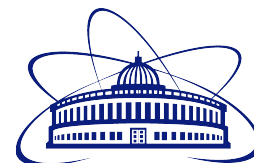


Исследование направленного потока протонов в ядро-ядерных столкновениях при энергиях $E_{kin}=1.2 — 4$ А ГэВ

По материалам кандидатской диссертации

Мамаев Михаил Валерьевич (ЛФВЭ ОИЯИ, НИЯУ МИФИ)
Научный руководитель: Тараненко Аркадий Владимирович (PhD)

Общелабораторный семинар ЛФВЭ
11/04/2025



Текст диссертации и автореферата

Диссертация:

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

Автореферат:

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

Email: mam.mih.val@gmail.com

Цель работы

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

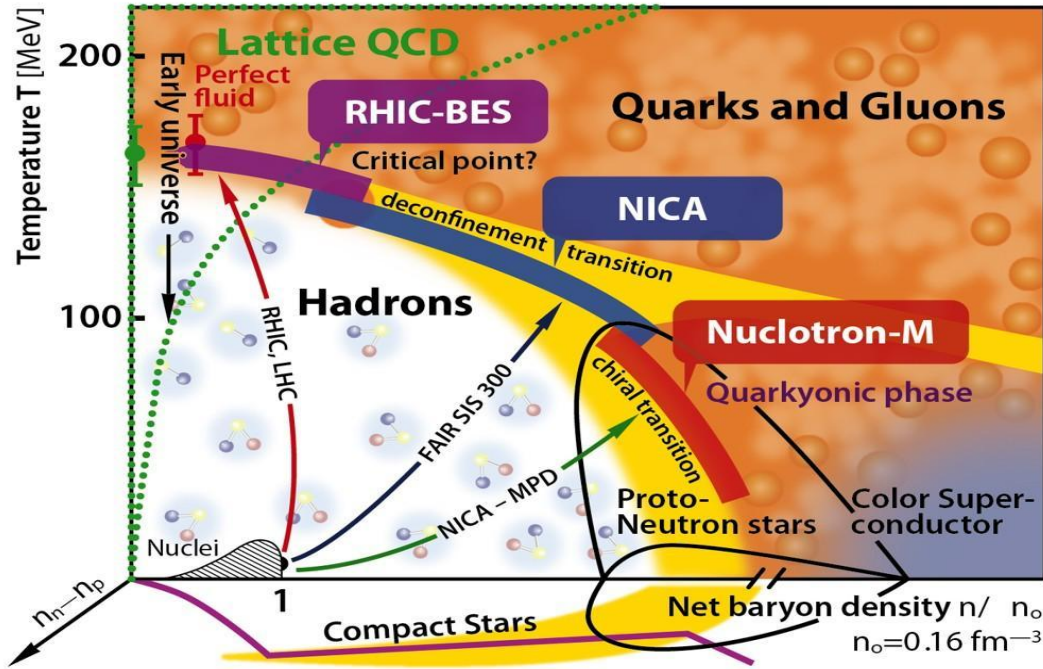
План презентации

1. Введение
2. Анизотропные коллективные потоки в столкновениях релятивистских тяжелых ионов и их чувствительность к свойствам сжатой барионной материи
3. Современные методы измерения анизотропных потоков в экспериментах с фиксированной мишенью
4. Измерение направленного потока протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag в эксперименте HADES (GSI)
5. Исследование эффективности установки BM@N (NICA) для измерения анизотропных потоков протонов
6. Предварительные результаты измерения потока протонов в столкновениях Xe+CsI при $E_{\text{kin}} = 3,8\text{A}$ ГэВ на установке BM@N



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

[PRD 90 094503 (2014)]

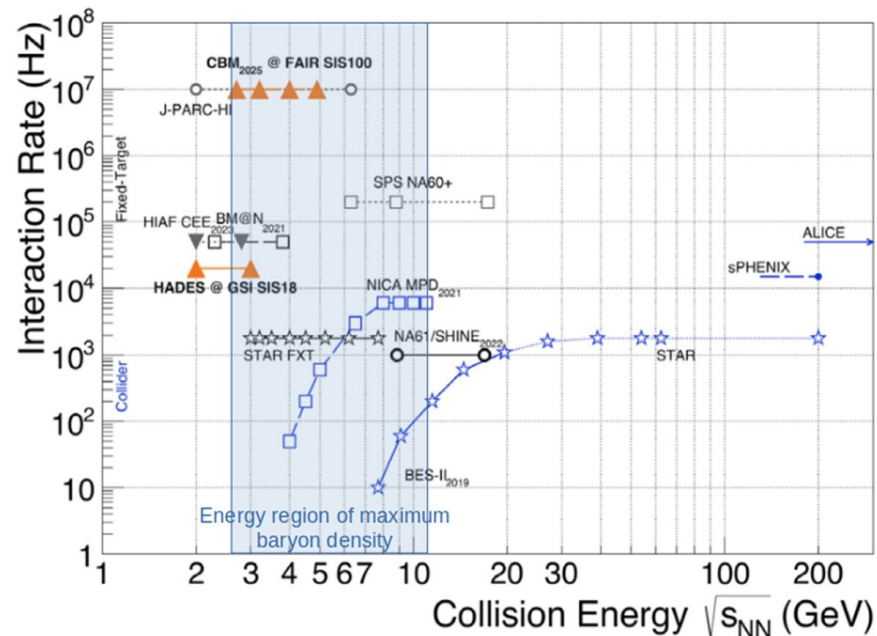


Столкновения релятивистских тяжелых ионов

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

Эксперименты по изучению сжатой барионной материи



Эксперименты в области высоких барионных плотностей:

Существующие:

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

Будущие:

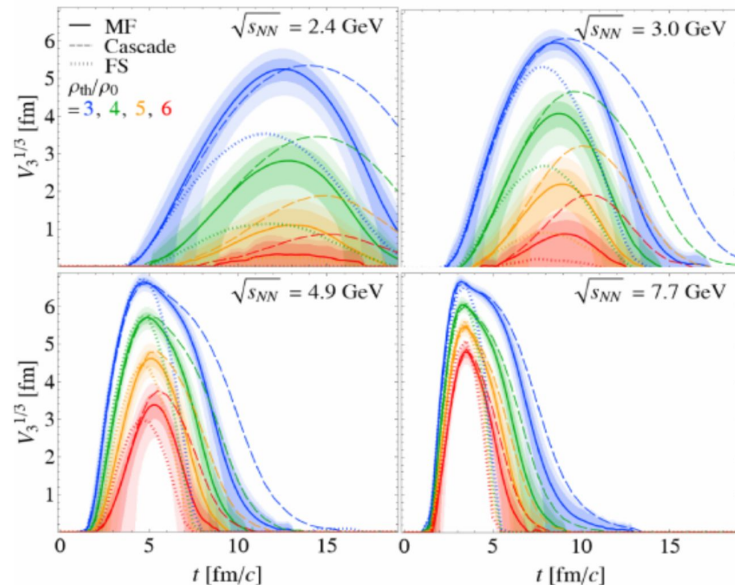
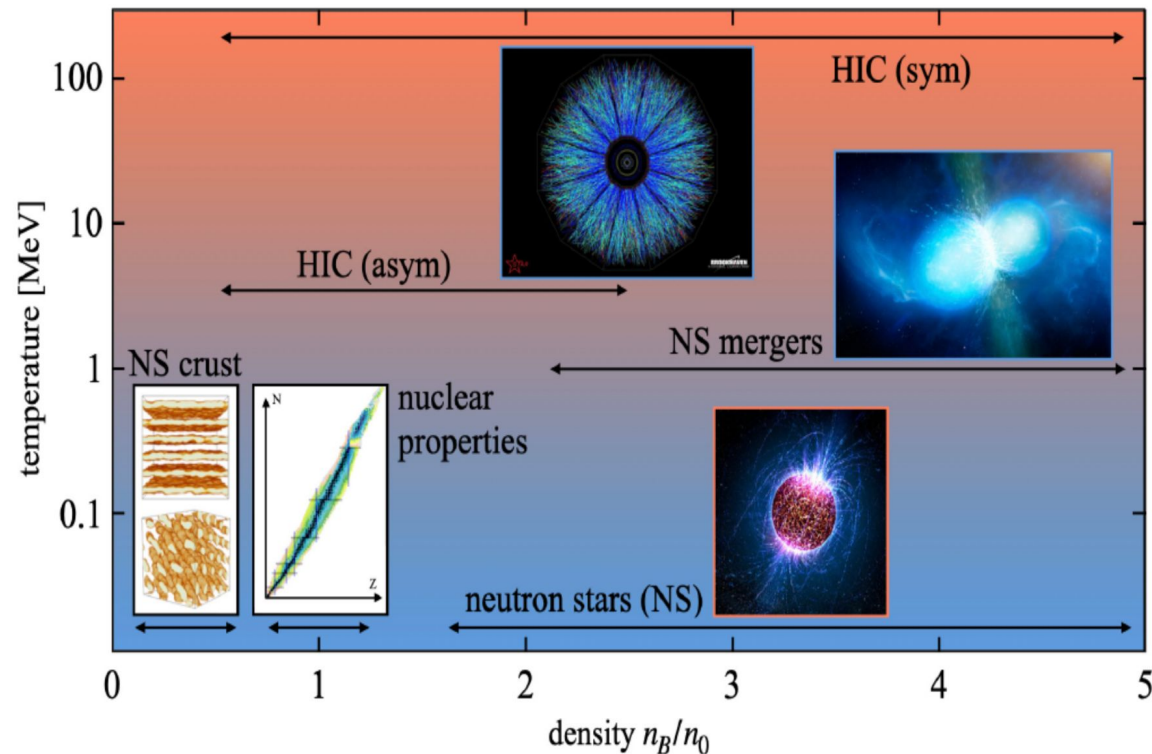
MPD/NICA (ОИЯИ) — 4-11 ГэВ (2025)
 CEE/HIAF (Китай) — 2.1-4.4 ГэВ (2026)
 CBM/FAIR (Германия) 2.4-4.9 ГэВ (2029)

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 $\longrightarrow$ $3.5 < \sqrt{s_{NN}} < 4.9$ GeV

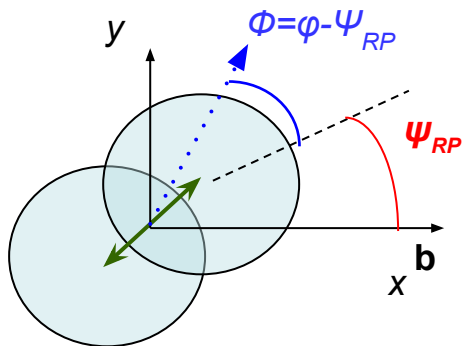
Сжатая барионная материя в лаборатории и астрофизике

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

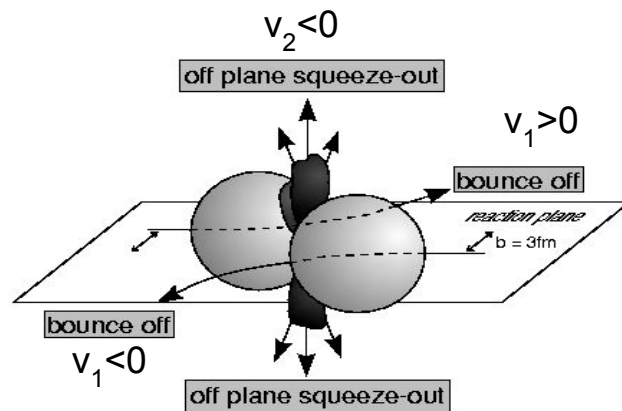
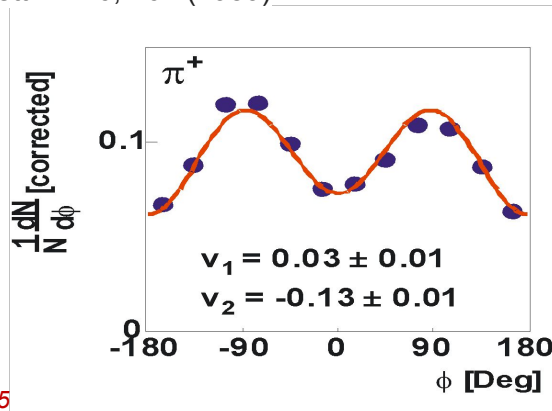


Коллективные анизотропные потоки 1989-2000

Diogene, M. Demoulin 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



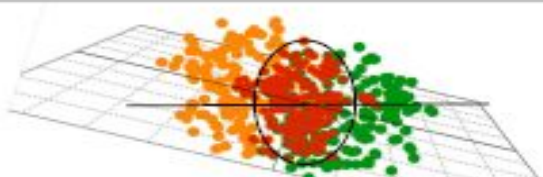
$$\frac{d^2 N}{d\varphi d\Psi_{RP}} = \frac{N}{2\pi} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\phi - \Psi_{RP}) \right)$$

Величина анизотропных потоков определяется коэффициентами ряда Фурье

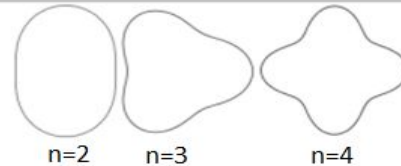
$$v_n = \langle \cos n(\phi - \Psi_{RP}) \rangle$$

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

Анизотропные потоки на RHIC и LHC

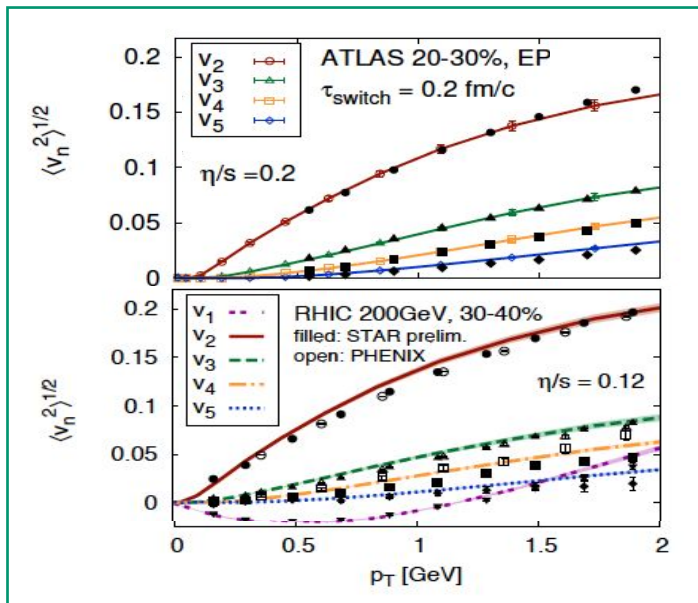


$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$



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

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

Непоточковые корреляции

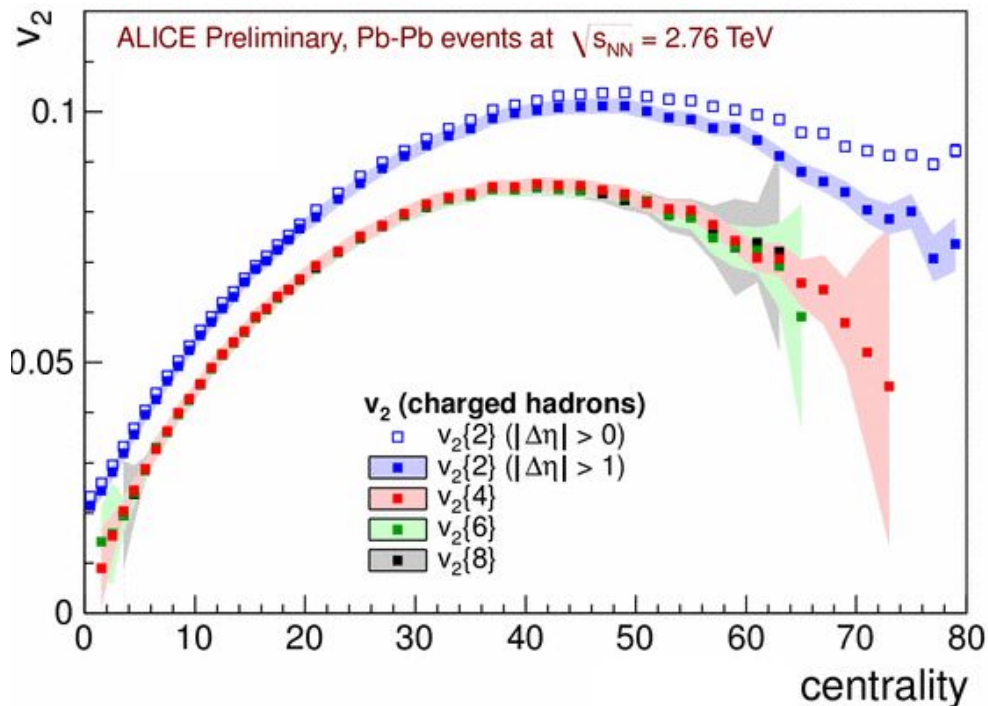
Существуют корреляции между частицами, не связанные с плоскостью реакции. Эти корреляции называются «непоточковыми»

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:

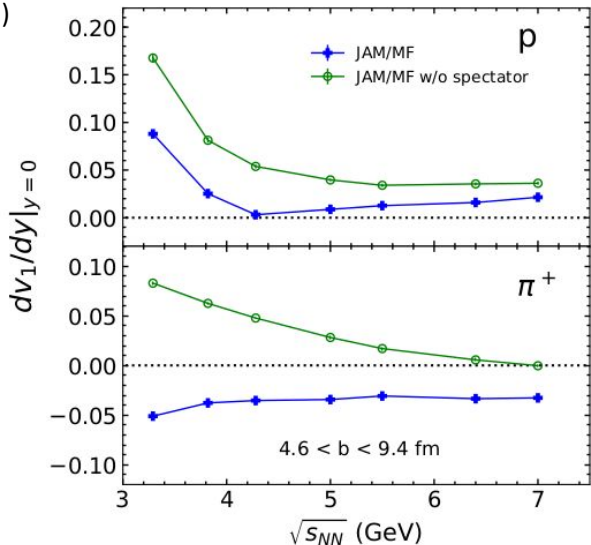
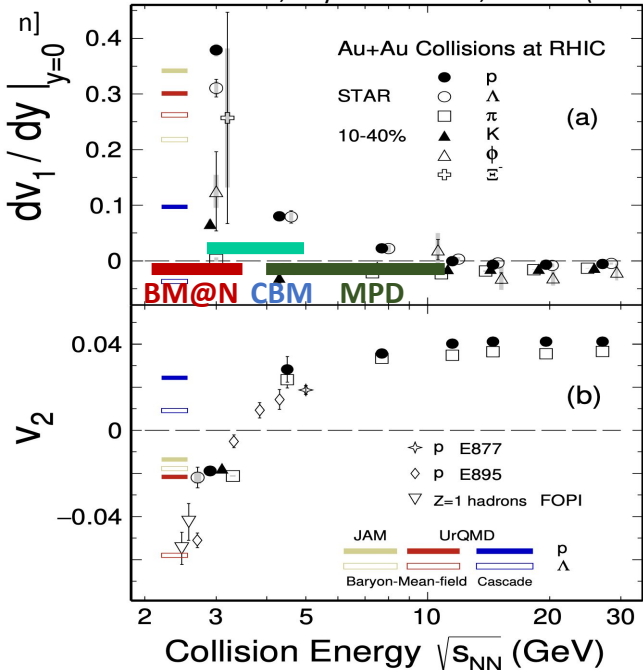
- Разделение траектории одной частицы в результате реконструкции
- Слияние траекторий двух частиц в результате реконструкции
- Сигналы от пролёта одной и той же частицы в соседних модулях сегментированных детекторов



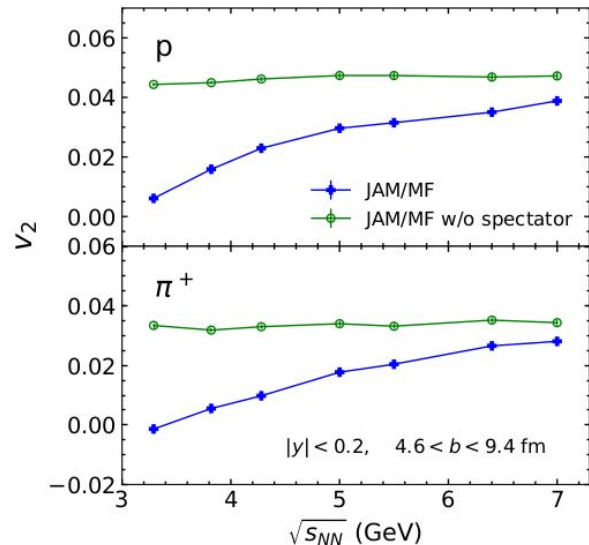
Как правило «непоточковые» корреляции оказывают существенное влияние только на частицы с близкими импульсами, их можно также подавить, увеличив интервал быстроты между частицами.

Анизотропный поток в столкновениях тяжелых ионов при высокой барионной плотности

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



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



Phys. Rev. C 97, 064913 (2018)

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

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

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

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

Уравнение состояние (EoS) сжатой барионной материи

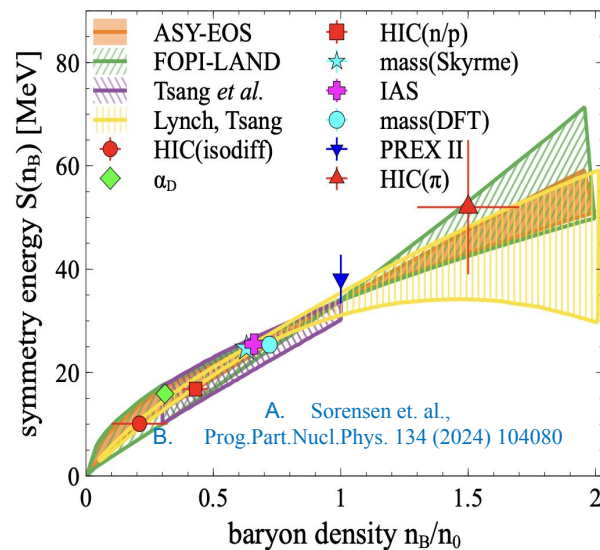
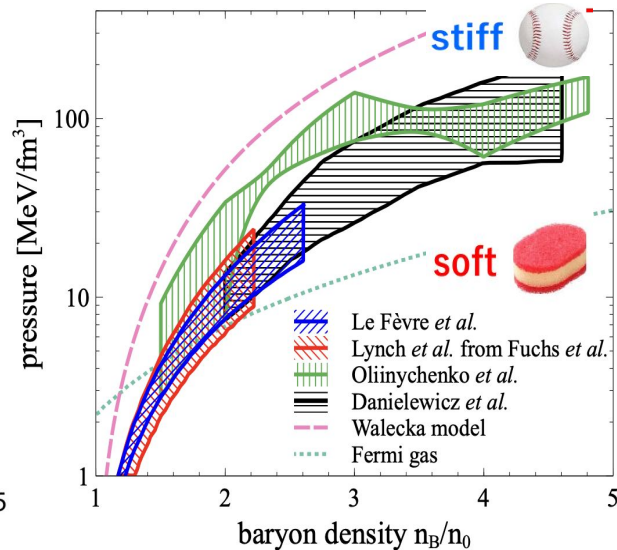
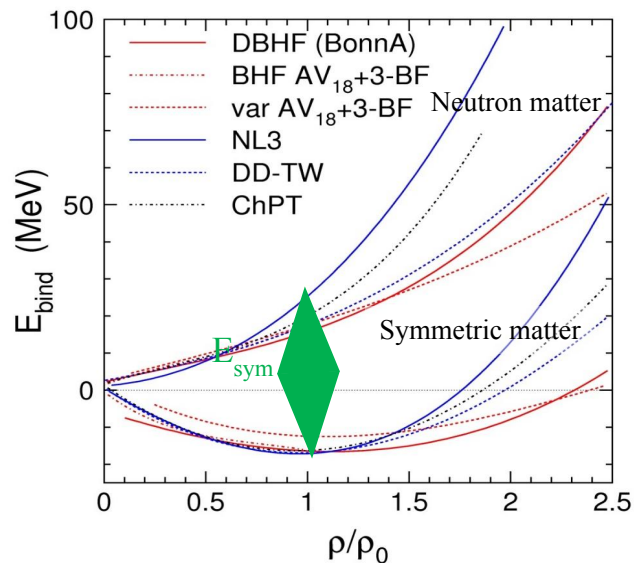
Давление $P = n^2 \frac{d(E/A)}{dn_b}$

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

Изоспиновая асимметрия $n_B = n_p + n_n$

Симметричная материя

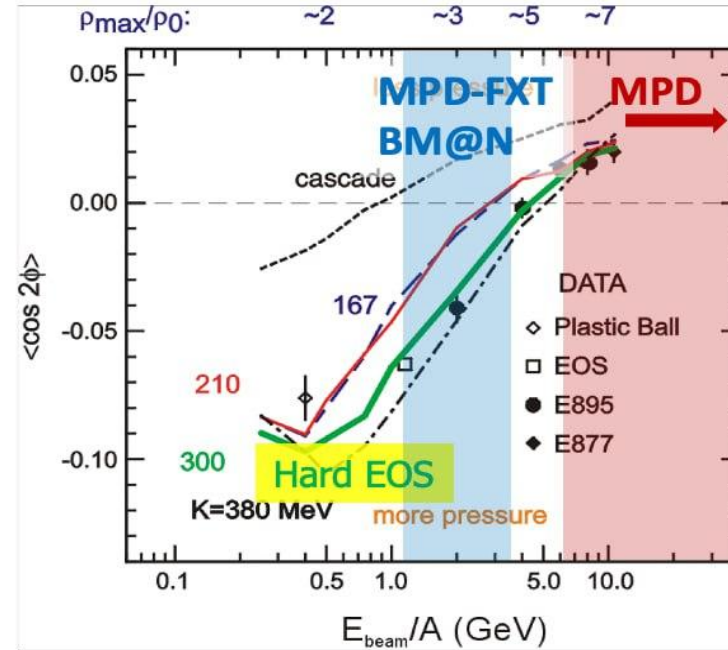
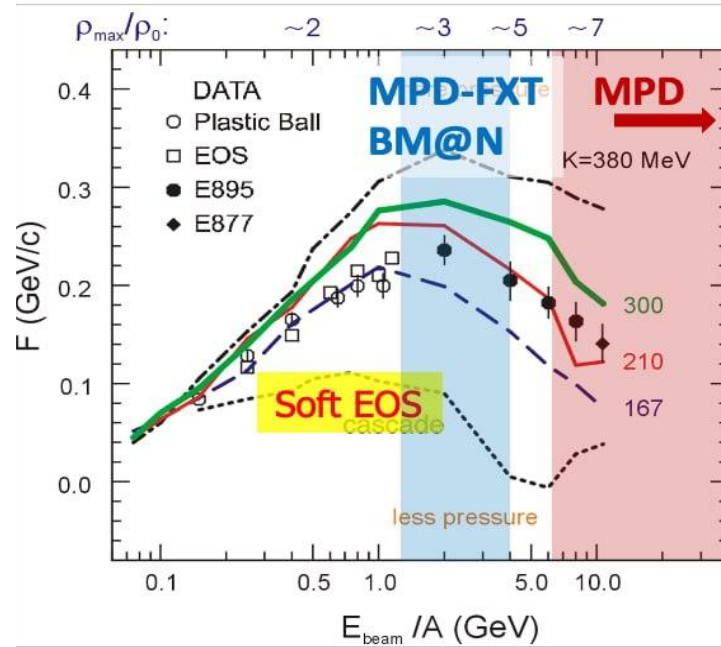
Энергия симметрии



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

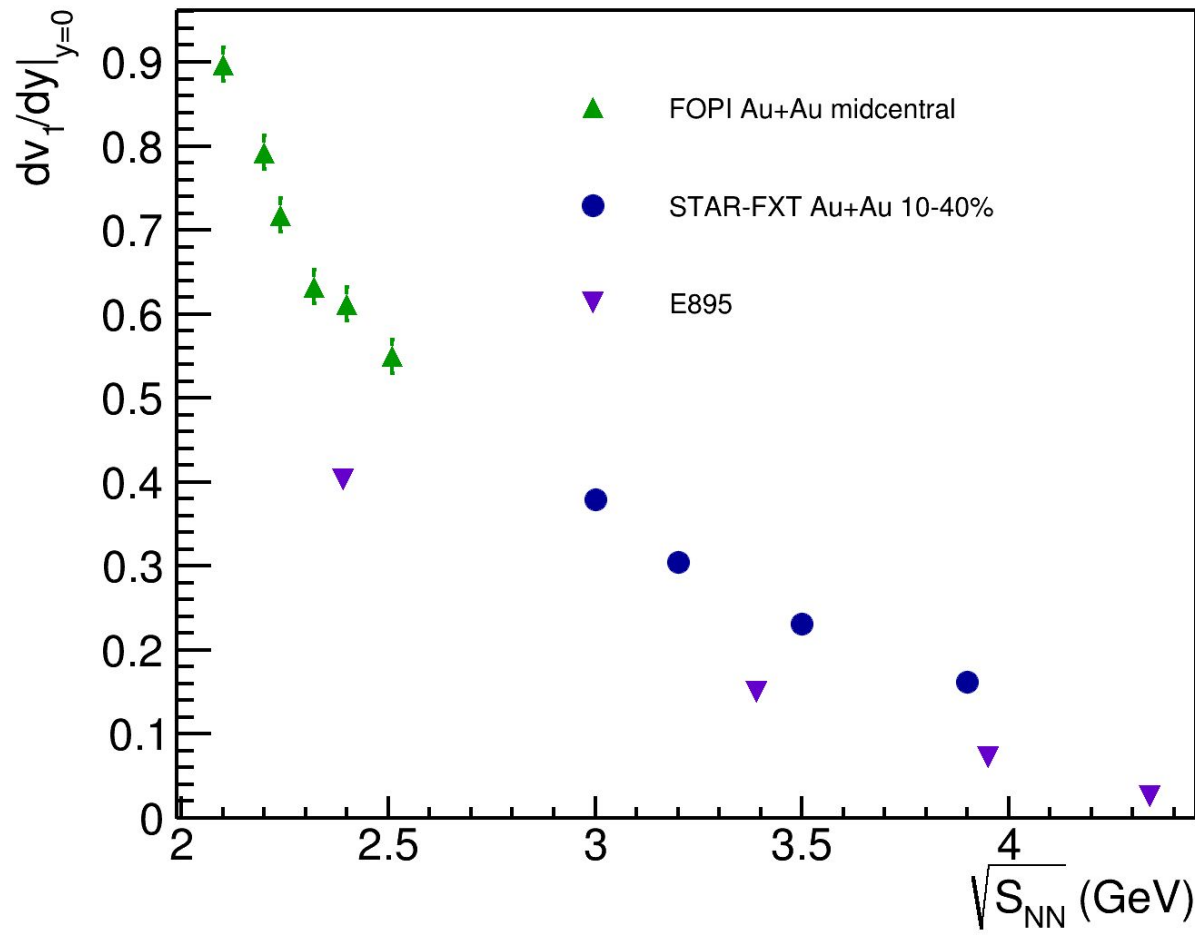
ν_n при энергиях NUCLOTRON-NICA

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



- Результаты старвнения ν_n с теоретическими предсказаниями неоднозначны:
 - ν_1 предполагает $K_{\text{nm}} \sim 210$ MeV and ν_2 предполагает $K_{\text{nm}} \sim 300$ MeV
- Необходимы дополнительные измерения, чтобы уточнить значение K_{nm}

Необходимость новых измерений ν_1



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

Задачи, которые необходимо решить

1. Усовершенствовать и применить на практике метод измерения коллективных потоков в экспериментах с фиксированной мишенью с учетом неоднородности азимутального аксептанса установки.
2. Разработать метод учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц (непоточковых корреляций), и изучить их влияние на результаты измерения коллективных потоков.
3. Исследовать характеристики направленного потока ν_1 протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}}=1,23\text{-}1,58\text{ А ГэВ}$ ($\sqrt{s_{\text{NN}}}=2,4\text{-}2,55\text{ ГэВ}$) в эксперименте HADES.
4. Произвести сравнение полученных результатов измерения ν_1 протонов с теоретическими моделями и данными других экспериментов.
5. Исследовать влияние спектаторов налетающего ядра на формирование ν_1 протонов с помощью проверки законов масштабирования коллективных потоков с энергией и геометрией столкновения.
6. Изучить возможности измерения коллективных потоков протонов в эксперименте BM@N (NICA).

Векторы потока u_n и Q_n

Из импульса каждой частицы
определяется единичный вектор u_n :

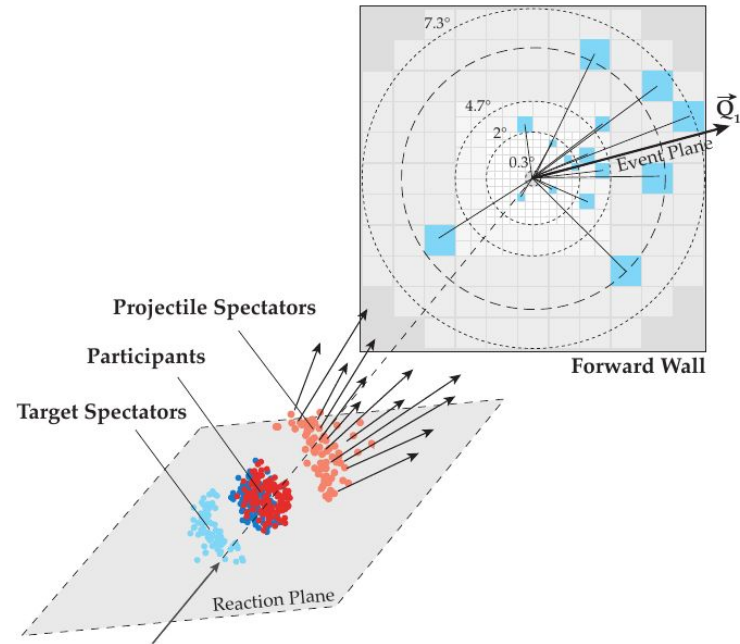
$$\vec{u}_n = (\cos n\varphi, \sin n\varphi)$$

где φ — азимутальный угол импульса

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

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

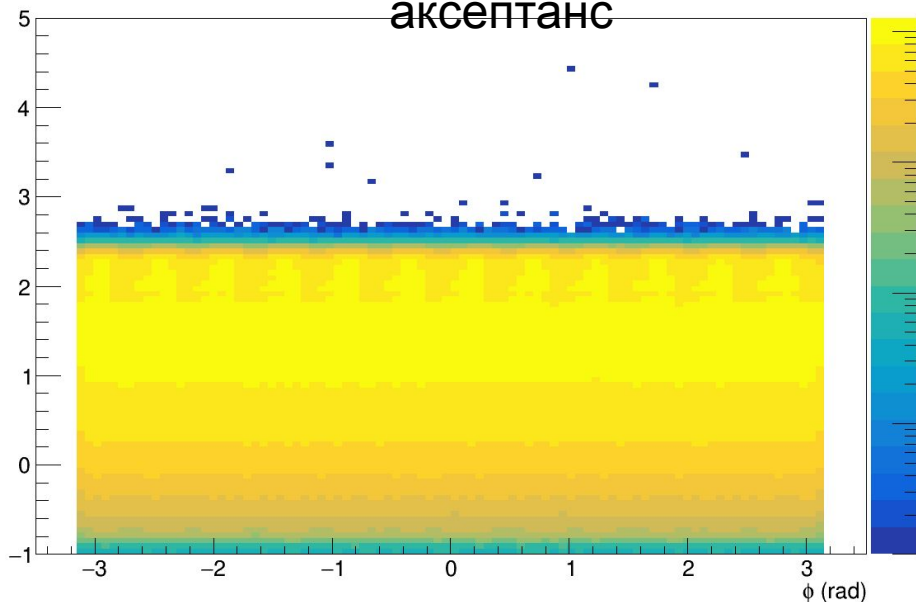
Ψ_n^{EP} — угол плоскости симметрии
(оценка угла плоскости реакции)



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

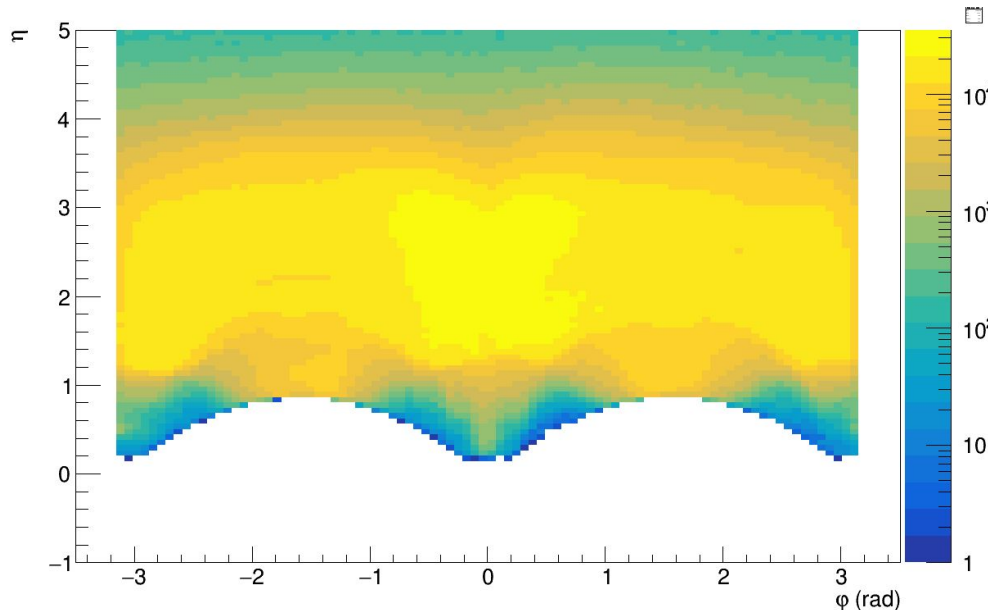
Влияние азимутального аксептанса на v_n

Однородный азимутальный аксептанс



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

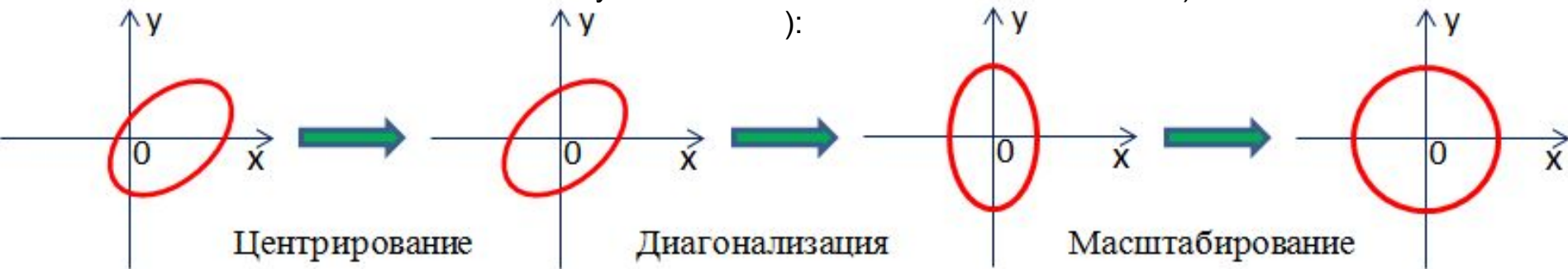
Неоднородный азимутальный аксептанс



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

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:

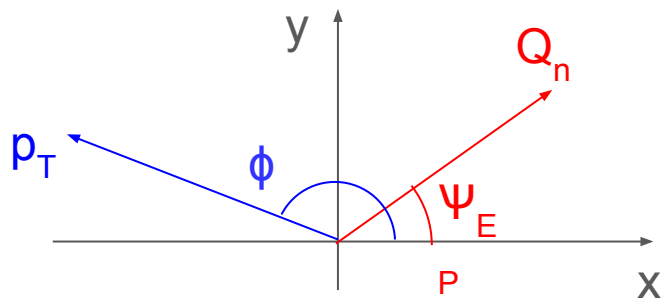
https://github.com/mam-mih-val/qntools_macros

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

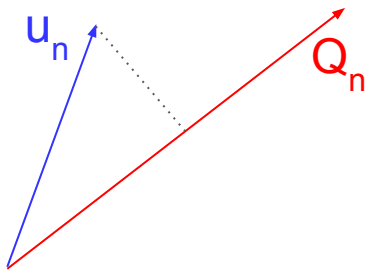
Метод скалярного произведения

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:

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

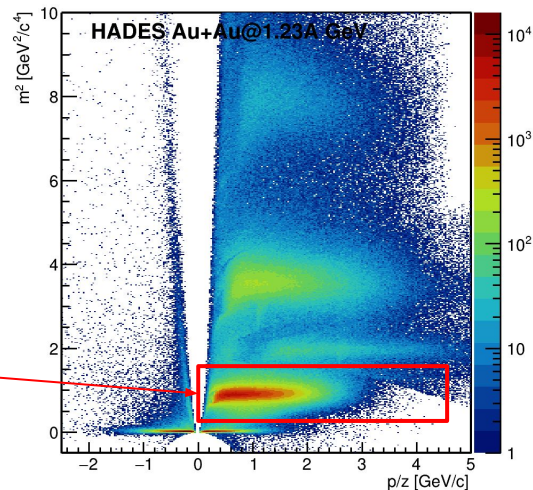
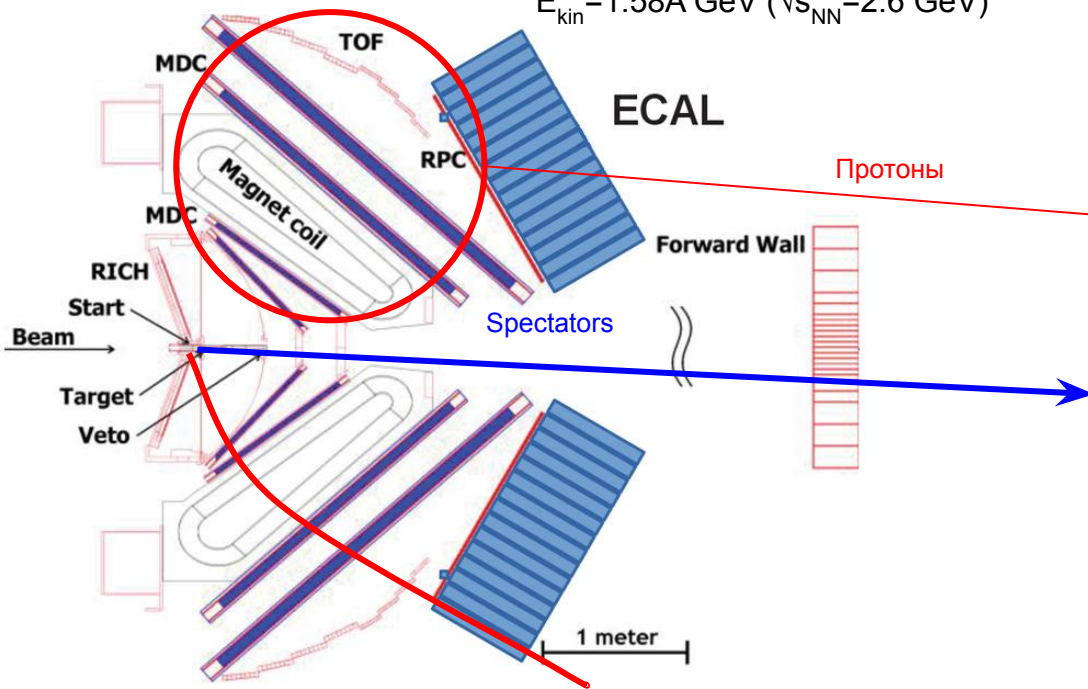
Метод даёт 3 оценки v_n , что позволяет оценивать вклад непотоковых корреляций

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

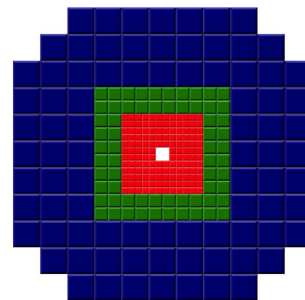
2012: Au+Au $E_{\text{kin}}=1.23\text{A GeV}$ ($\sqrt{s_{\text{NN}}}=2.4\text{ GeV}$)

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

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

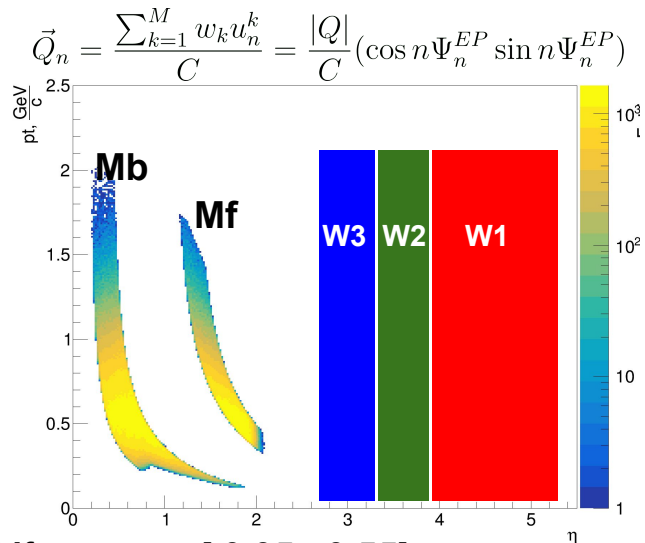


Eur.Phys.J.A41:243-277,2009



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

Векторы потока



Mf — p; $y_{cm} [0.35, 0.55]$

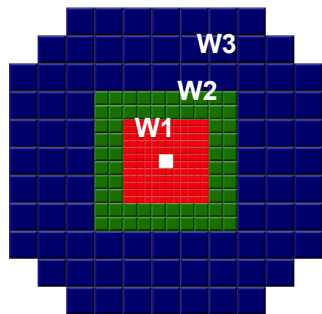
Mb — p; $y_{cm} [-0.55, -0.35]$

Заряженные фрагменты:

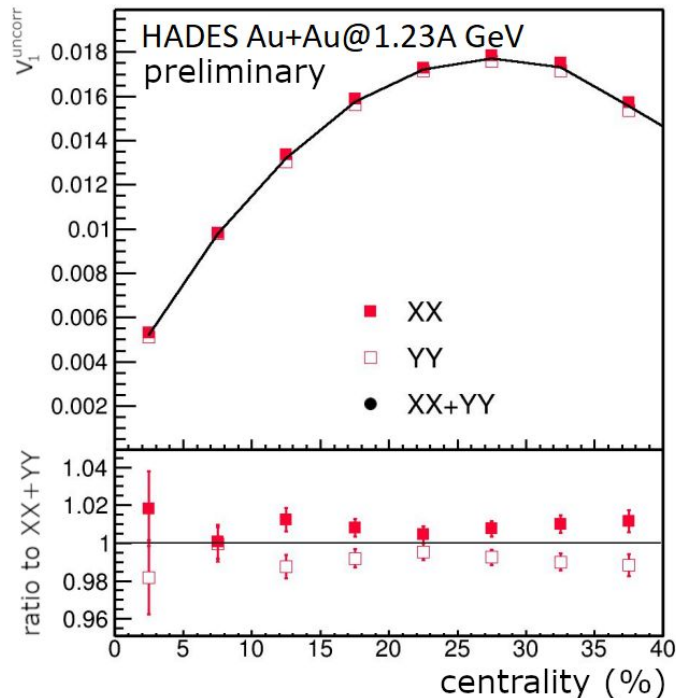
W1: $3.77 < \eta < 5.38$

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 азимутальной неоднородности акцентанса $< 2\%$

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

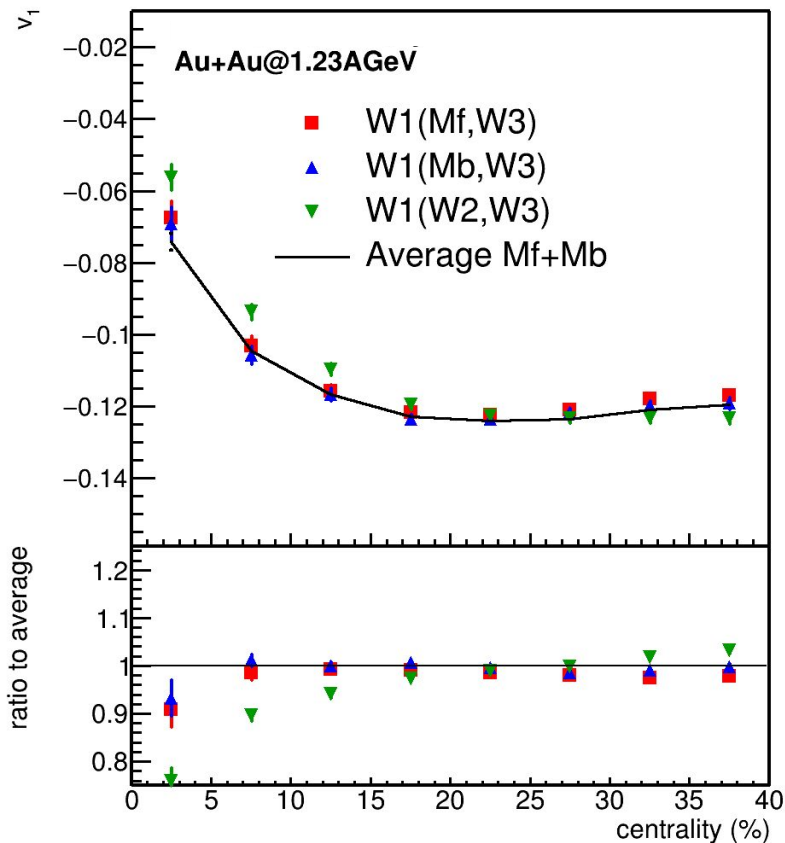
$$R_1^{F1} = \langle \cos(\Psi_1^{F1} - \Psi_1^{RP}) \rangle$$

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

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

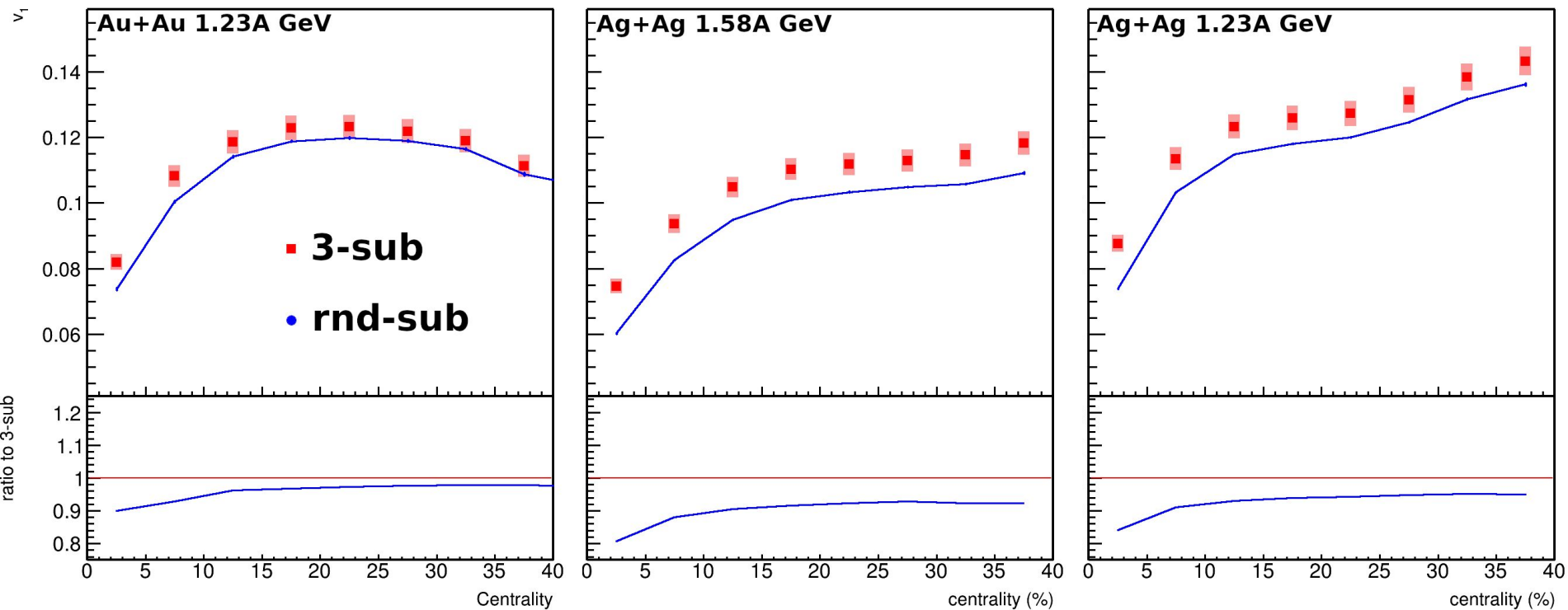
M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281

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

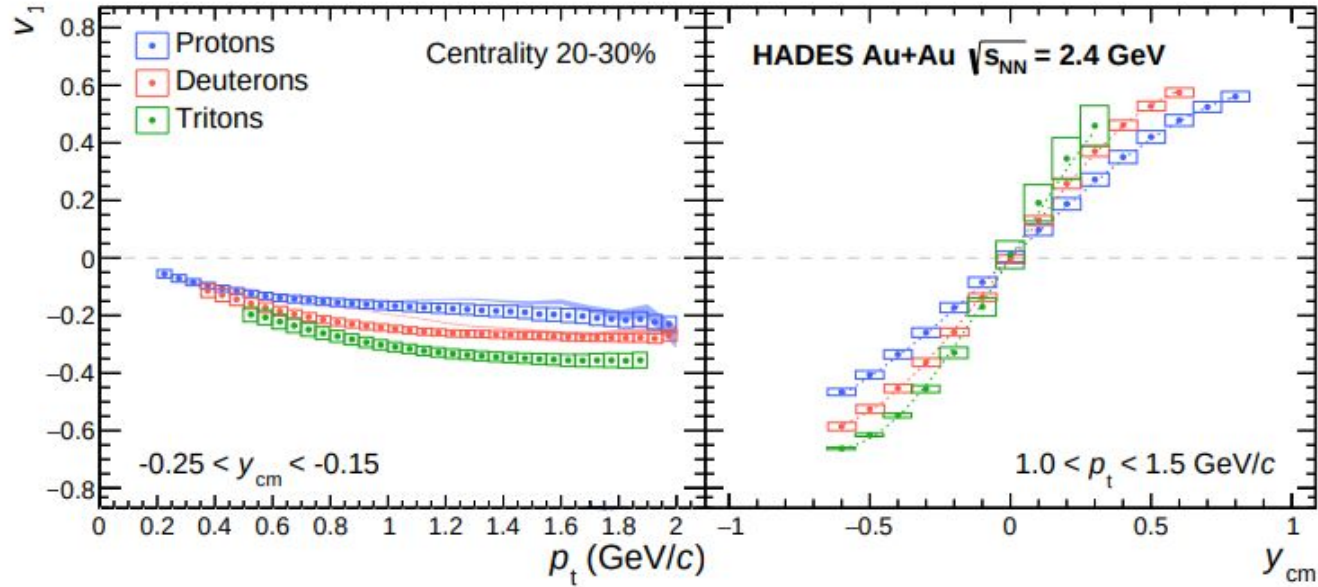


Систематическая ошибка из-за метода измерения v_1 менее 5% в
среднецентральных столкновениях Au+Au

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. Greifehnagen^{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].

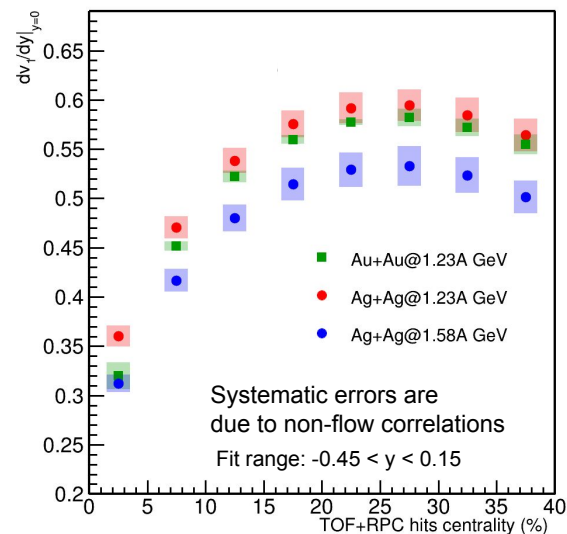
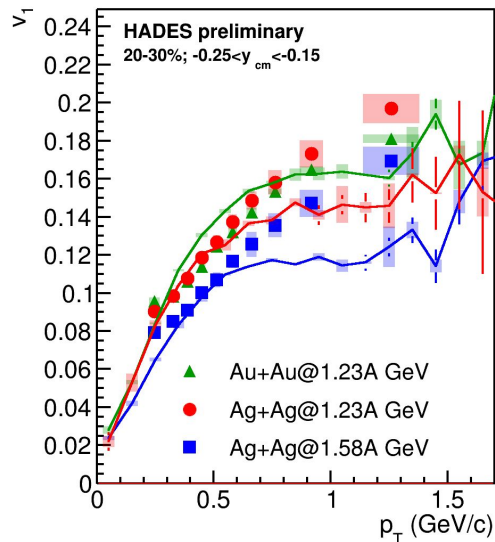
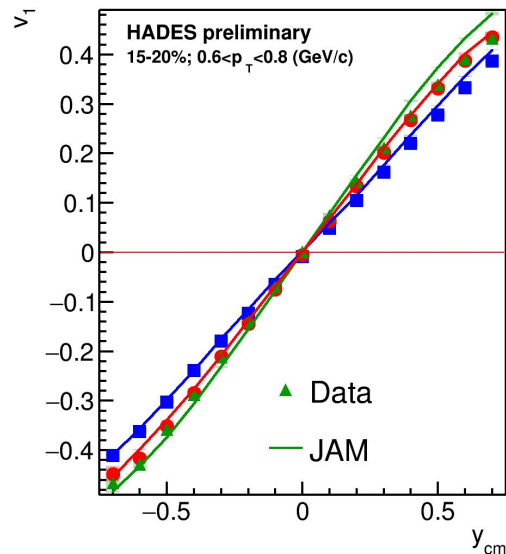


35. R. Brun, F. Bruyant, F. Carminati, S. Giani, M. Maire, A. McPherson, G. Patrick, and L. Urban, *GEANT Detector Description and Simulation Tool* (1994).
36. M. Mamaev, O. Golosov, and I. Selyuzhenkov (HADES), *Phys. Part. Nucl.* **53**, 277 (2022).
37. A. Andronic *et al.* (FOPI), *Phys. Rev.* **C64**,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

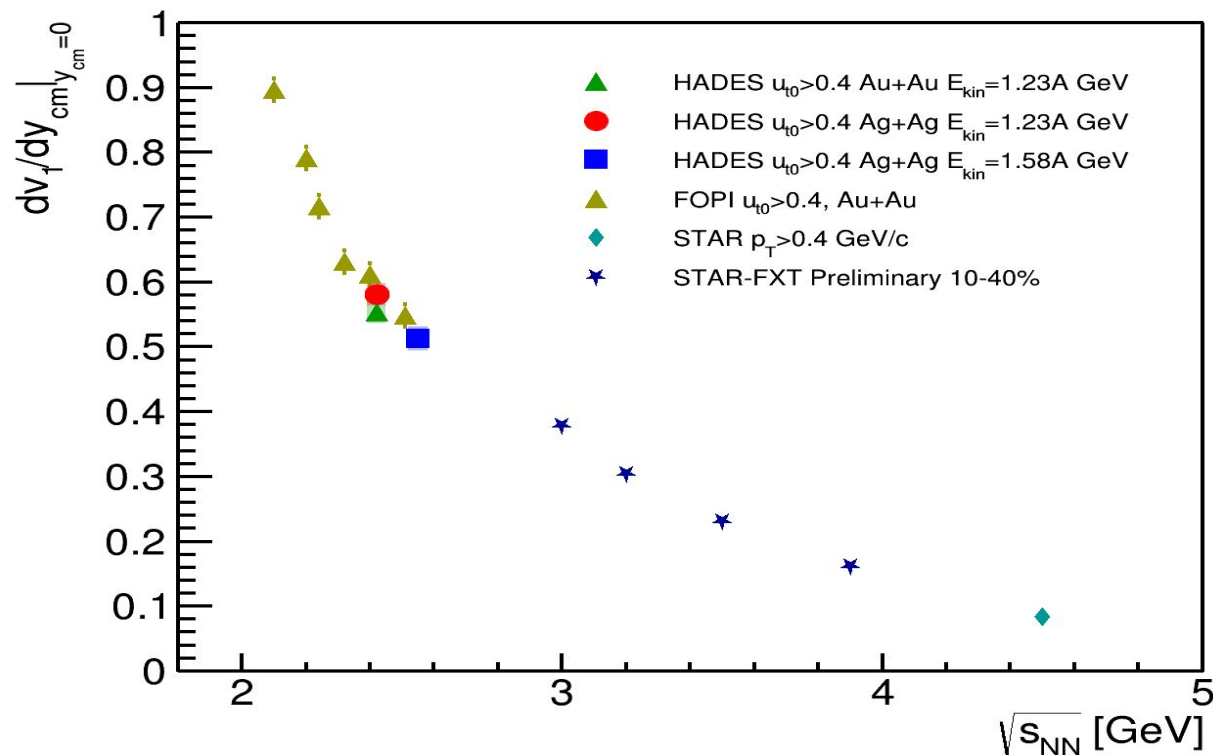
Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — T. 55, № 4. — С. 832—835.



- 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

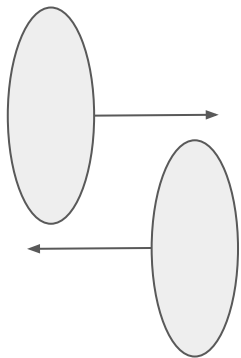


Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — T. 21, № 4. — С. 661—663.

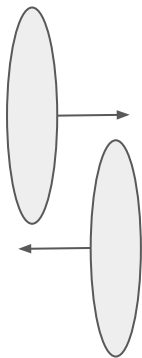
Измеренные значения dv_1/dy протонов хорошо согласуются с данными других экспериментов

Масштабирование dv_1/du с энергией и размером системы

Меньшая энергия



Большая энергия



Более длинное время пролета Более короткое время пролета

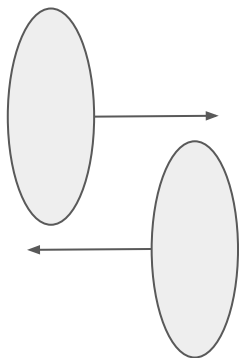
Во время пролета двух ядер t_{pass} :

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

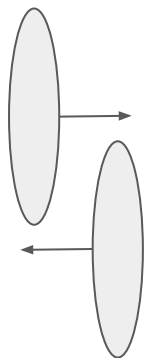
$dv_1/du|_{y=0}$ пропорционален времени пролета $t_{pass}=2R/\sinh(y_{beam}) \Rightarrow$ ожидается масштабирование с y_{beam}

Масштабирование dv_1/du с энергией и размером системы

Меньшая энергия

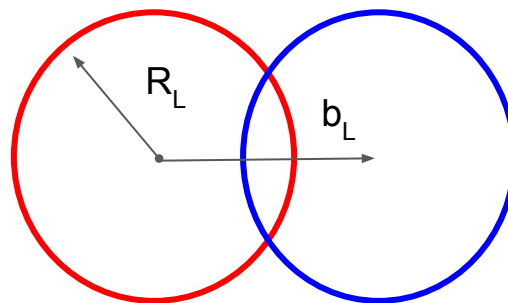


Большая энергия

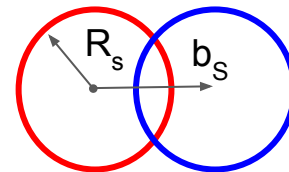


Более длинное время пролета Более короткое время пролета

Большие ядра



Малые ядра



Во время пролета двух ядер:

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

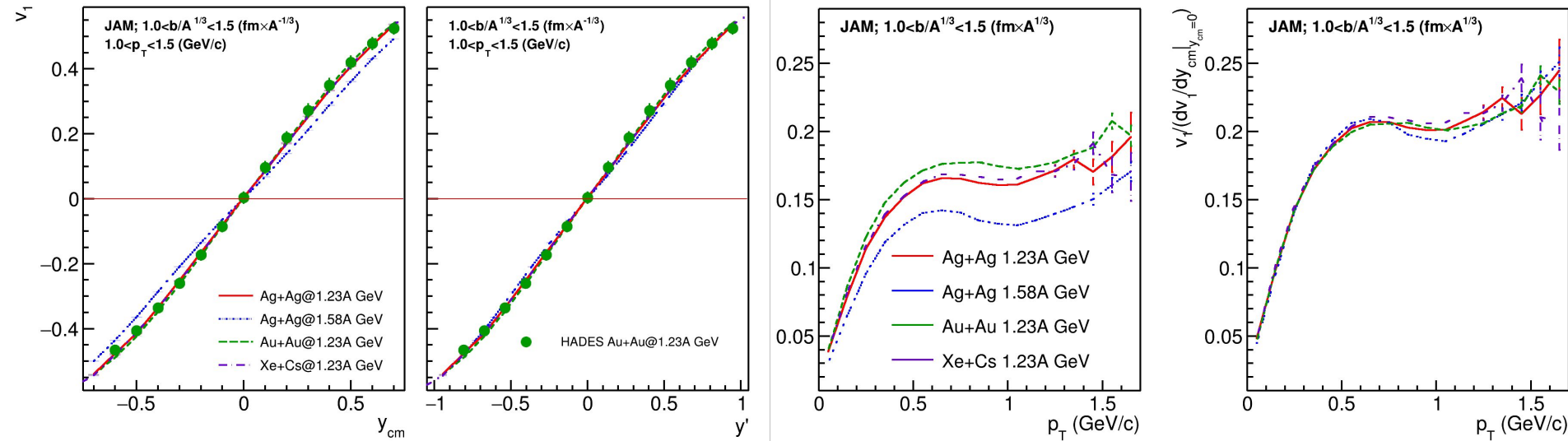
v_1 отражает изначальную асимметрию области перекрытия $\Rightarrow$ ожидается похожий v_1 для одного относительного прицельного параметра b/R

$$b_L/R_L = b_s/R_s$$

$dv_1/dy|_{y=0}$ 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

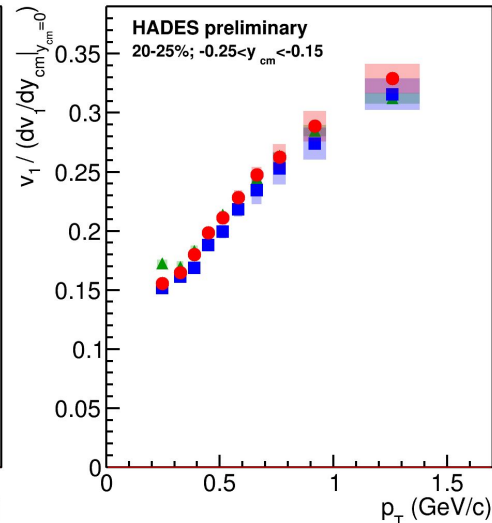
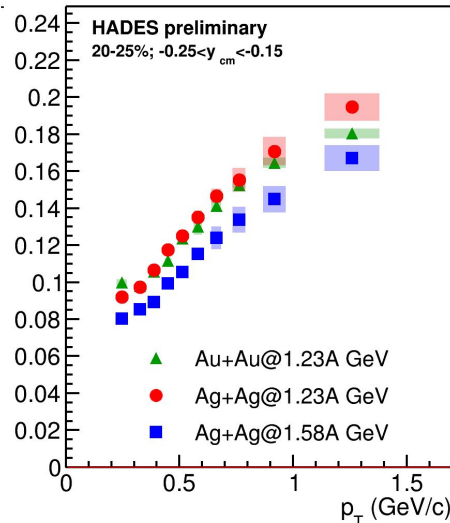
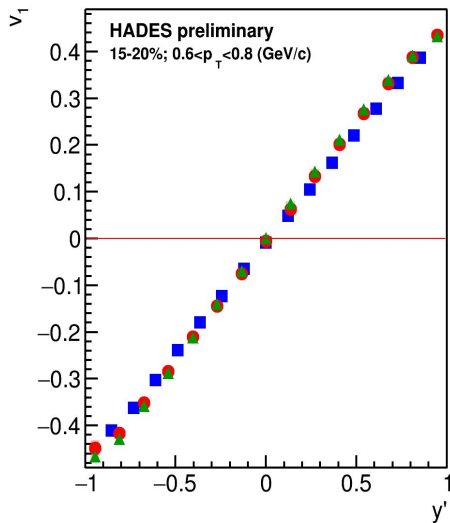
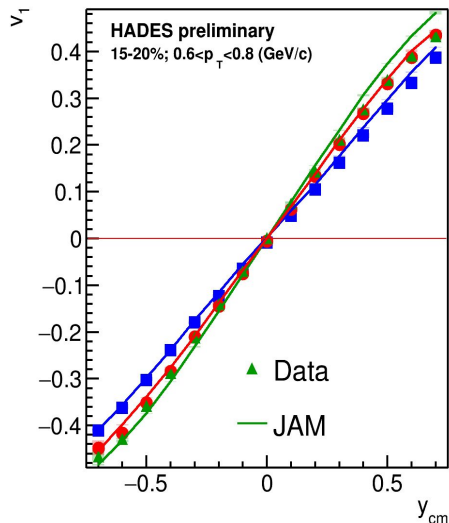
$t_{\text{Au+Au@1.23A GeV}} = 18 \text{ fm/c}$
 $t_{\text{Ag+Ag@1.23A GeV}} = 15 \text{ fm/c}$
 $t_{\text{Ag+Ag@1.58A GeV}} = 13 \text{ fm/c}$

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

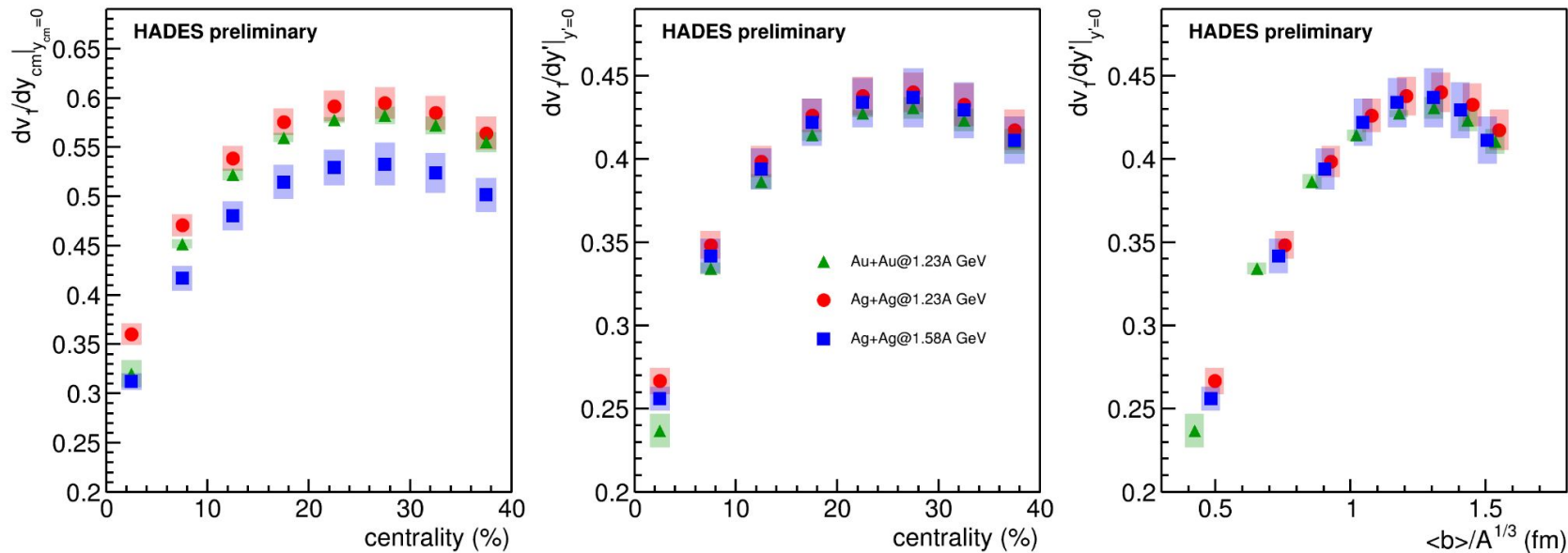
Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — T. 21, № 4. — С. 661—663.

Mamaev M. Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — T. 55, № 4. — С. 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 ($\langle b \rangle / A^{1/3}$)

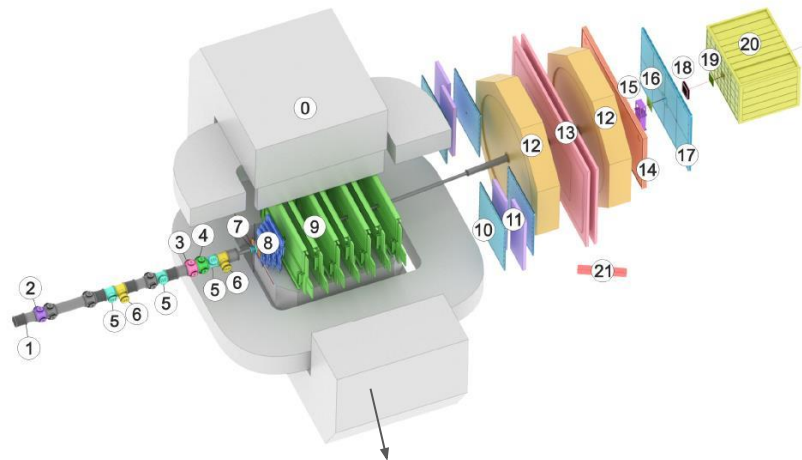
Результаты анализа анизотропных потоков на HADES

- Разработан метод учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц (непоточковых корреляций), и изучено их влияние на результаты измерения коллективных потоков в области энергий 1,2-4А ГэВ.
- Впервые получены зависимости v_1 протонов от быстроты и поперечного импульса, а также наклона $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ в области средних быстрот в столкновениях Au+Au при энергии $E_{kin}=1,23A$ ГэВ и Ag+Ag при энергиях $E_{kin}=1,23A$ и $E_{kin}=1,58A$ 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 $E_{kin}=1,23A$ и $E_{kin}=1,58A$ ГэВ, что позволяет оценить влияние спектров налетающего ядра на формирование направленного потока протонов.

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

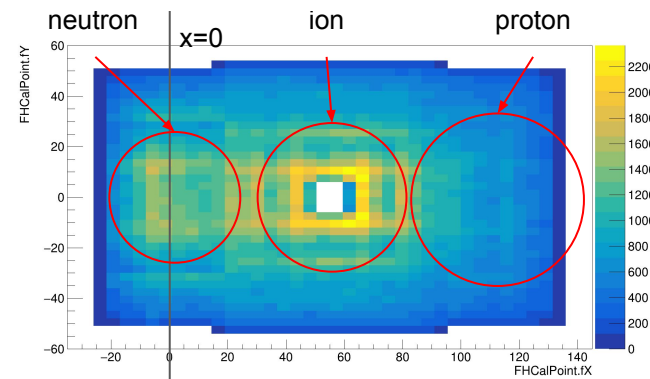
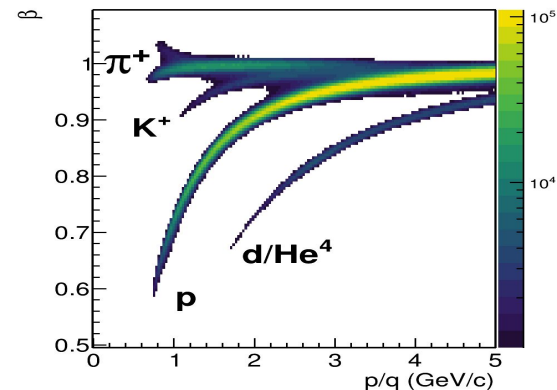
Xe+Csl столкновения при энергии $E_{\text{kin}} = 3.8 \text{ А ГэВ}$,
10 млн модельных (JAM, DCM-QGSM-SMM)
событий + GEANT4 + полная реконструкция

Nucl.Instrum.Meth.A 1065 (2024)



Трековая система внутри магнита

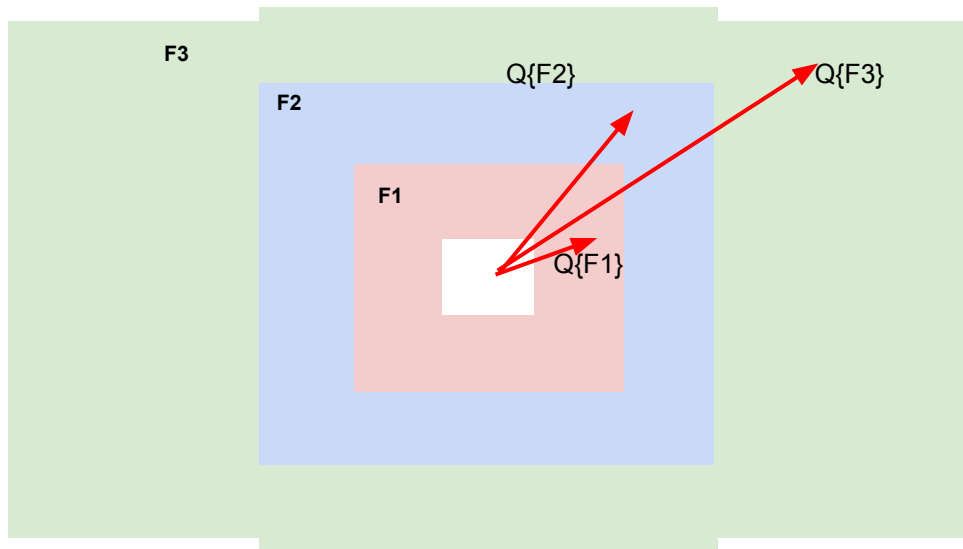
- Magnet SP-41 (0)
- Vacuum Beam Pipe (1)
- BC1, VC, BC2 (2-4)
- SiBT, SiProf (5, 6)
- Triggers: BD + SiMD (7)
- FSD, GEM (8, 9)
- CSC $1 \times 1 \text{ m}^2$ (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC $2 \times 1.5 \text{ m}^2$ (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH (19)
- FHCaI (20)
- HGN (21)



Плоскость симметрии определяется азимутальной
асимметрией распределения энерговыведения в FHCaI

Q-вектора из FHCaI и треков заряженных частиц

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

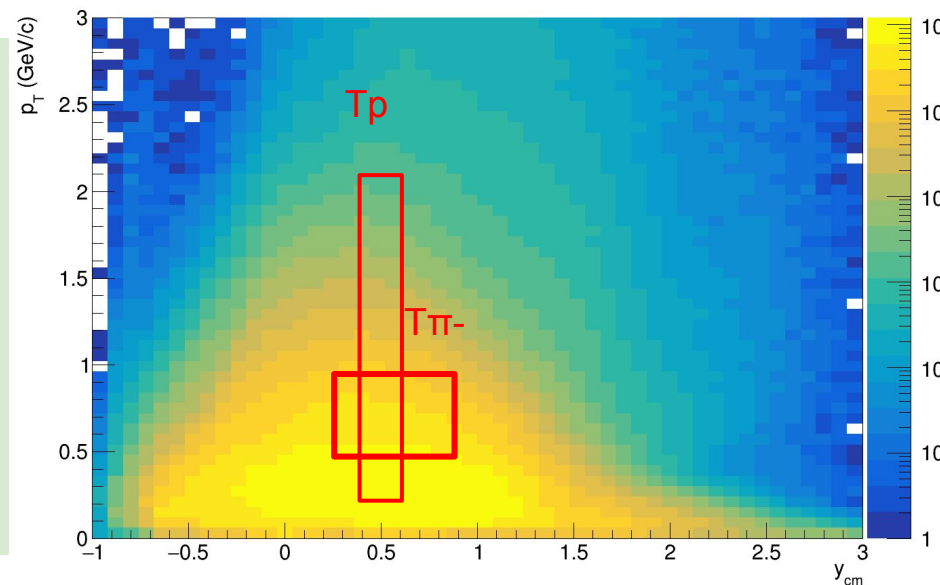


3 вектора из FHCaI:

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

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

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



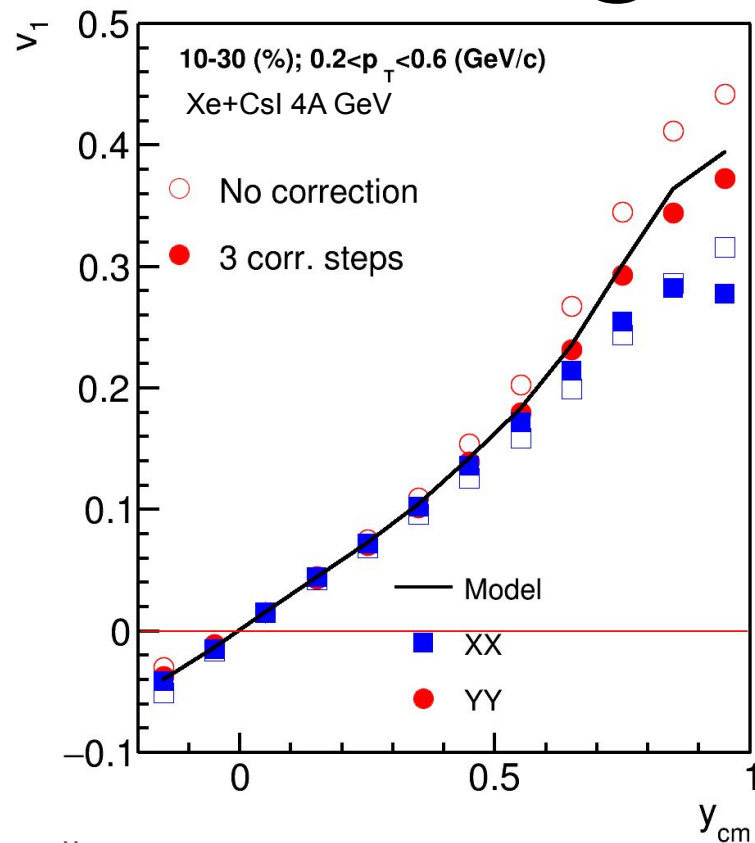
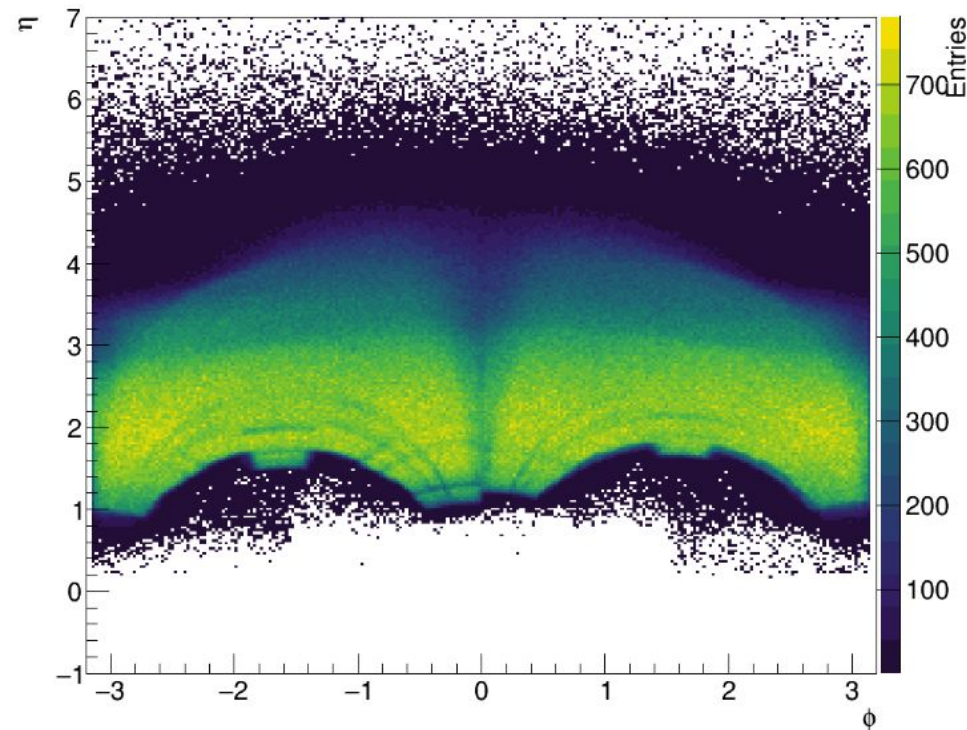
Дополнительные подсобытия из рожденных частиц:

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

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

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

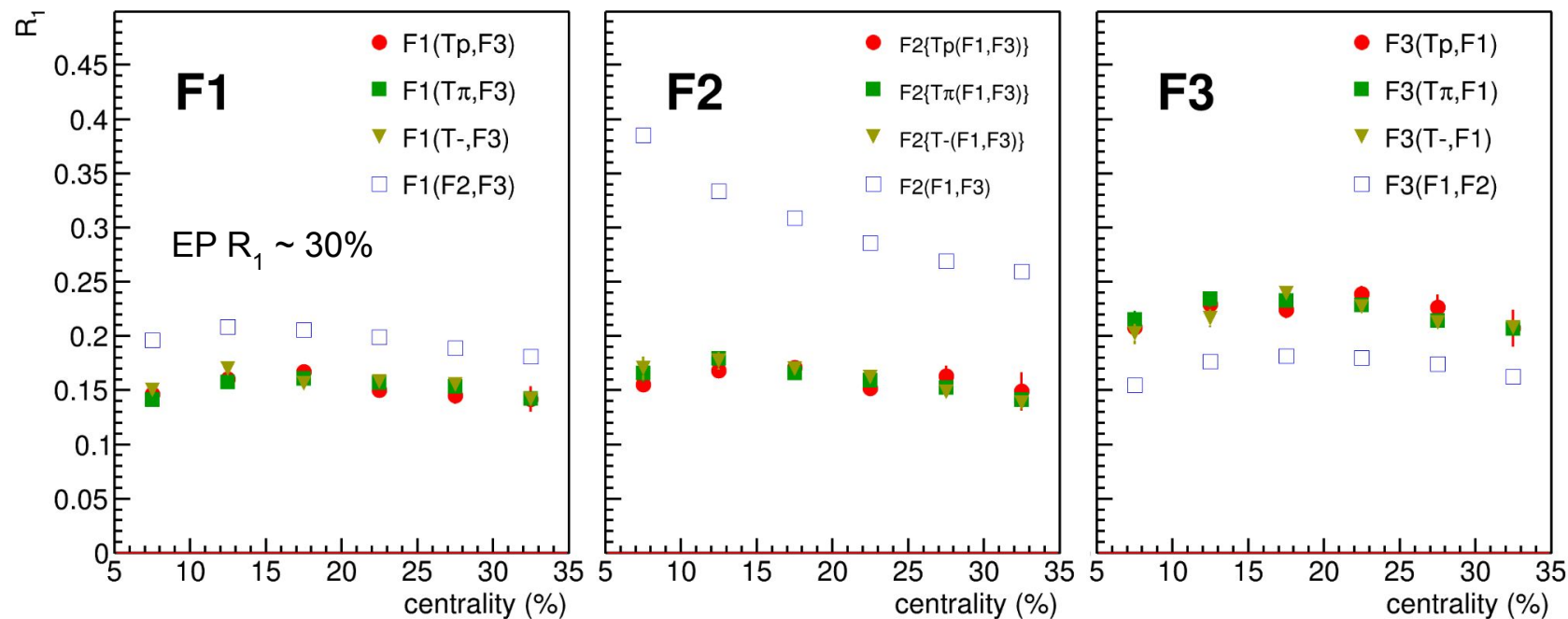
Коррекции на неоднородный аксептанс BM@N



После применения коррекций реконструированные и модельные данные v_1 сходятся

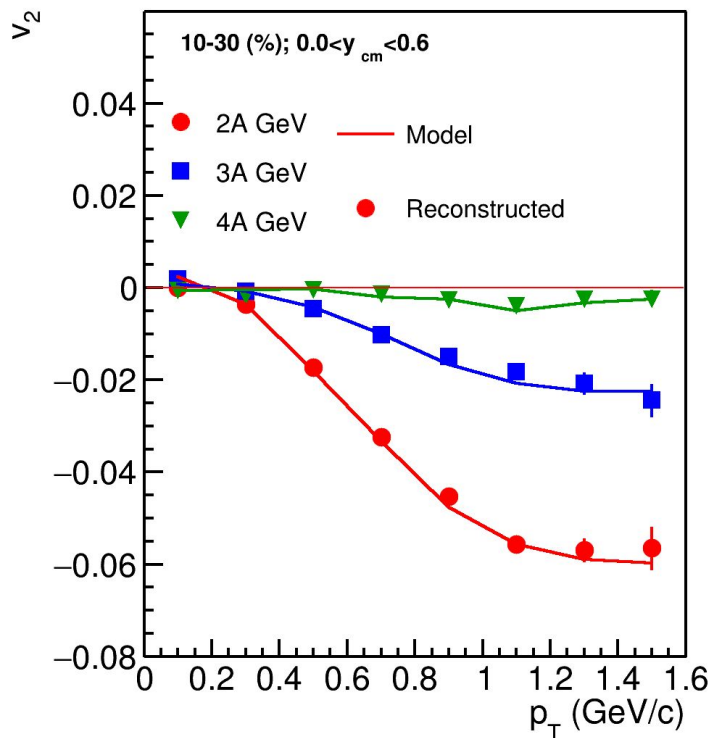
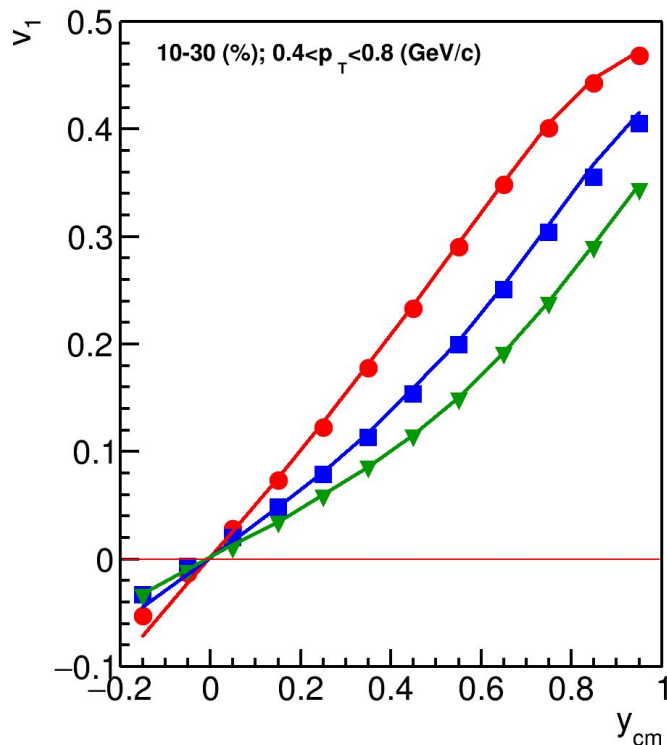
Скалярное произведение: зависимость разрешения плоскости событий R_1 от центральности (модельные данные Xe+Cs(I) $E_{kin} = 3.8$ АГэВ)

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.](#)

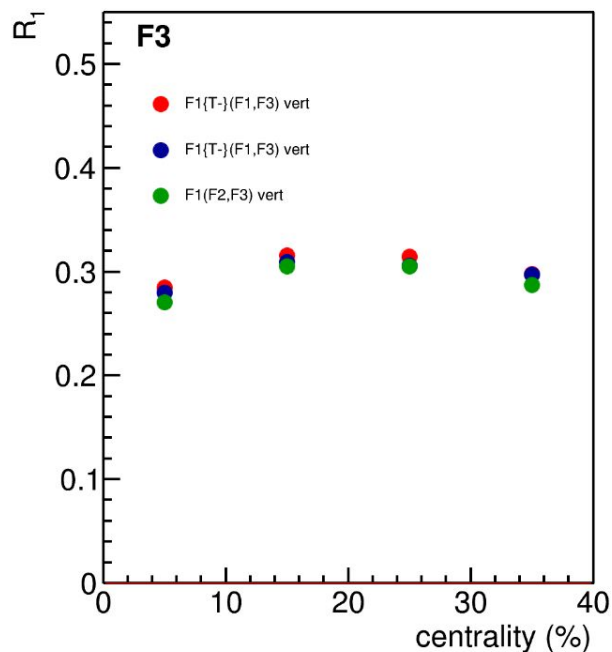
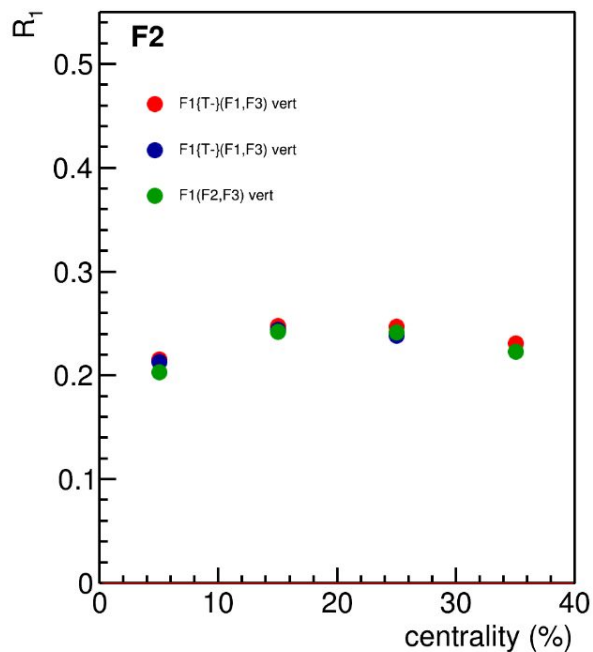
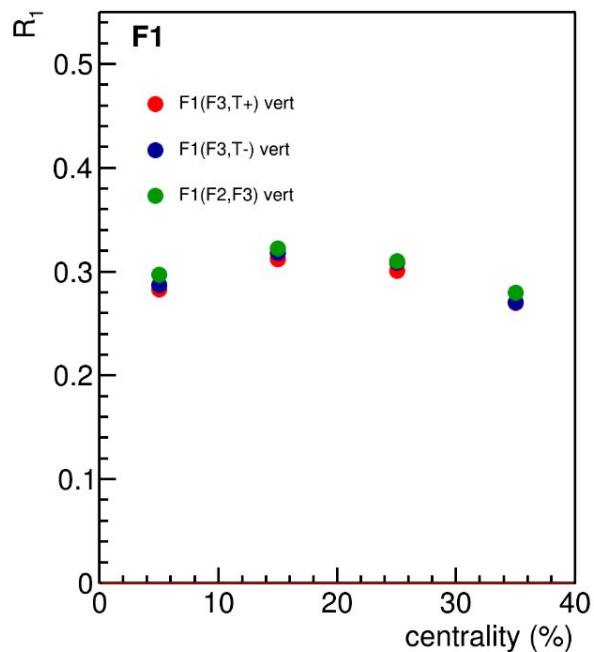
Physics of Particles and Nuclei Letters, 2023, 20(5), pp.
1205–1208

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

Particles, 2023, 6(2), pp.
622–637

Хорошее согласие между реконструированными и модельными значениями V_n

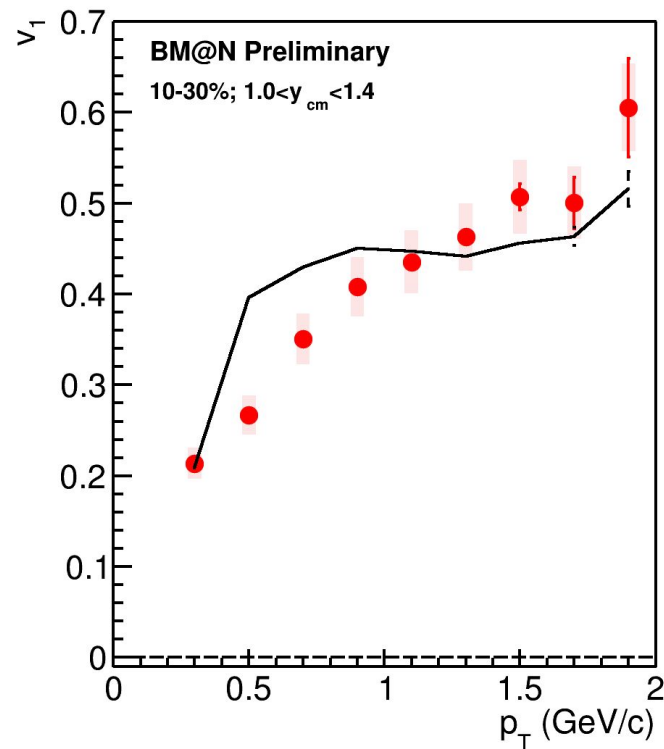
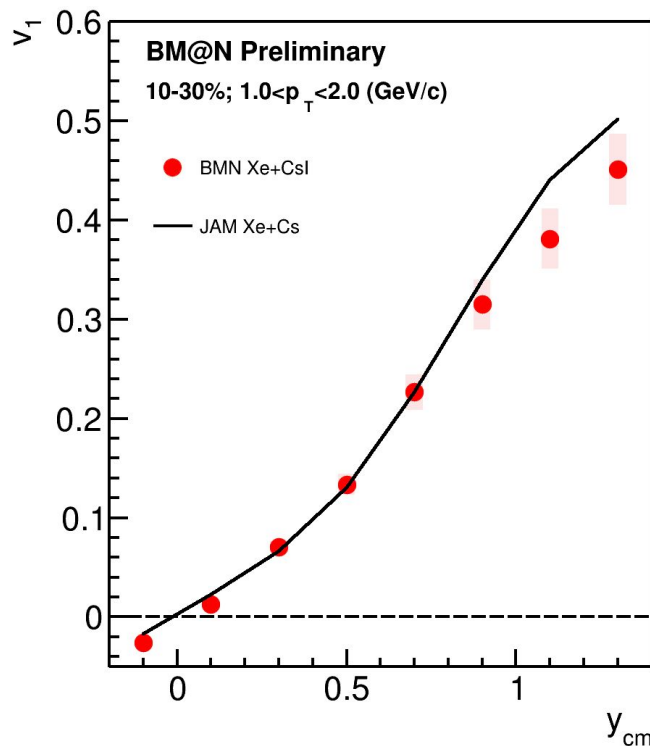
Скалярное произведение: зависимость разрешения плоскости событий R_1 от центральности (экспериментальные данные BM@N: Xe+Cs(I) $E_{kin} = 3.8$ АГэВ)



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

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

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

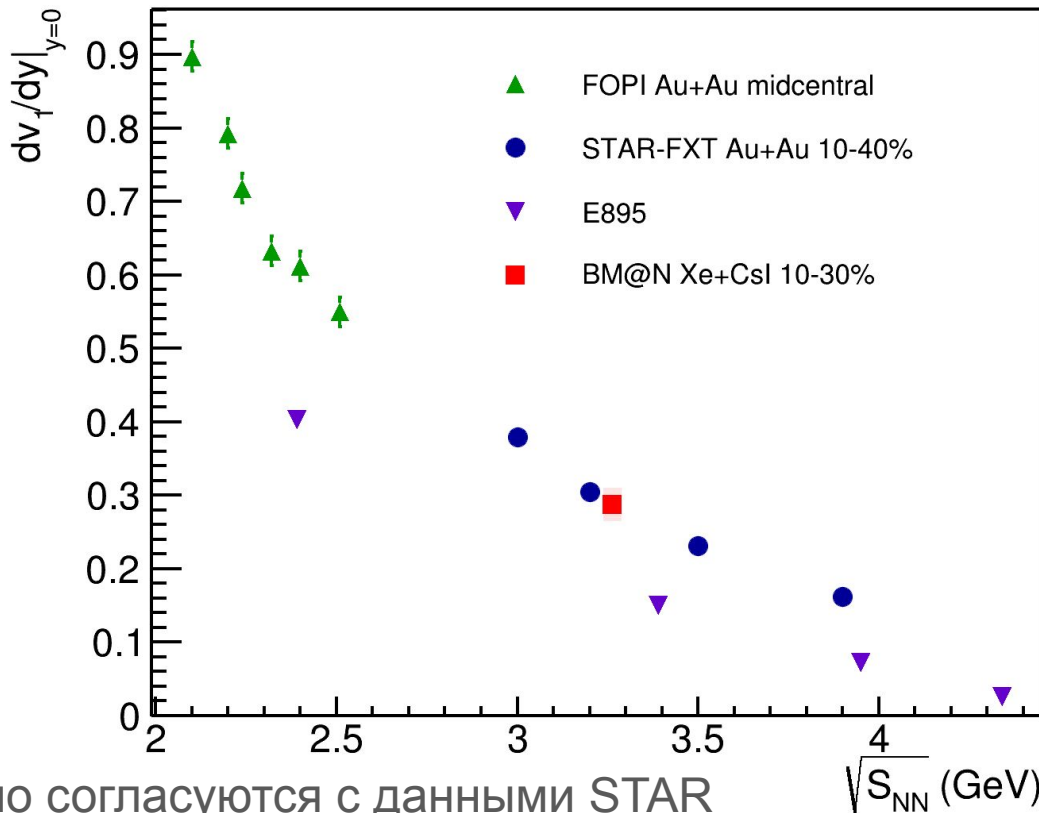
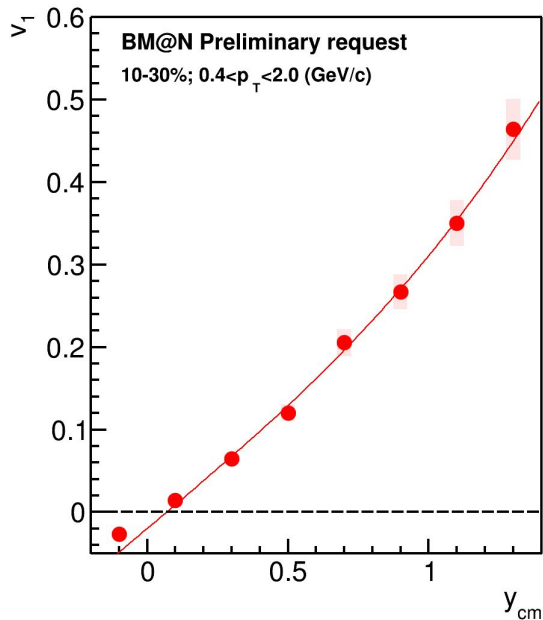


Модель JAM согласуется в пределах 8% при быстротах $y_{cm} < 1$

dv_1/dy протонов в экспериментальных данных Xe+Csl

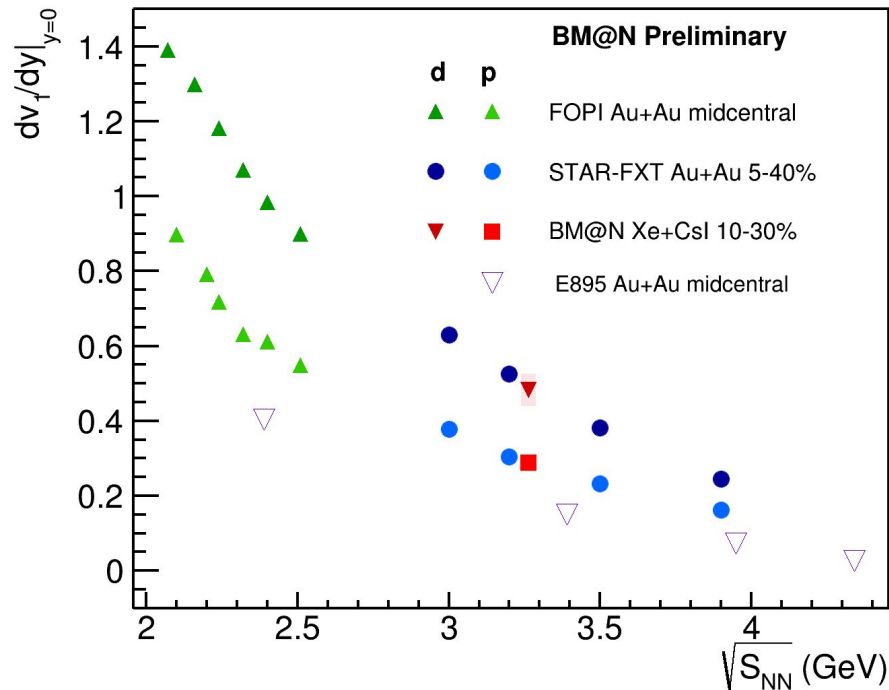
$E_{\text{kin}} = 3.8A$ ГэВ

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

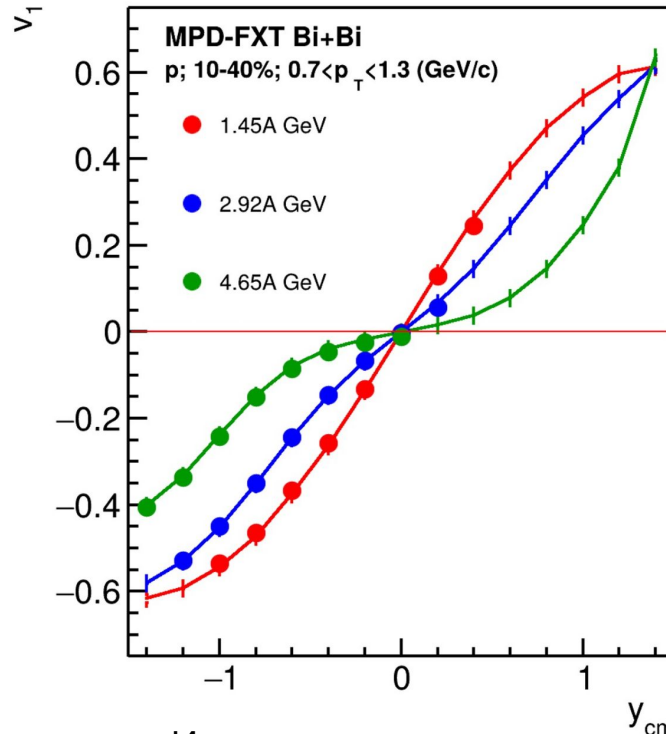


dv_1/dy хорошо согласуются с данными STAR

p



Исследование v_1 легких ядер в BM@N
(Совместно с И.Жаворонковой)



Исследование возможности
измерения v_1 протонов в MPD
(Совместно с П.Парфеновым)

Положения выносимые на защиту

1. Зависимости коэффициента направленного потока v_1 протонов от центральности столкновения, поперечного импульса p_T и быстроты y_{cm} для столкновений Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{kin} = 1,23-1,58$ А ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4-2,55$ ГэВ) в эксперименте HADES.
2. Метод учета вклада непотоковых корреляций и изучения их влияния на измеренные значения коэффициентов потоков v_n для экспериментов с фиксированной мишенью в условиях сильной неоднородности азимутального акцентанса установки.
3. Результаты сравнения измеренных значений направленного потока v_1 с расчетами в рамках современных моделей ядро-ядерных столкновений, проверка эффекта масштабирования v_1 с энергией столкновения и геометрией области перекрытия.
4. Полученные оценки эффективности измерения коллективных потоков на экспериментальной установке BM@N.

Доклады на конференциях

1. Международная конференция «Ядро» (2020, 2021, 2024, Россия)
2. Международный семинар «Исследования возможностей физических установок на FAIR и NICA» (2021, Россия)
3. Международная научная конференция молодых учёных и специалистов «AYSS» (2022, 2023, 2024, ОИЯИ)
4. Международная конференция по физике элементарных частиц и астрофизике «ICPPA» (2020, 2022, 2024 Россия)
5. Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц (2023, Россия)
6. XXV Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий (2023, ОИЯИ),
7. Международный семинар «NICA» (2022, 2023, 2024, Россия),
8. Научная сессия ядерной физики ОФН РАН (2024, 2025, Россия),
9. Международная конференция «HSFI» (2024, Россия)
10. Международный семинар «Россия–Китай на установке NICA» (2024, Китай)

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. — T. 1690, № 1. — C. 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. — T. 53, № 2. — C. 277—281.
3. Mamaev M. Performance Towards Spectator Symmetry Plane Estimation Using Forward Hadron Calorimeter in the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2023. — T. 20, № 5. — C. 1205—1208.
4. Mamaev M., Taranenko A. Toward the System Size Dependence of Anisotropic Flow in Heavy-Ion Collisions at $\sqrt{s_N} N = 2\text{--}5$ GeV // Particles. — 2023. — T. 6, № 2. — C. 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 $\sqrt{s_N} N = 2.4$ GeV // Phys. Rev. Lett. — 2020. — T. 125. — C. 262301.
6. Mamaev M. Baryonic Matter @ Nuclotron: Upgrade and Physics Program Overview // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — T. 87, № 1. — C. 311—318.
7. Mamaev M. On the Azimuthal Flow of Protons in the Heavy Ion Collisions at $\sqrt{s_N} N = 2\text{--}4$ GeV // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — T. 21, № 4. — C. 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. — T. 55, № 4. — C. 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. — T. 33, №11. — C. 2441009.

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

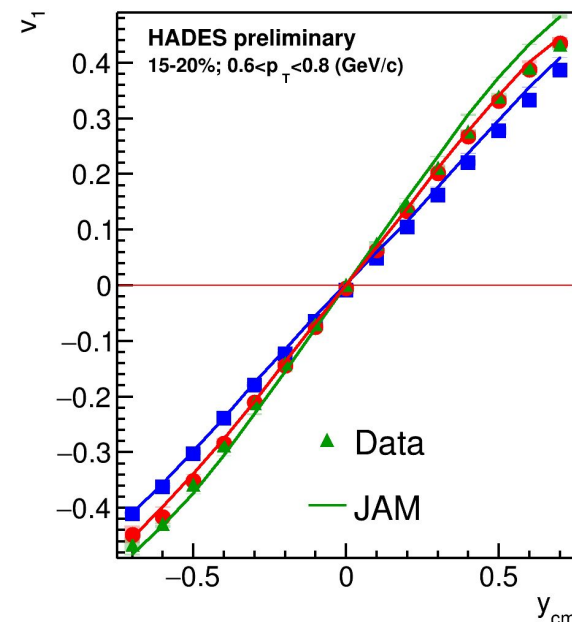
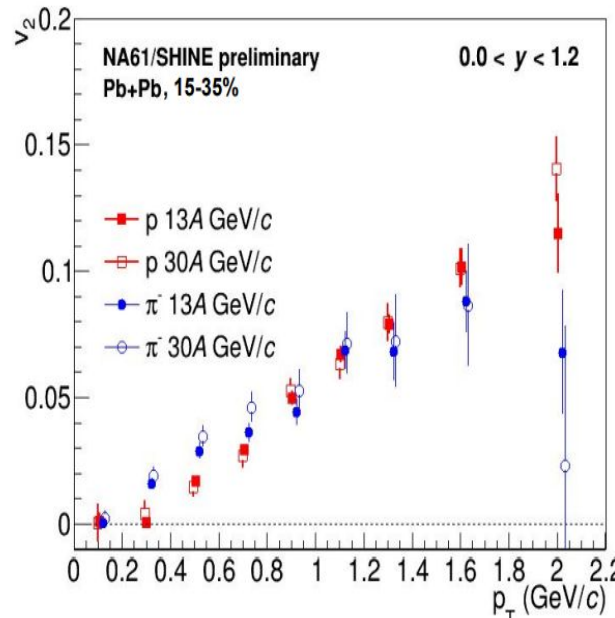
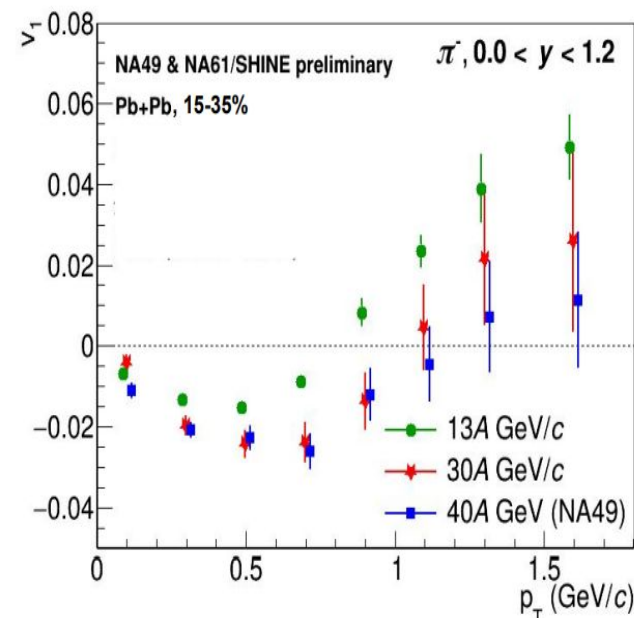
Заключение

- Разработан метод учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц (непоточковых корреляций), и изучено их влияние на результаты измерения коллективных потоков в области энергий 1,2-4А ГэВ.
- Впервые получены зависимости v_1 протонов от быстроты и поперечного импульса, а также наклона $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ в области средних быстрот в столкновениях Au+Au при энергии $E_{kin}=1,23A$ ГэВ и Ag+Ag при энергиях $E_{kin}=1,23A$ и $E_{kin}=1,58A$ 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 $E_{kin}=1,23A$ и $E_{kin}=1,58A$ 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



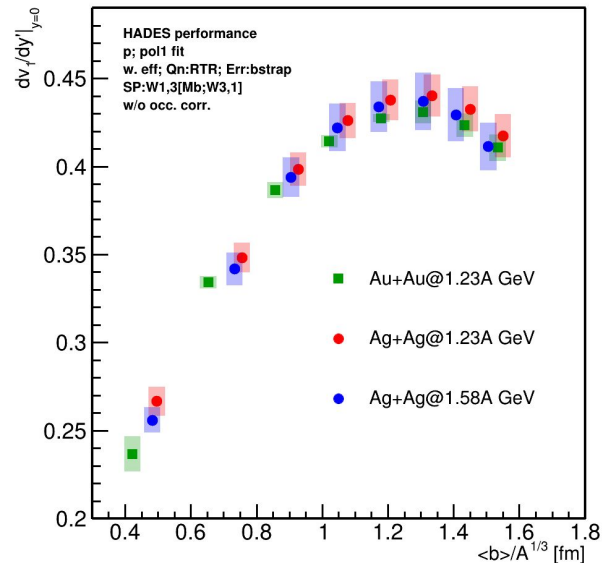
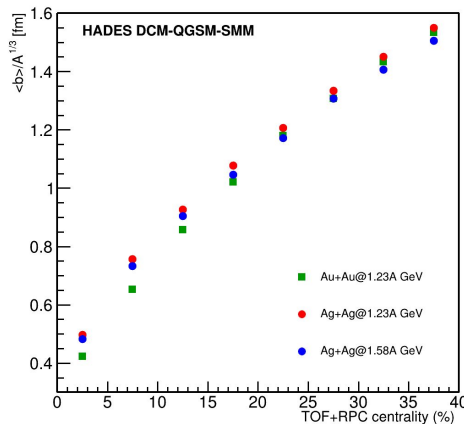
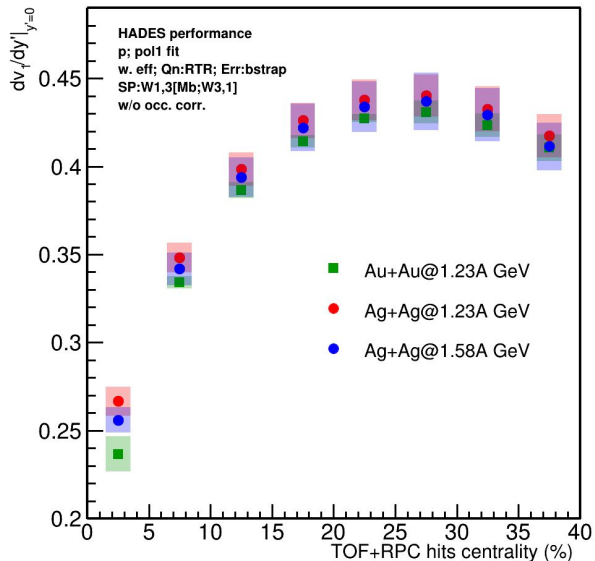
- All the methods used for performance study were carried out using QnTools framework: <https://github.com/HeavyIonAnalysis/QnTools> (well documented and well-tested)
- Methods for flow measurements in fixed-target experiments were tested on experimental data from NA61/SHINE, HADES and ALICE
- Tested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

Масштабирование dv_1/dy с энергией столкновения и размером системы

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

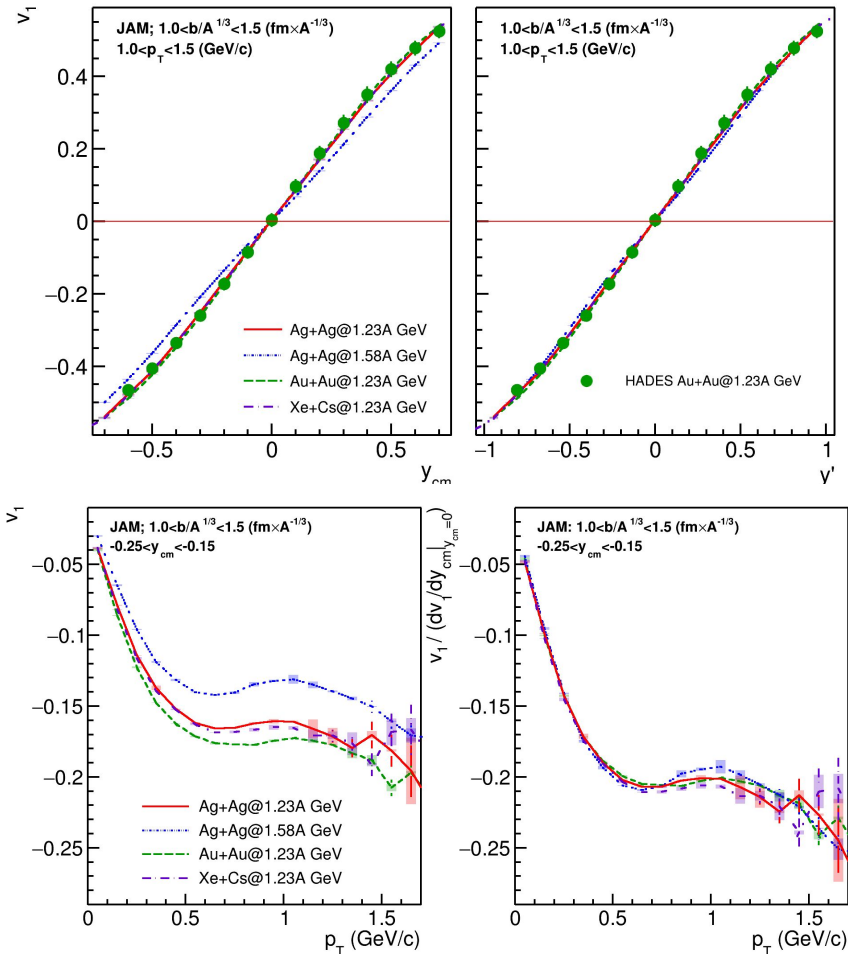
$$\text{центральность} \rightarrow \langle b \rangle / A^{1/3}$$

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



- 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:

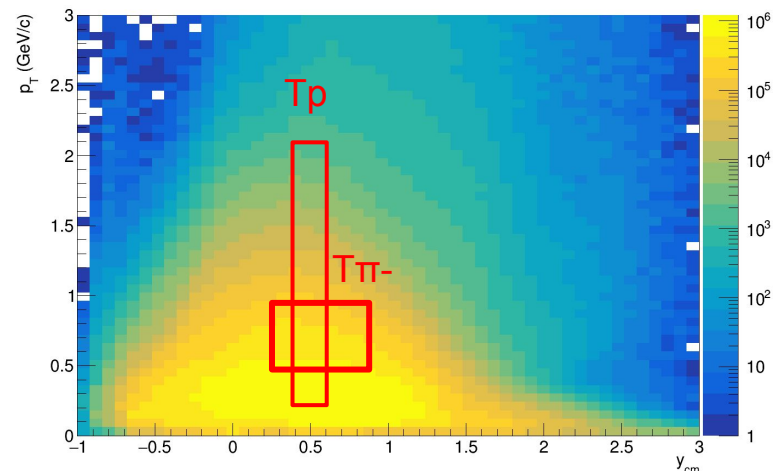
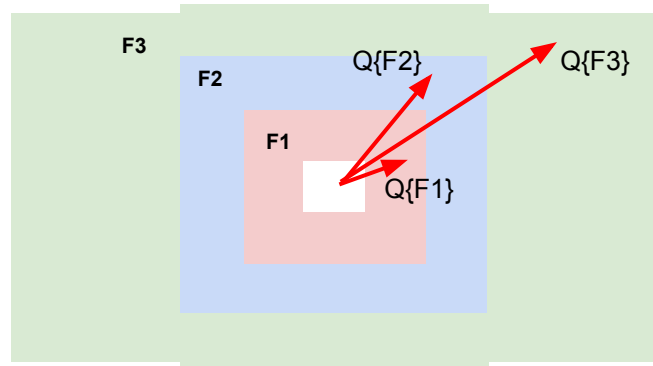
$$u_n = e^{in\phi}$$

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; $w=1/\text{eff}$ ⁵¹

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:

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

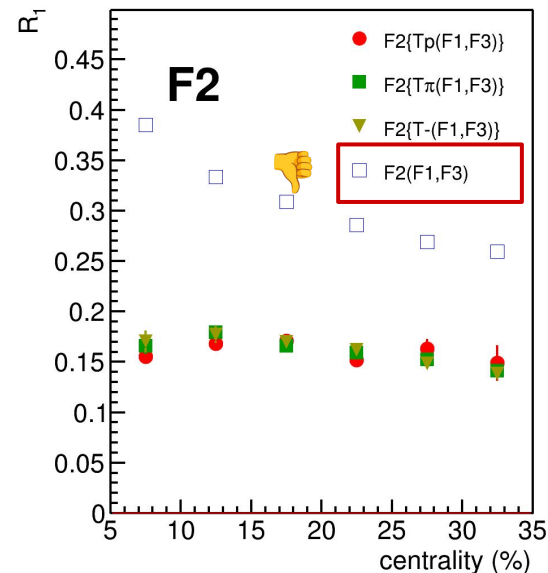
Where R_1 is the resolution correction factor

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

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

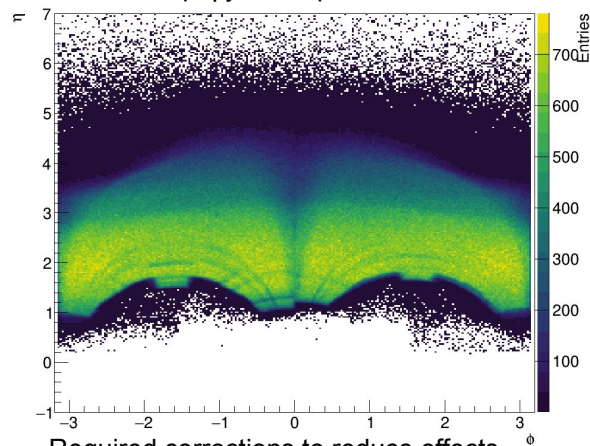


Symbol “F2{Tp}(F1,F3)” means R_1 calculated via (4S resolution):

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

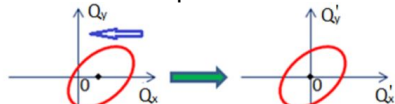
Azimuthal asymmetry of the BM@N acceptance

ϕ - η yield of protons

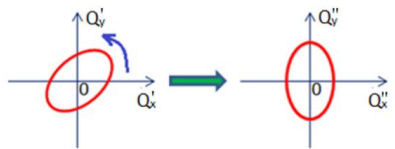


Required corrections to reduce effects of non-uniform azimuthal acceptance

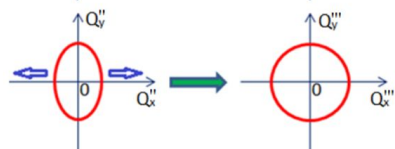
1. Recentering



2. Twist

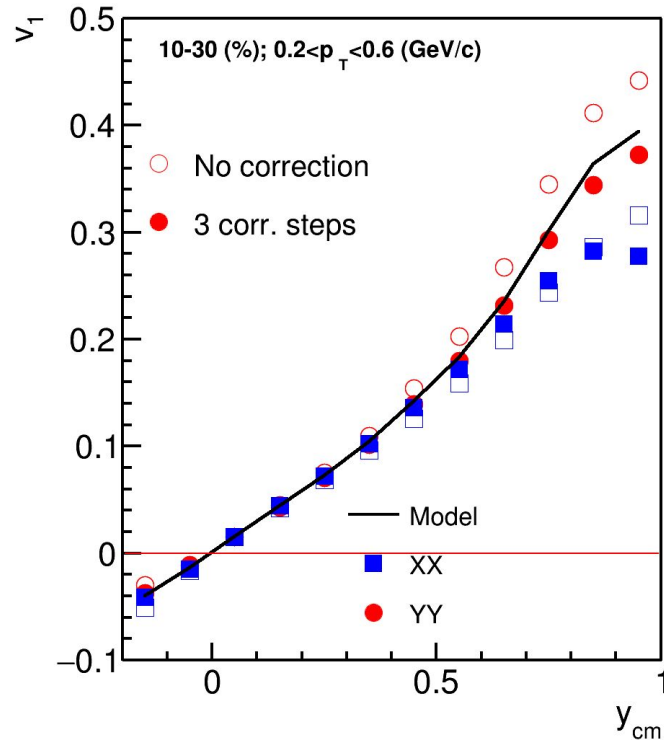


3. Rescaling



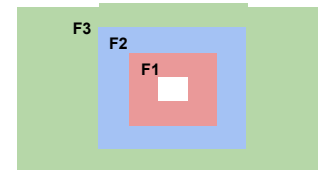
Corrections are based on method in:

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



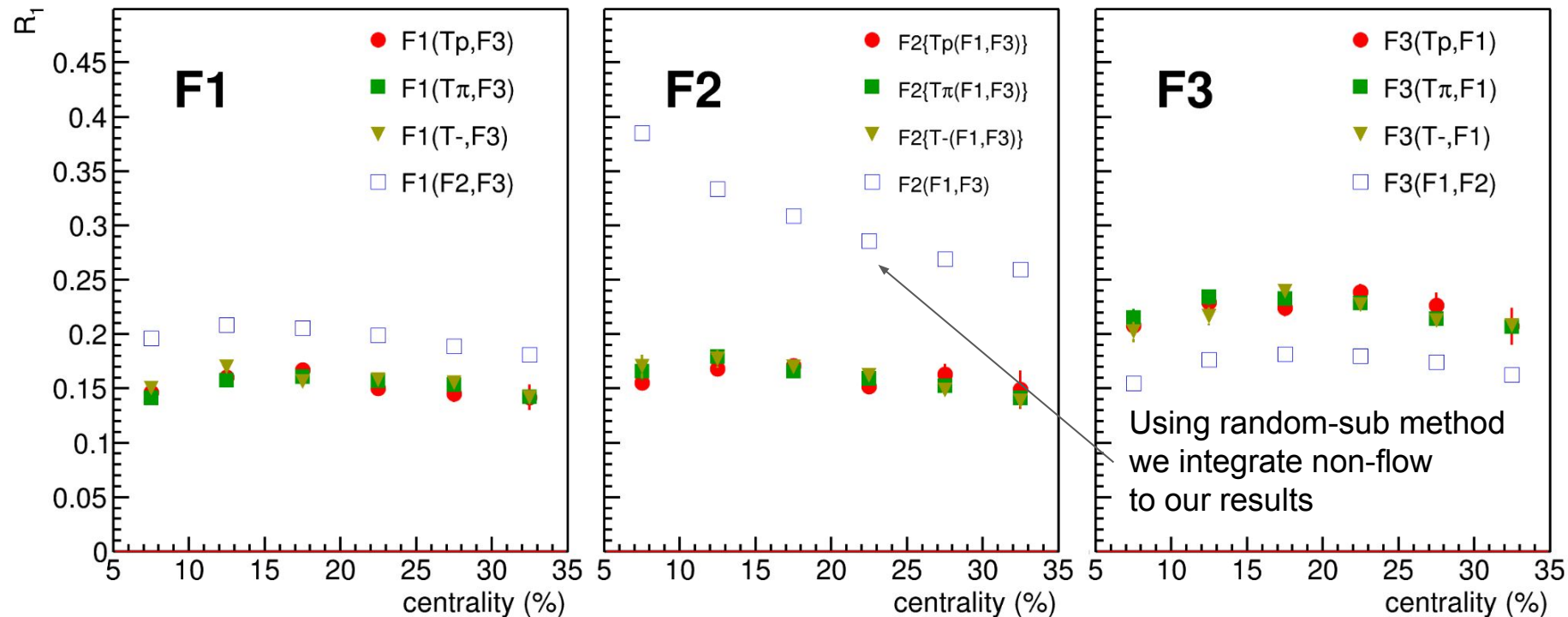
- Better agreement after rescaling for YY
- XX component has a large bias (due to magnetic field)

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



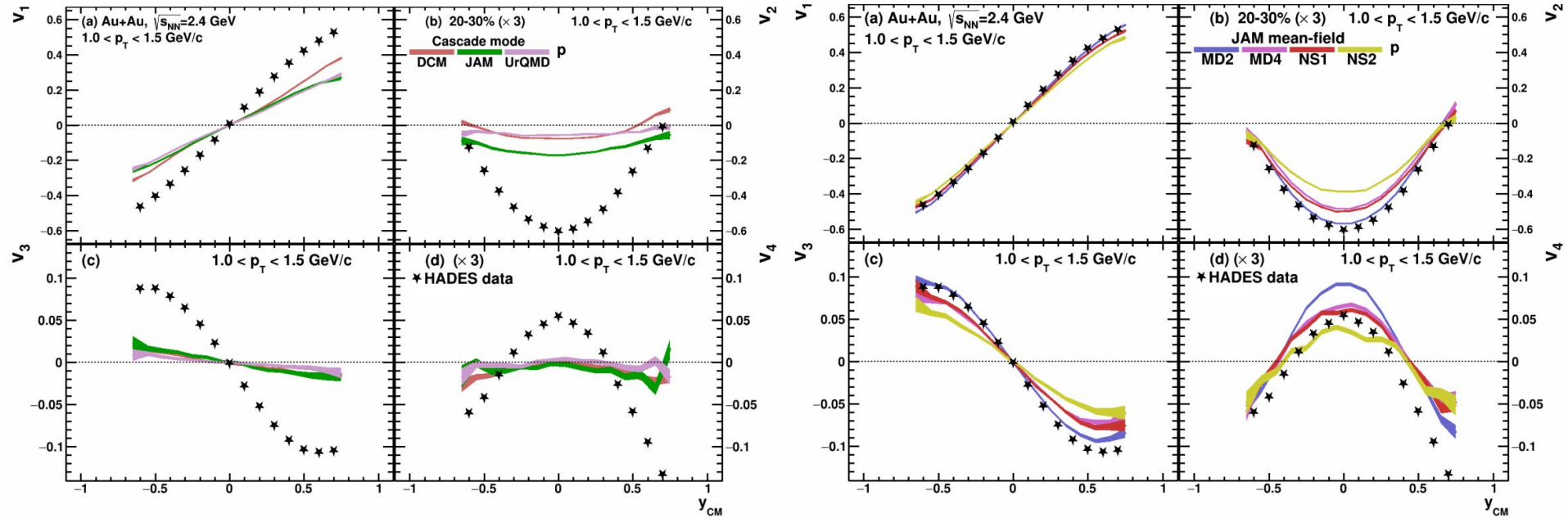
SP gives unbiased estimation of v_n (root-mean-square)

EP gives biased estimation (somewhere between mean and RMS)



Using the additional sub-events from tracking provides a robust combination to calculate resolution 54

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:

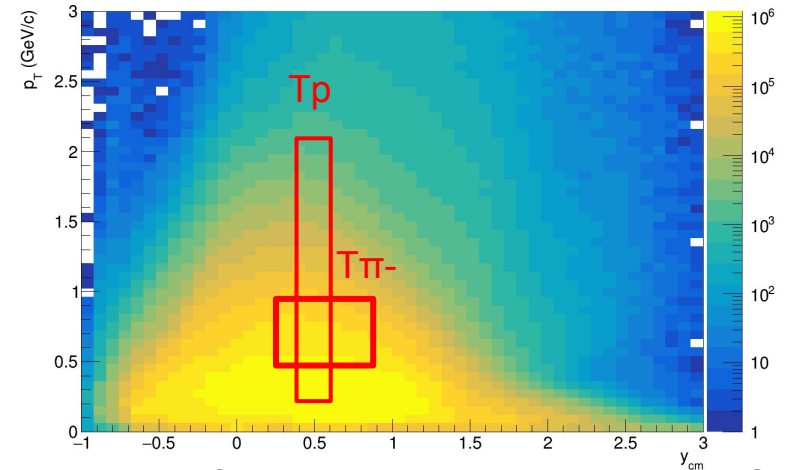
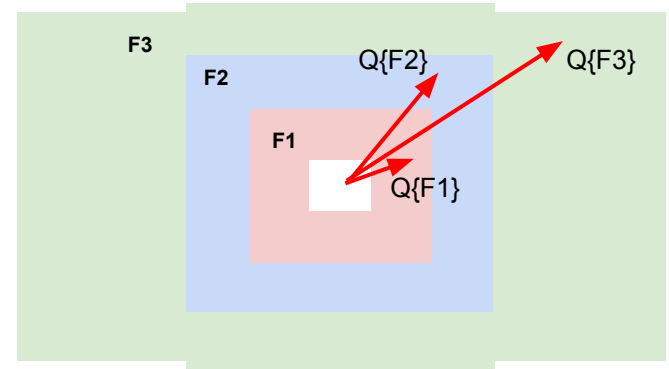
$$u_n = e^{in\phi}$$

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; $w=1/\text{eff}$ ⁵⁷

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:

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

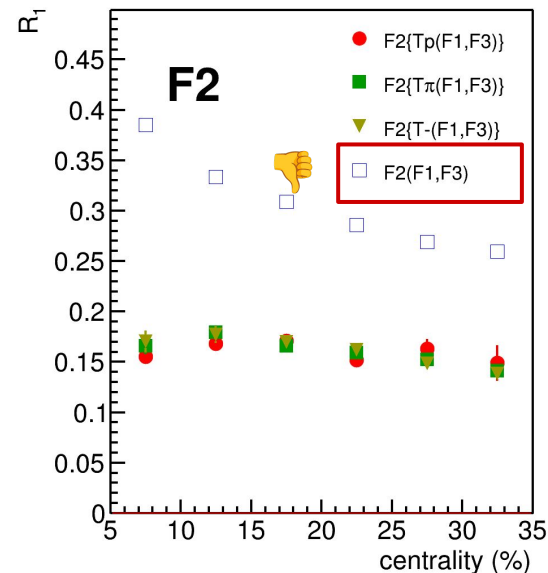
Where R_1 is the resolution correction factor

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

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

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

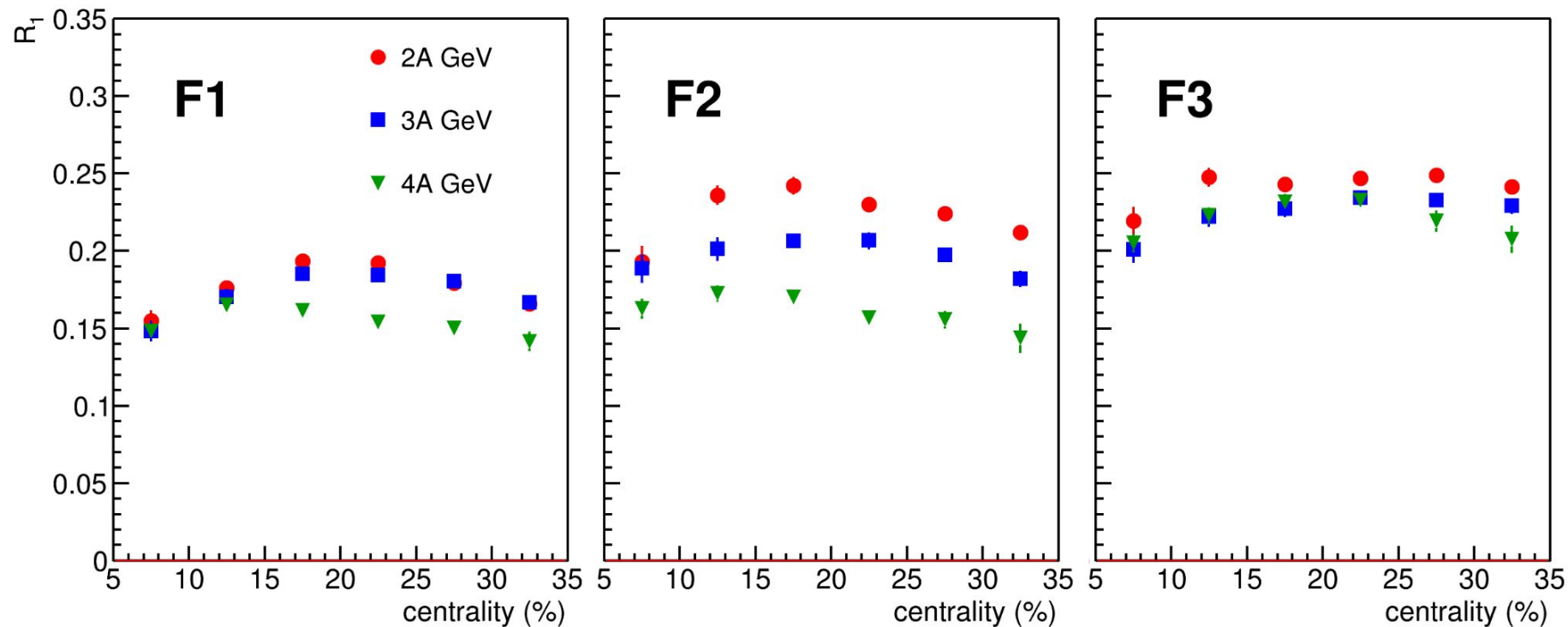
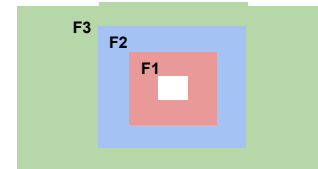
Method helps to eliminate non-flow
Using 2-subevents doesn't



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

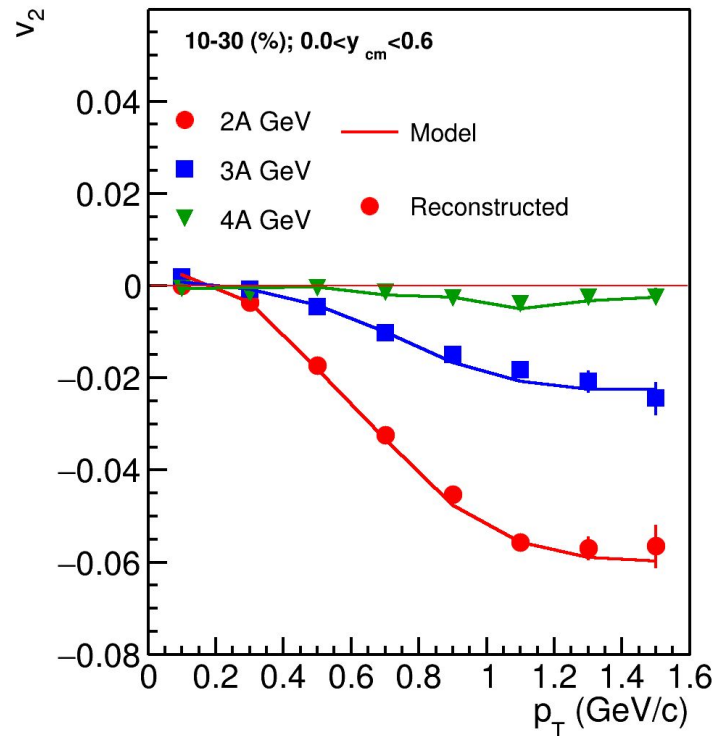
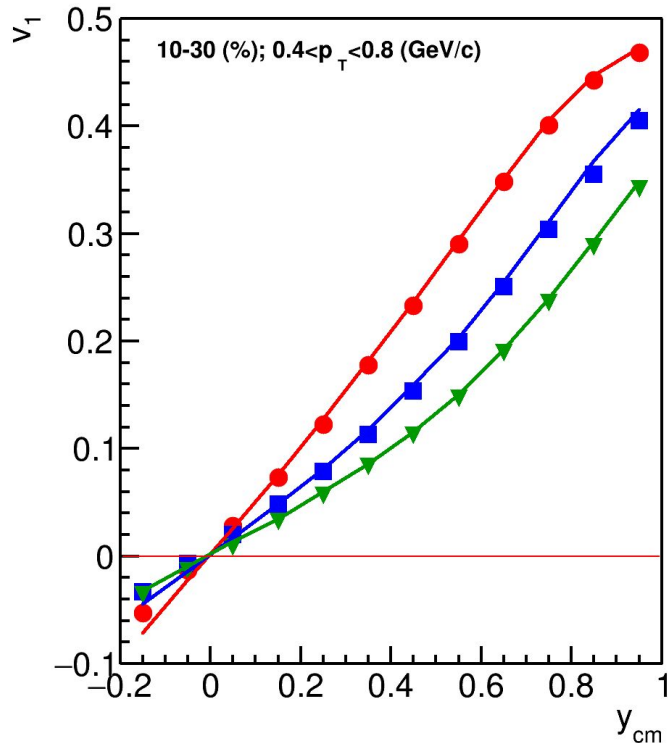
$$R_1^{F2\{Tp\}(F1,F3)} = \langle Q_1^{F2} Q_1^{Tp} \rangle \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{Tp} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{Tp} Q_1^{F3} \rangle}}$$

Rec R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs



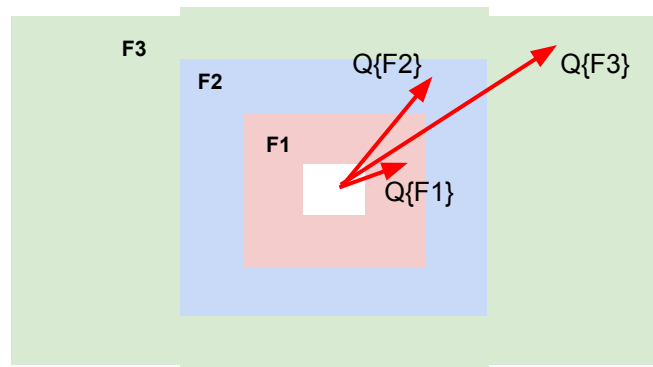
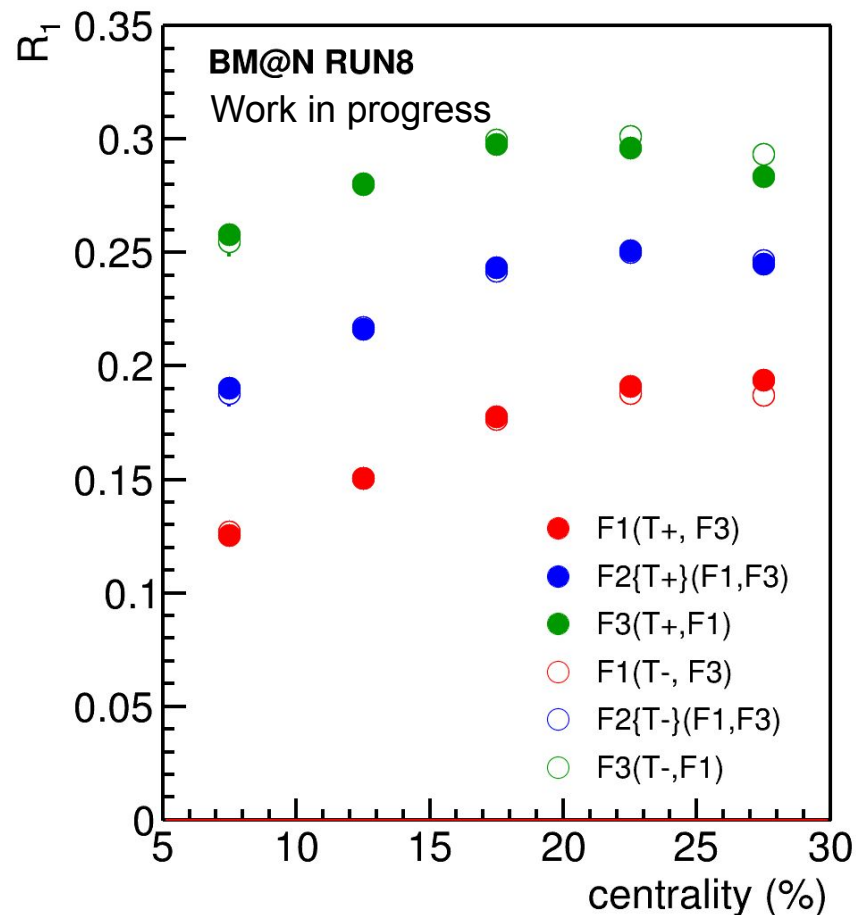
Resolution is lower for higher energies due to lower v_1

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:

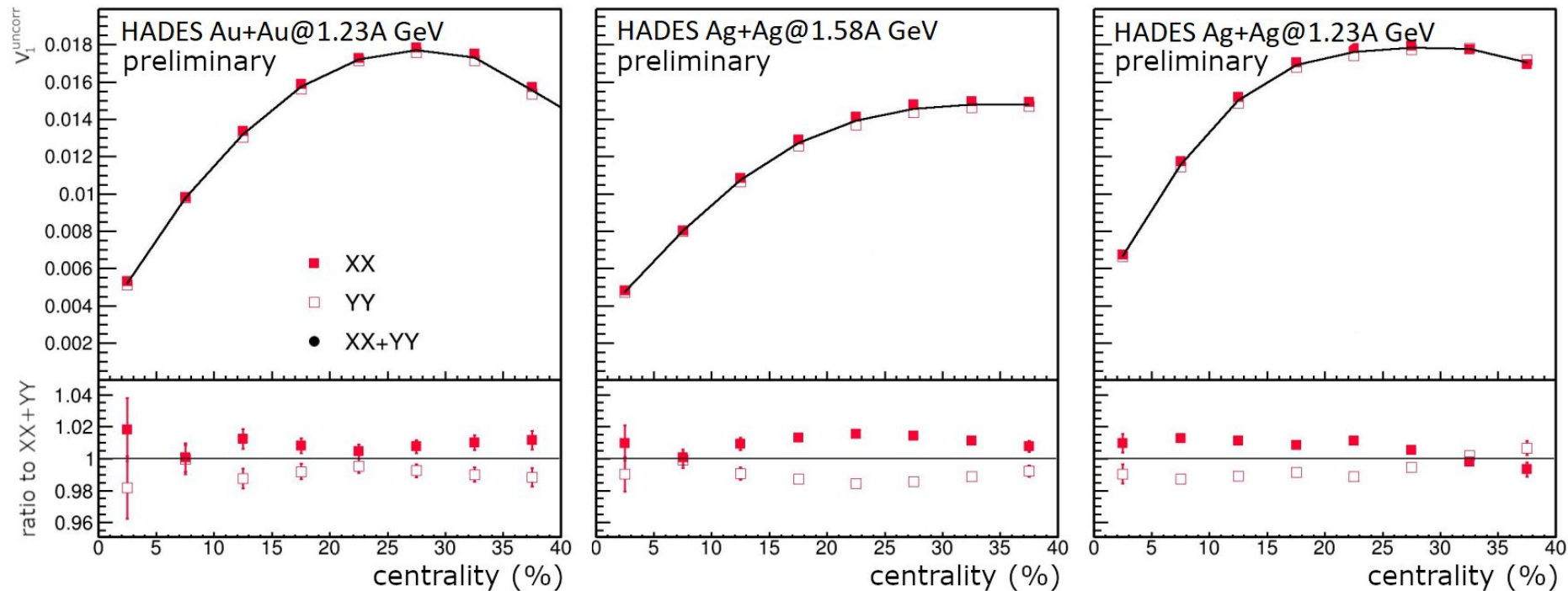
- $1.5 < \eta < 4$
- $p_T > 0.2 \text{ GeV/c}$

T+: all positively charged particles with:

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

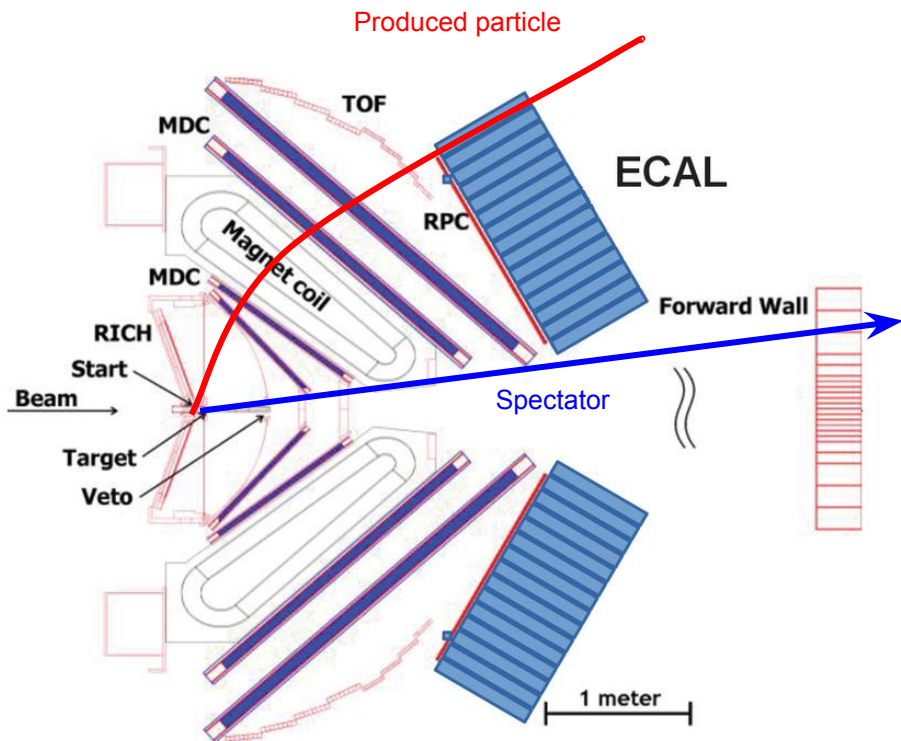
Results for v_1 and v_2 are in progress

Corrections due to non-uniform acceptance



Residual effect due to non-uniform acceptance is 2%

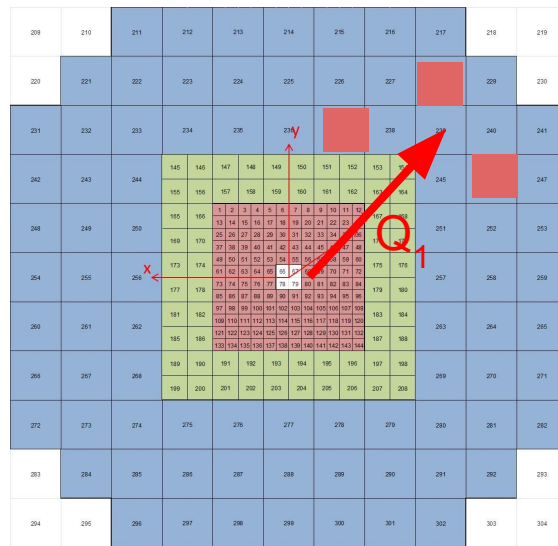
The HADES at SIS-18 accelerator (GSI, Germany)



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

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

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

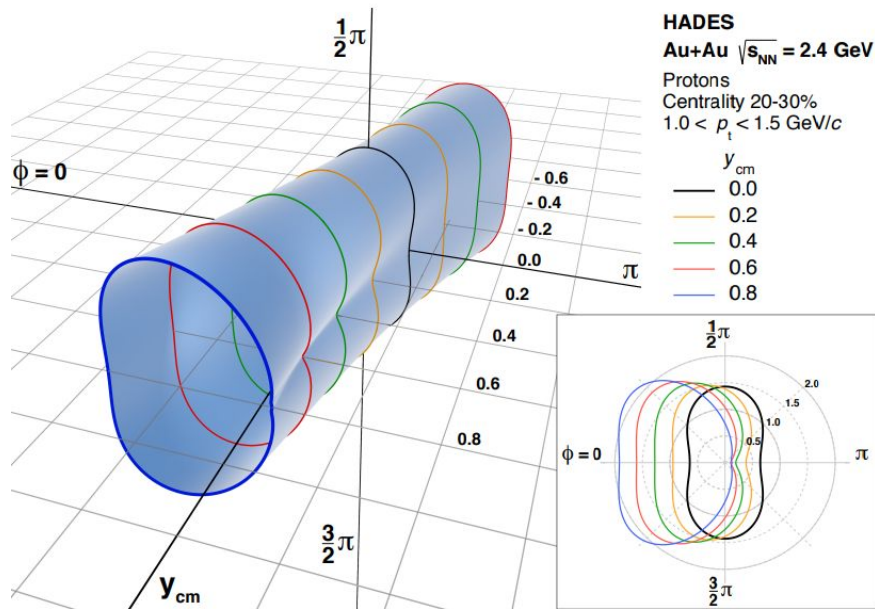


Reaction plane estimation using the deflection of projectile spectators

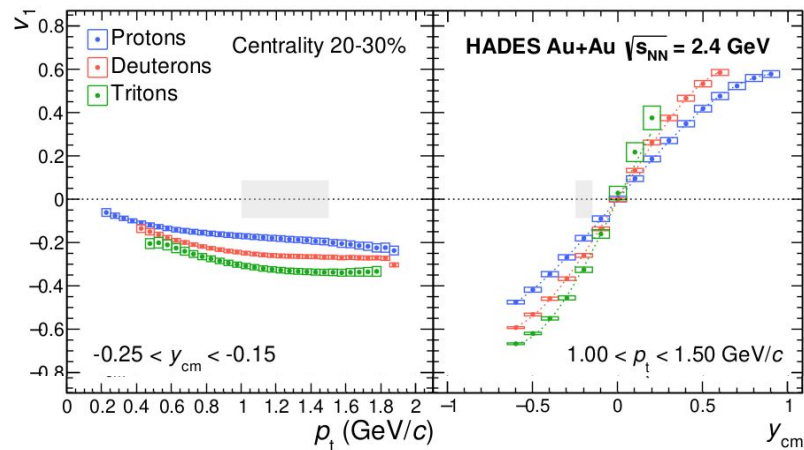
Systematic error table

	Неоднородность аксептанса	Непоточковые 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



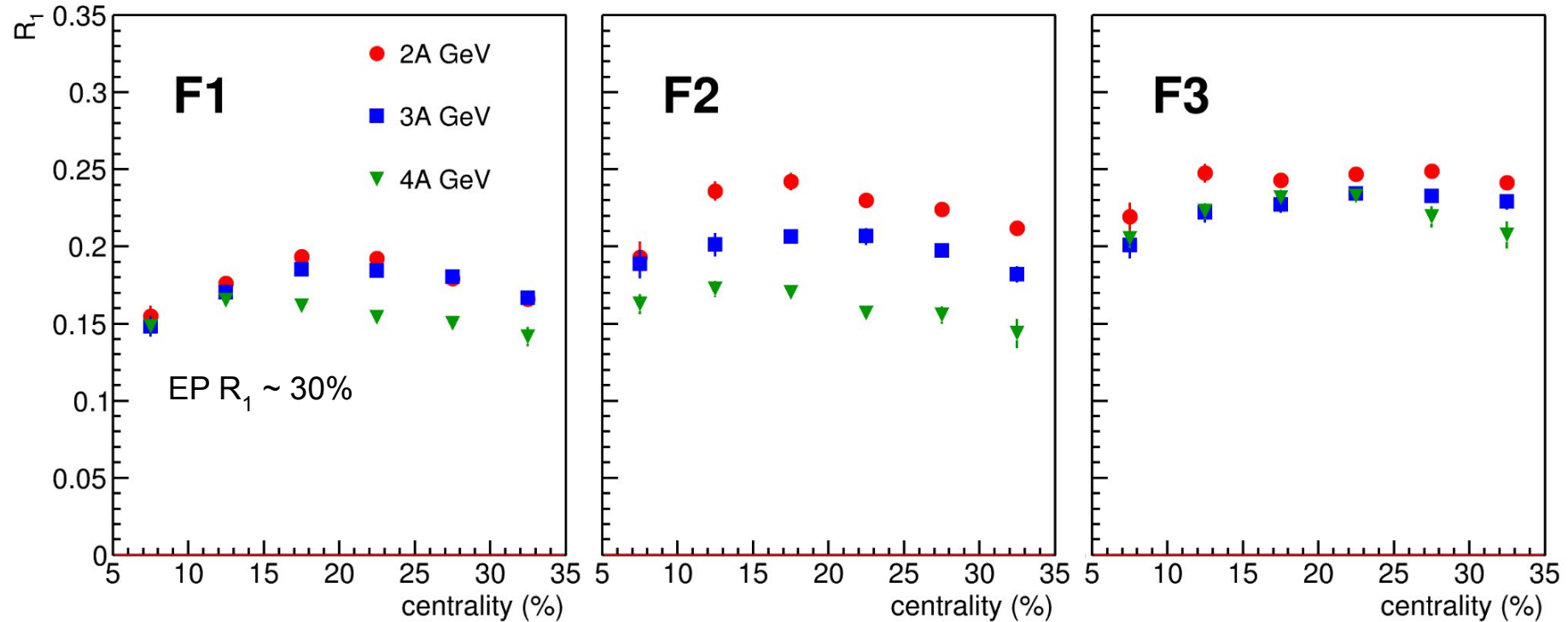
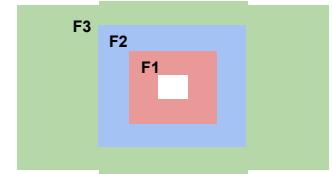
Коллективные потоки в Au+Au@1.23A ГэВ измерены до 6 гармоник

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

Table for the systematic uncertainties

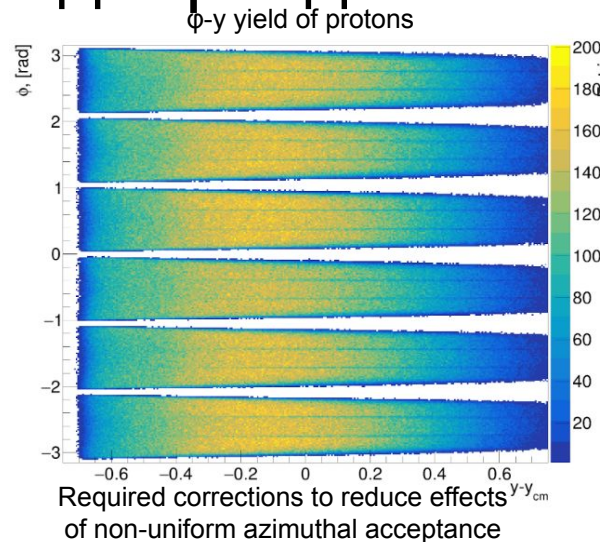
	Неоднородность аксептанса	Непоточковые корреляции	Общая
Хе+Cs при $E_{\text{kin}}=2\text{А ГэВ}$	3%	4%	5%
Хе+Cs при $E_{\text{kin}}=3\text{А ГэВ}$	3%	4%	5%
Хе+Cs при $E_{\text{kin}}=4\text{А ГэВ}$	3%	4%	5%

Rec R1: DCMQGCM-SMM Xe+Cs

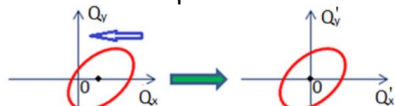


Для более высоких энергий R_1 ниже, поскольку ниже v_1

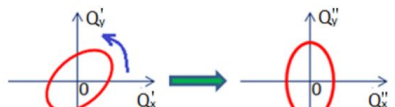
Неоднородность азимутального акцептанса HADES



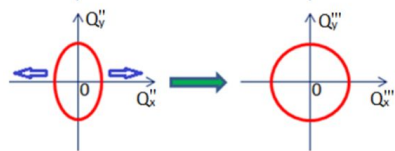
1. Recentering



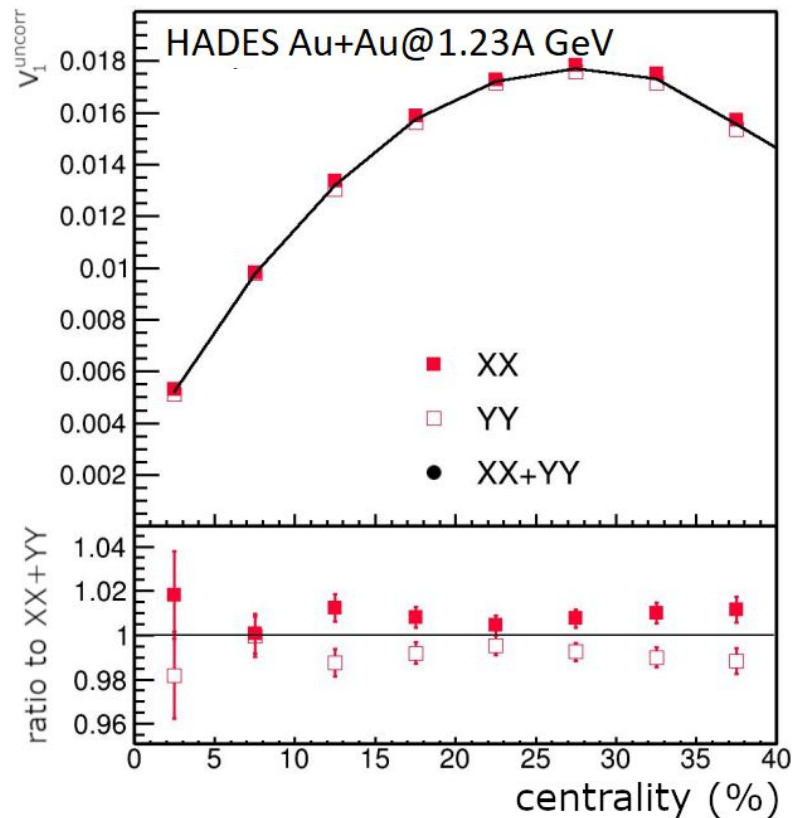
2. Twist



3. Rescaling

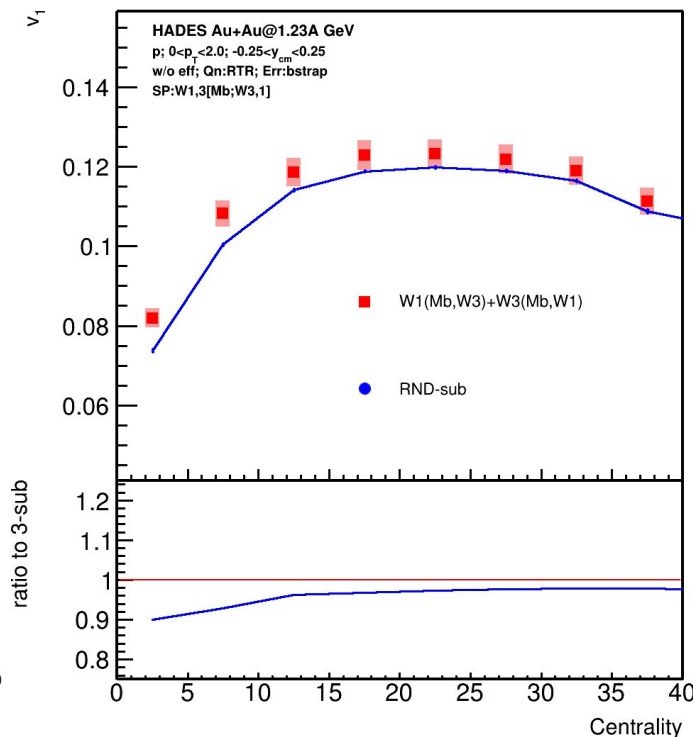
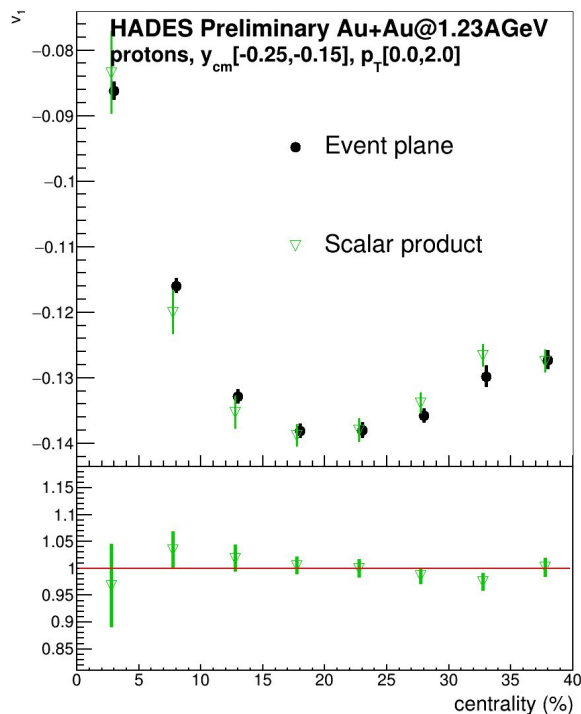


Corrections are based on method in:
I. Selvuzhenkov and S. Voloshin PRC77, 034904 (2008)



M Mamaev et al 2020 PPNuclei 53, 277–281

Сравнение методов измерения v_1 в эксперименте HADES

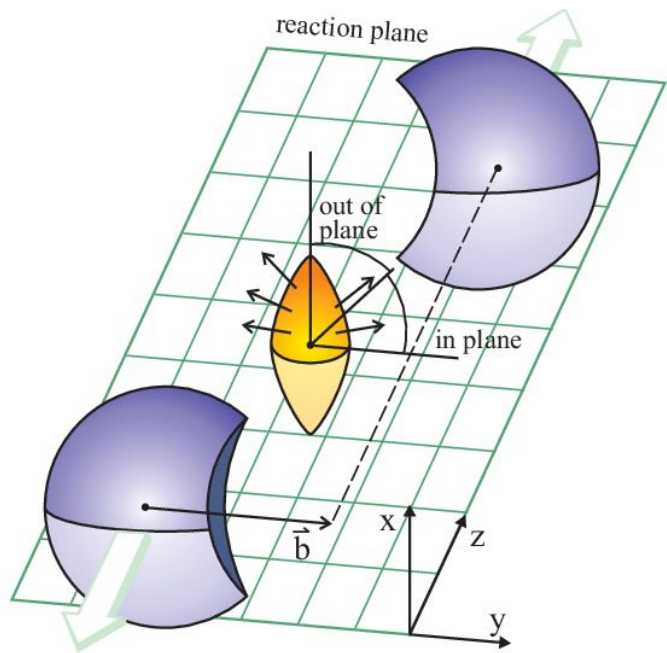


M.Mamaev et al. *Physics of Particles and Nuclei*, 2022, 53(2), pp. 277–281

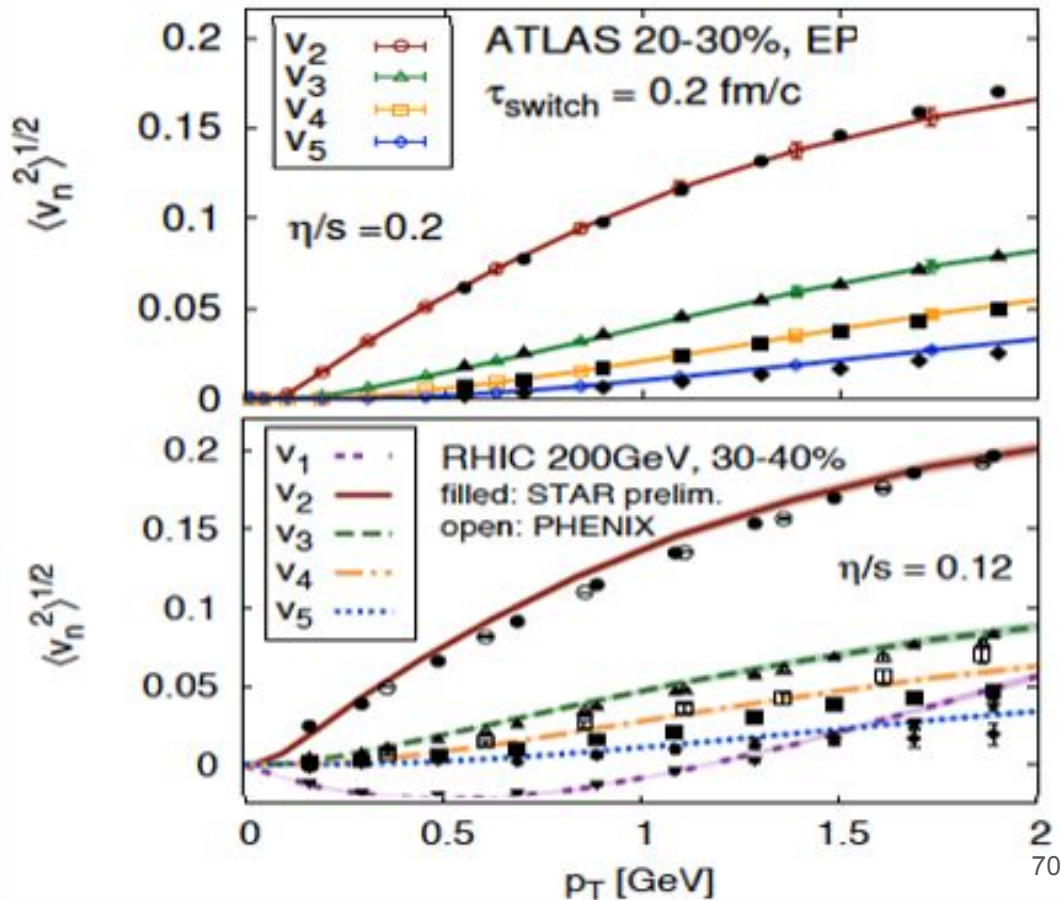
M.Mamaev et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1690(1), 012122

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

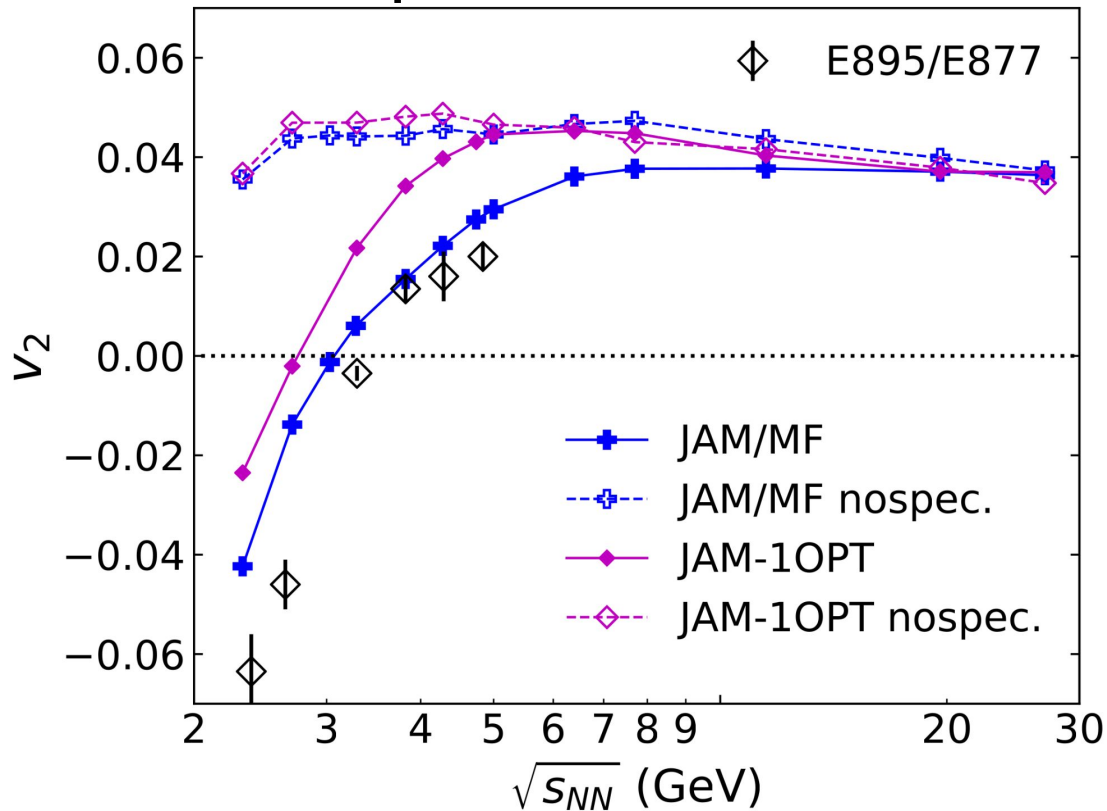
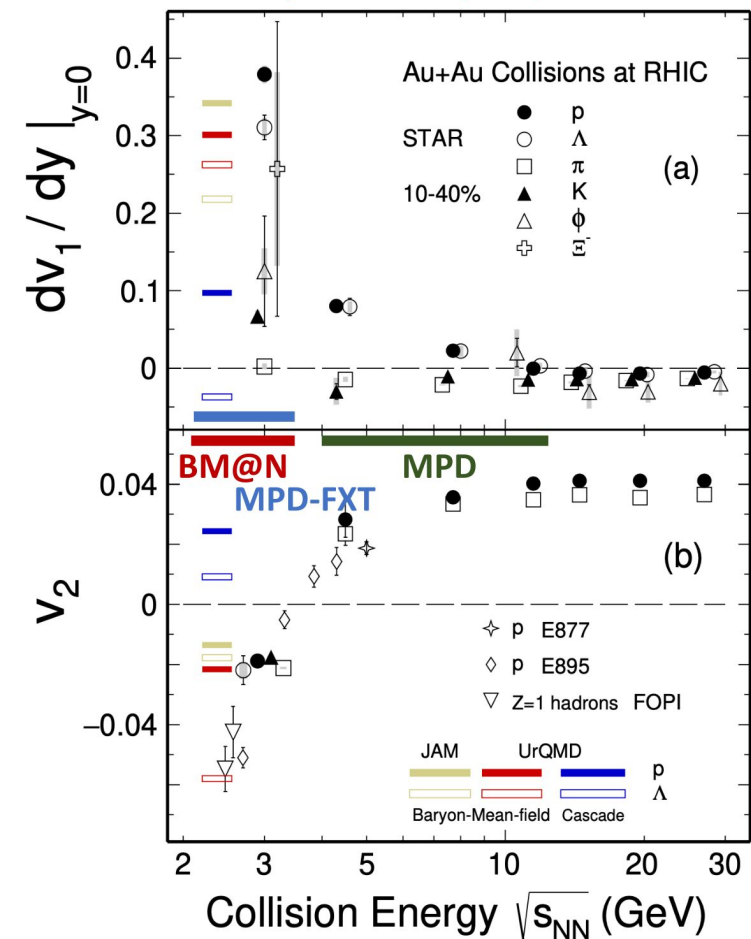
Роль анизотропных потоков в открытии КГМ



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

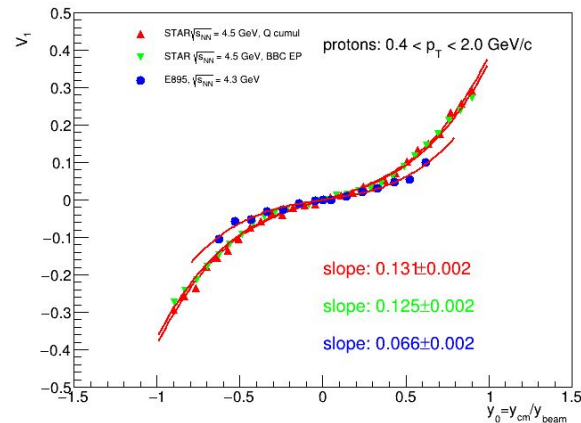
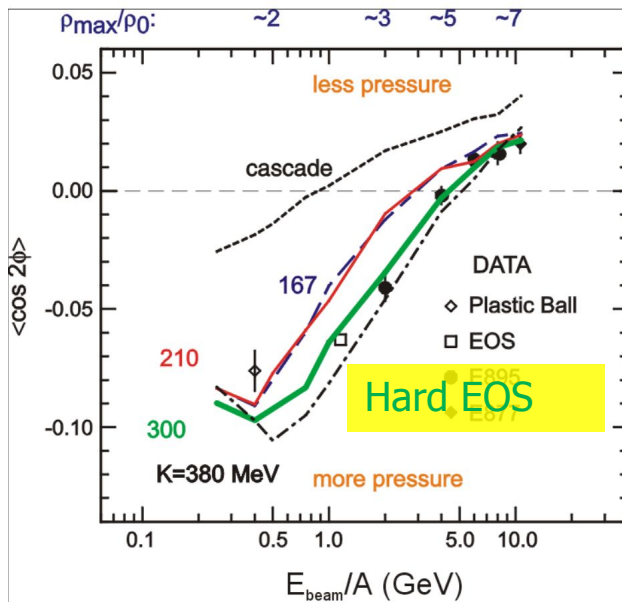
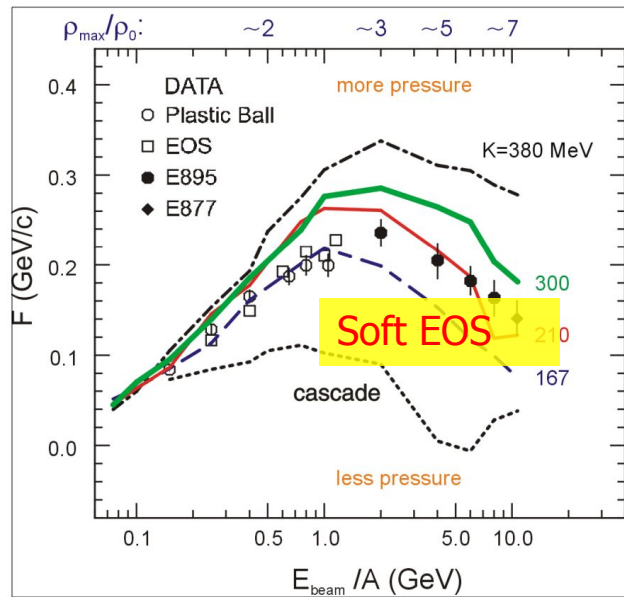


Влияние зрителей на анизотропные потоки



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



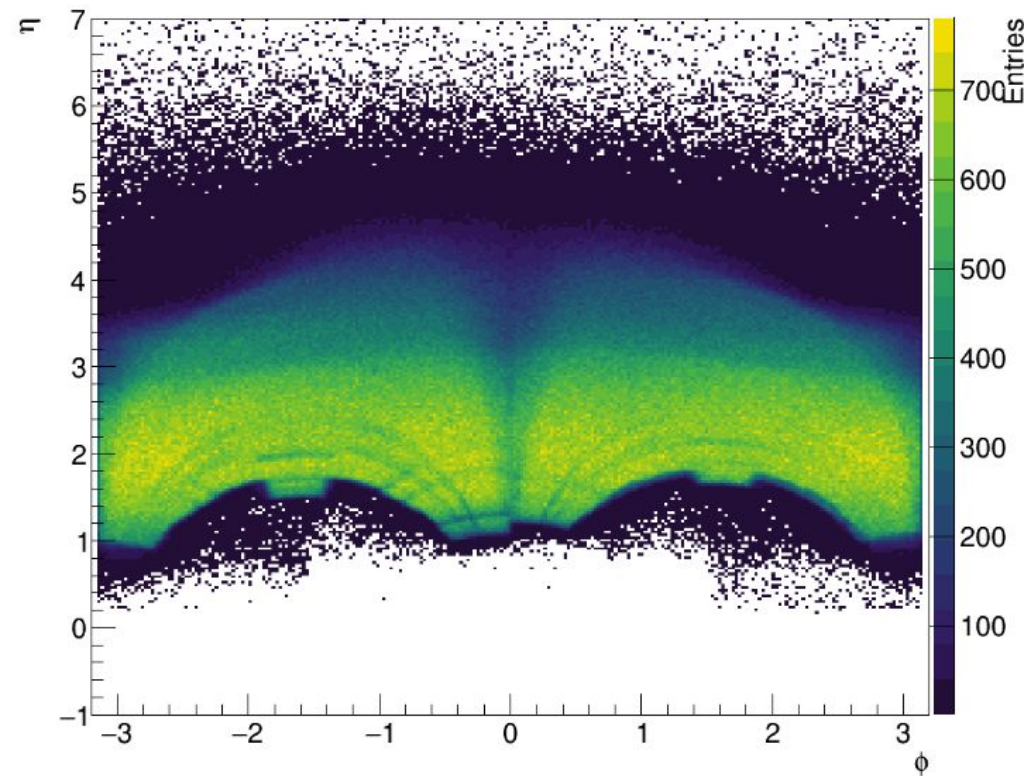
v_1 предполагает $K_{mn} \approx 210$ МэВ

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.

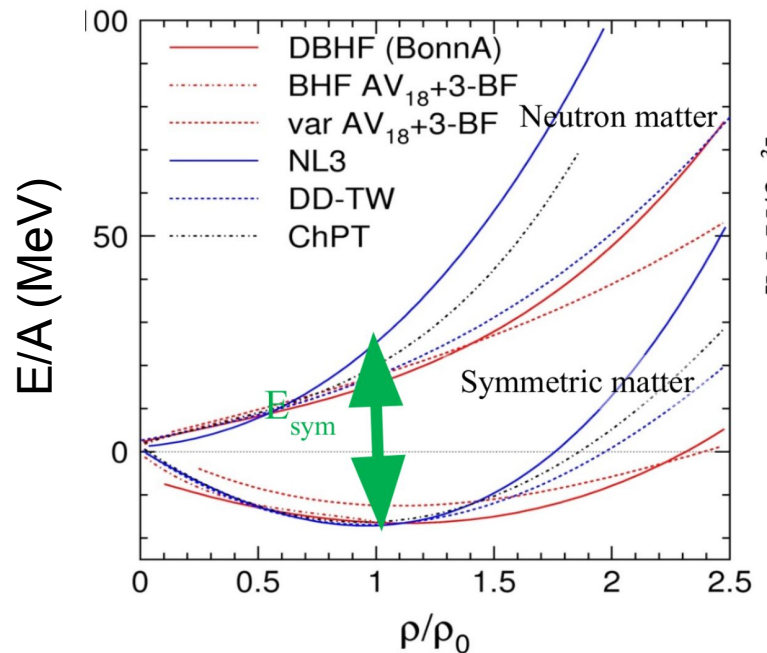
Энергия связи E/A определяется как:

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

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

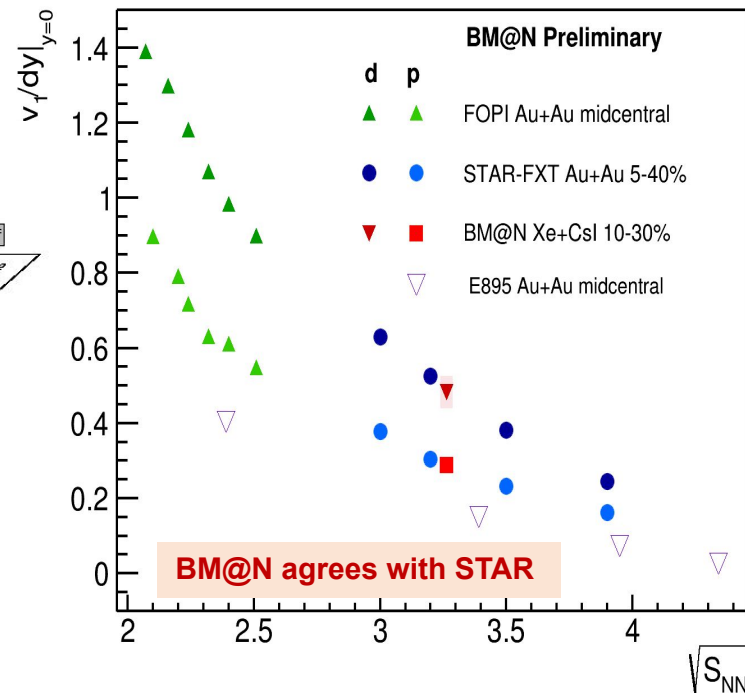
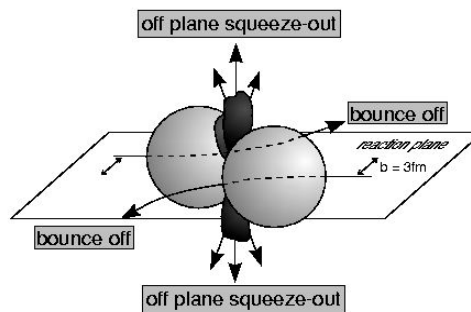
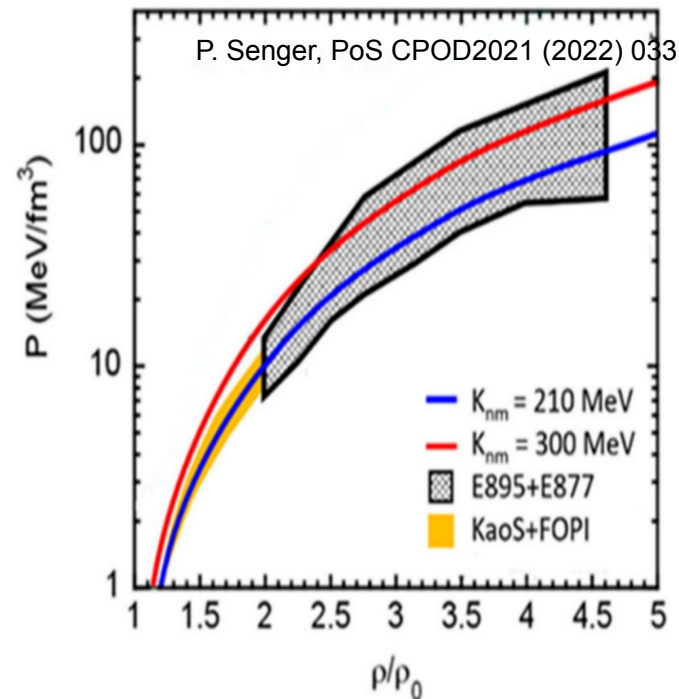
HADES collaboration

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. Ciepal³, C. Deveaux¹¹, J. Dreyer⁷, E. Eppel^{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. Greifenhagen^{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



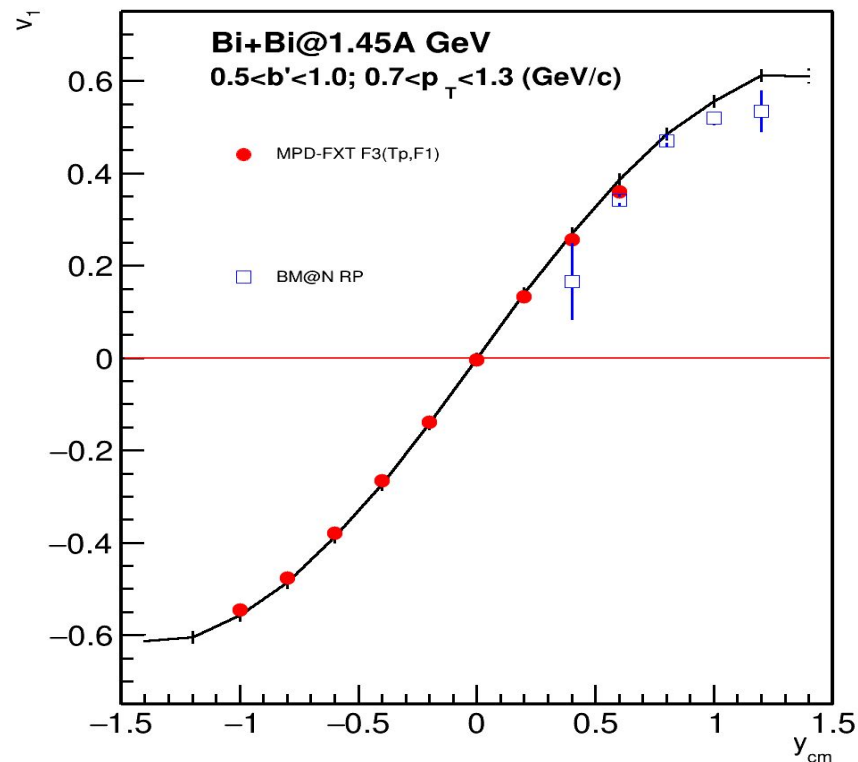
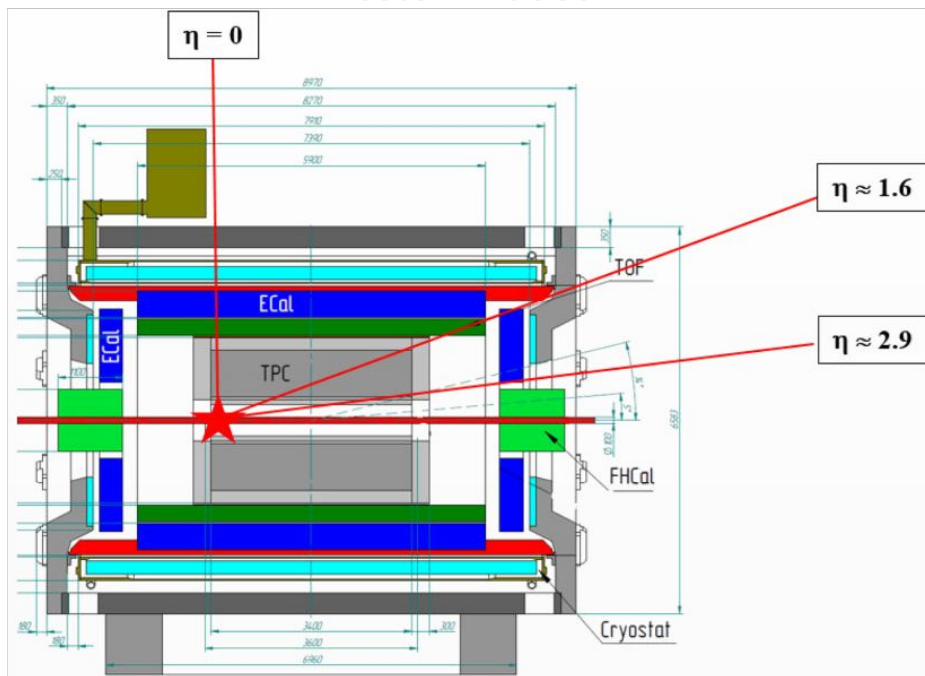
Nuclear incompressibility from collective proton flow

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

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

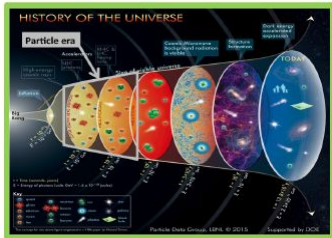
MPD in Fixed-Target Mode (FXT) vs BM@N

MPD-FXT

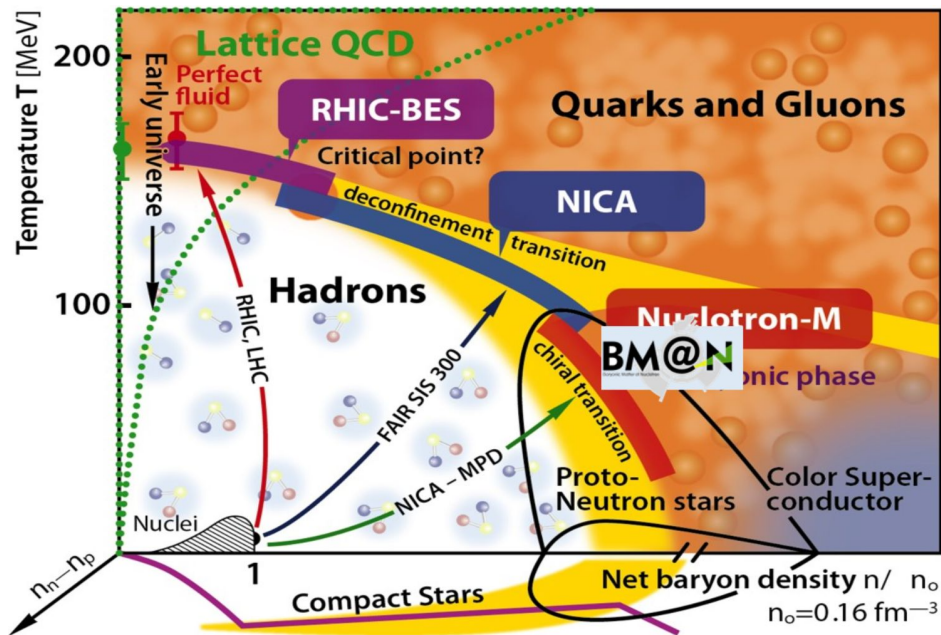


Please see Pater Parfenov talk at Nucleus-2024 – 02/07//2024

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

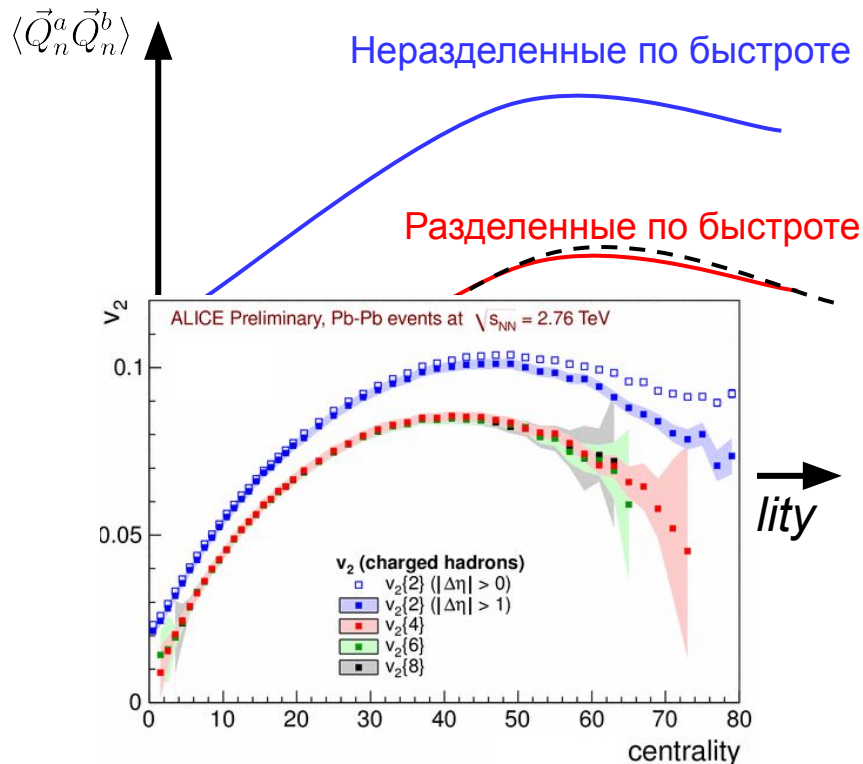
2010 - Поиск сигналов деконфайнмента, фазового перехода первого рода и критической точки КХД материи - основа для программ сканирования по энергии столкновения ядер в современных экспериментах на ускорителях: RHIC, SPS, Nuclotron, SIS18

Непотокковые корреляции

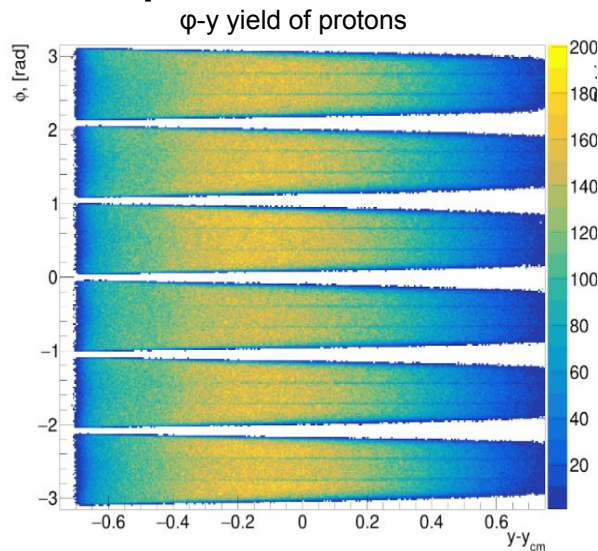
Корреляции не относящиеся к изначальному коллективному движению частиц называют непотокковыми:

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

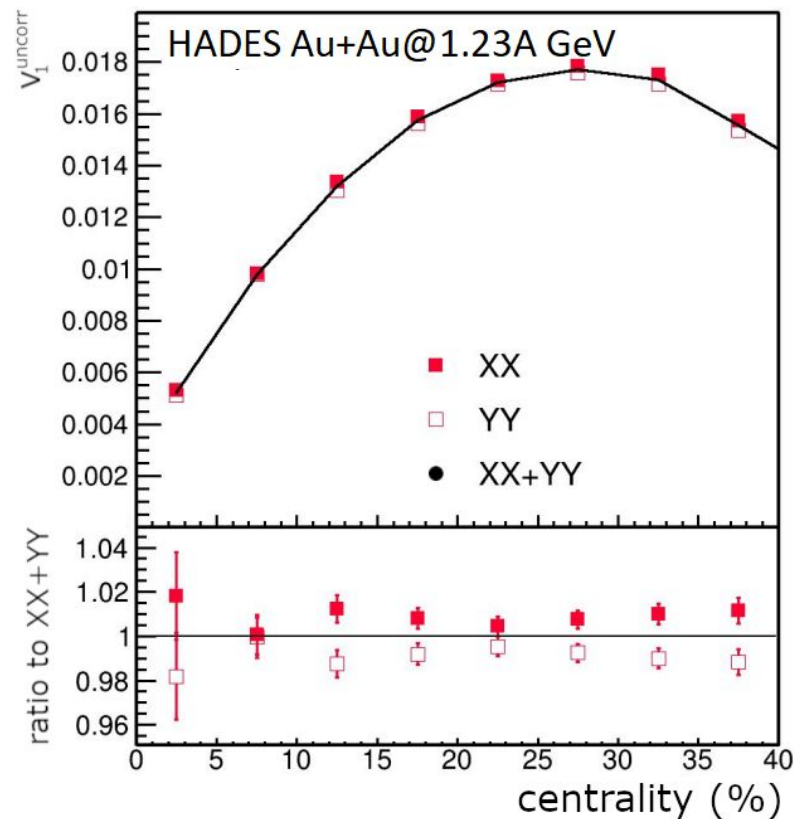
Основной способ подавить непотокковые корреляции — внести разделение по (псевдо-) быстроте между Q_n -векторами



Неоднородность азимутального акцептанса HADES



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



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

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

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

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 :

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

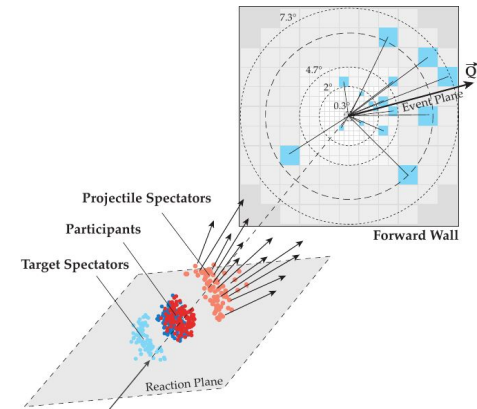
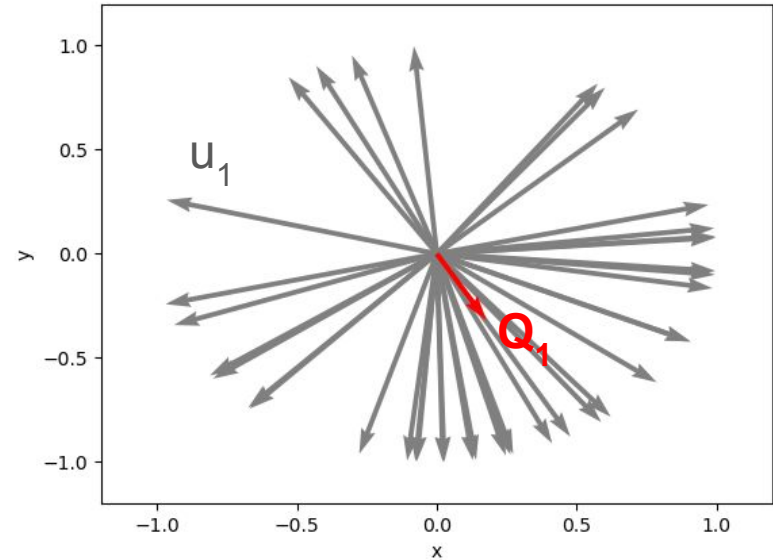
где φ — азимутальный угол импульса

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

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

Где R_1 — разрешение плоскости симметрии

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

Метод трех подсобытий:

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

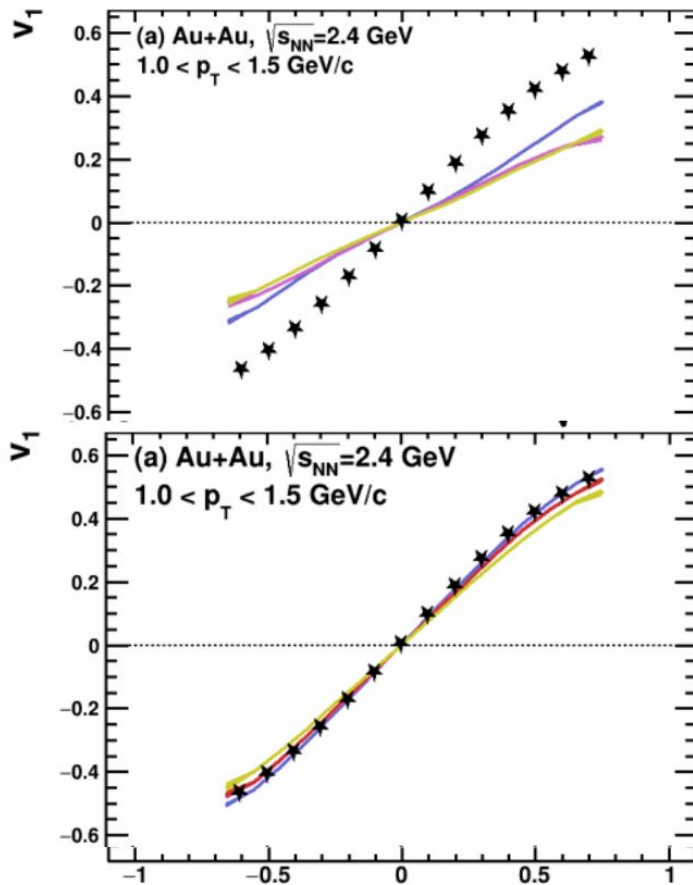
3 оценки для v_n
Можно оценить вклад
непоточковых корреляций

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

Цель работы

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