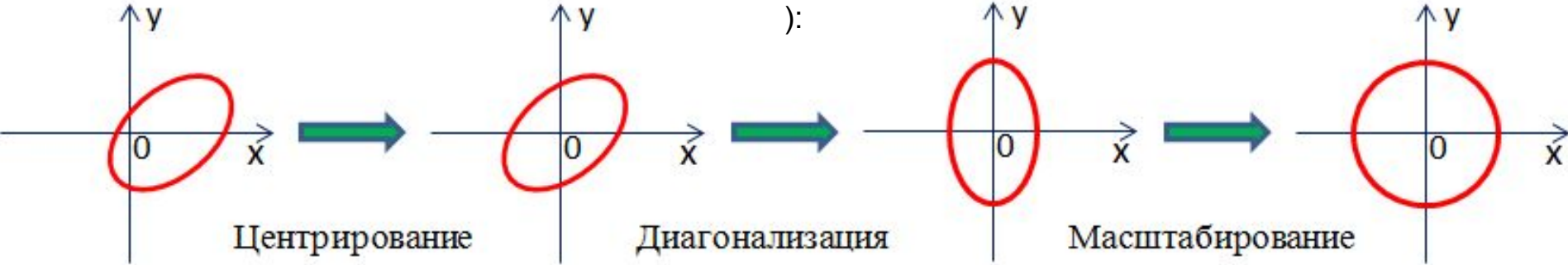
Неоднородный азимутальный акцептанс



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

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:

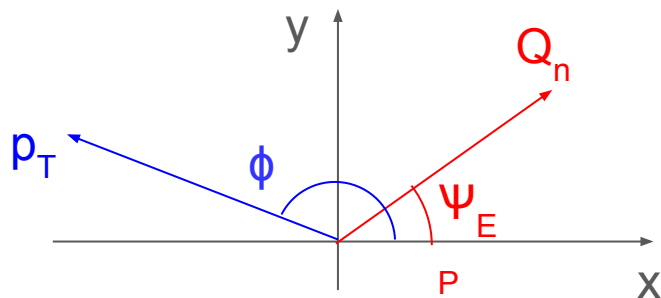
https://github.com/mam-mih-val/qntools_macros

Метод плоскости события

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

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

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 подвержен вкладу непотоковых корреляций

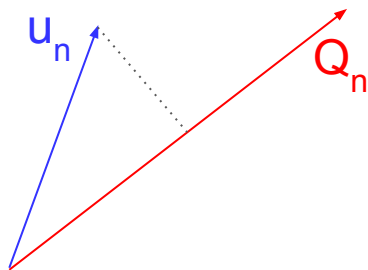
Метод скалярного произведения

Метод скалярного произведения:

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

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

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



Метод трех подсобытий:

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

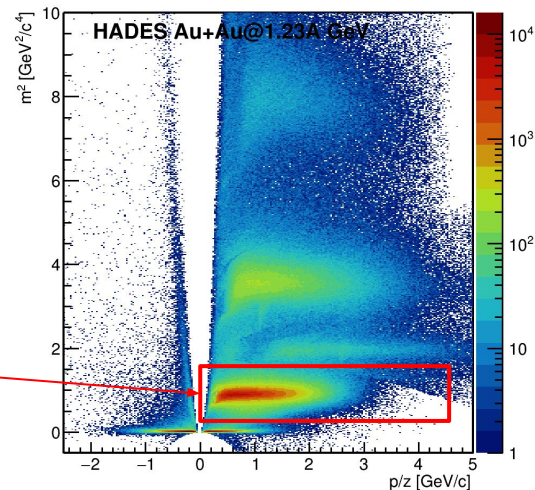
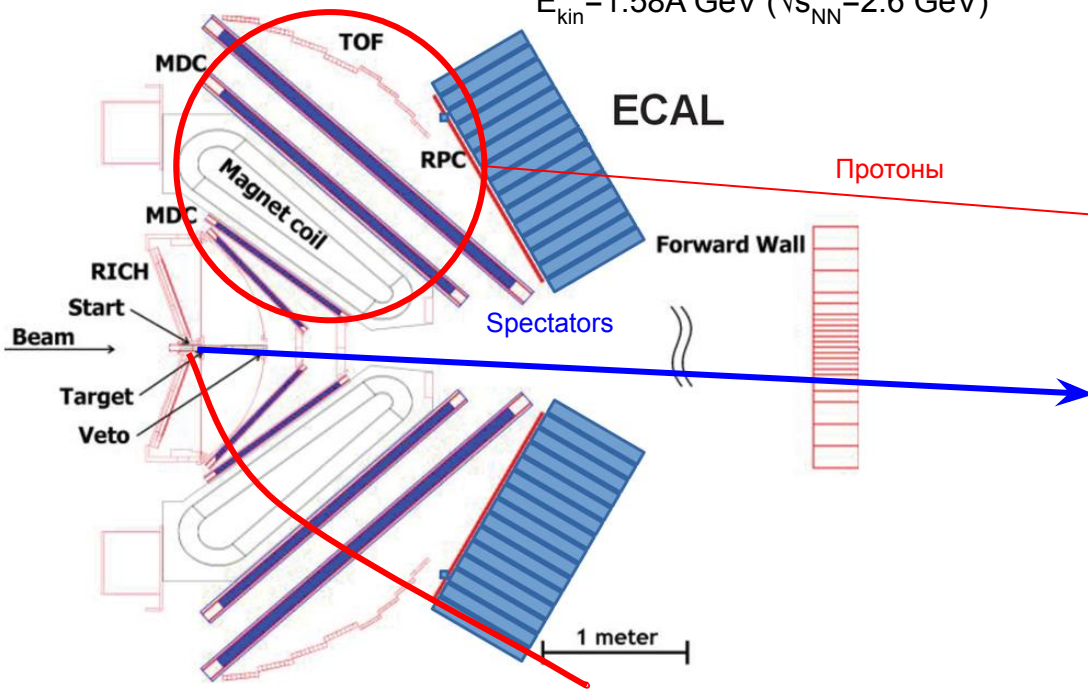
Метод даёт 3 оценки v_n , что позволяет оценивать вклад непотоковых корреляций

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

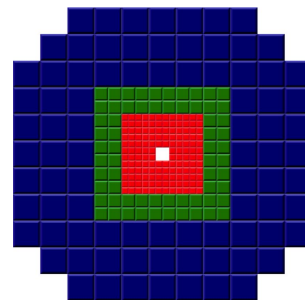
2012: Au+Au $E_{\text{kin}}=1.23\text{A GeV}$ ($\sqrt{s_{\text{NN}}}=2.4\text{ GeV}$)

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

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

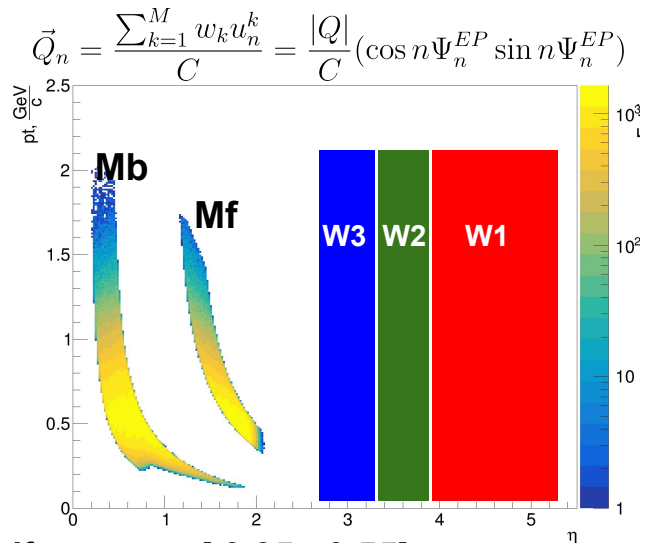


Eur.Phys.J.A41:243-277,2009



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

Векторы потока



Mf — p; $y_{cm} [0.35, 0.55]$

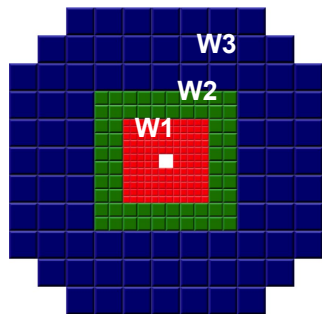
Mb — p; $y_{cm} [-0.55, -0.35]$

Заряженные фрагменты:

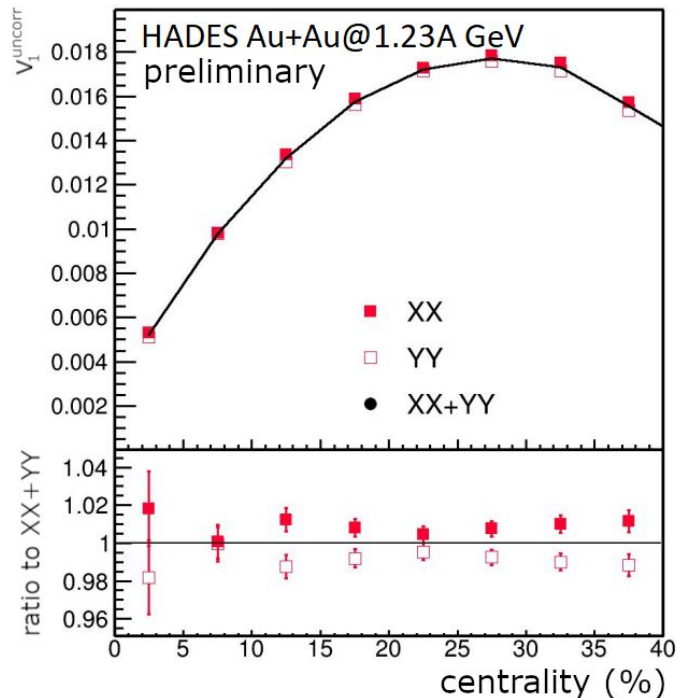
W1: $3.77 < \eta < 5.38$

W2: $3.28 < \eta < 3.88$

W3: $2.68 < \eta < 3.35$



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



Ошибка из-за азимутального
неоднородности акцетанса < 2%

Методы вычисления v_n

Метод скалярного произведения (SP)

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

Где R_1 — разрешение плоскости симметрии

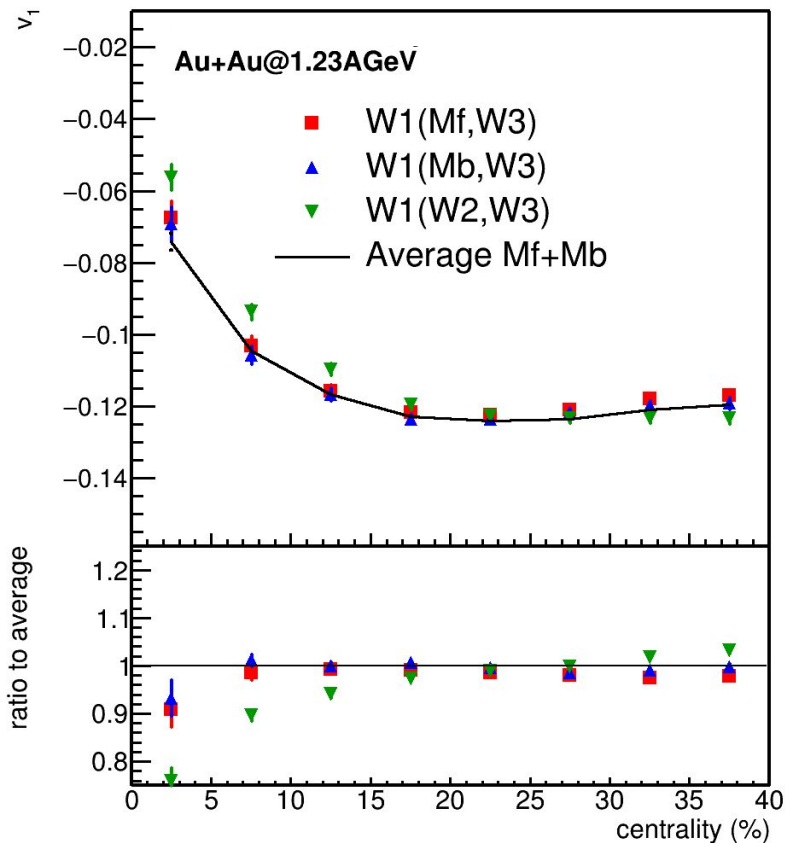
$$R_1^{F1} = \langle \cos(\Psi_1^{F1} - \Psi_1^{RP}) \rangle$$

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

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

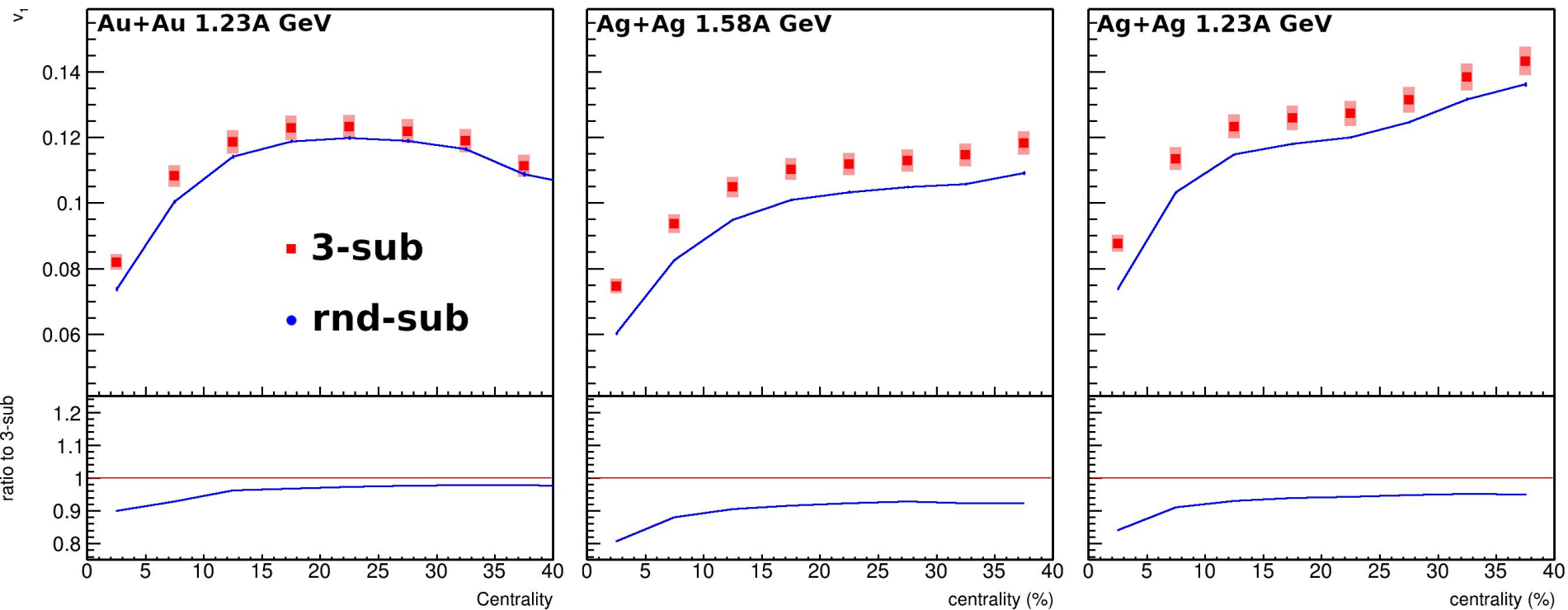
M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281

M Mamaev et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012122



Ошибка из-за непотоковых
корреляций < 5%

Сравнение методов измерения v_1 в эксперименте HADES

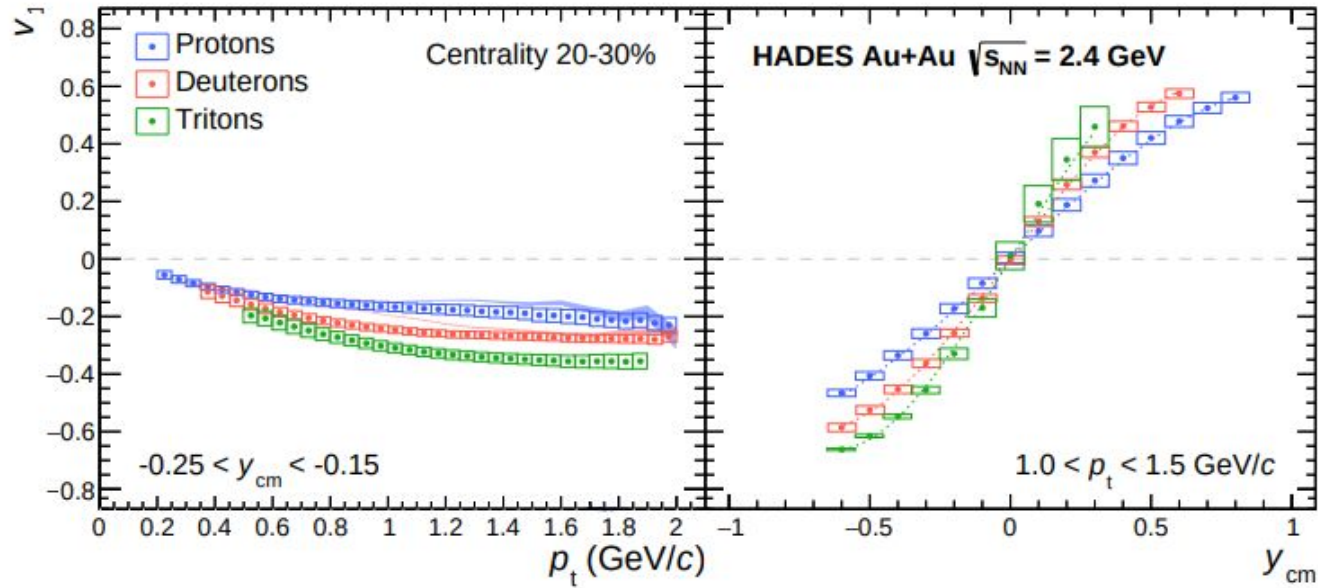


Систематическая ошибка из-за метода измерения v_1 менее 5% в
среднецентральных столкновениях Au+Au

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

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

Коллективные потоки в столкновениях Au+Au при $E_{\text{kin}} = 1.23 \text{ АГэВ}$



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

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

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



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

HADES collaboration

J. Adamczewski-Musch⁵, O. Arnold^{9,10}, C. Behnke⁸, A. Belounnas¹³, J. C. Berger-Chen^{9,10}, A. Blanco², C. Blume⁸, M. Böhmer¹⁰, P. Bordalo², L. Chlad¹⁴, I. Ciepał³, C. Deveau¹¹, J. Dreyer⁷, E. Epple^{9,10}, L. Fabbietti^{9,10}, P. Filip¹, P. Fonte^{2,b}, C. Franco², J. Friese¹⁰, I. Fröhlich⁸, T. Galatyuk^{5,6}, J. A. Garzón¹⁵, R. Gernhäuser¹⁰, R. Greifenhagen^{7,c†}, M. Gumberidze^{5,6}, S. Harabasz^{4,6}, T. Heinz⁵, T. Hennino¹³, S. Hlavac¹, C. Höhne^{5,11}, R. Holzmann⁵, B. Kämpfer^{7,c}, B. Kardan⁸, I. Koenig⁵, W. Koenig⁵, M. Kohls⁸, B. W. Kolb⁵, G. Korcyl⁴, G. Kornakov⁶, F. Kornas⁶, R. Kotte⁷, A. Kugler¹⁴, T. Kunz¹⁰, R. Lalik⁴, K. Lapidus^{9,10}, L. Lopes², M. Lorenz⁸, T. Mahmoud¹¹, L. Maier¹⁰, A. Malige⁴, A. Mangiarotti², J. Markert⁵, T. Matulewicz¹⁶, S. Maurus¹⁰, V. Metag¹¹, J. Michel⁸, D. M. Mihaylov^{9,10}, C. Müntz⁸, R. Münzer^{9,10}, L. Naumann⁷, K. Nowakowski⁴, Y. Parpottas¹⁸, V. Pechenov⁵, O. Pechenova⁵, K. Piasecki¹⁶, J. Pietraszko⁵, W. Przygoda⁴, K. Pysz⁵, S. Ramos², B. Ramstein¹³, N. Rathod⁴, P. Rodriguez-Ramos¹⁴, P. Rosier¹³, A. Rost⁶, A. Rustamov⁵, P. Salabura⁴, T. Scheib⁸, H. Schuldes⁸, E. Schwab⁵, F. Scozzi^{6,13}, F. Seck⁶, P. Sellheim⁸, I. Selyuzhenkov⁵, J. Siebenson¹⁰, L. Silva², U. Singh⁴, J. Smyski⁴, Yu. G. Sobolev¹⁴, S. Spataro¹⁷, S. Spies⁸, H. Ströbele⁸, J. Stroth^{5,8}, C. Sturm⁵, O. Svoboda¹⁴, M. Szala⁸, P. Tlustý¹⁴, M. Traxler⁵, H. Tsertos¹², V. Wagner¹⁴, C. Wendisch⁵, M. G. Wiebusch⁵, J. Wirth^{9,10}, D. Wójcik¹⁶, P. Zumbach⁵

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].

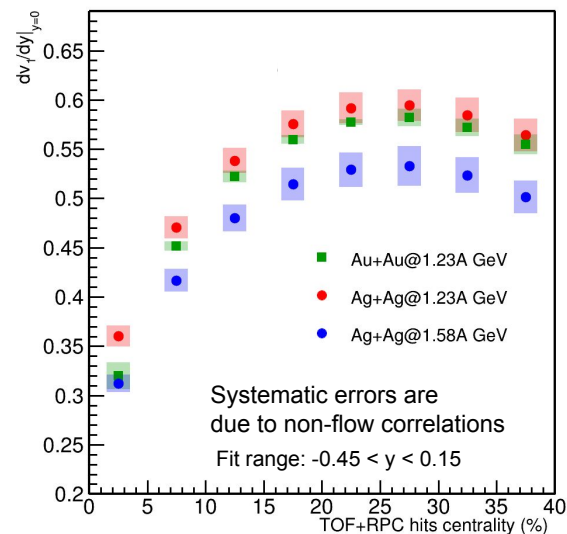
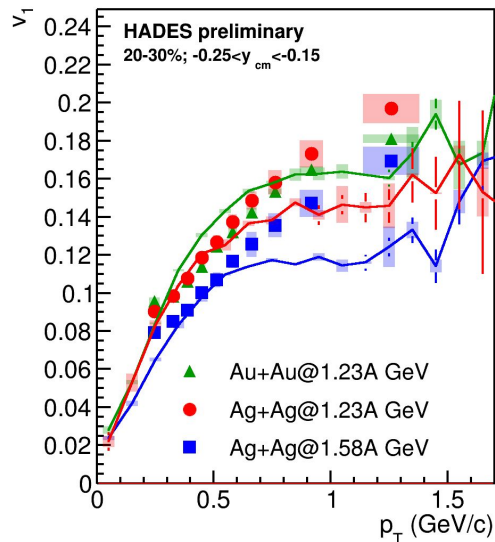
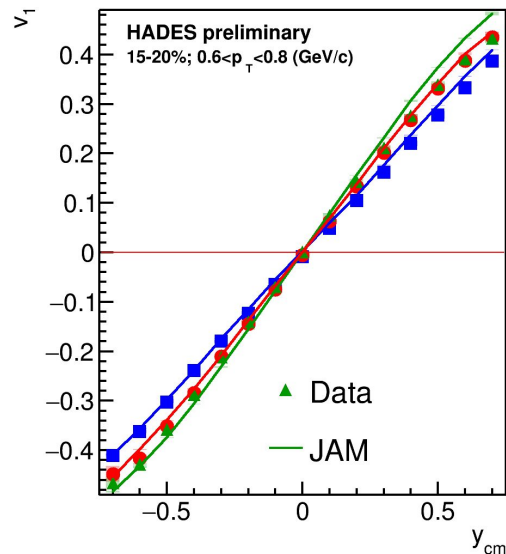


35. R. Brun, F. Bruyant, F. Carminati, S. Giani, M. Maire, A. McPherson, G. Patrick, and L. Urban, *GEANT Detector Description and Simulation Tool* (1994).
36. M. Mamaev, O. Golosov, and I. Selyuzhenkov (HADES), *Phys. Part. Nucl.* **53**, 277 (2022).
37. A. Andronic *et al.* (FOPI), *Phys. Rev.* **C64**,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

v_1 протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag

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

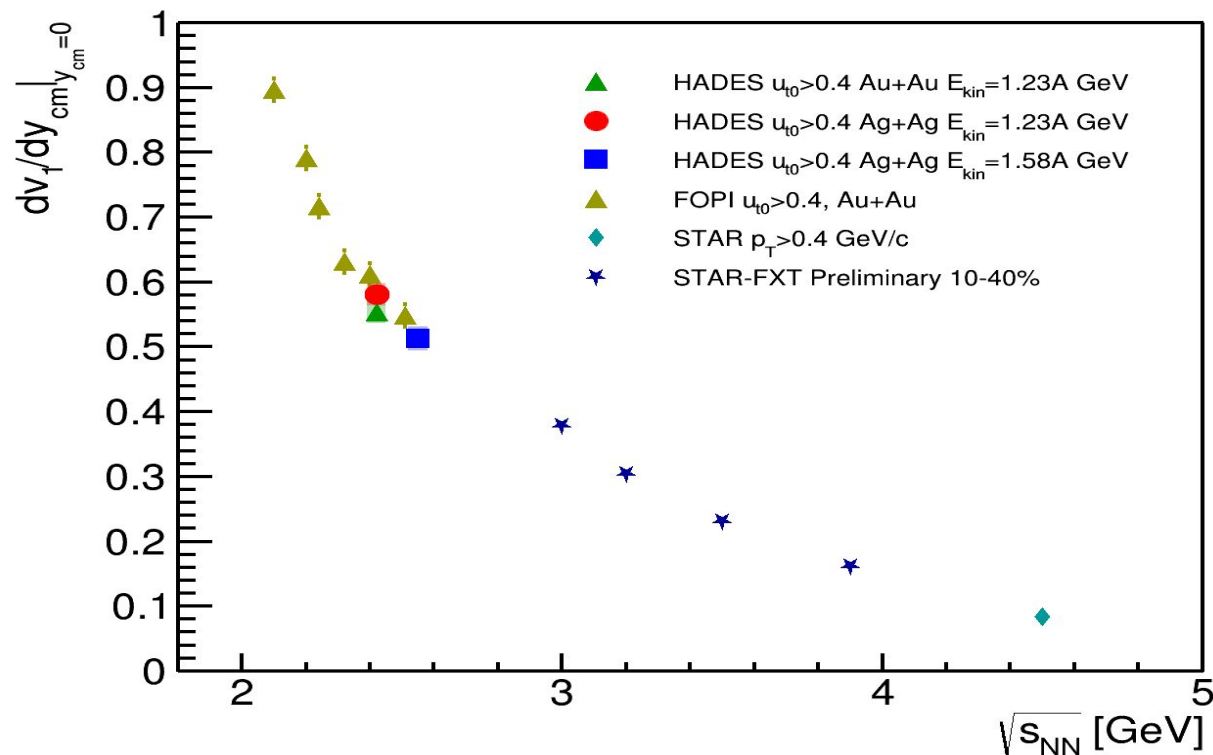
Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — T. 55, № 4. — С. 832—835.



- 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 $E_{kin}=1.23A$ ГэВ
- Модель JAM-MF (с импульсно зависимым средним полем) довольно хорошо описывает зависимость v_1 от быстроты

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

Сравнение результатов с существующими мировыми данными

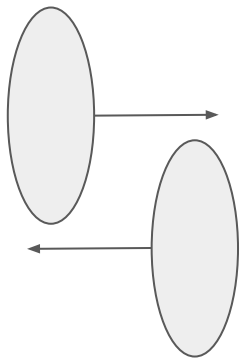


Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — T. 21, № 4. — С. 661—663.

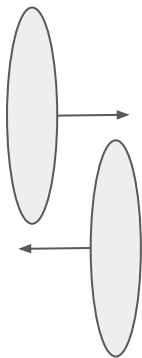
Измеренные значения dv_1/dy протонов хорошо согласуются с данными других экспериментов

Масштабирование dv_1/du с энергией и размером системы

Меньшая энергия



Большая энергия



Более длинное время пролета Более короткое время пролета

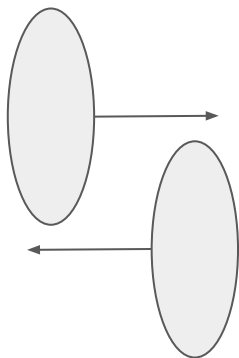
Во время пролета двух ядер t_{pass} :

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

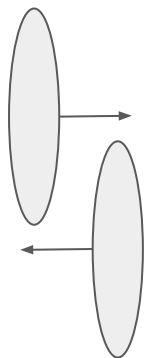
$dv_1/du|_{y=0}$ пропорционален времени пролета $t_{pass}=2R/\sinh(y_{beam}) \Rightarrow$ ожидается масштабирование с y_{beam}

Масштабирование dv_1/du с энергией и размером системы

Меньшая энергия

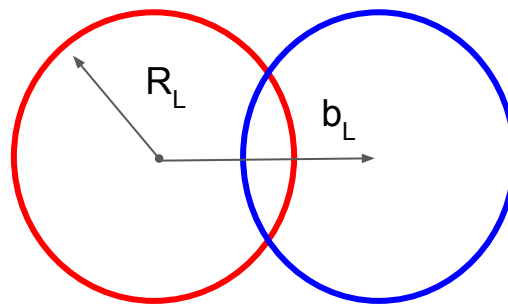


Большая энергия

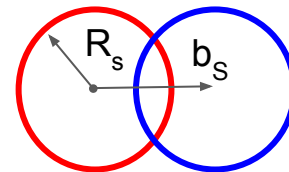


Более длинное время пролета Более короткое время пролета

Большие ядра



Малые ядра



Во время пролета двух ядер:

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

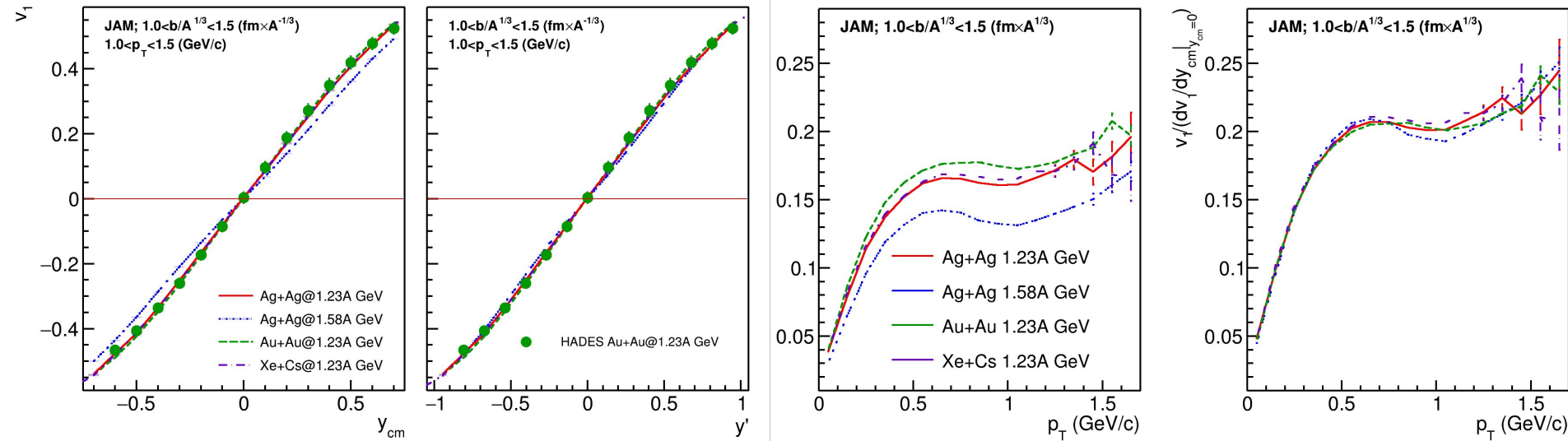
v_1 отражает изначальную асимметрию области перекрытия $\Rightarrow$ ожидается похожий v_1 для одного относительного прицельного параметра b/R

$$b_L/R_L = b_s/R_s$$

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

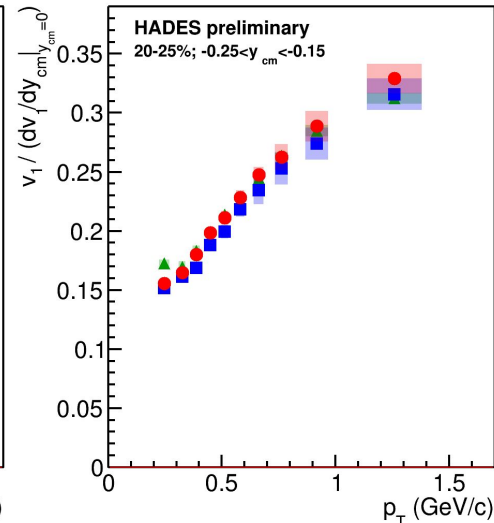
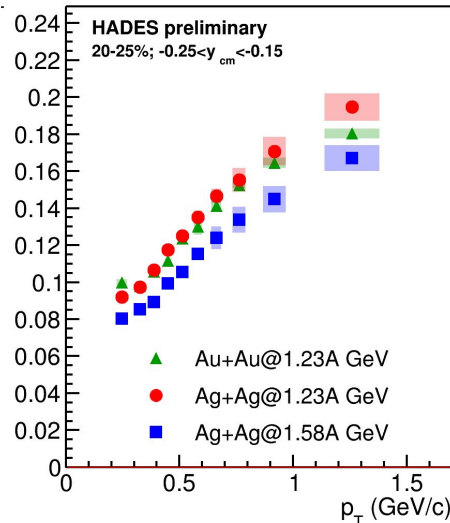
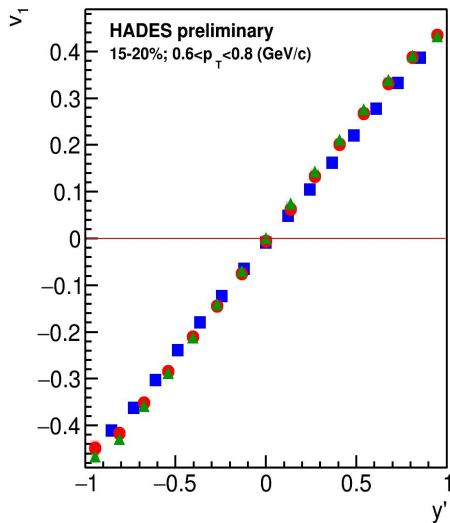
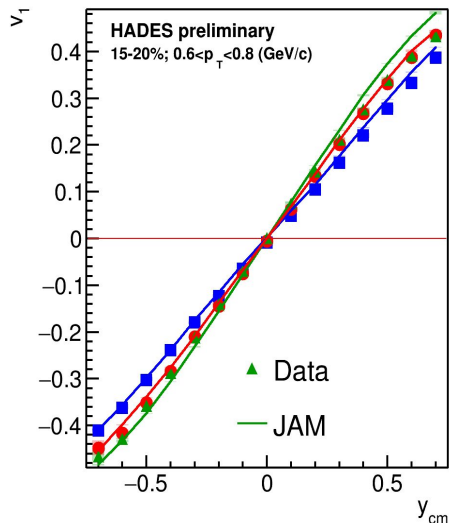
$t_{\text{Au+Au@1.23A GeV}} = 18 \text{ fm/c}$
 $t_{\text{Ag+Ag@1.23A GeV}} = 15 \text{ fm/c}$
 $t_{\text{Ag+Ag@1.58A GeV}} = 13 \text{ fm/c}$

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

Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — T. 55, № 4. — C. 832—835.

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

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



- 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

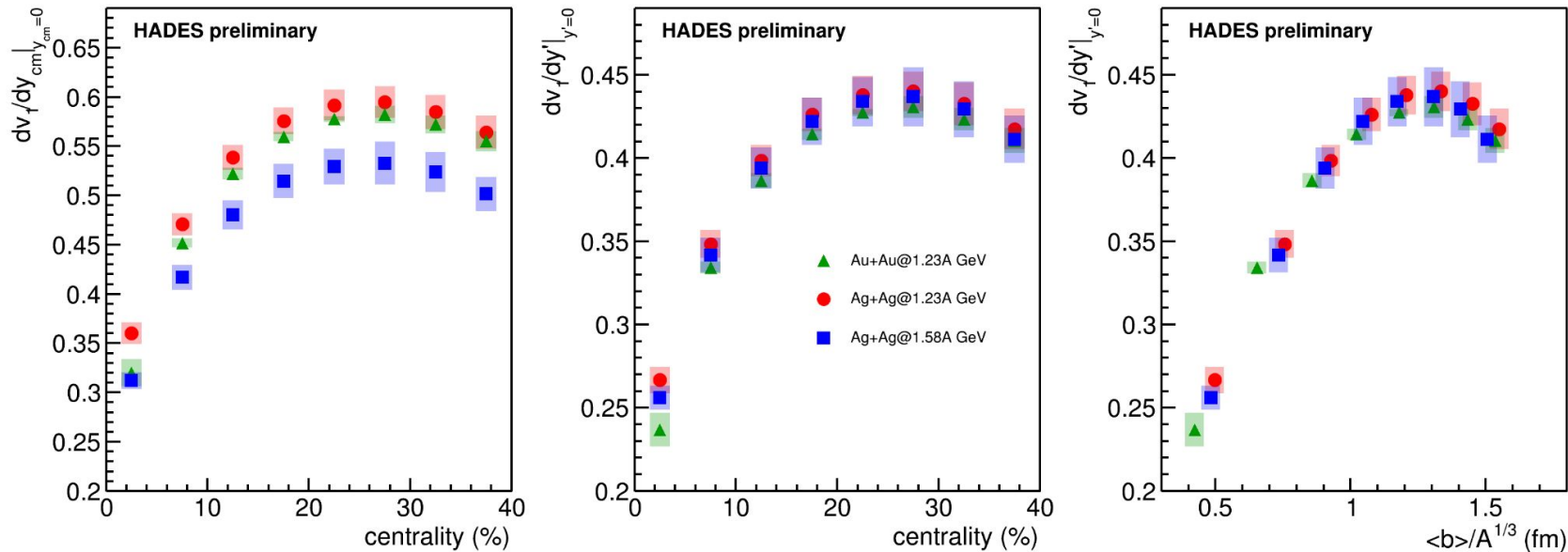
Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — T. 21, № 4. — C. 661—663.

Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — T. 55, № 4. — C. 832—835.

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

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

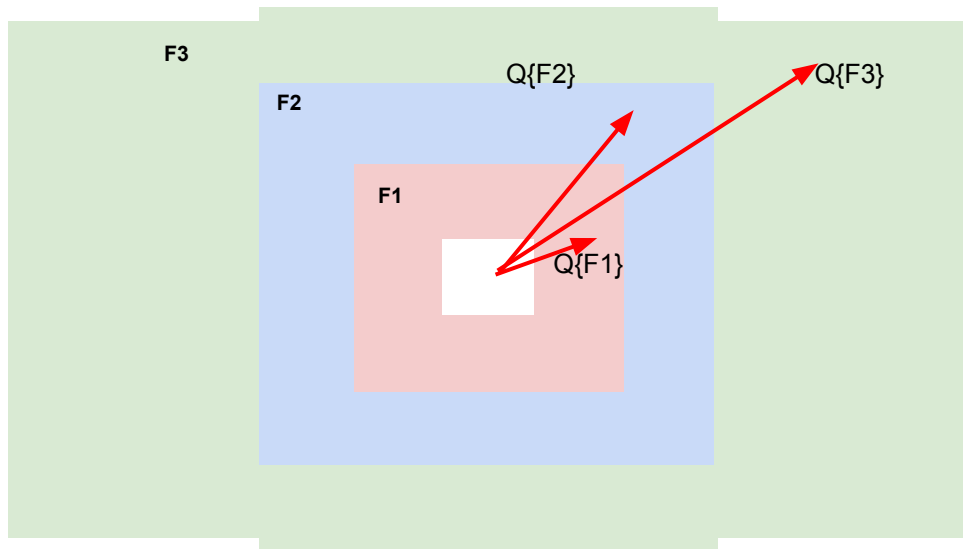
$$\text{Centrality} \rightarrow \langle b \rangle / A^{1/3}$$



- 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 ($\langle b \rangle / A^{1/3}$)

Q-вектора из FHCaI и треков заряженных частиц

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

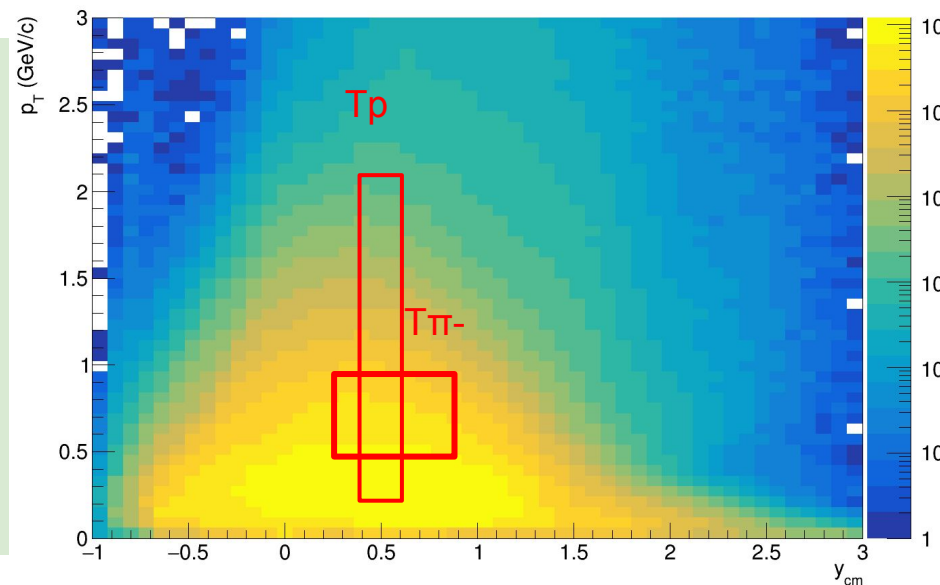


3 вектора из FHCaI:

F1: $4.4 < \eta < 5.5$; $w=E_{\text{kin}}$

F2: $3.9 < \eta < 4.4$; $w=E_{\text{kin}}$

F3: $3.1 < \eta < 3.9$; $w=E_{\text{kin}}$



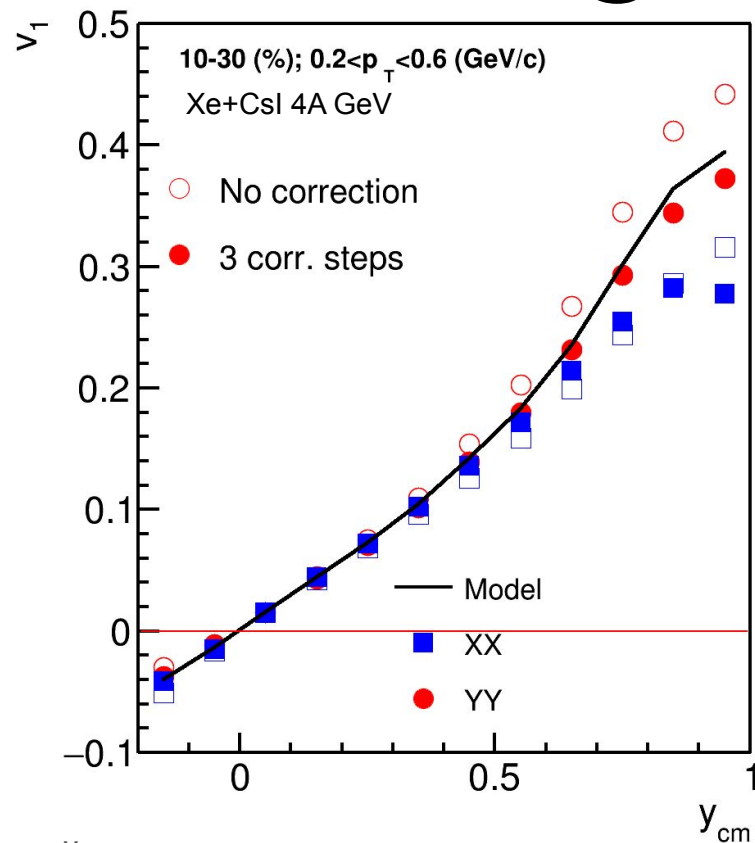
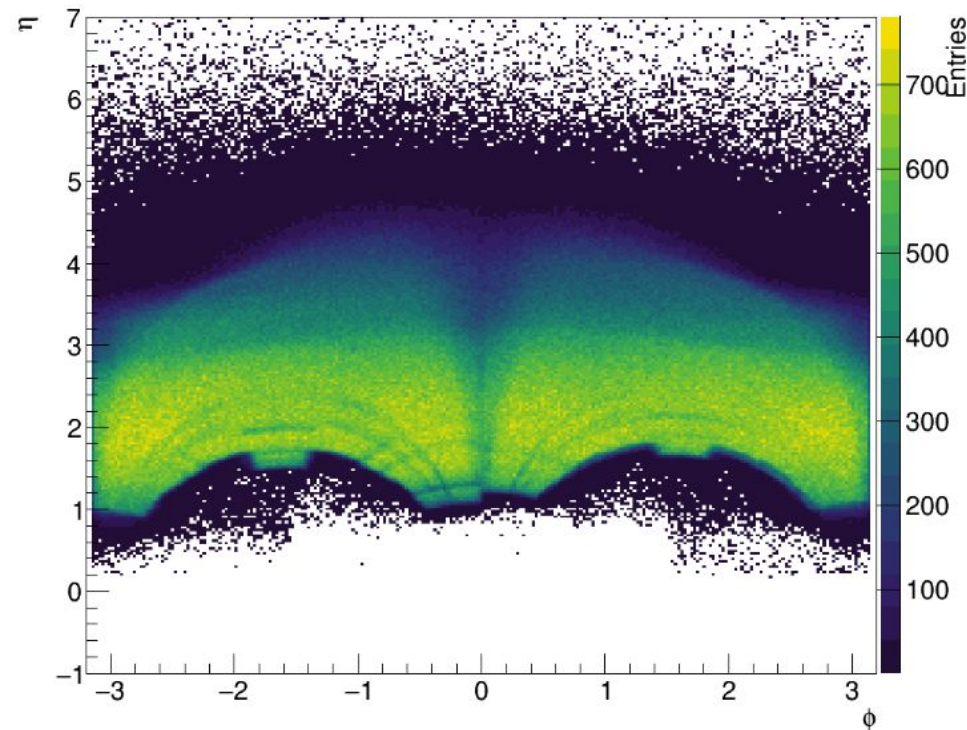
Дополнительные подсобытия из рожденных частиц:

Tr: p ; $0.4 < y < 0.6$; $0.2 < p_T < 2 \text{ GeV/c}$; $w=1/\text{eff}$

Tπ-: π^- ; $0.2 < y < 0.8$; $0.1 < p_T < 0.5 \text{ GeV/c}$; $w=1/\text{eff}$

T-: all negative; $1.0 < \eta < 2.0$; $0.1 < p_T < 0.5 \text{ GeV/c}$;

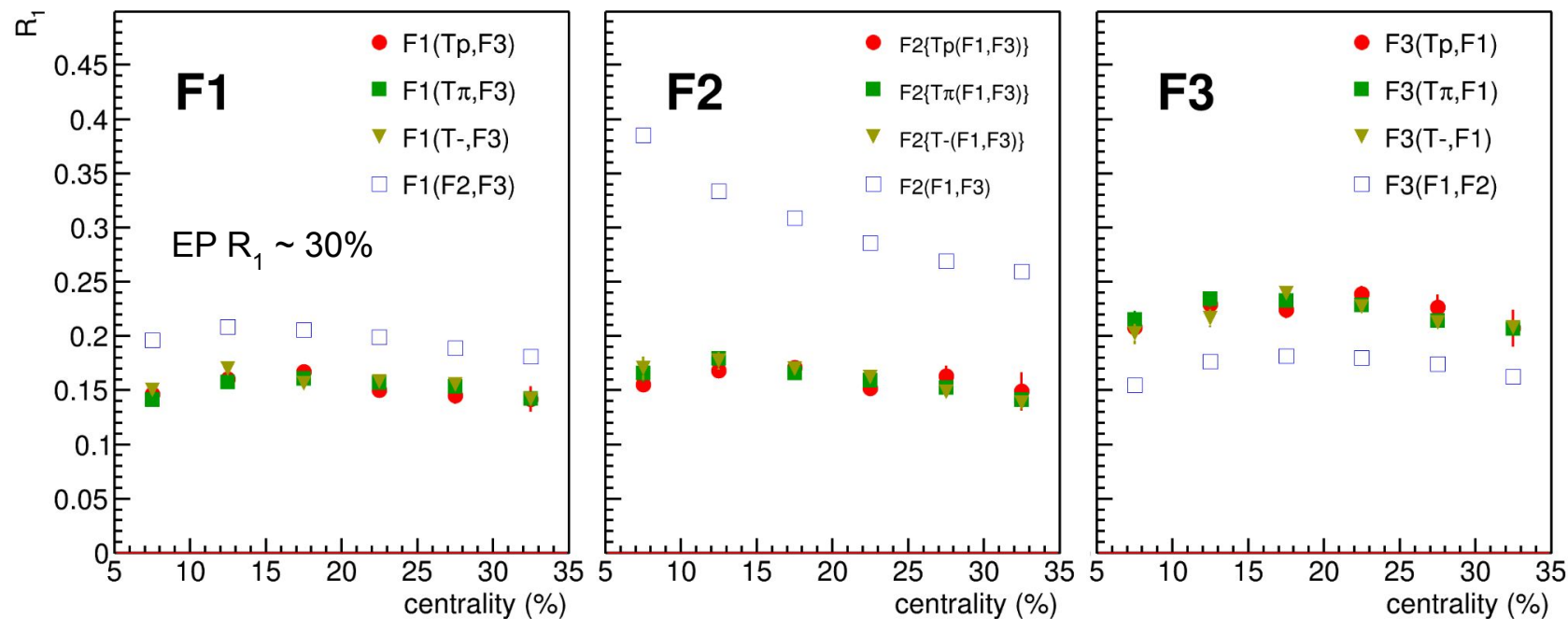
Коррекции на неоднородный аксептанс BM@N



После применения коррекций реконструированные и модельные данные v_1 сходятся

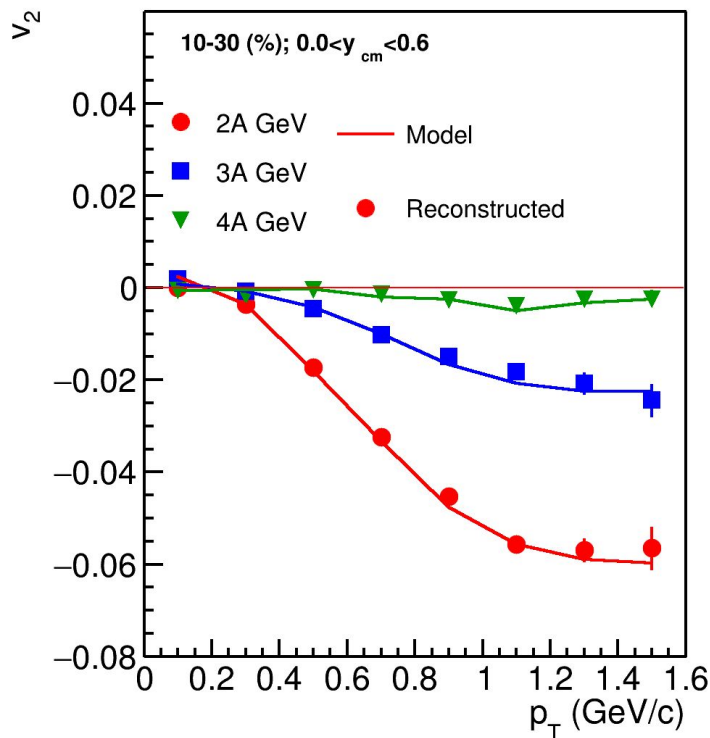
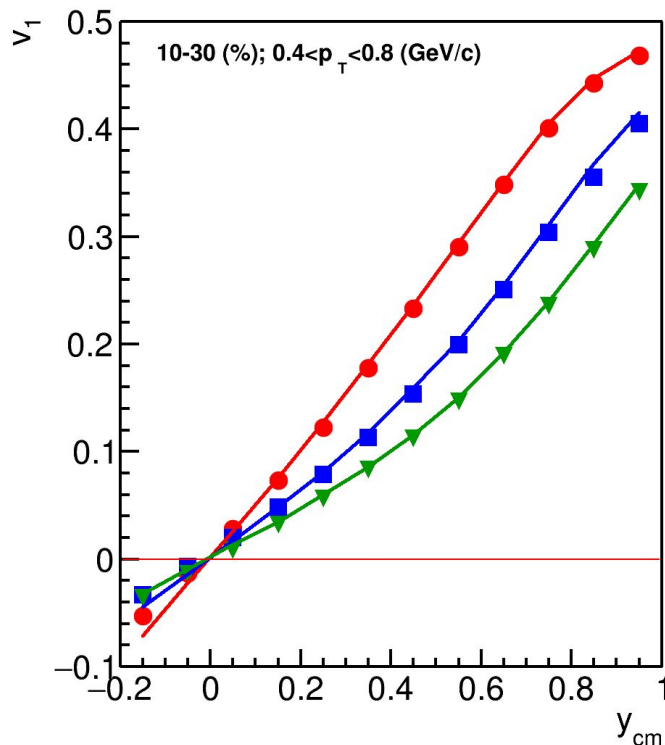
Скалярное произведение: зависимость разрешения плоскости событий R_1 от центральности (модельные данные Xe+Cs(I) $E_{kin} = 3.8$ АГэВ)

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



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

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.](#)

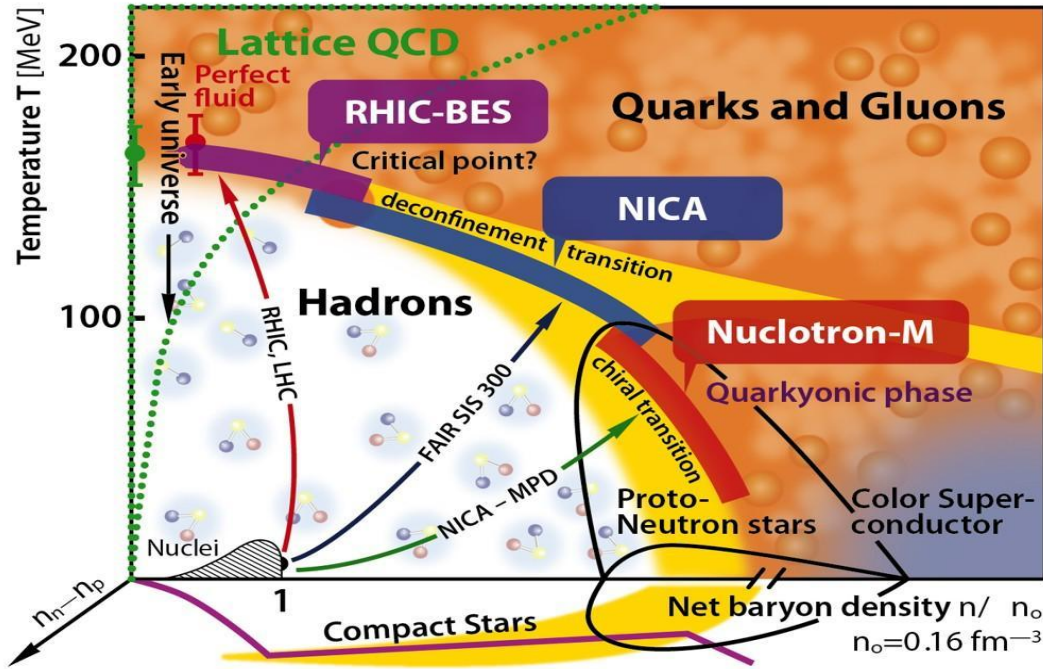
Particles, 2023, 6(2), pp.
622–637

Хорошее согласие между реконструированными и модельными значениями V_n



Critical Temperature
 $T_c \approx 156 \pm 9$ MeV

[PRD 90 094503 (2014)]

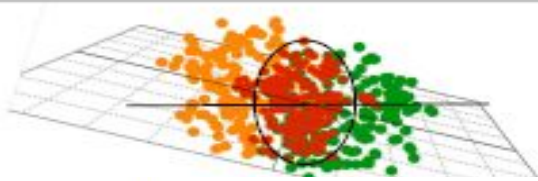


Heavy ion collisions

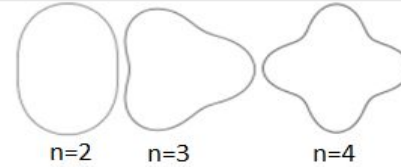
In 2005 4 experiments (STAR, PHENIX, BRAHMS, PHOBOS) at RHIC announced discovery of quark-gluon matter (QGM) with properties of ideal fluid in Au+Au at the energy of $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV
 In 2010 experiments (ALICE, ATLAS, CMS) at LHC confirmed the observing of QGM in Pb+Pb at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV

Smooth transition (crossover) to partonic degrees of freedom at zero baryon densities

Anisotropic flow at RHIC and LHC

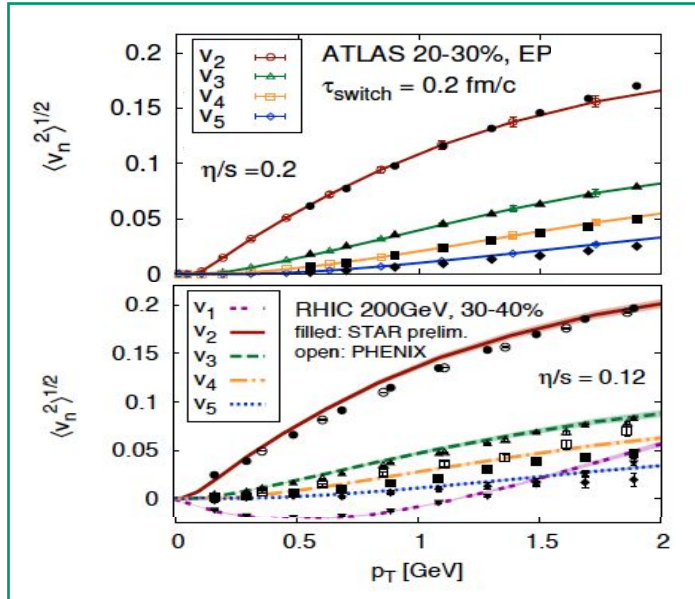


$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$



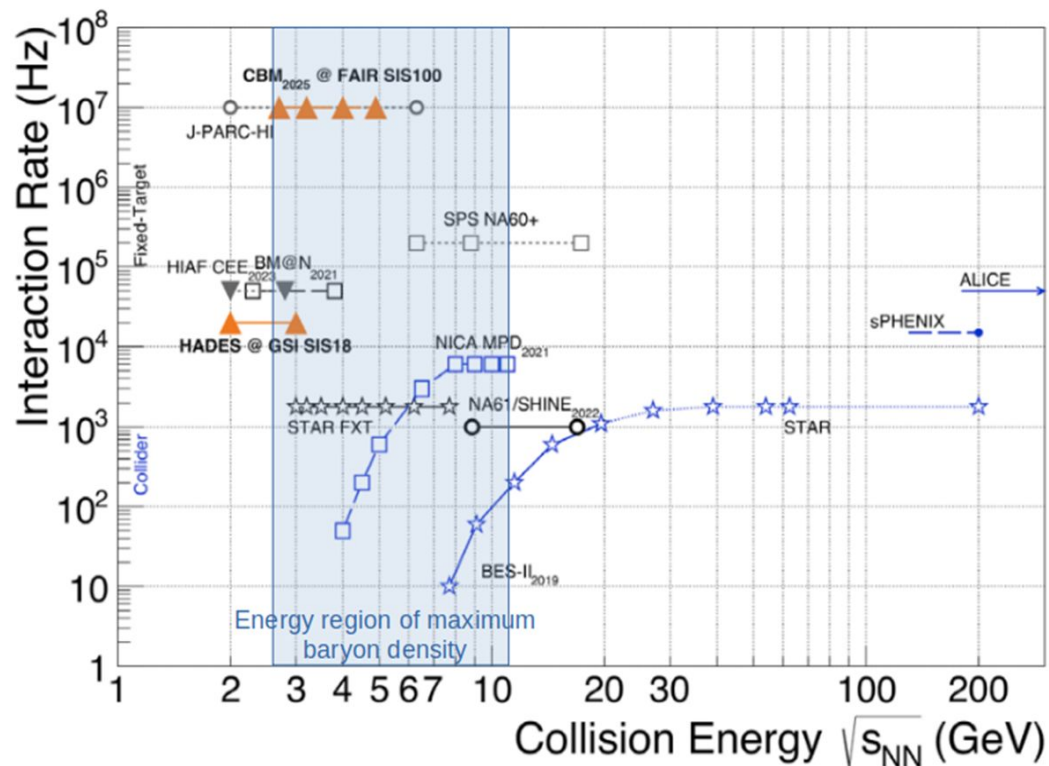
$$\frac{d^2 N}{d\phi d\Psi_{RP}} = \frac{N}{2\pi} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\phi - \Psi_{RP}) \right)$$

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



- The overlap region eccentricity ϵ_n (and corresponding fluctuations) causes azimuthal anisotropy in momentum space v_n with viscous modulations η/s
- For v_2 and v_3 : $v_n \sim k_n \epsilon_n$
- Anisotropic flow at RHIC and LHC are well-described by viscous hydrodynamics with η/s close to the predicted minimum $\eta/s > 1/4\pi$

HIC-experiments at the high-baryon density region



HIC experiments where high-baryon density can be achieved:

Existing:

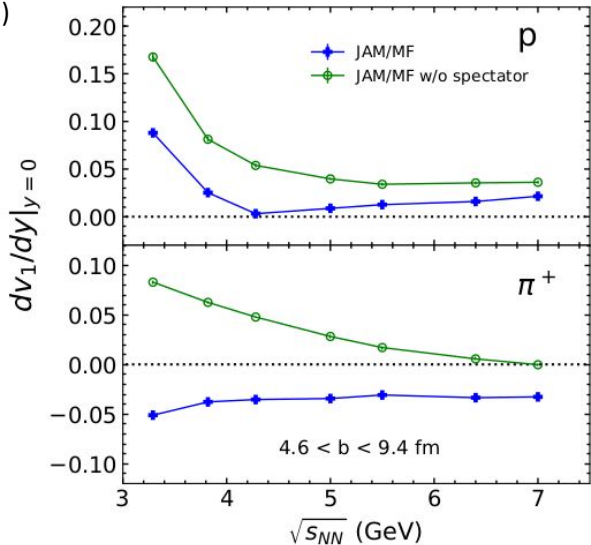
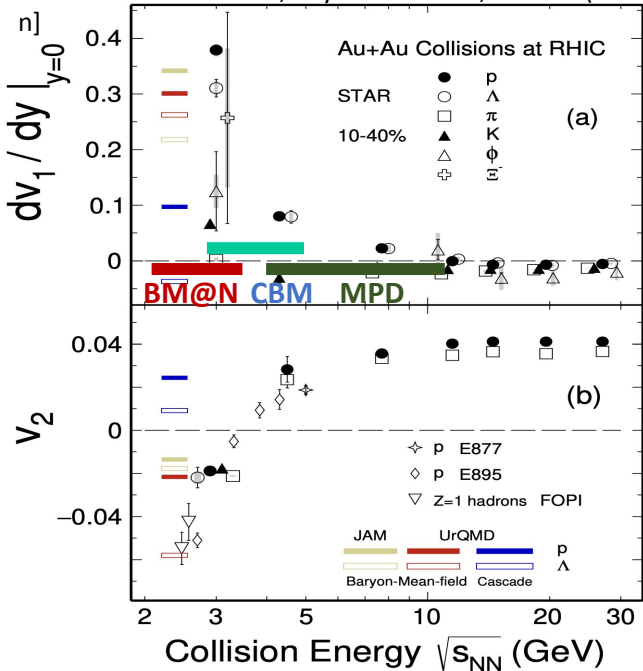
BM@N/NICA — 2.4-3.3 GeV
HADES/SIS18 — 2.4-2.55 GeV
STAR/RHIC — 3-200 GeV

Future:

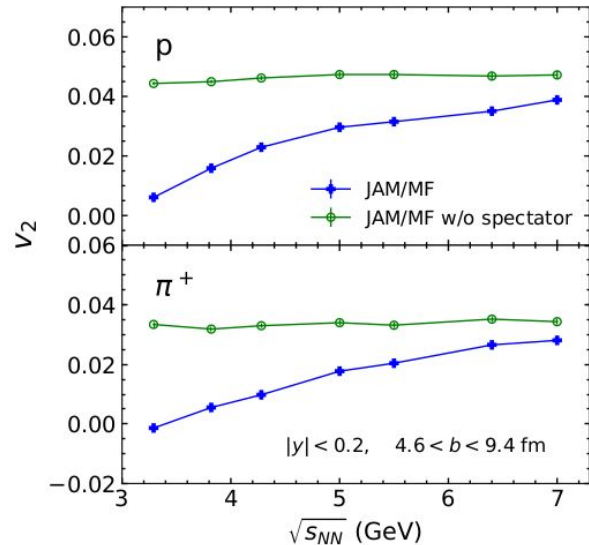
MPD/NICA — 4-11 GeV (2025)
CEE/HIAF — 2.1-4.4 GeV (2026)
CBM/FAIR 2.4-4.9 GeV (2029)

Anisotropic flow in HIC at high-baryon density

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



$$\begin{aligned} \sqrt{s_{NN}} &= 10 \text{ GeV}: t_{\text{pass}} \sim 1 \text{ fm/c} \\ \sqrt{s_{NN}} &= 2, 4 \text{ GeV}: t_{\text{pass}} \sim 20 \text{ fm/c} \end{aligned}$$



Phys. Rev. C 97, 064913 (2018)

At the energies of BM@N anisotropic flow is heavily influenced by:

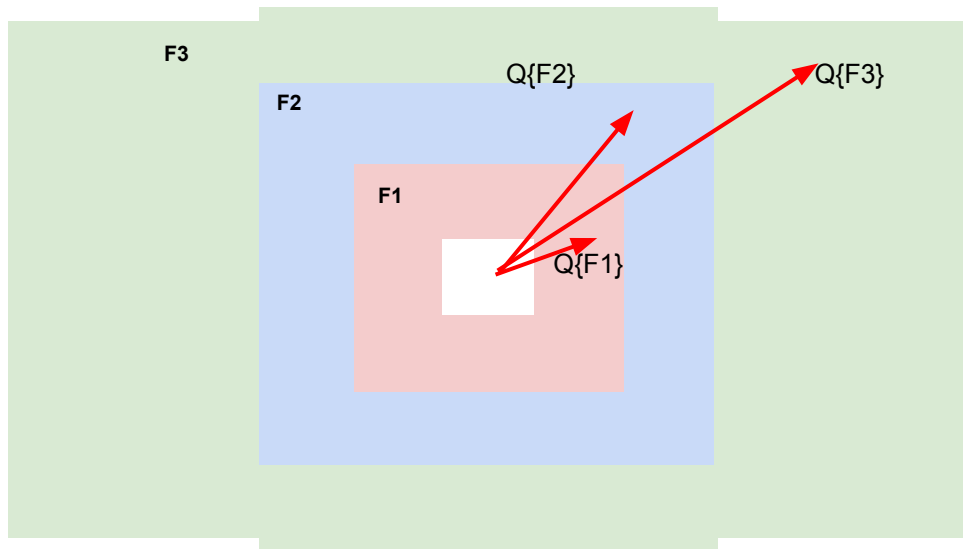
1. Time of expansion of the overlap region:
2. Passing time of colliding nuclei:

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

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

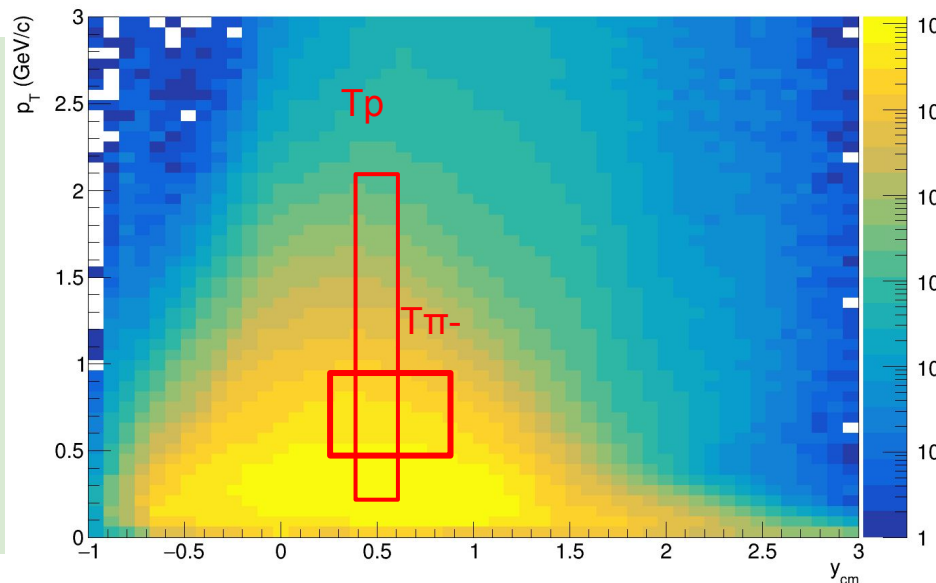
Q-vectors from FHCAL charged particle trajectories

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



3 vectors from FHCAL:

F1: $4.4 < \eta < 5.5$; $w = E_{\text{kin}}$
F2: $3.9 < \eta < 4.4$; $w = E_{\text{kin}}$
F3: $3.1 < \eta < 3.9$; $w = E_{\text{kin}}$



Additional subevents from charged particles tracks:

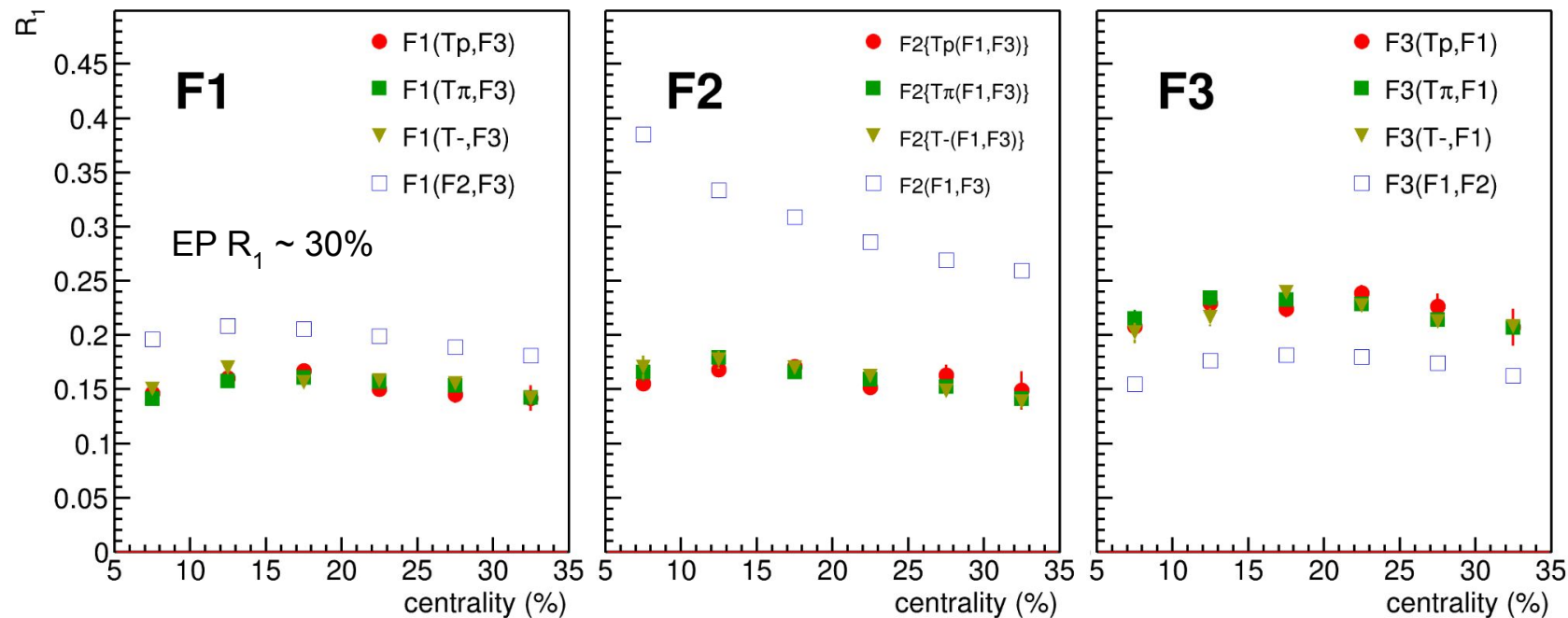
T_p : p ; $0.4 < y < 0.6$; $0.2 < p_T < 2$ GeV/c; $w = 1/\text{eff}$

T_{π^-} : π^- ; $0.2 < y < 0.8$; $0.1 < p_T < 0.5$ GeV/c; $w = 1/\text{eff}$

T_- : all negative; $1.0 < \eta < 2.0$; $0.1 < p_T < 0.5$ GeV/c;

R_1 vs centrality for Xe+Cs(I) at $E_{\text{kin}}=4A$ GeV: MC-simulation

Mamaev M. Phys. Part. Nucl. Lett. — 2023. — T. 20, № 5. — C. 1205—1208.



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