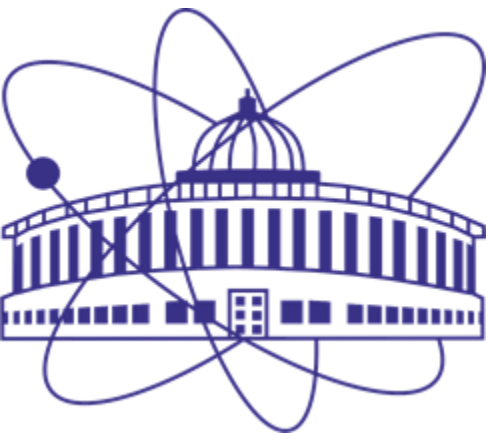


Измерение анизотропных потоков адронов в эксперименте MPD в NICA

Парфенов П.Е., Мамаев М.В., Тараненко А.В.
(ОИЯИ, НИЯУ МИФИ)

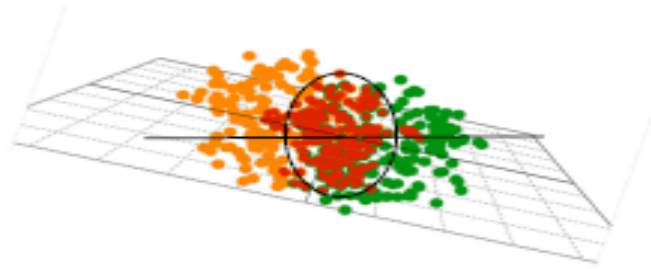
Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН
17-21 февраля 2025

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект "Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA (ОИЯИ)" № FSWU-2025-0014

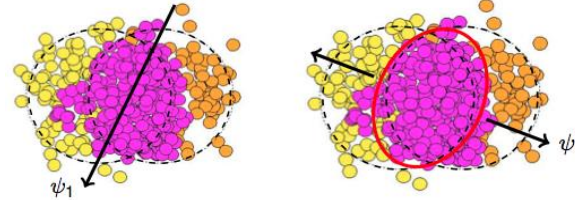


Анизотропные потоки при энергиях Nuclotron-NICA

STAR, Phys.Lett.B 827 (2022) 137003

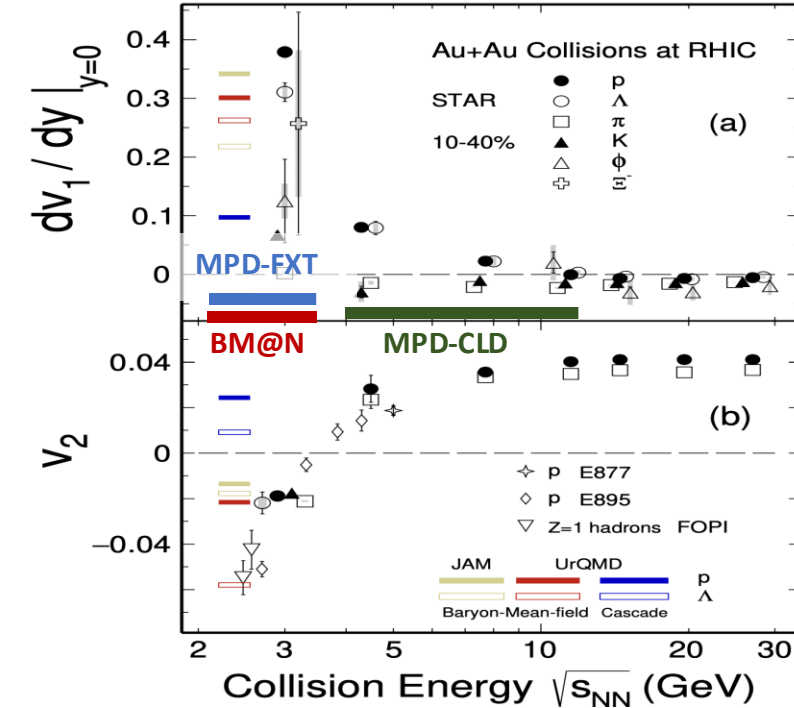


v_1 – прямой поток; v_2 – эллиптический поток;



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

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

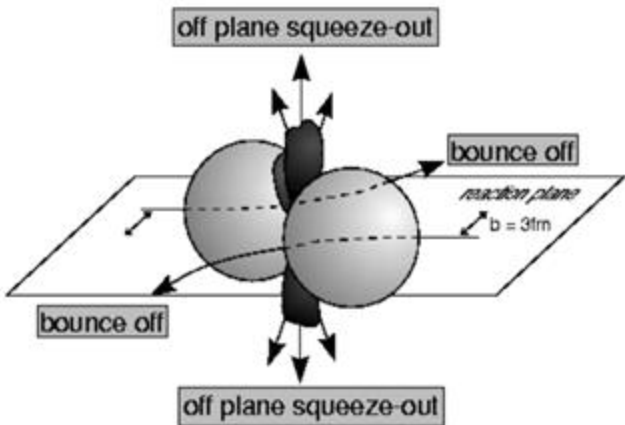


$$\epsilon_n = \sqrt{\frac{\langle r^n \cos n\phi \rangle + \langle r^n \sin n\phi \rangle}{\langle r^n \rangle}}$$

Начальный эксцентриситет ϵ_n (и сопутствующие ему колебания) приводит к анизотропии импульса v_n с определенной вязкой модуляцией

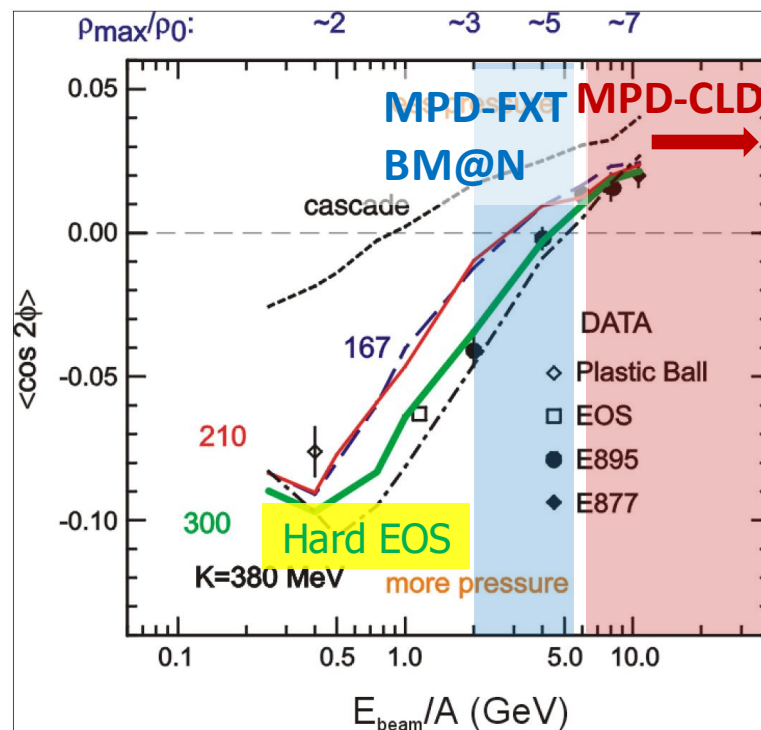
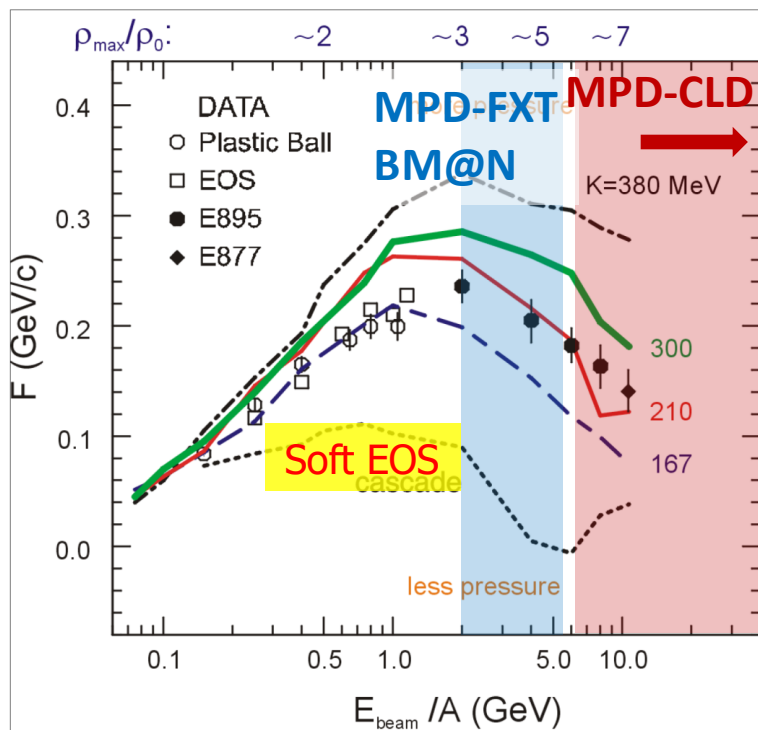
Коллективные потоки чувствительны к:

- Сжатию материи, созданной в ядро-ядерном столкновении
 $(t_{exp} = R/c_s, c_s = c\sqrt{dp/d\varepsilon})$
- Времени взаимодействия области нуклонов-участников и зрителей
 $(t_{pass} = 2R/\gamma_{CM}\beta_{CM})$



Чувствительность потоков к EoS

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



Потоки можно использовать для ограничений параметров EoS: определение коэффициента несжимаемости

$$K_0 = 9\rho^2 \frac{\partial^2(E_A)}{\partial \rho^2}$$

Несоответствия в интерпретации данных:

- v_1 предполагают мягкий EoS ($K_0 \approx 210$ MeV)
- v_2 предполагают жесткий EoS ($K_0 \approx 380$ MeV)

Новые измерения с использованием новых данных и современных методов анализа могут устранить эти несоответствия.

$$F = \left. \frac{d\langle p_x/A \rangle}{d(y/y_{cm})} \right|_{y/y_{cm}=1}$$

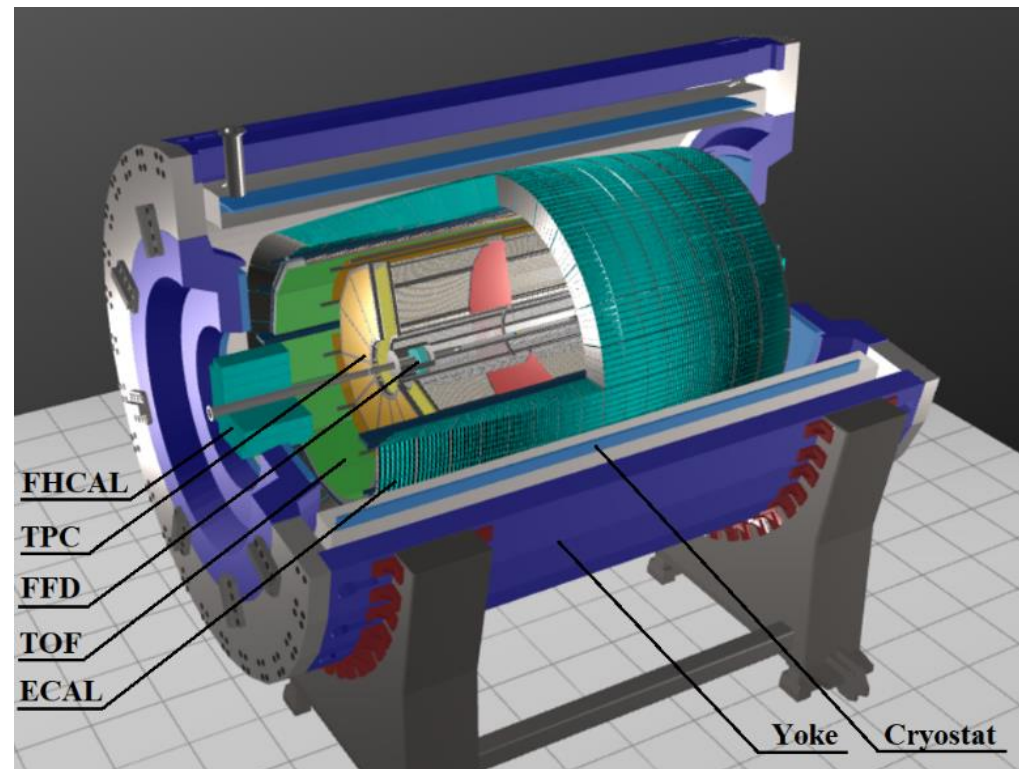
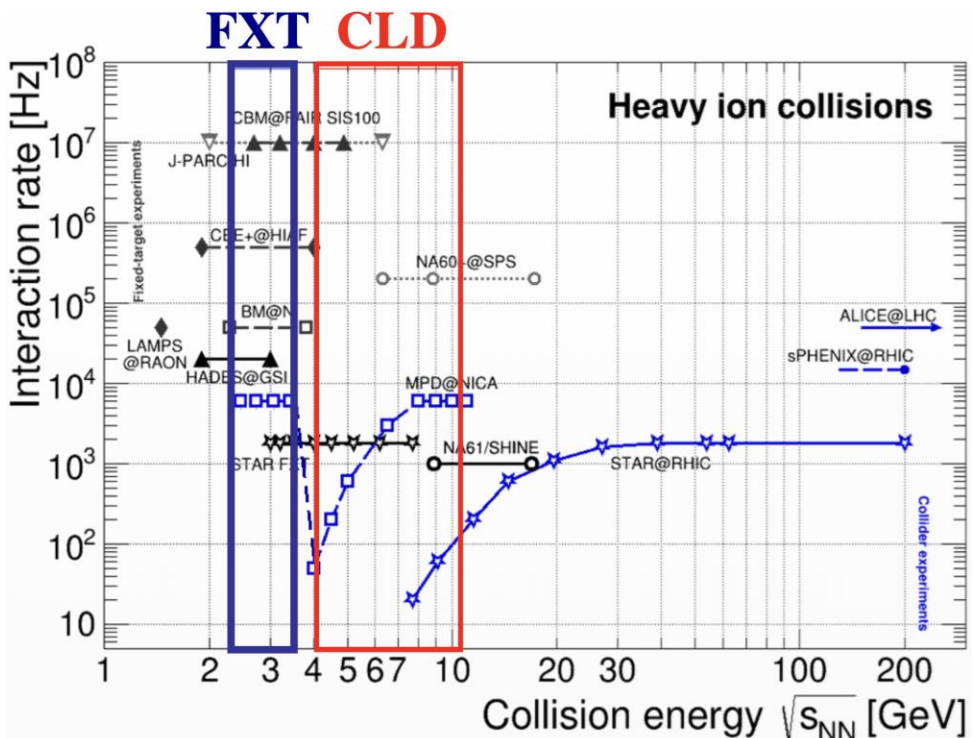
$$v_2 \equiv \langle \cos(2(\phi - \Psi_{RP})) \rangle$$

Для уточнения предыдущих результатов необходимы дополнительные измерения.

Эксперимент MPD на NICA

Основные подсистемы на этапе I (Stage-I):

- TPC ($|\eta| \leq 1.6$): трекинг заряженных частиц + реконструкция импульса + идентификация по dE/dx
- TOF ($|\eta| \leq 1.4$): идентификация заряженных частиц
- ECal ($2.9 < |\eta| < 1.4$): энергия и идентификация для γ/e^{\pm}
- FHCAL ($2 < |\eta| < 5$) и FFD ($2.9 < |\eta| < 3.3$): триггер событий + геометрия событий

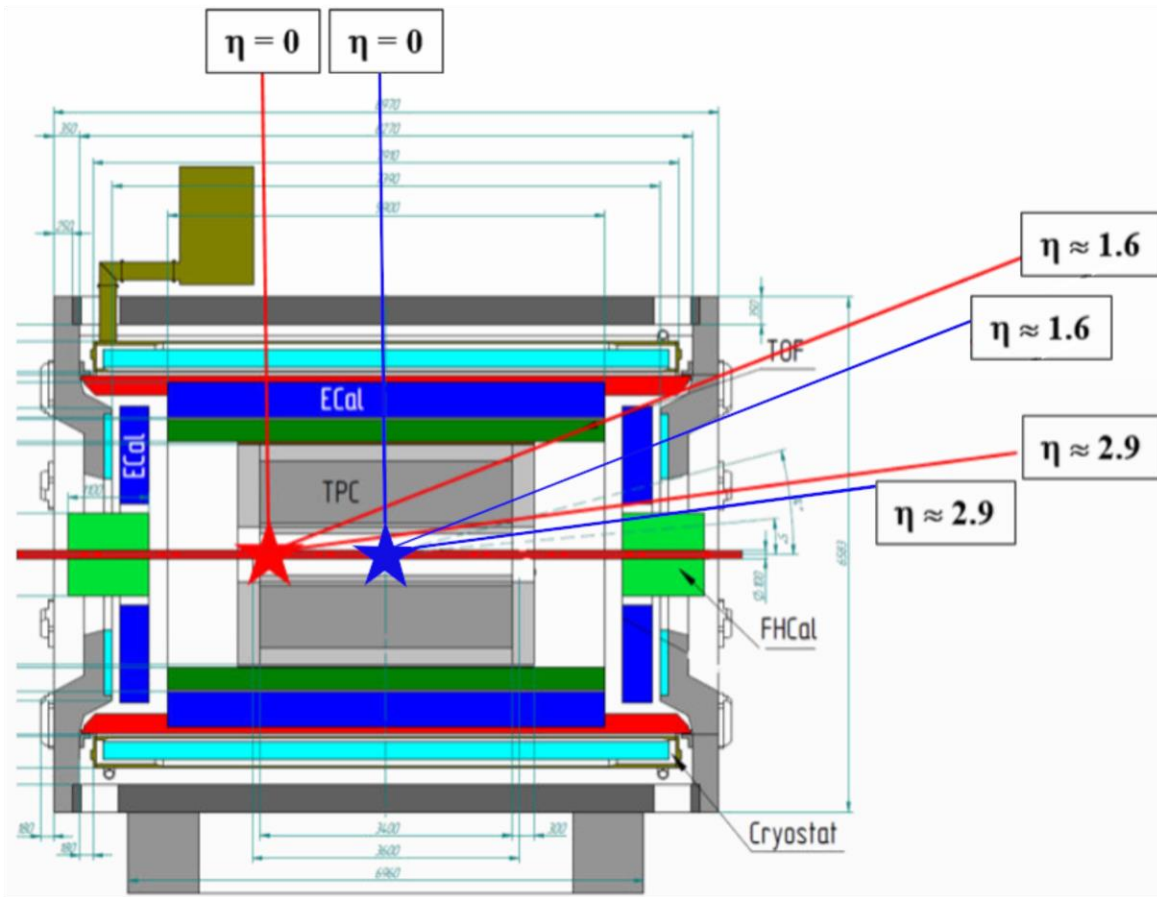


Ожидаемые пучки в первые годы эксплуатации (Stage-I):

- MPD-CLD: Xe/Bi+Xe/Bi при $\sqrt{s_{NN}} \sim 7$ GeV
- MPD-FXT: Xe/Bi +W при $\sqrt{s_{NN}} \sim 3$ GeV

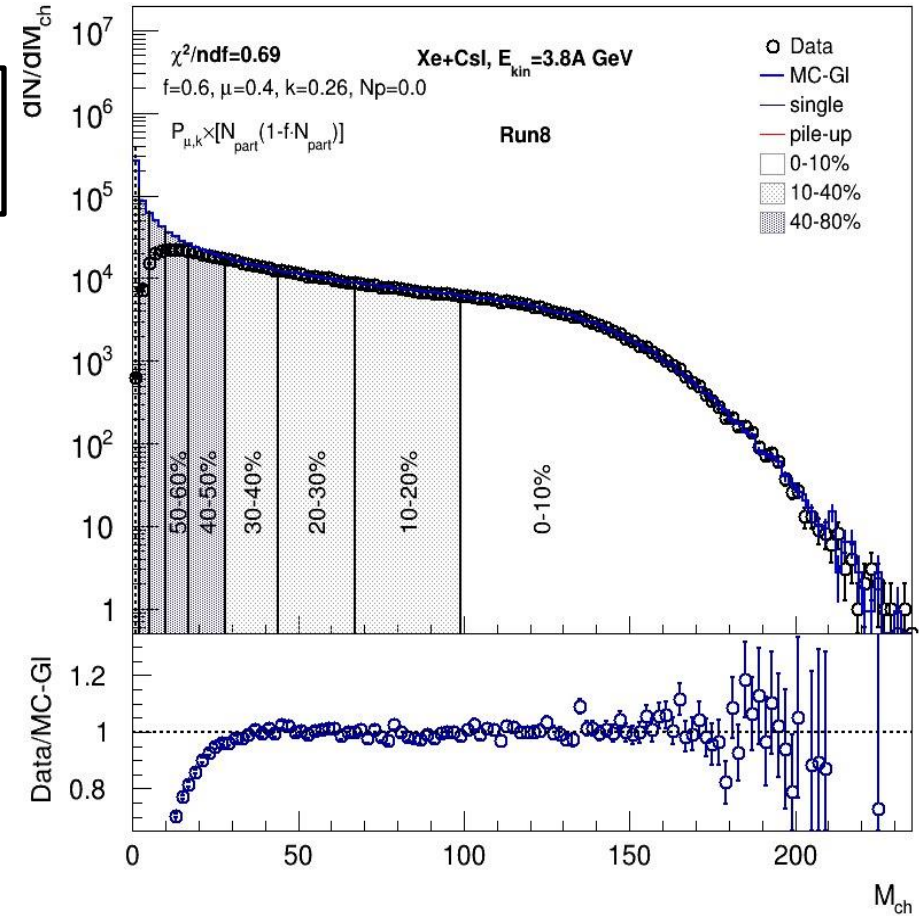
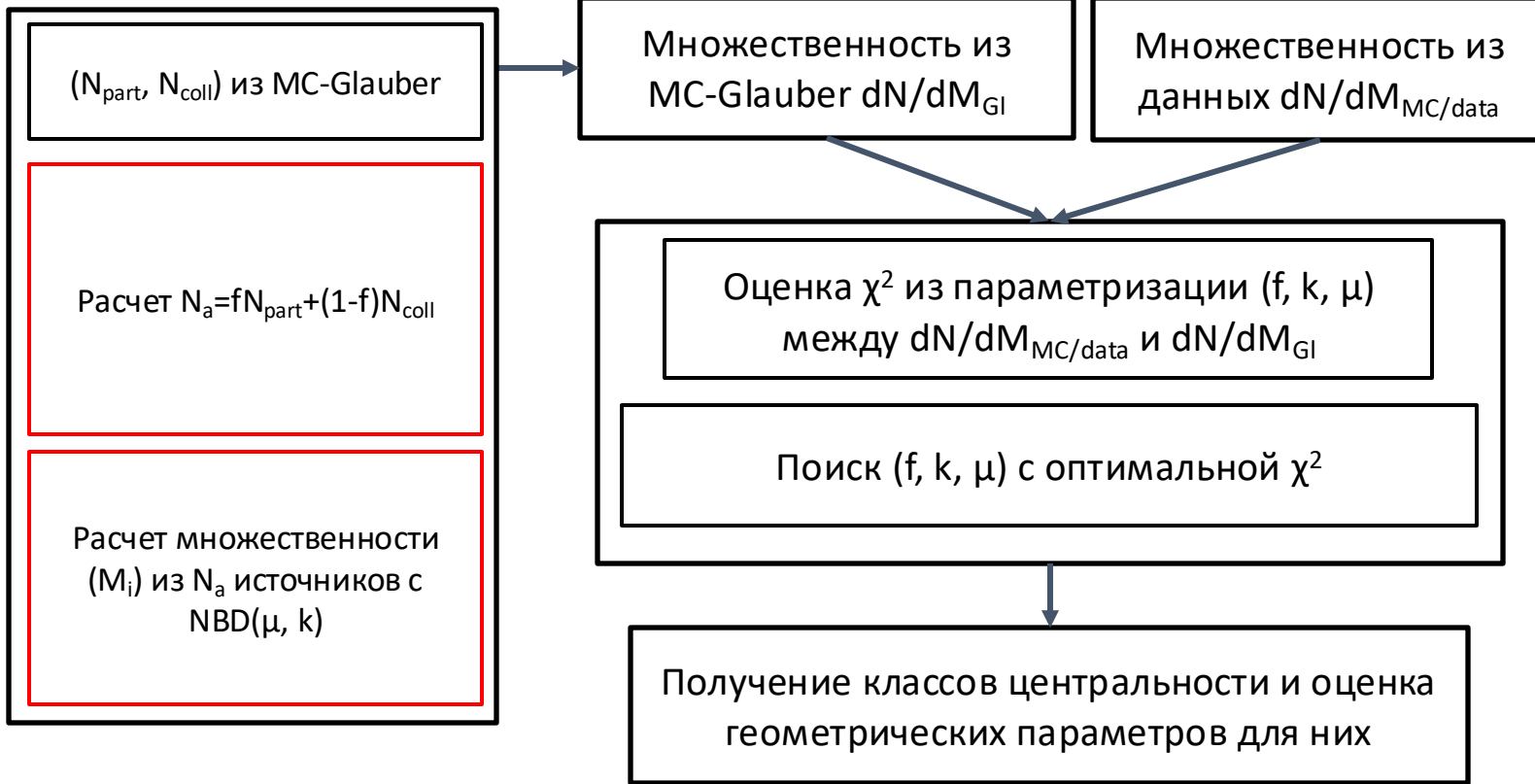
Пересечение по энергии: HADES, STAR BES, NA61/SHINE и будущий CBM

Данные для анализа



- **MPD-FXT**: UrQMD mean field, Bi+Bi
 - 11M событий $E_{\text{kin}}=1.45$ AGeV ($v_{s_{\text{NN}}}=2.5$ GeV)
 - 11M событий $E_{\text{kin}}=2.92$ AGeV ($v_{s_{\text{NN}}}=3.0$ GeV)
 - 11M событий $E_{\text{kin}}=4.65$ AGeV ($v_{s_{\text{NN}}}=3.5$ GeV)
- **MPD-CLD**: UrQMD cascade, Bi+Bi
 - 50M событий Bi+Bi, $v_{s_{\text{NN}}}=9.2$ GeV
- Конфигурация мишени (точки взаимодействия):
 - **MPD-FXT**: точечная мишень при $z = -115$ см
 - **MPD-CLD**: точка взаимодействия при $z = 0$ см
- Транспортная модель GEANT4
- Определение центральности по множественности заряженных частиц в TPC
- Идентификация частиц с помощью dE/dx (TPC) и m^2 (TPC+TOF)

Процедура определения центральности: MC-Glauber



см. доклады А. Деманова и Д. Идрисова

Пакет для определения центральности:

<https://github.com/FlowNICA/CentralityFramework/>

P. Parfenov, et al., Particles. 2021; 4(2):275-287

Процедура определения центральности: Γ -fit

Отношение между множественностью N_{ch} и прицельным параметром b задается флуктуационным ядром:

$$P(N_{ch}|c_b) = \frac{1}{\Gamma(k(c_b))\theta^k} N_{ch}^{k(c_b)-1} e^{-N_{ch}/\theta} \quad \frac{\sigma^2}{\langle N_{ch} \rangle} = \theta \approx const, k = \frac{\langle N_{ch} \rangle}{\theta}$$

$$c_b = \int_0^b P(b') db' \quad \text{– центральность по прицельному параметру}$$

Зависимость средней множественности от центральности задается с помощью параметризации:

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

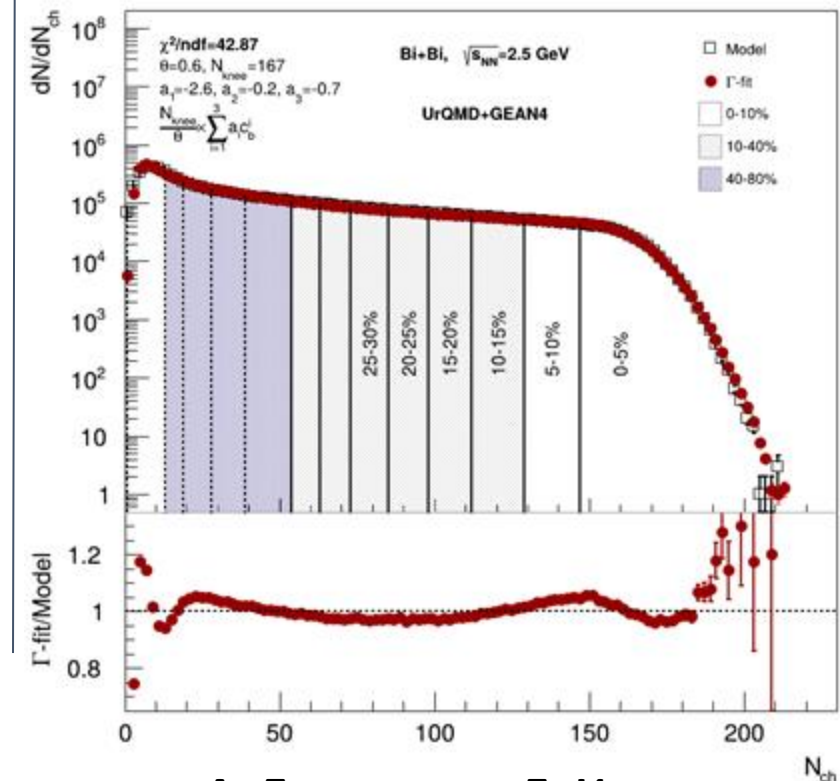
Параметризация множественности и прицельного параметра:

$$P(N_{ch}) = \int_0^1 P(N_{ch}|c_b) dc_b \quad P(b|n_1 < N_{ch} < n_2) = P(b) \frac{\int_{n_1}^{n_2} P(N_{ch}|b) dN_{ch}}{\int_{n_1}^{n_2} P(N_{ch}) dN_{ch}}$$

Метод состоит из 2 этапов:

Параметризация данных множественности $P(N_{ch})$

Построение $P(b|E)$, используя обратную теорему Байеса



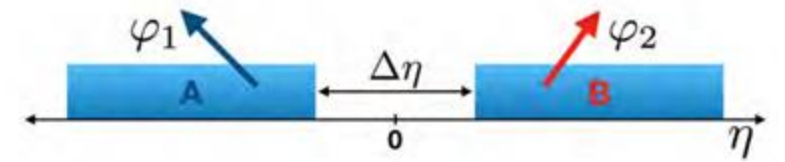
см. доклады А. Деманова и Д. Идрисова

Измерение потоков v_n в MPD-CLD

- 2-частичные прямые кумулянты (Q-cumulants) $v_2\{2\}$:

$\Delta\eta=0.1$ между 2 подсобытиями A, B для подавления non-flow

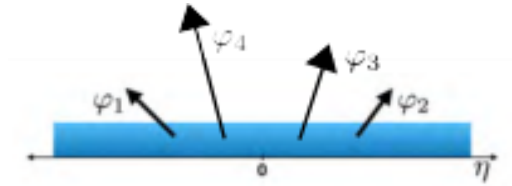
$$Q_n = \sum_{i=1}^M e^{in\phi} \quad \langle 2 \rangle_{a|b} = \frac{Q_{n_a} Q_{n_b}^*}{M_a M_b} \quad v_2\{2\} = \sqrt{\langle \langle 2 \rangle \rangle_{a|b}}$$



- 4-частичные прямые кумулянты (Q-cumulants) $v_2\{4\}$:

$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)} \quad v_2\{4\} = \sqrt[4]{2 \langle \langle 2 \rangle \rangle^2 - \langle \langle 4 \rangle \rangle}$$

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



- Метод плоскости событий (с $\Delta\eta=0.1$):

$$Q_{n,x} = \sum_i w_i \cos(n\phi_i) \quad \Psi_n^{EP} = \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\frac{Q_{n,y}}{Q_{n,x}} \right)$$

$$Q_{n,y} = \sum_i w_i \sin(n\phi_i)$$

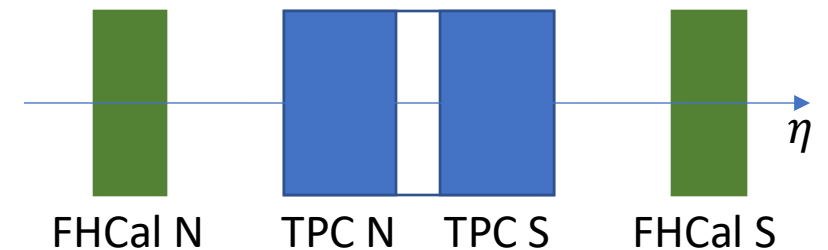
$$v_n = \frac{\langle \cos[n(\phi - \Psi_n^{EP})] \rangle}{\sqrt{\langle \cos[n(\Psi_{n,a} - \Psi_{n,b})] \rangle}}$$

Тут: ω_i - $p_{T,i}$ поперечный импульс i -го трека в TPC

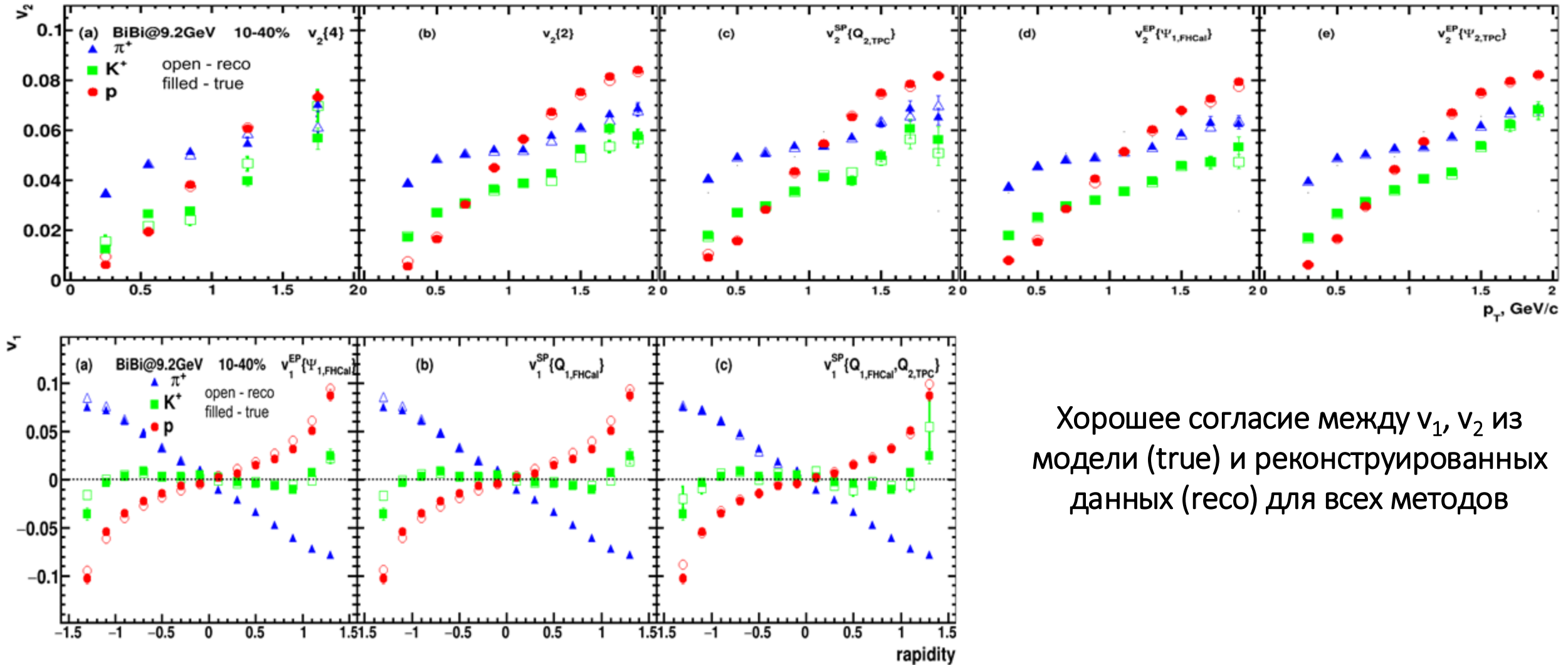
$E_{dep,i}$ энергия в i -м модуле FHCaI

ϕ_i - азимутальный угол i -го трека в TPC или центра i -го модуля FHCaI

Ψ_n - углы плоскости события



Результаты: $v_1(y)$, $v_2(p_T)$



Хорошее согласие между v_1 , v_2 из модели (true) и реконструированных данных (reco) для всех методов

Анизотропные потоки Λ -гиперонов

см. доклад В. Трошина

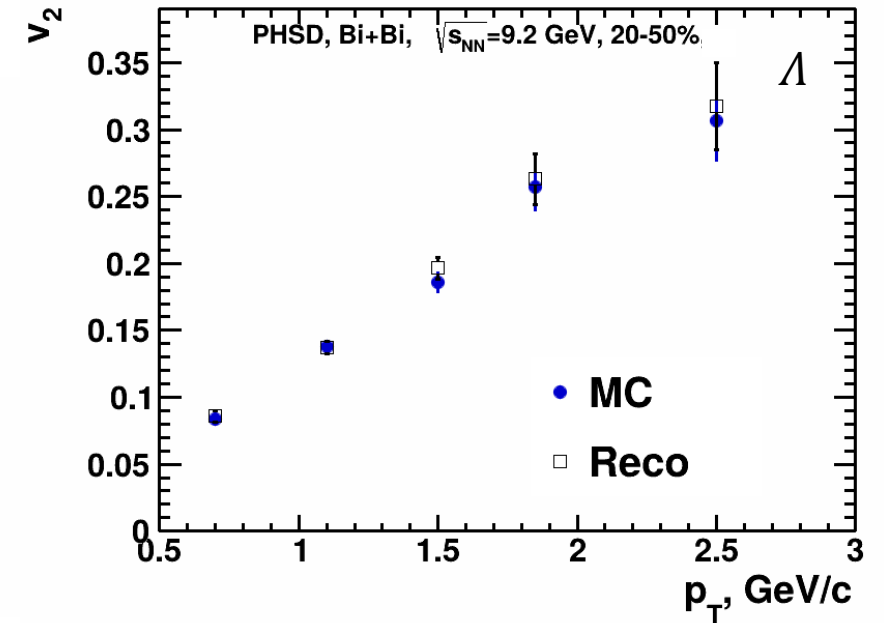
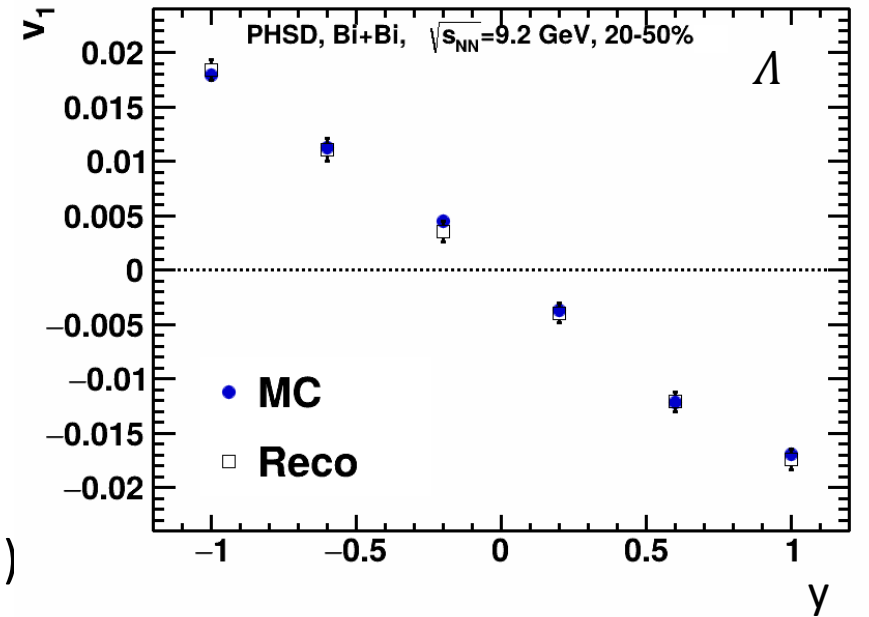
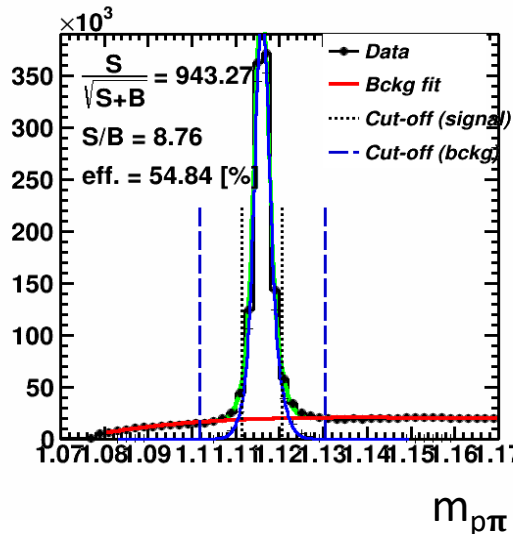
Потоки могут быть измерены с использованием параметризации:

$$v_n^{SB}(m_{inv}) = v_n^S \frac{N^S(m_{inv})}{N^{SB}(m_{inv})} + v_n^B(m_{inv}) \frac{N^B(m_{inv})}{N^{SB}(m_{inv})}$$

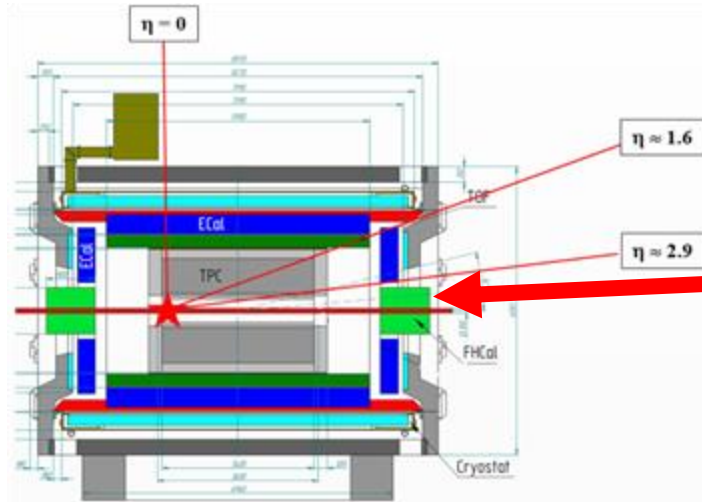
где:

- v_n^S - поток сигнала (указывается как параметр)
- $v_n^B(m_{inv})$ - поток фона (указывается как полиномиальная функция)
- $N^{SB}(m_{inv})$ - m_{inv} распределение (сигнал + фон)
- $N^S(m_{inv})$ - m_{inv} распределение сигнала
- $N^B(m_{inv})$ - m_{inv} распределение фона

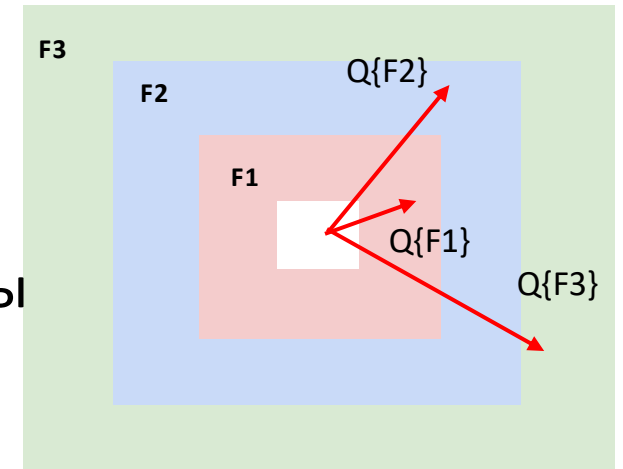
Хорошее соответствие между v_1, v_2
из модели (MC) и
реконструированных данных (reco)



Измерение потоков в MPD-FXT: выбор подсобытий



Модули FHCAL
разделены на 3 группы



Для каждой измеренной частицы определяется u_n -вектор в азимутальной плоскости:

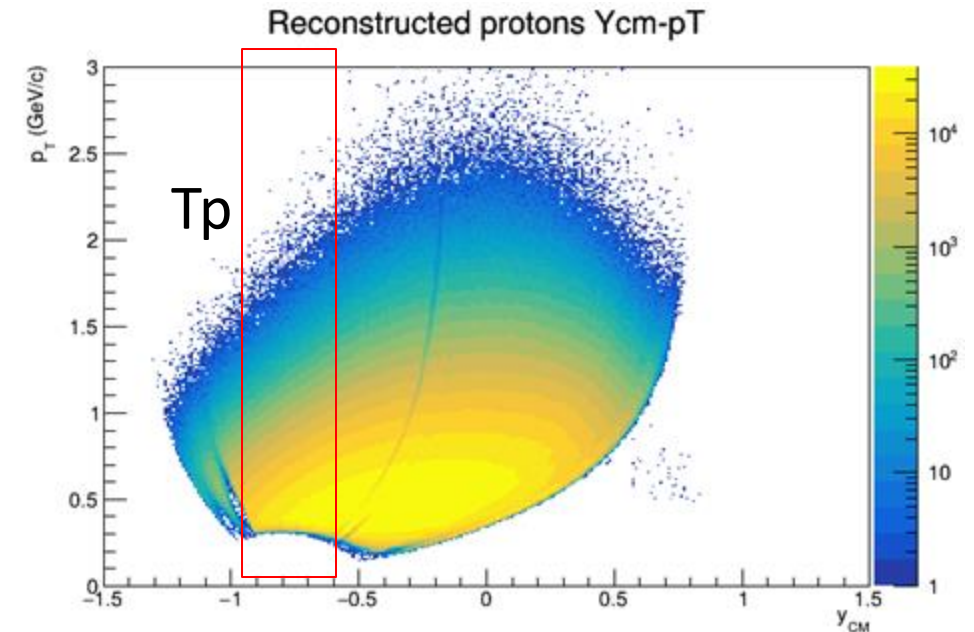
$$u_n = e^{in\phi}$$

где ϕ - азимутальный угол частицы

Взвешенная сумма по группе u_n -векторов в событии называется Q_n -вектором:

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

Ψ_n^{EP} плоскость события (симметрии)



Дополнительные подсобытия из
трекинговой системы:

Tr: $p_T < 0.6$; $-1.0 < y_{CM} < -0.6$;

Измерение потоков в MPD-FXT: метод скалярных произведений

Метод проверен M Mamaev et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012122
 в BM@N, HADES: M Mamaev et al Phys.Part.Nucl. 53 (2022) 2, 277-281
 M Mamaev et al Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 4, 832-835

Метод скалярных произведений (SP):

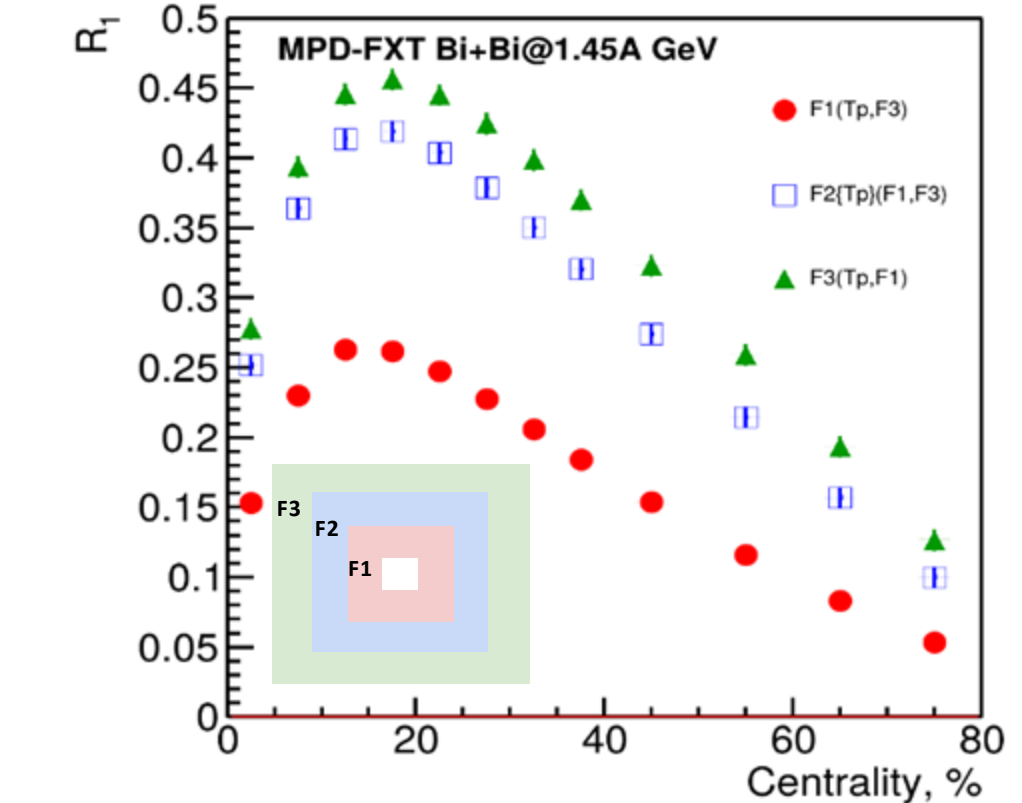
$$v_1 = \frac{\langle u_1 Q_1^{F1} \rangle}{R_1^{F1}} \quad v_2 = \frac{\langle u_2 Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}{R_1^{F1} R_1^{F3}}$$

где R_1 - разрешение плоскости симметрии:

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

Символ “F2(F1,F3)” означает, что R_1 был получен с помощью 3-х подсобытий:

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



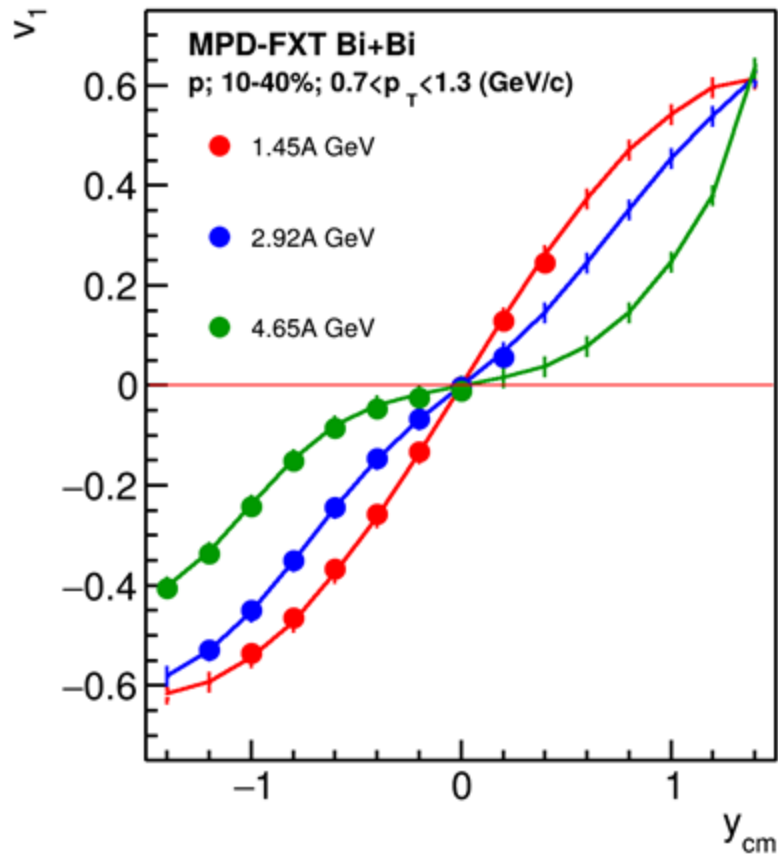
Символ “F2{Tp}(F1,F3)” означает, что R_1 был получен с помощью 4-х подсобытий:

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

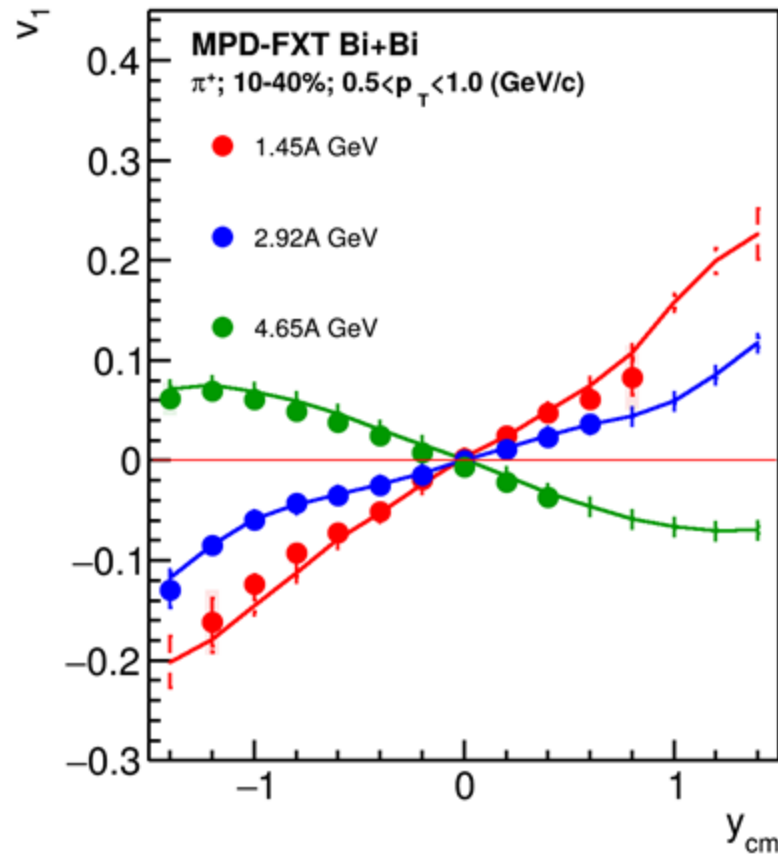
Результаты: $v_1(y)$

Систематические ошибки:
xx, yy, F1, F2, F3

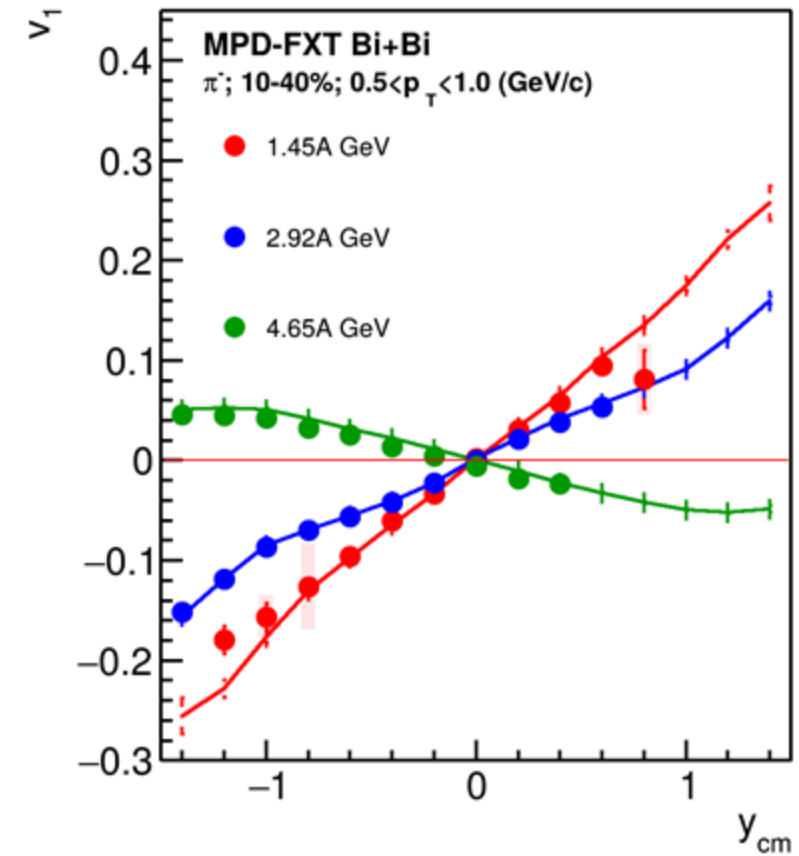
p



π^+



π^-

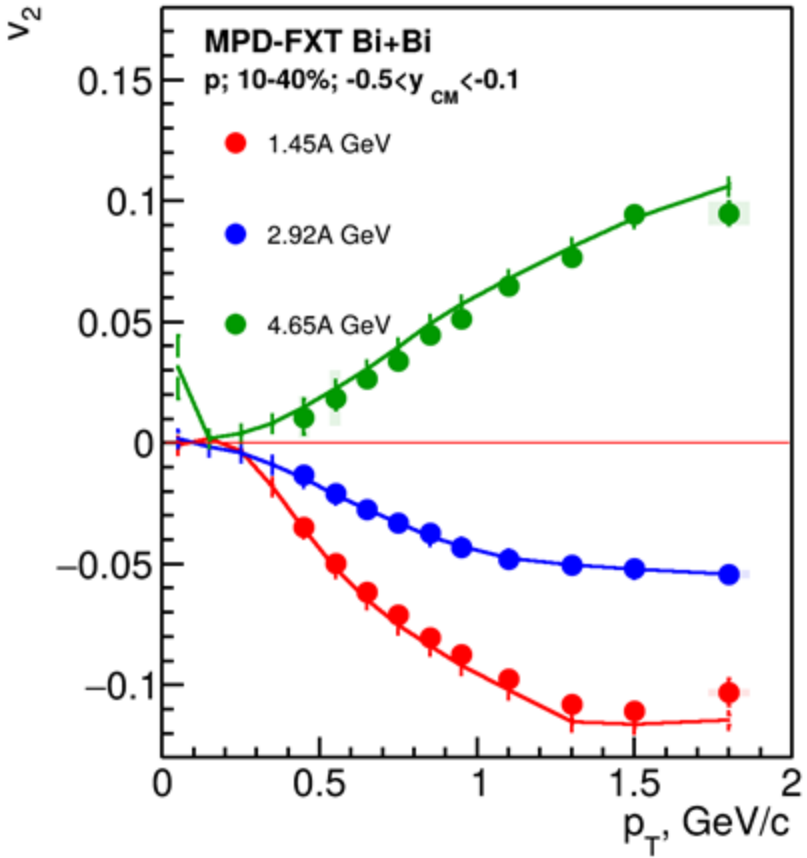


Хорошее согласие потоков из реконструированных данных (точки) и из модели (линии)

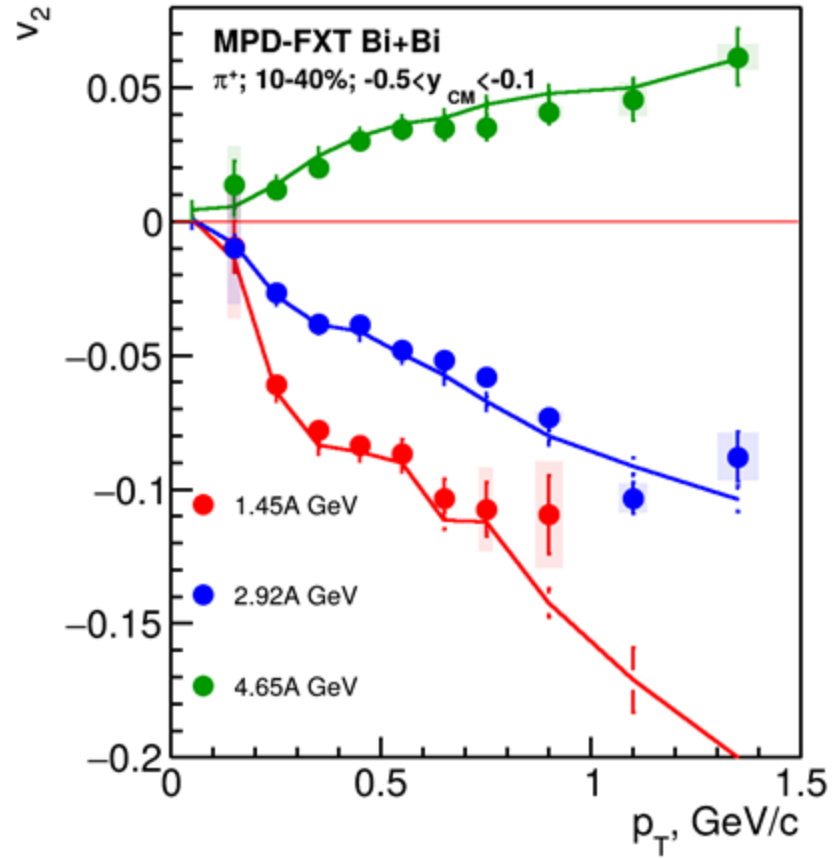
Результаты: $v_2(p_T)$

Систематические ошибки:
xxx, хуу

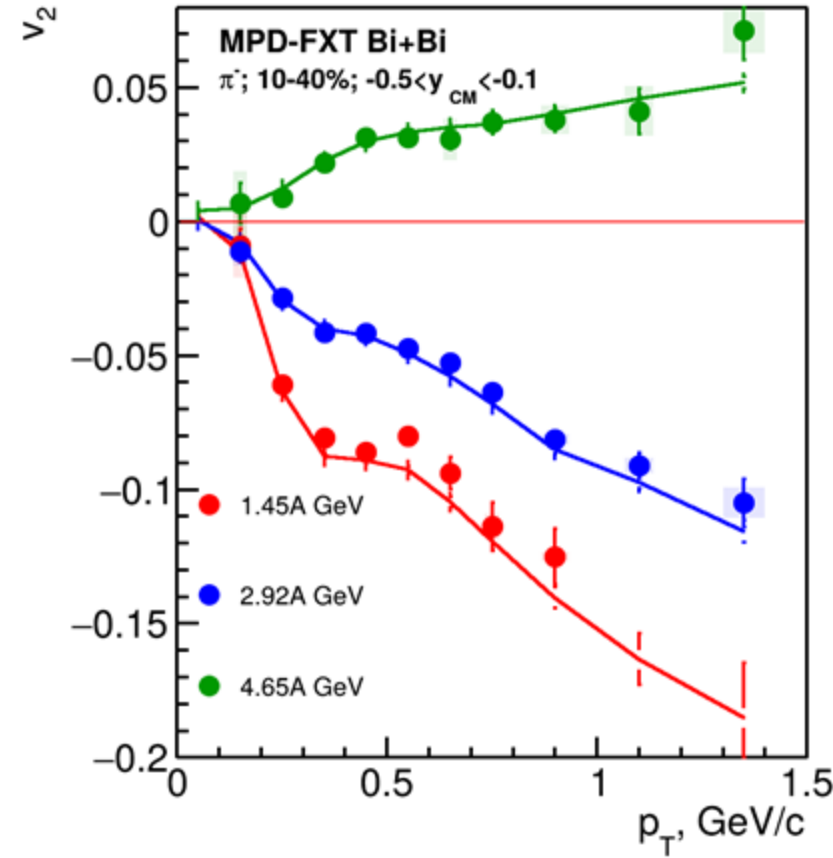
p



π^+



π^-



Хорошее согласие потоков из реконструированных данных (точки) и из модели (линии)

Заключение

Детекторная система эксперимента MPD позволяет проводить высокоточные дифференциальные измерения анизотропных потоков адронов:

- **Режим работы коллайдера MPD-CLD:**
 - Измерения потоков производятся с помощью корреляций из 2 симметричных подсобытий в TPC/FHCaI детекторов относительно $y=0$.
 - Был успешно проверен целый ряд методов измерения потоков – в том числе для короткоживущих частиц.
- **Режим работы с фиксированной мишенью MPD-FXT:**
 - Был успешно протестирован метод скалярных произведений с использованием оценок плоскости симметрии на основе 3-х и 4-х подсобытий.
 - Хороший результат для всех протестированных энергий ($2.5 < \sqrt{s_{NN}} < 3.5$ ГэВ).

Спасибо за внимание!

Backup

MPD

BM@N

EOS for high baryon density matter

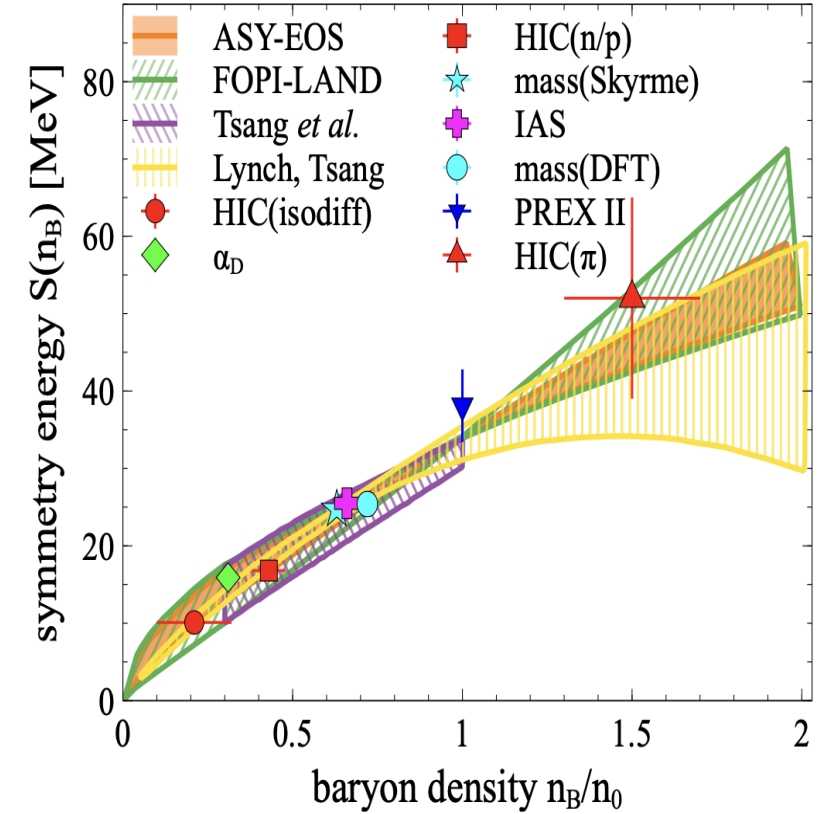
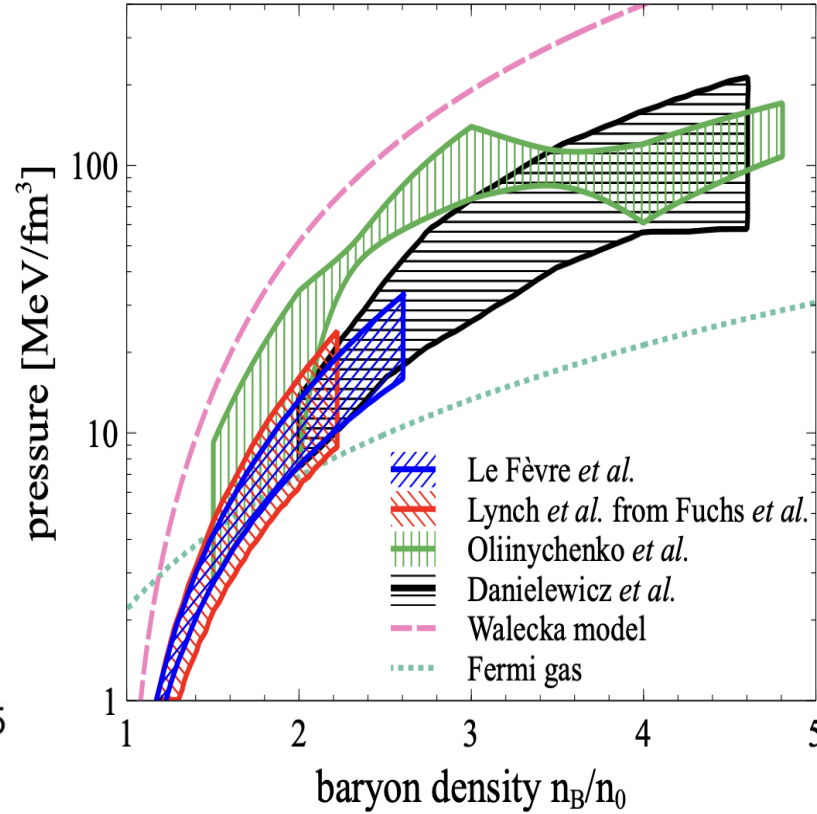
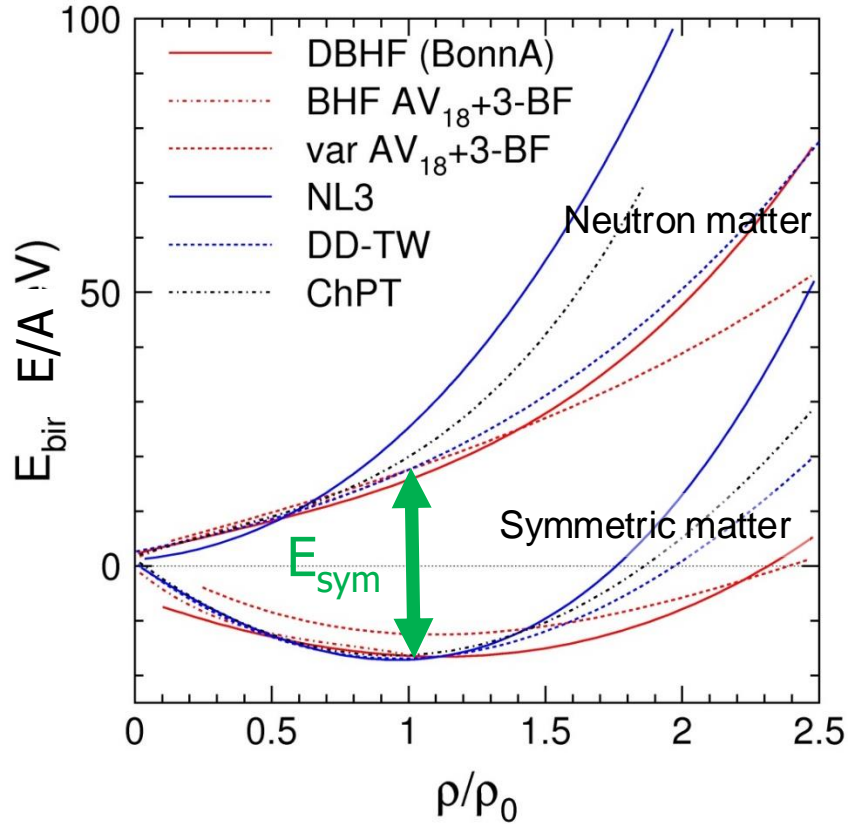
The binding energy per nucleon: $E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$

Isospin asymmetry:

$$\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$$

Symmetric matter

Symmetry energy



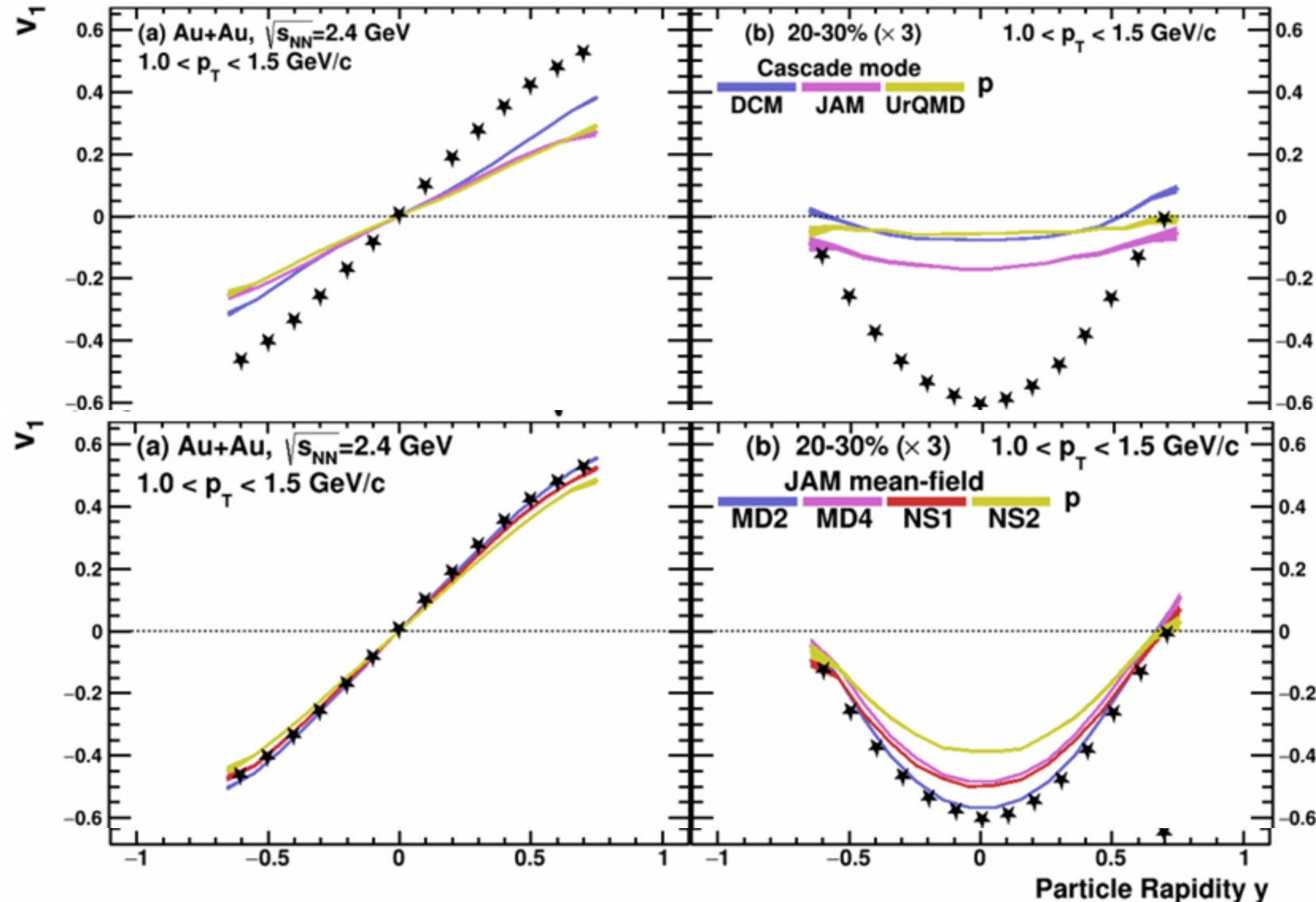
Ch. Fuchs and H.H. Wolter, EPJA 30 (2006) 5

A. Sorensen et. al., Prog.Part.Nucl.Phys. 134 (2024) 104080

New data is needed to further constrain transport models with hadronic d.o.f.

Выбор модели ядро-ядерного столкновения

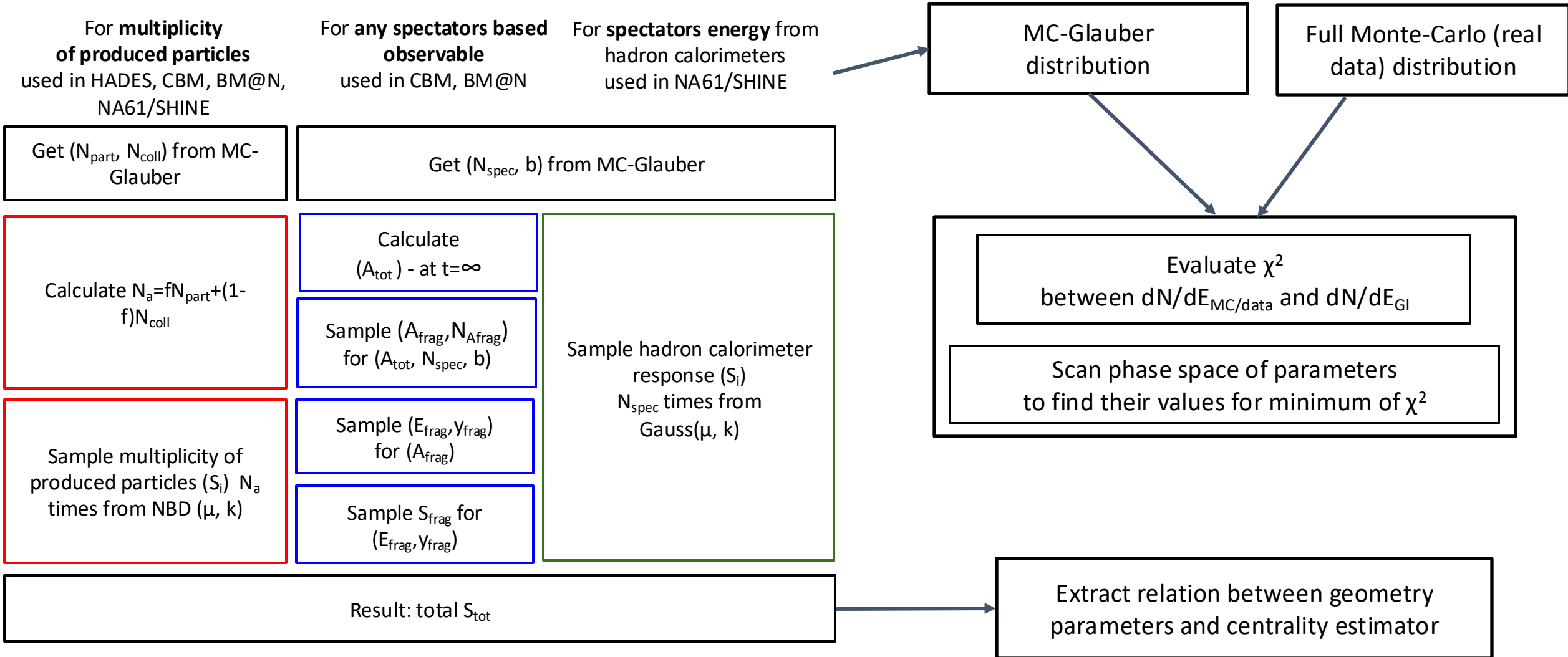
P.Parfenov Particles 5 (2022) 4, 561-579



Модели с каскадным режимом работы не могут воспроизвести v_n при низких энергиях ядро-ядерных столкновений

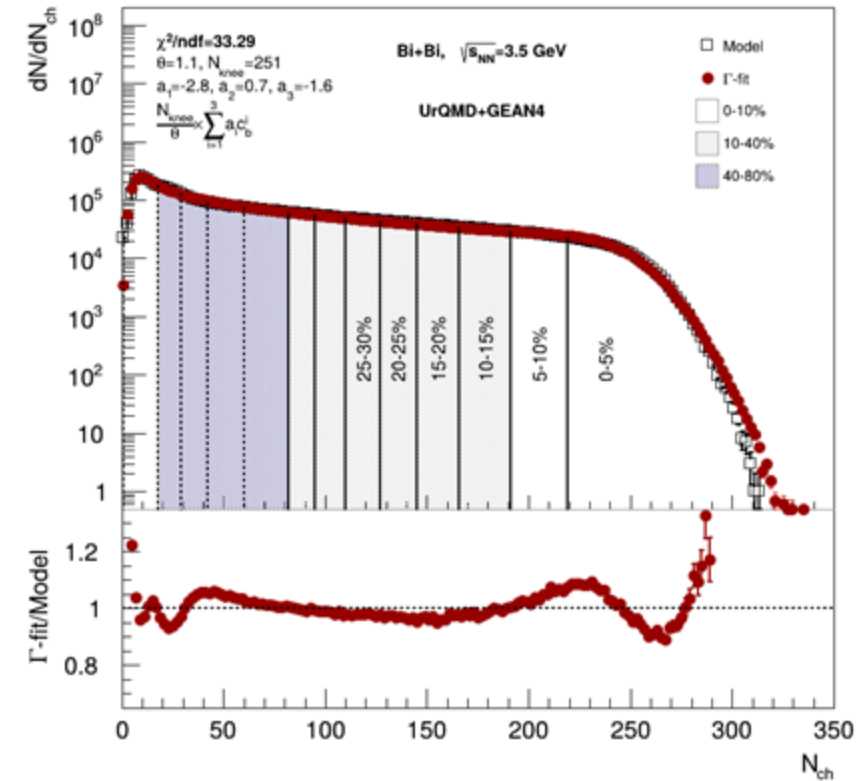
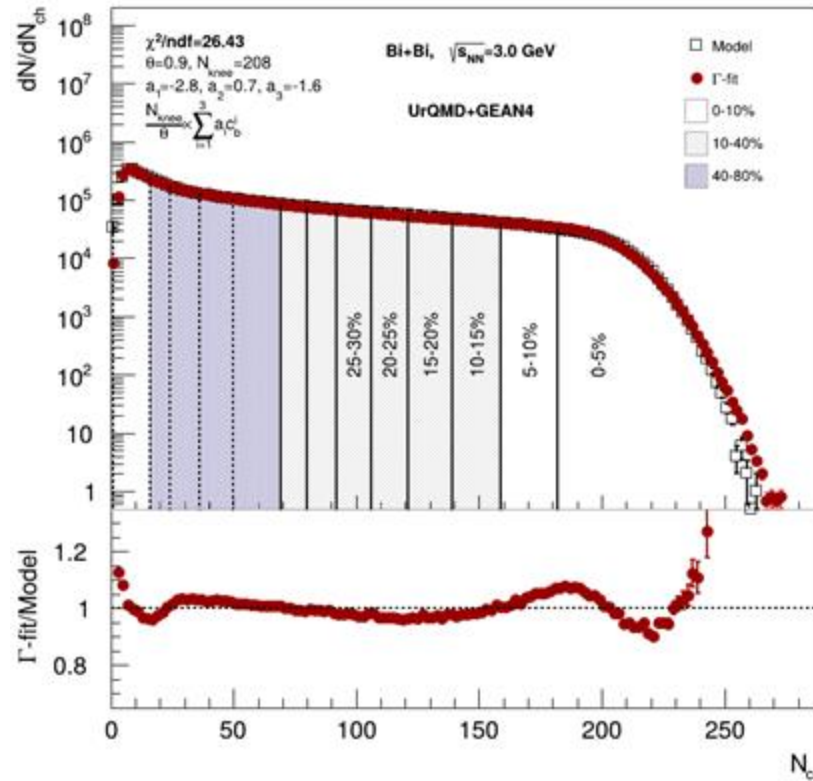
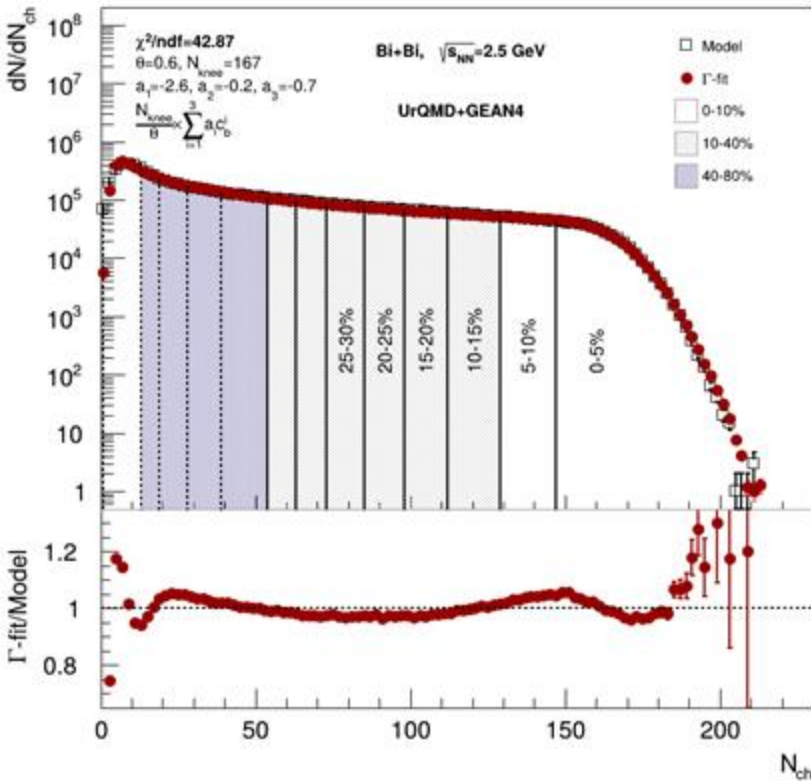
Модели с режимом работы среднего поля (mean-field) довольно хорошо воспроизводят v_n

Centrality determination based on Monte-Carlo Glauber sampling



Centrality can be estimated based on **multiplicity of produced charged particles** or **spectator energy**

Процедура определения центральности: Результаты



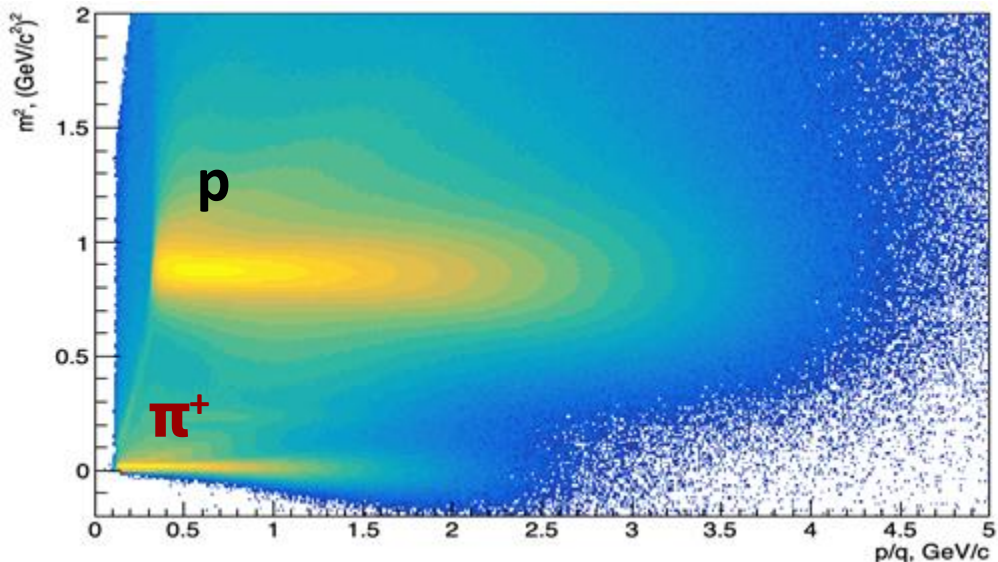
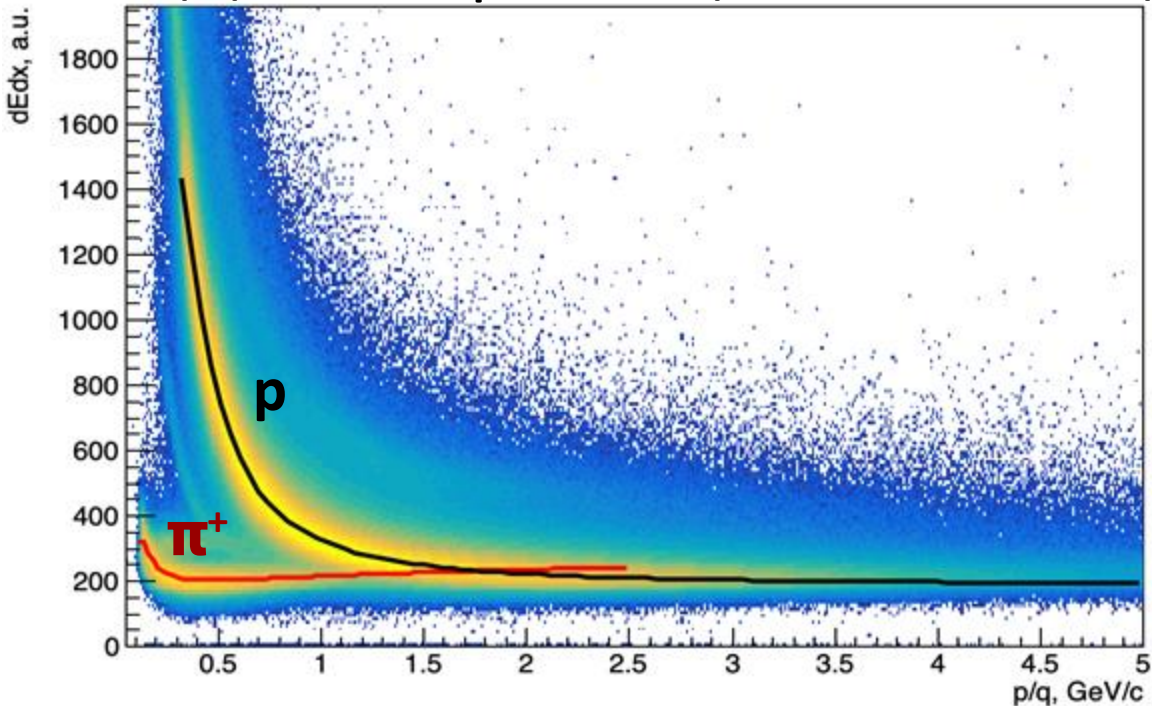
Отбор по трекам частиц:

- $N_{hits} > 16$
- $0 < \eta < 2$

Хорошее согласие данных с параметризацией

Используется процедура определения центральности с помощью множественности частиц, основанная на обратной теореме Байеса (Γ -fit или inverse Bayes)

Идентификация частиц



Для dE/dx параметризация формулы Бете-Блоха:

$$f(\beta\gamma) = \frac{p_1}{\beta^{p_4}} \left(p_2 - \beta^{p_4} - \ln \left(p_3 + \frac{1}{(\beta\gamma)^{p_5}} \right) \right)$$

$$\beta^2 = \frac{p^2}{m^2 + p^2}, \beta\gamma = \frac{p}{m} \quad p_i - \text{параметры}$$

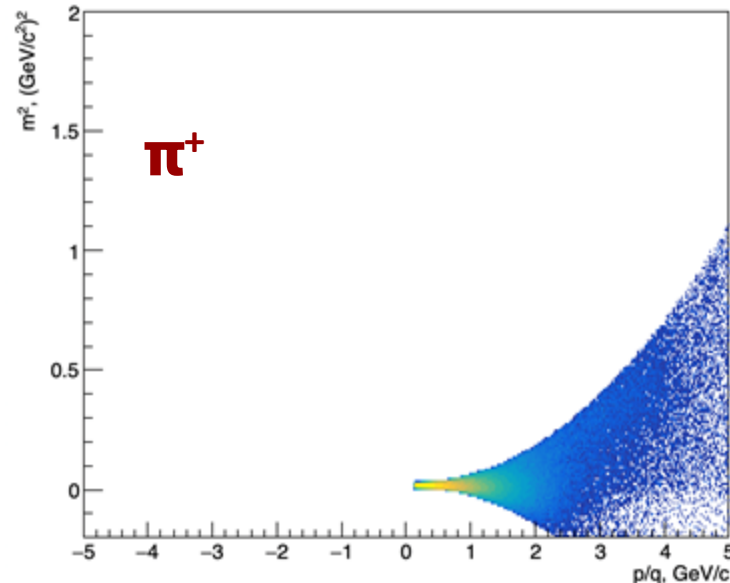
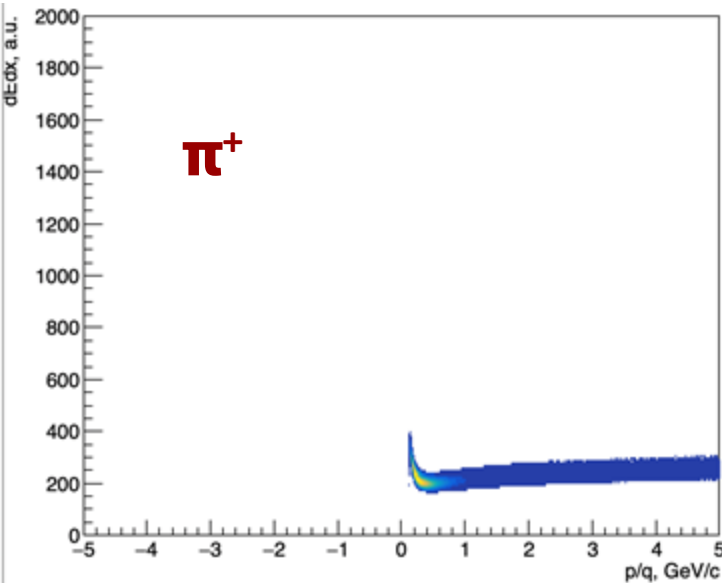
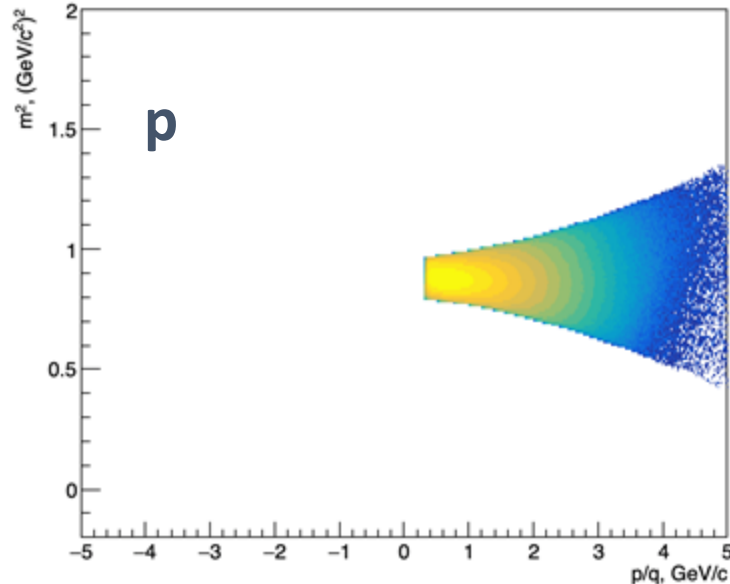
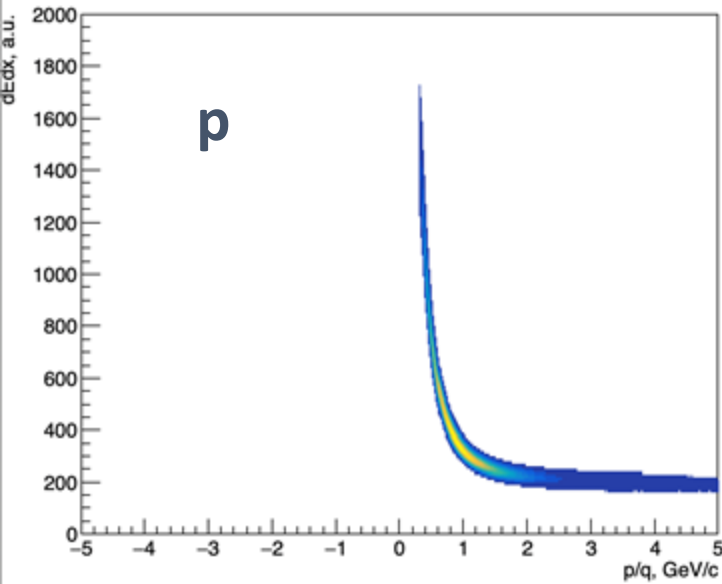
Величину $(dE/dx - f(\beta\gamma))/f(\beta\gamma)$ можно параметризовать гауссом при разных p/q и получить $\sigma_p(dE/dx)$

m^2 можно параметризовать гауссом при разных p/q и получить $\sigma_p(m^2)$

Координаты (x,y) для отбора частиц:

$$x_p = \frac{(dE/dx)^{meas} - (dE/dx)_p^{fit}}{(dE/dx)_p^{fit} \sigma_p^{dE/dx}}, \quad y_p = \frac{m^2 - m_p^2}{\sigma_p^{m^2}}$$

Идентификация частиц: Результаты



$$x_p = \frac{(dE/dx)^{meas} - (dE/dx)_p^{fit}}{(dE/dx)_p^{fit} \sigma_p^{dE/dx}}$$

$$y_p = \frac{m^2 - m_p^2}{\sigma_p^{m^2}}$$

Протоны:

$$\sqrt{x_p^2 + y_p^2} < 2, \sqrt{x_\pi^2 + y_\pi^2} > 3$$

Пионы (π⁺):

$$\sqrt{x_\pi^2 + y_\pi^2} < 2, \sqrt{x_p^2 + y_p^2} > 3$$

Пионы (π⁻):

Отрицательный заряд (q<0)

Распределения (y - p_T), эффективности и δp_T (протоны)

$$\text{eff} = \frac{\frac{dN}{dydp_T}(\text{reco})}{\frac{dN}{dydp_T}(\text{sim})}$$

$$\Delta p_T = \frac{|p_T^{\text{reco}} - p_T^{\text{mc}}|}{p_T^{\text{mc}}}$$

Bi+Bi vs_{NN}=2.5 ГэВ

Отбор на треки частиц:

- $N_{\text{hits}} > 27$
- $\text{DCA} < 1 \text{ cm}$
- PID (TPC+TOF)

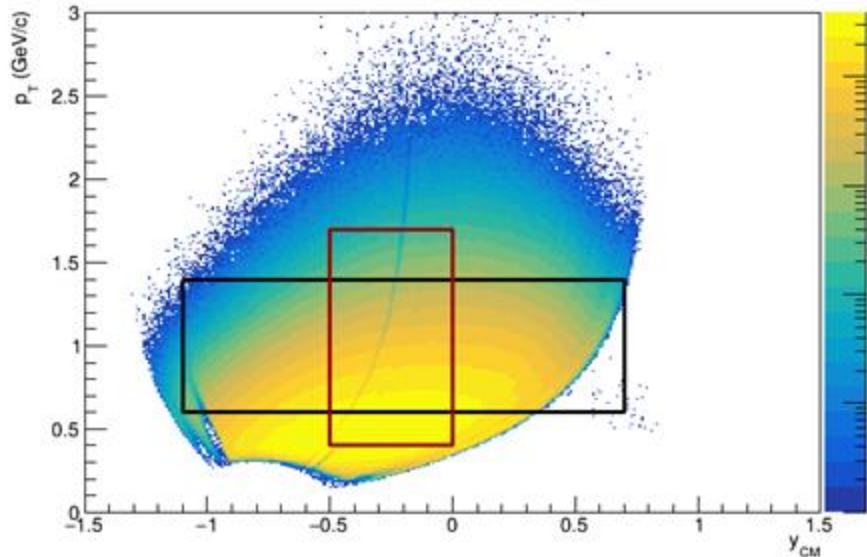
Отбор на mc частицы:

- PID (pdg код)
- Первичные (motherId)

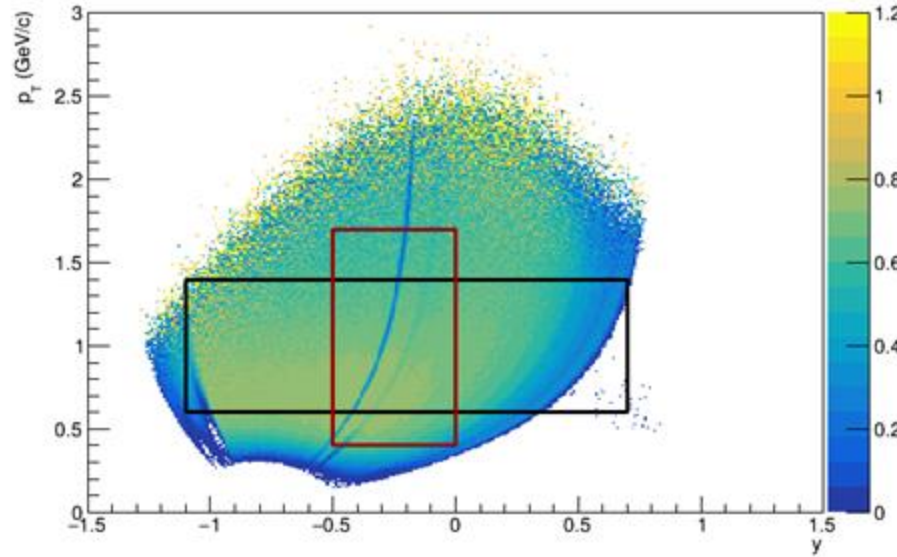
Черный
прямоугольник: окно
(y - p_T) для $v_n(y)$

Красный
прямоугольник: окно

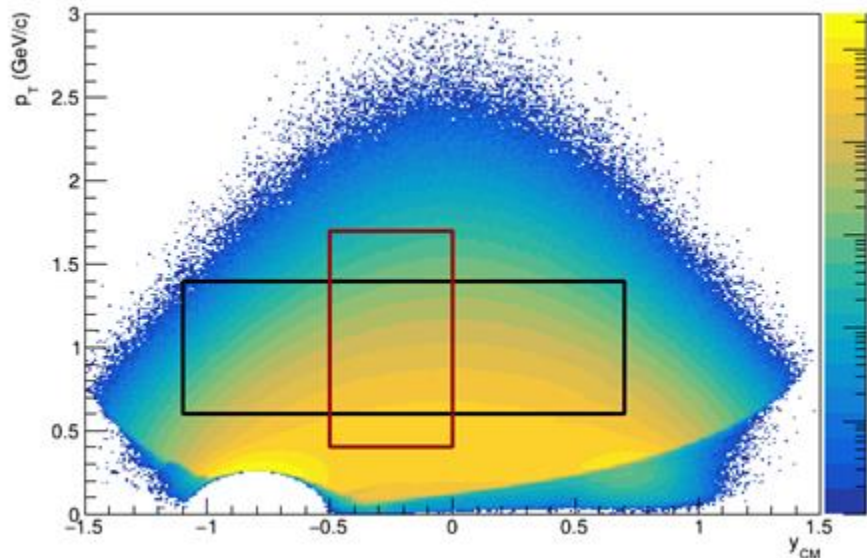
Reconstructed protons $Y_{\text{cm}}-p_T$



Efficiency (Y - p_T) of primary protons



Simulated protons $Y_{\text{cm}}-p_T$



Pt-resolution for reconstructed protons in $Y_{\text{cm}}-p_T$ plane

