Измерение потоков в эксперименте MPD с фиксированной мишенью на коллайдере NICA

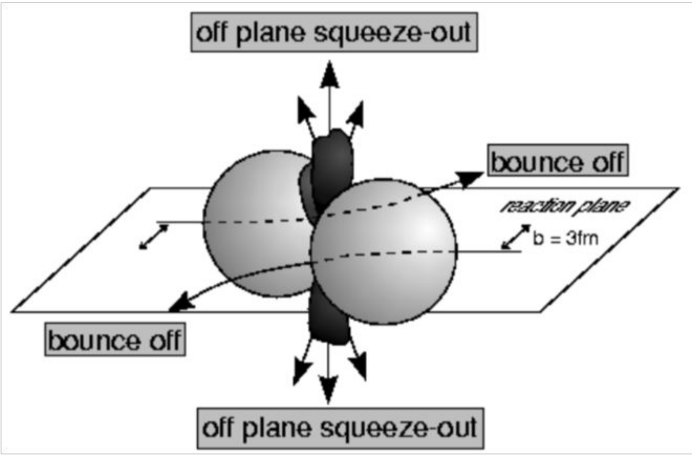
Парфенов П.Е., Мамаев М.В., Тараненко А.В.
(ОИЯИ, НИЯУ МИФИ)

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН
1-5 апреля 2024

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект "Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA" № FSWU-2024-0024

MEPhI
National Research
Nuclear University

Анизотропные потоки адронов



Азимутальное распределение рожденных частиц от Ψ_{RP}:

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

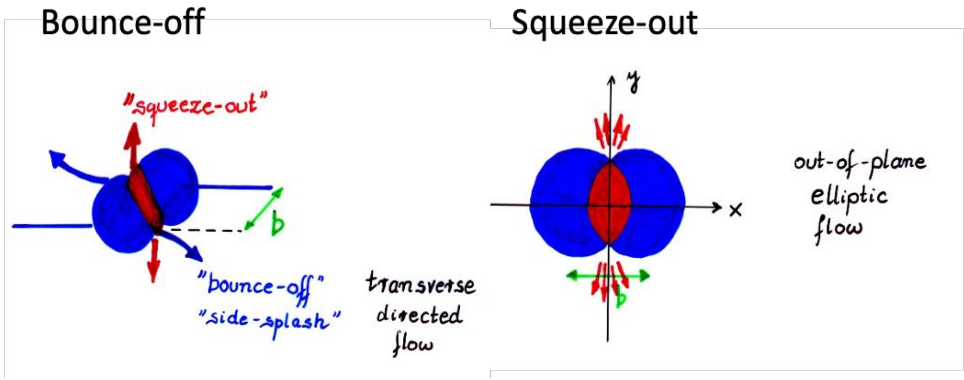
Коллективные потоки v_n - коэффициенты ряда Фурье:

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

v_1 - направленный поток, v_2 - эллиптический поток

Коллективные потоки чувствительны к:

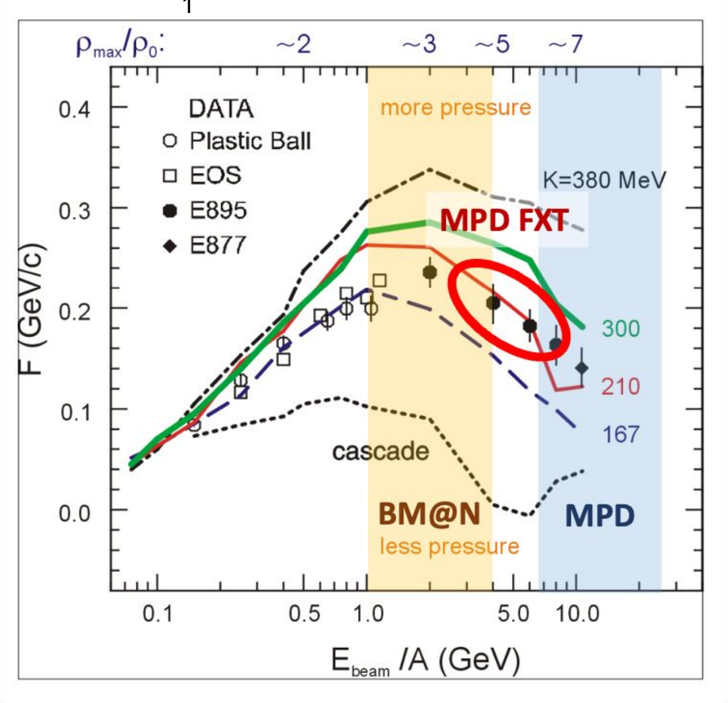
- Сжатию материи, созданной в ядро-ядерном столкновении $\left(t_{exp} = R/c_s,\ c_s = c\sqrt{dp/d\varepsilon}\right)$
- Времени взаимодействия области нуклонов-участников и спектаторов $\left(t_{pass} = 2R/\gamma_{CM}\beta_{CM}\right)$



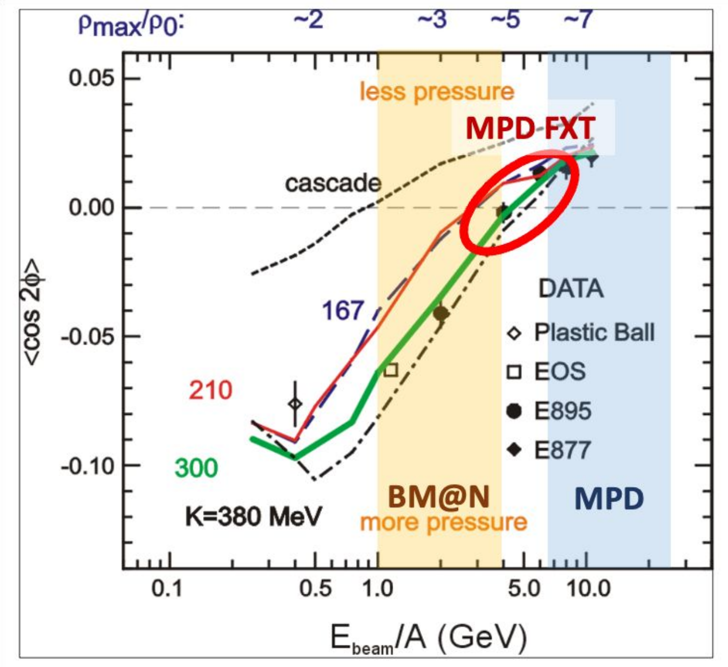
v_n при энергиях Нуклотрон-NICA

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

v_1 согласован с мягким EoS



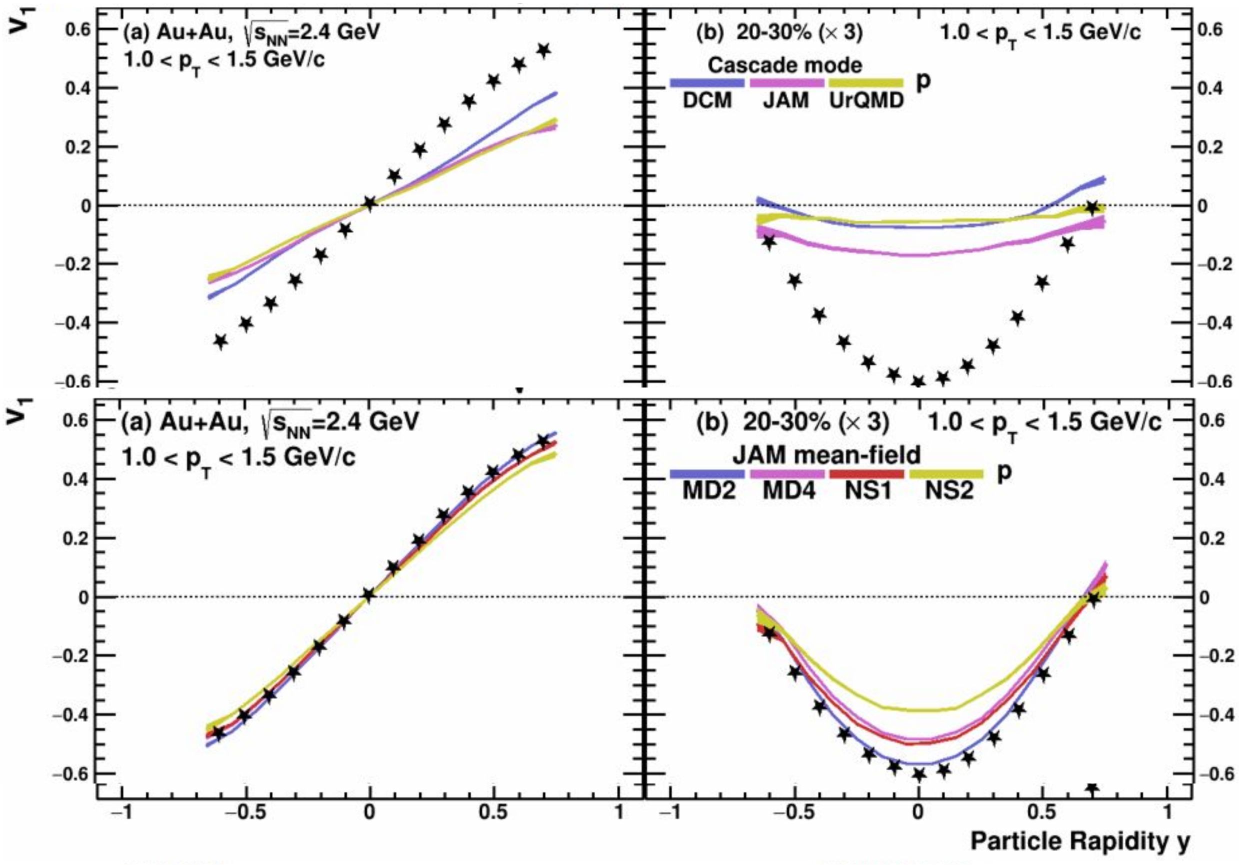
v_2 согласован с жестким EoS



- **Данные v_n из E895 эксперимента могут быть неоднозначно трактованы:**
  - v_1 согласован с мягким EoS, а v_2 согласован с жестким EoS
- **Дополнительные измерения необходимы для уточнения предыдущих измерений**

Выбор модели ядро-ядерного столкновения

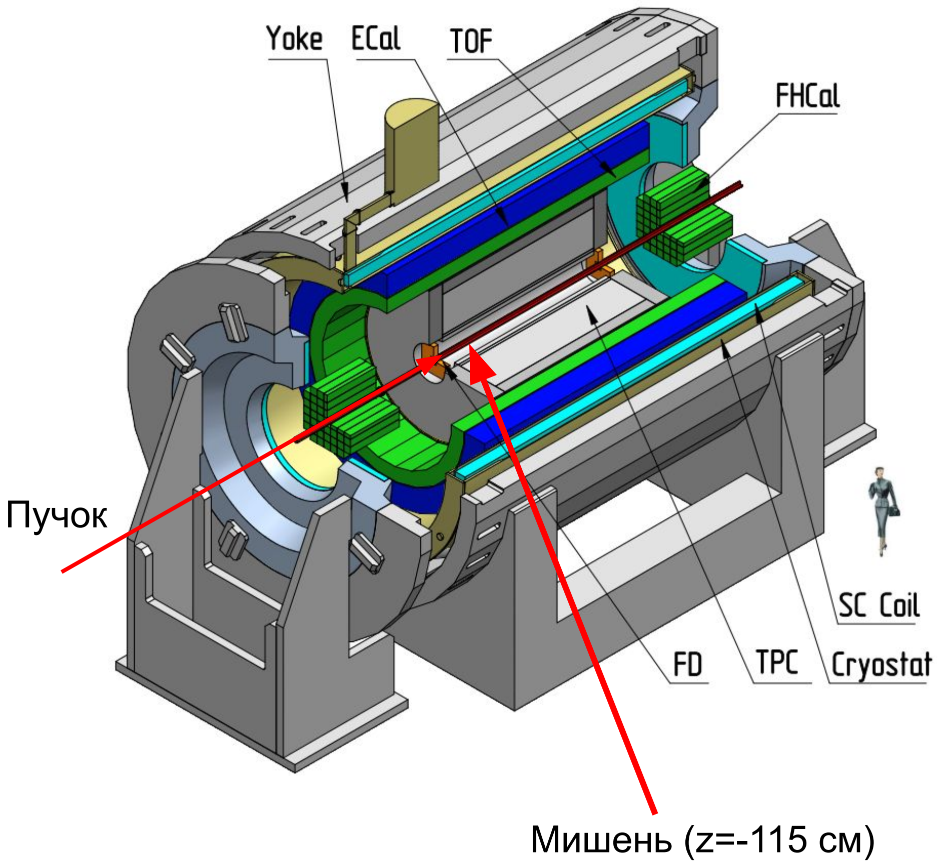
P.Parfenov Particles 5 (2022) 4, 561-579



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

MPD в режиме работы с фиксированной мишенью (MPD-FXT)



- Модель: UrQMD mean-field
  - 10M, Bi+Bi, E_{kin}=1.45A ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}$ =2.5 ГэВ)
  - 10M, Bi+Bi, E_{kin}=2.92A ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}$ =3.0 ГэВ)
  - 10M, Bi+Bi, E_{kin}=4.65A ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}$=3.5 ГэВ)
- Точечная мишень в z = -115 см
- GEANT4 для симуляции детекторного отклика
- Центральность, определенная по множественности заряженных частиц
- Идентификация частиц основана на dE/dx (TPC) и m^2 (TOF+TPC)
- Отбор первичных частиц: DCA < 1 cm
- Отбор по качеству треков частиц:
  - N_{hits}>27 (протоны), N_{hits}>22 (пионы)

Процедура определения центральности: Г-fit метод

Отношение между множественностью N_{ch} и

прицельным параметром b задается

флуктуационным ядром:

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

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

Зависимость средней множественности от

центральности задается с помощью

параметризации:

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

Параметризация множественности и прицельного

параметра:

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

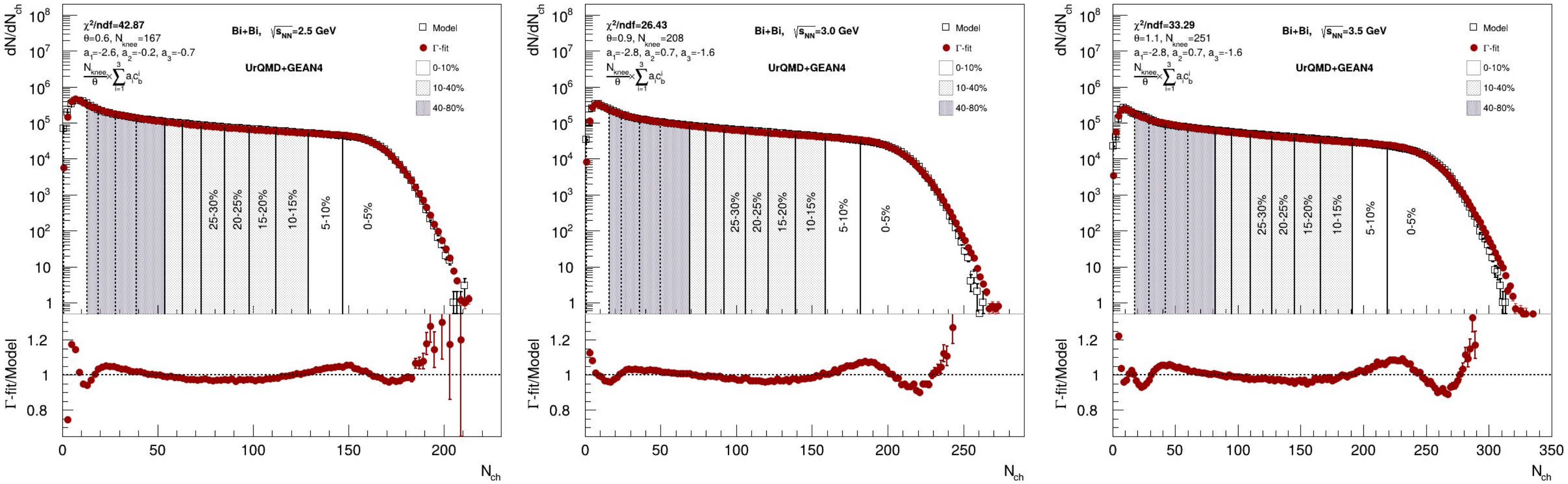
Метод состоит из 2 этапов:

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

↓

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

Процедура определения центральности: Результаты



Отбор по трекам частиц:

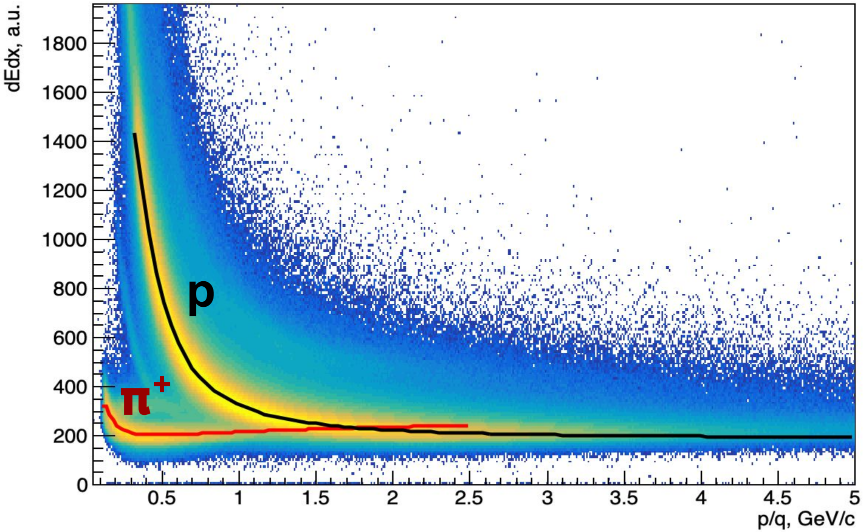
- $N_{hits} > 16$
- $0 < \eta < 2$

Хорошее согласие данных с параметризацией

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

W. Blum, W. Riegler, L. Rolandi, Particle Detection with Drift Chambers (2nd ed.), Springer, Verlag (2008)

Идентификация частиц

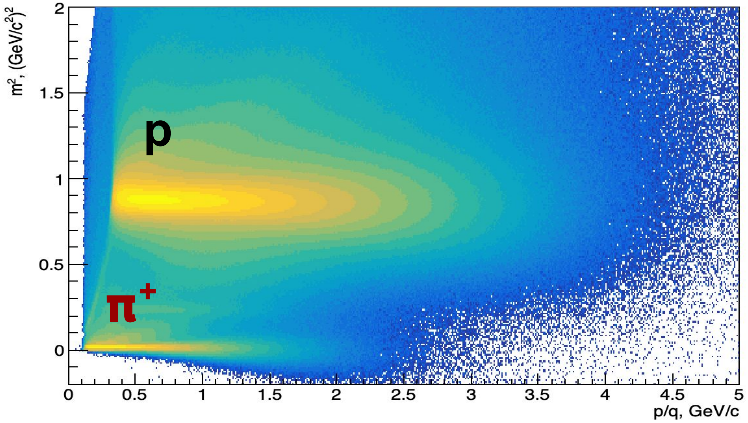


Для dE/dx параметризация формулы Бете-Блоха:

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

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

Величину *(dE/dx - f(βɣ))/f(βɣ)* можно параметризовать гаусом при разных p/q и получить σ_p(dE/dx)

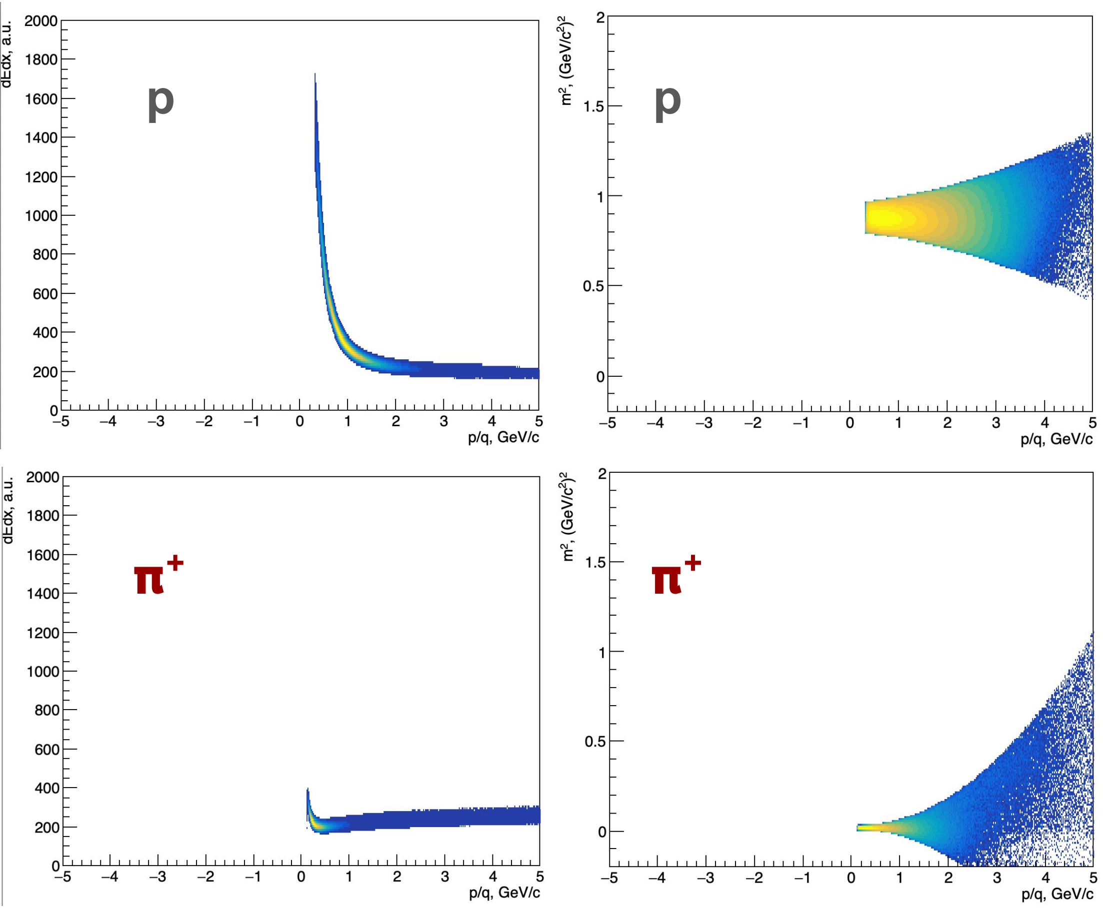


m^2 можно параметризовать гаусом при разных p/q и получить $\sigma_p(m^2)$

Координаты (x,y) для отбора частиц:

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

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:

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

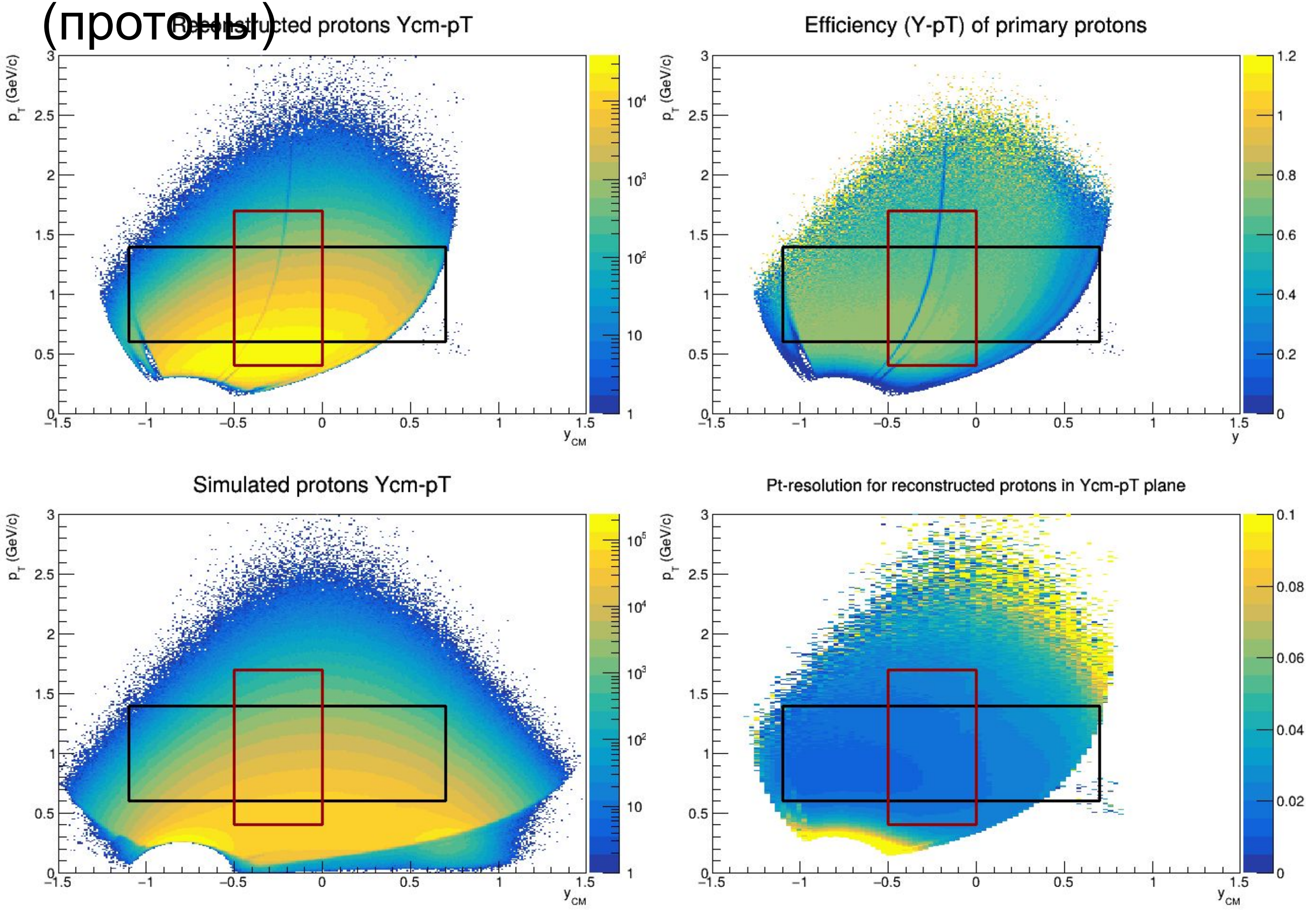
Пионы (π^+):

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

Пионы (π^-):

Отрицательный заряд (q<0)

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



$$\mathrm{eff} = \frac{\frac{dN}{dy dp_T}(\mathrm{reco})}{\frac{dN}{dy dp_T}(\mathrm{sim})}$$

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

Bi+Bi $\sqrt{s_{NN}}$=2.5 ГэВ

Отбор на треки частиц:

- N_{hits}>27
- DCA< 1 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 (y-p_T) для v_n(p_T)

Измерение потоков: u- и Q-вектора

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

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

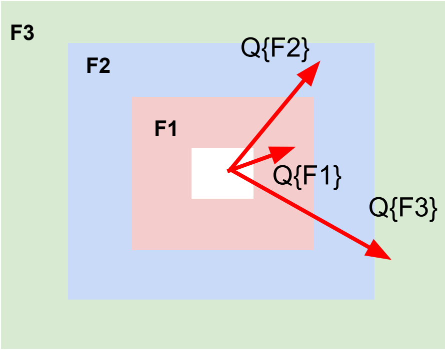
где φ - азимутальный угол частицы

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

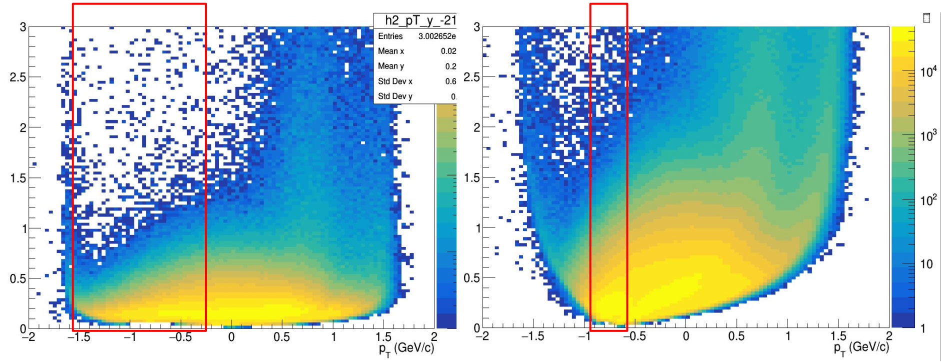
$$Q_n = \frac{\sum_{k=1}^{N} w_n^k u_n^k}{\sum_{k=1}^{N} w_n^k} = |Q_n| e^{in\Psi_n^{EP}}$$

Ψ_n^{EP} - плоскость события (симметрии)

Модули FHCal разделены на 3 группы: F1, F2, F3



Tπ- Tp

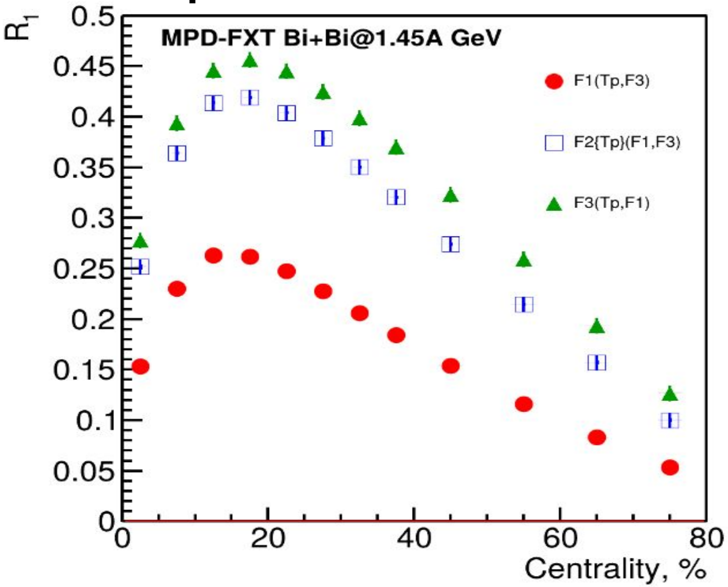


Дополнительные подсобытия из трекинговой системы:
Tp: p; -1.0<y<-0.6;
Tπ-: π-; -1.5<y<-0.2;

Измерение потоков: метод скалярных произведений

Метод проверен в BM@N, HADES:

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



Метод скалярных произведений (SP):

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

Где R_1 - разрешение плоскости симметрии:

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

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

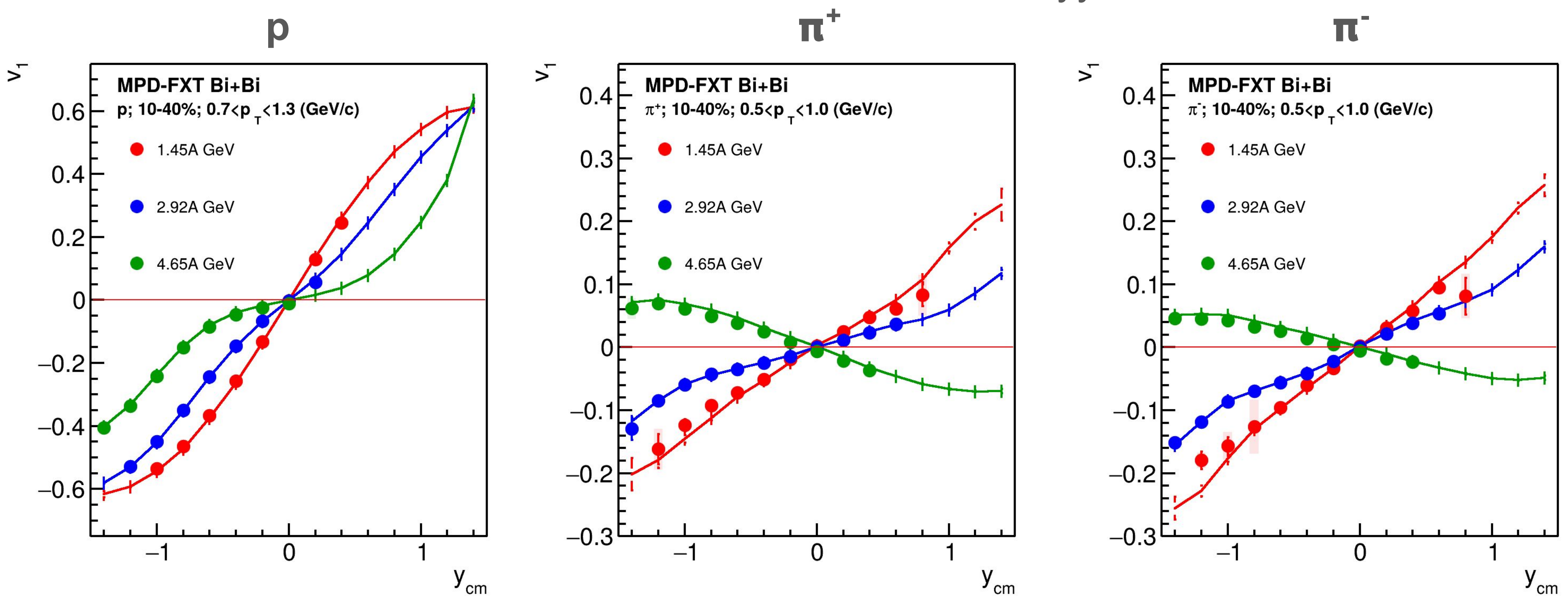
$$R_1^{F2(F1,F3)} = \frac{\sqrt{\langle Q_1^{F2} Q_1^{F1} \rangle \langle Q_1^{F2} Q_1^{F3} \rangle}}{\sqrt{\langle Q_1^{F1} Q_1^{F3} \rangle}}$$

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: $v_1(y)$

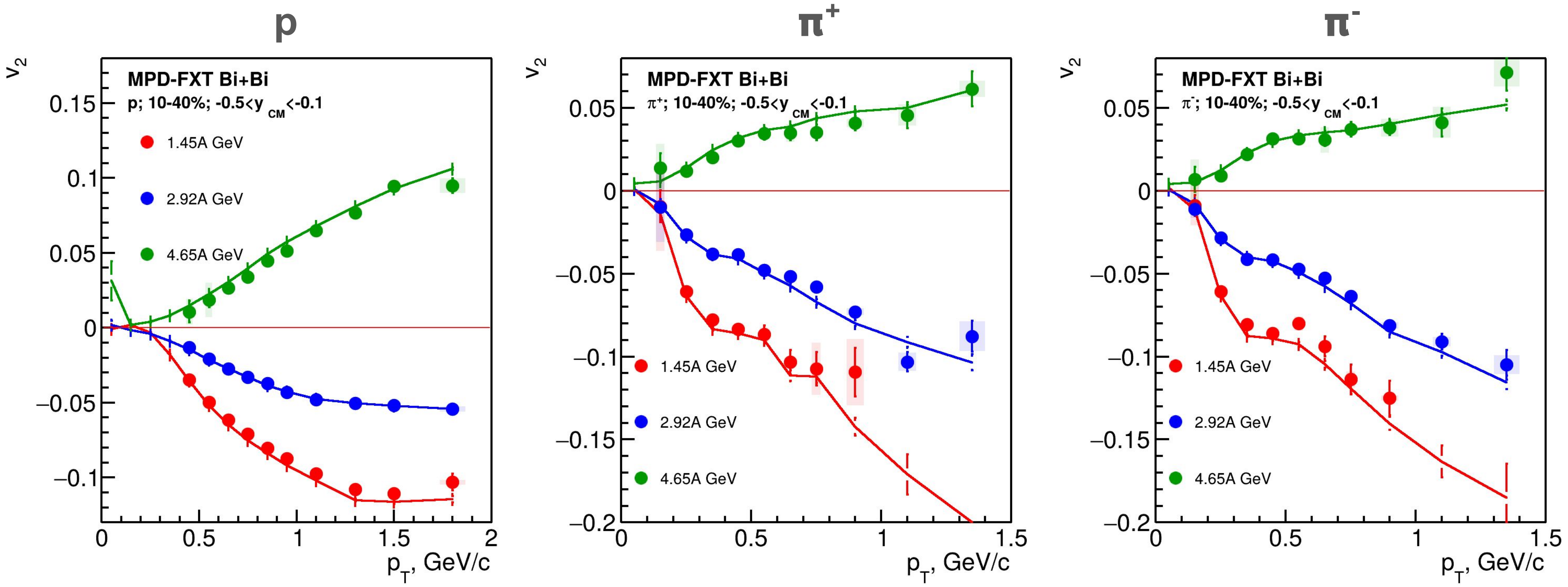
Систематические ошибки:
xx, yy, F1, F2, F3



Хорошее согласие с данными из модели

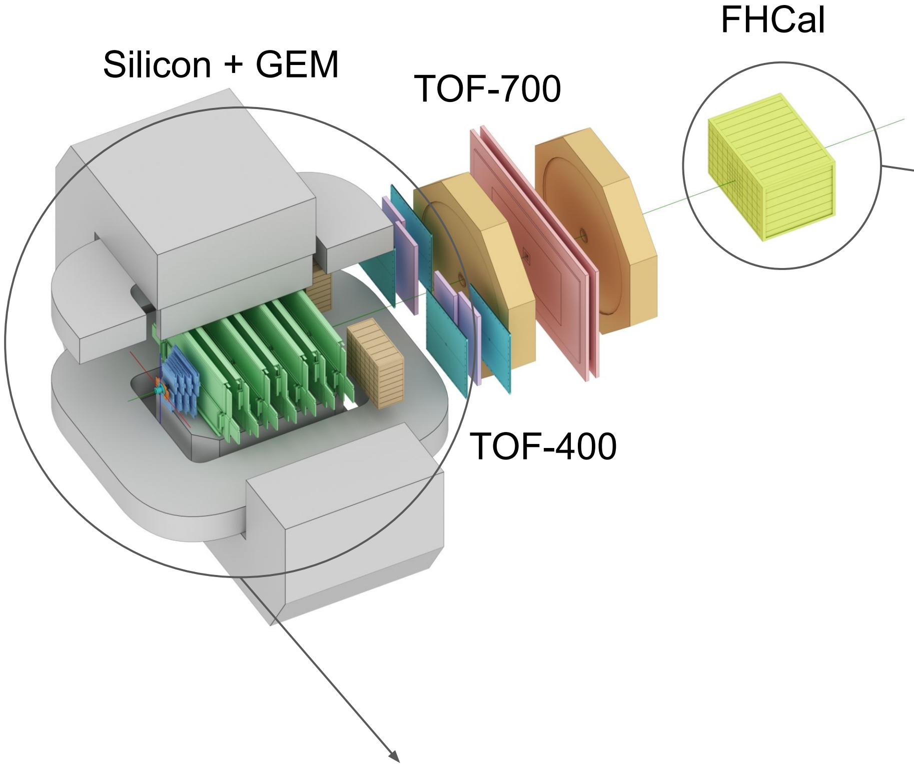
Результаты: $v_2(p_T)$

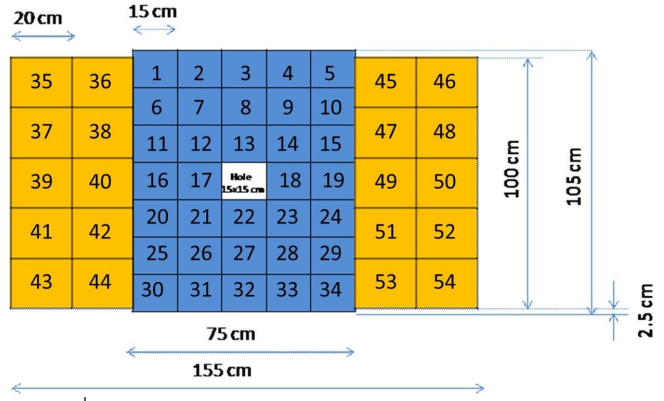
Систематические ошибки:
xxx, xyy

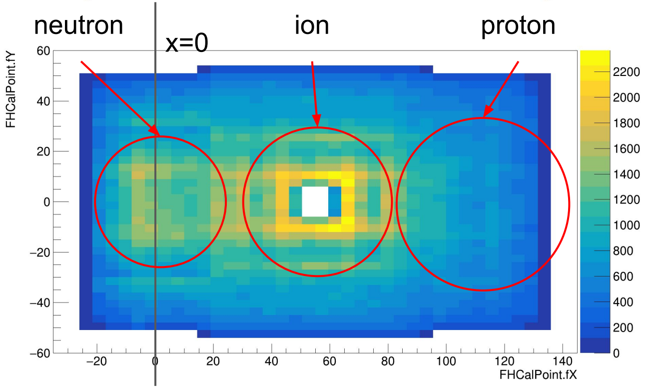


Хорошее согласие с данными из модели

Эксперимент BM@N (симуляция для RUN8)



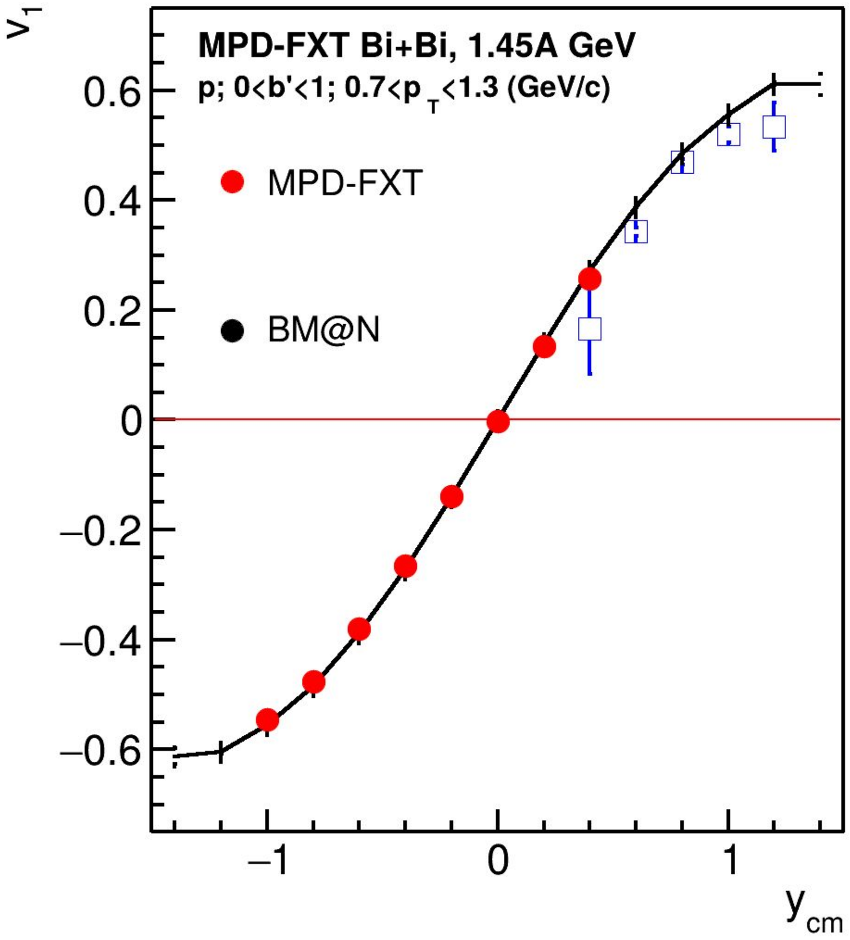




Гибридная система трекинга внутри магнитного поля, отклоняющего частицы вдоль оси X.

Разделение частиц (фрагментов) по заряду на поверхности FHCal под влиянием магнитного поля.

Сравнение результатов MPD-FXT и BM@N



TOF система BM@N (TOF-400 и TOF-700) обладает ограниченным покрытием области средних быстрот при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.5 ГэВ

- Нужно провести сравнение при более высоких энергиях (например $\sqrt{s_{NN}}$ = 3 ГэВ)
- Из-за влияния магнитного поля в BM@N требуется больше статистики:
  - Только компонента “yy” корреляций <uQ> и <QQ> может быть использована для измерений потоков

Оба эксперимента MPD-FXT и BM@N могут быть использованы для измерений v_n:

- Чтобы расширить покрытие по быстроте
- Чтобы провести сравнительную проверку результатов

Заключение

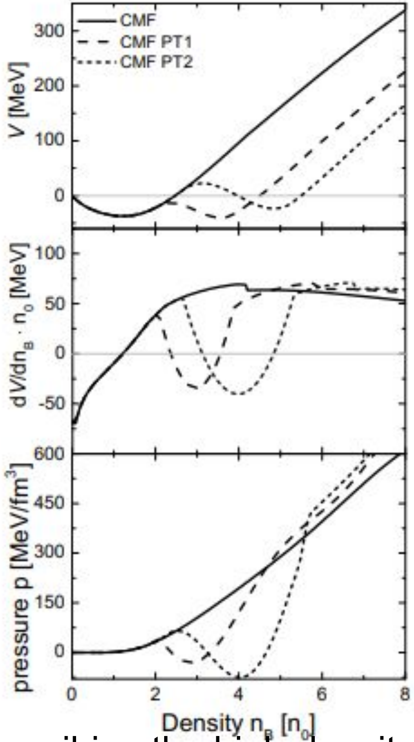
- Было проведено исследование детекторных возможностей по измерению анизотропных потоков идентифицированных заряженных адронов в эксперименте MPD в режиме работы с фиксированной мишенью (MPD-FXT) с использованием модели ядро-ядерных столкновений UrQMD и симуляцией отклика детектора GEANT4 для столкновений Bi+Bi при энергиях $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.5, 3 и 3.5 ГэВ
- Измерены направленный и эллиптический потоки протонов и пионов:
  - Для каждого типа частиц, v_1 и v_2 совпадают с результатами, полученными из модели в областях отрицательных и средних быстрот
- Сравнение с результатами симуляции BM@N для Bi+Bi при $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.5 GeV:
  - TOF система BM@N обладает слабым покрытием области средних быстрот при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.5 ГэВ
  - Оба эксперимента MPD-FXT и BM@N могут быть использованы при измерениях коллективных потоков в энергетическом диапазоне ускорительного комплекса Нуклотрон-NICA

Спасибо за внимание!

Backup

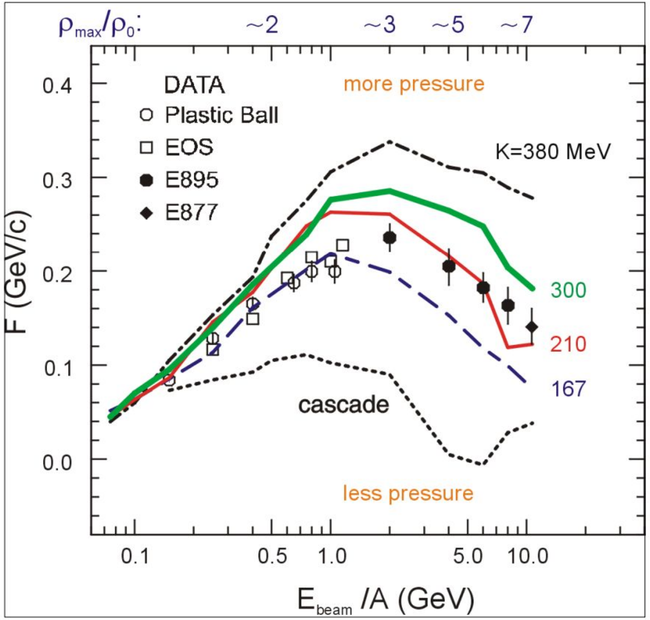
v_n as a function of collision energy

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

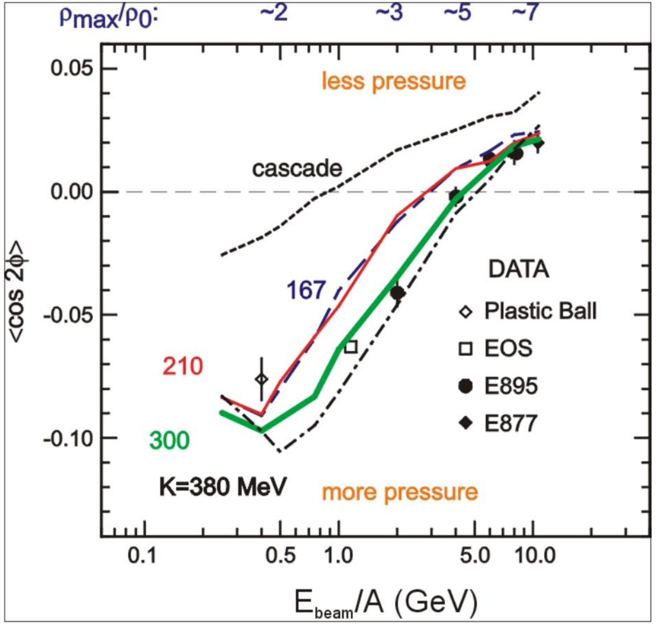


EPJ Web of Conferences 276, 01021 (2023)

v_1 suggests softer EOS



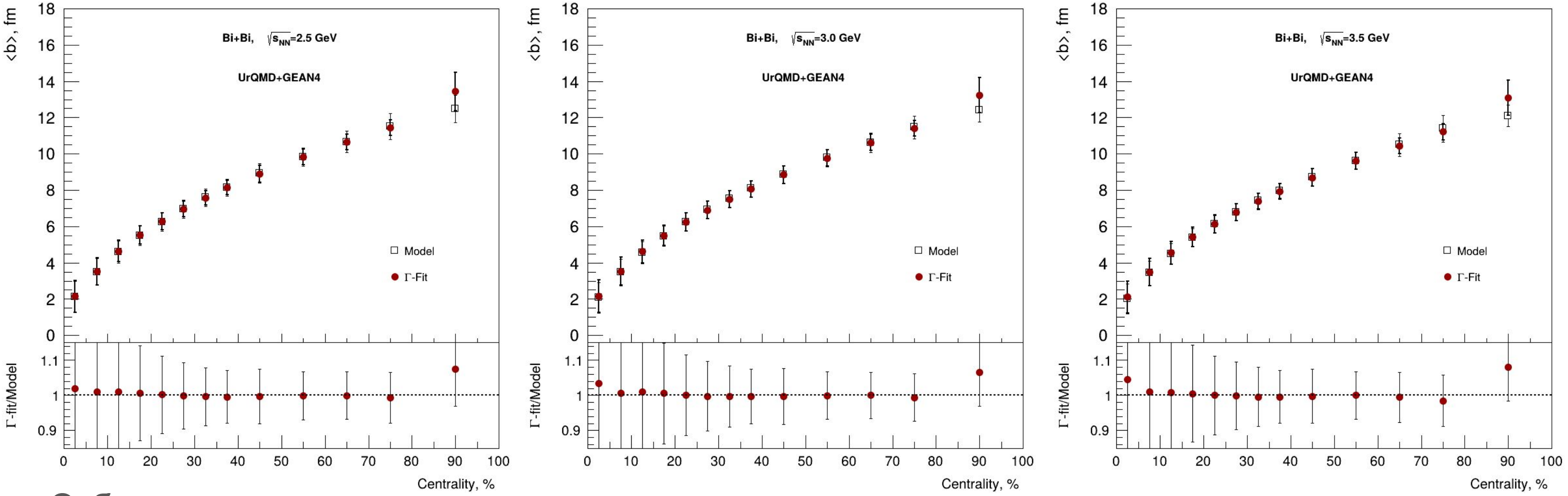
v_2 suggests harder EOS



Describing the high-density matter using the mean field
Flow measurements constrain the mean field

Discrepancy is probably due to non-flow correlations

Процедура определения центральности: Результаты



Отбор по трекам частиц:

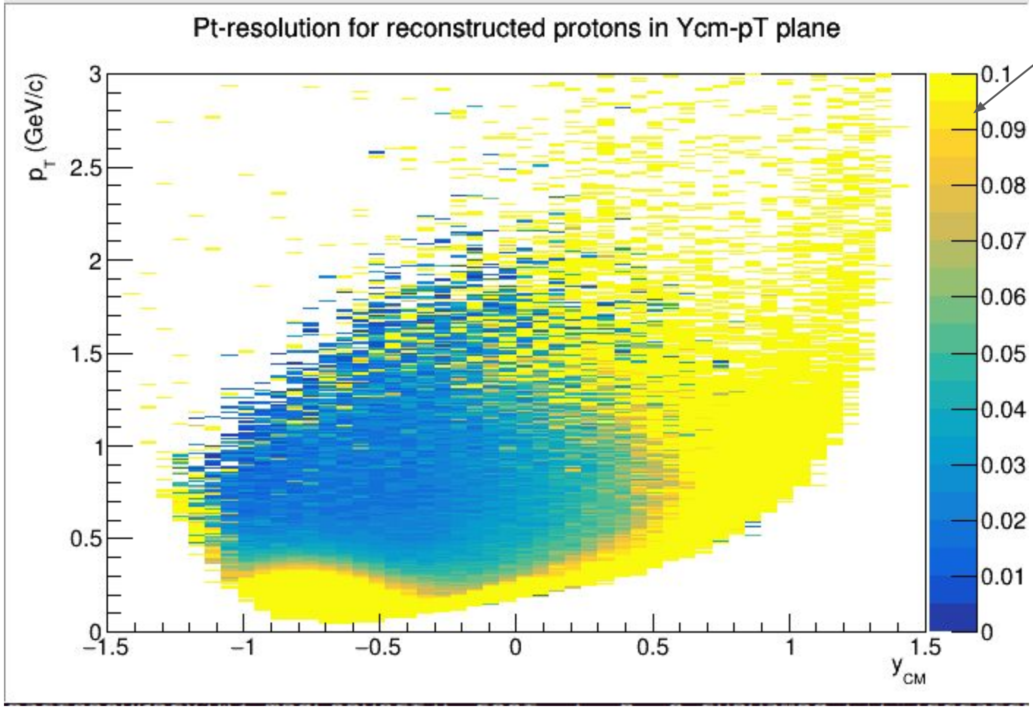
- N_{hits}>16
- $0 < \eta < 2$

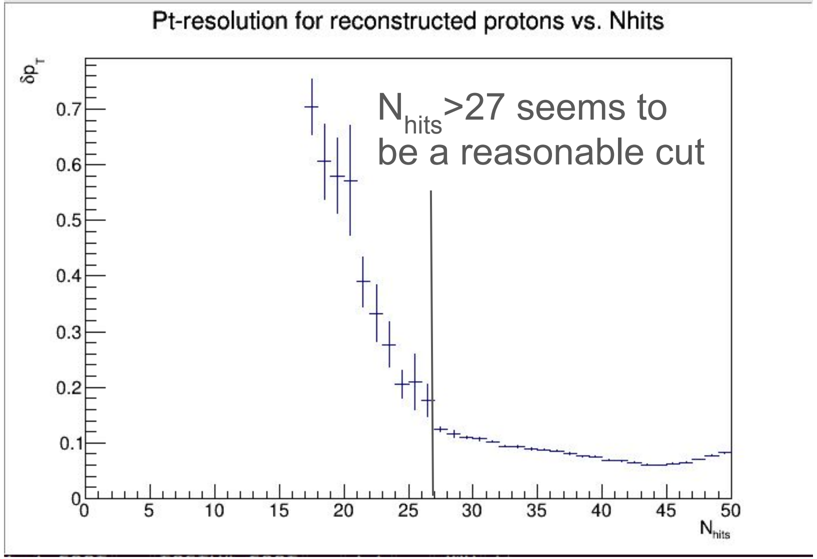
Хорошее согласие данных с параметризацией

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

Basic track quality check: p_T

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

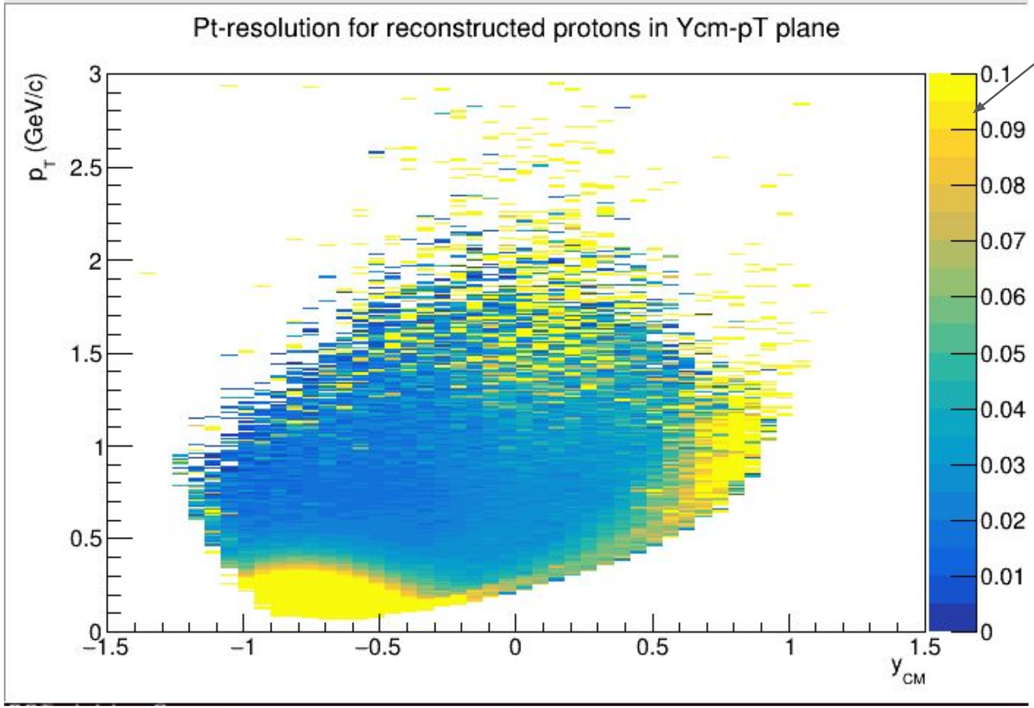


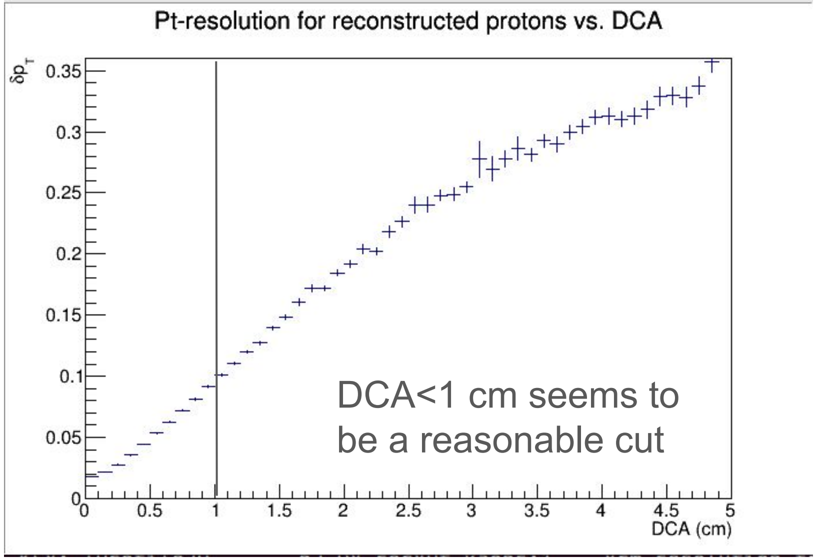


It seems the pt-resolution drops in the forward rapidity region (y_{CM}>0.5)

Basic track quality check: p_T

$$\Delta p_T = \frac{\left|p_T^{\mathrm{reco}} - p_T^{\mathrm{mc}}\right|}{p_T^{\mathrm{mc}}}$$

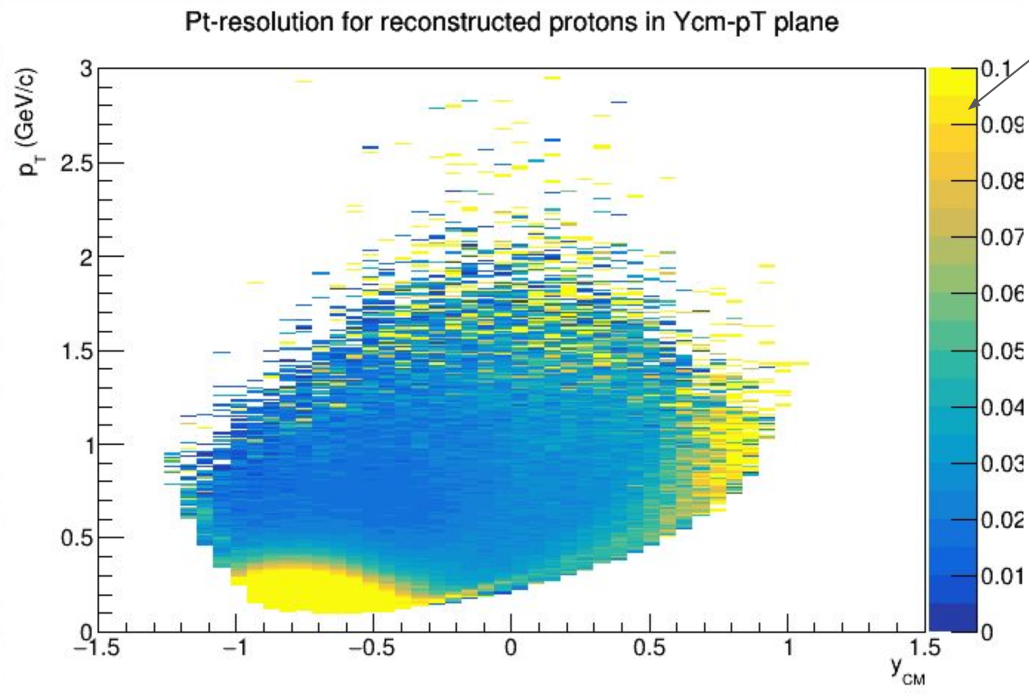


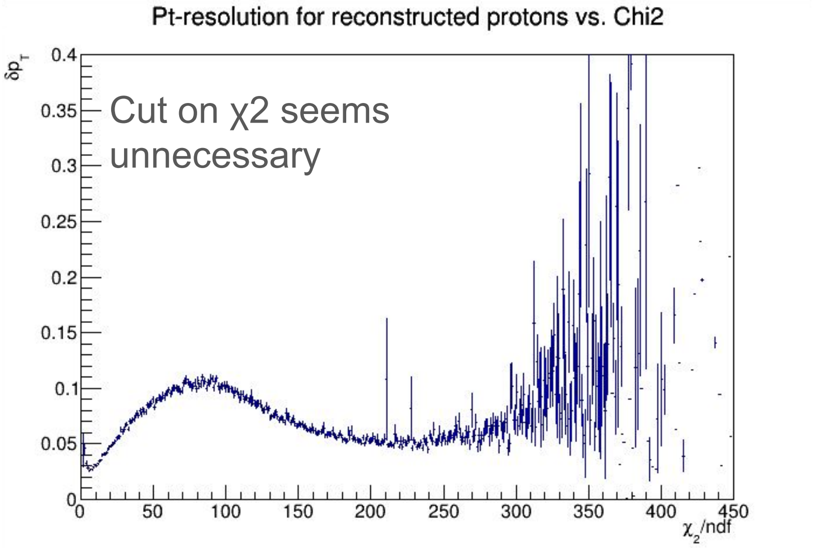


Cut N_{hits}>27 seems to improve the situation

Basic track quality check: p_T

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



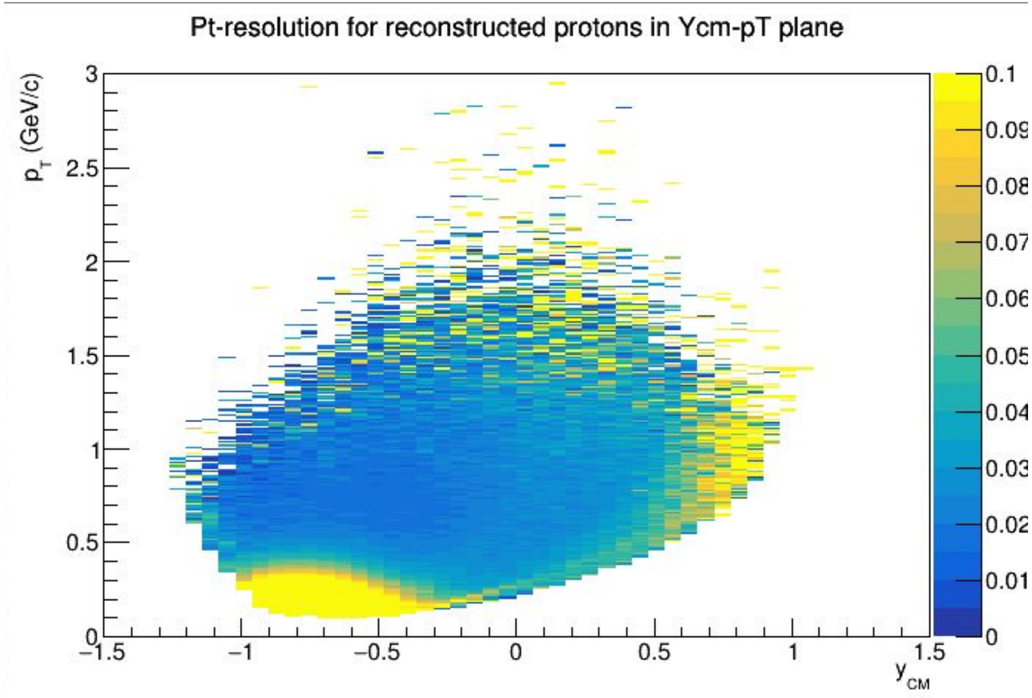


Cut on χ2 seems unnecessary

Cut DCA<1 cm slightly improve the situation

Track cuts based on p_T-resolution check

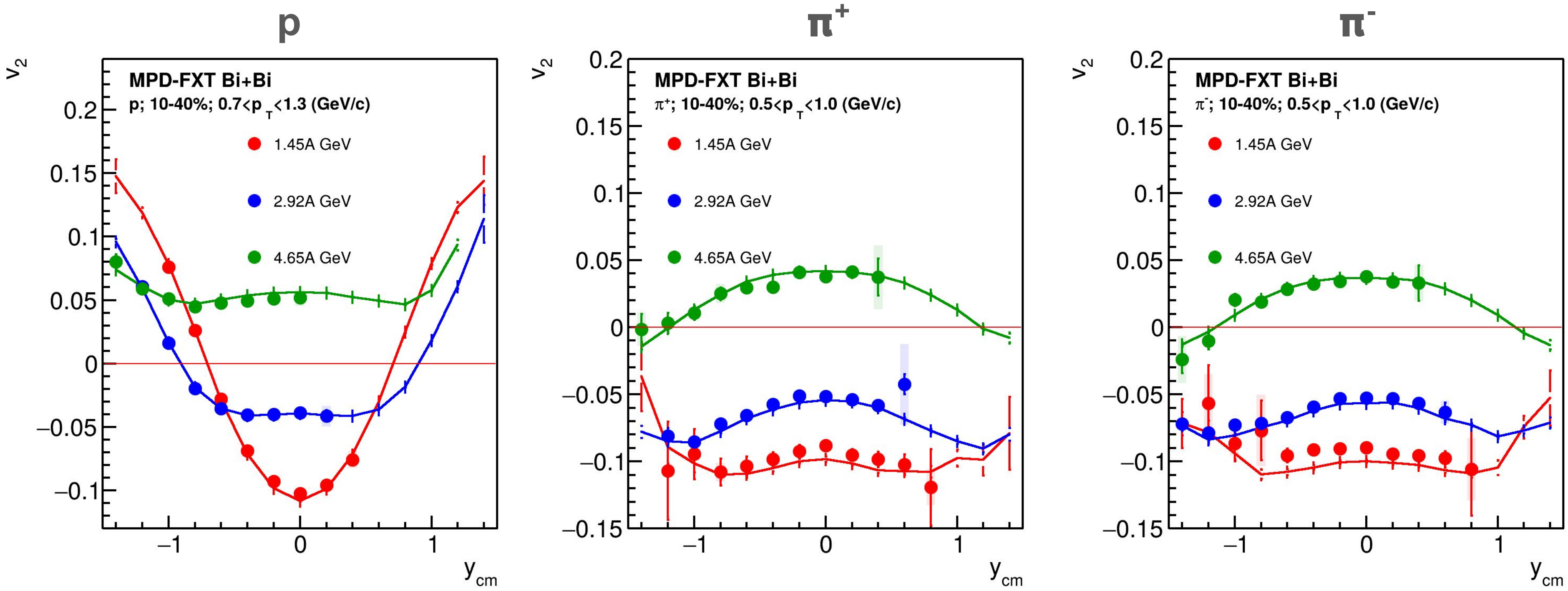
Protons:
- Nhits>27
- DCA<1 cm



Now let's look at the efficiency plots with the new cuts

Результаты: $v_2(y)$

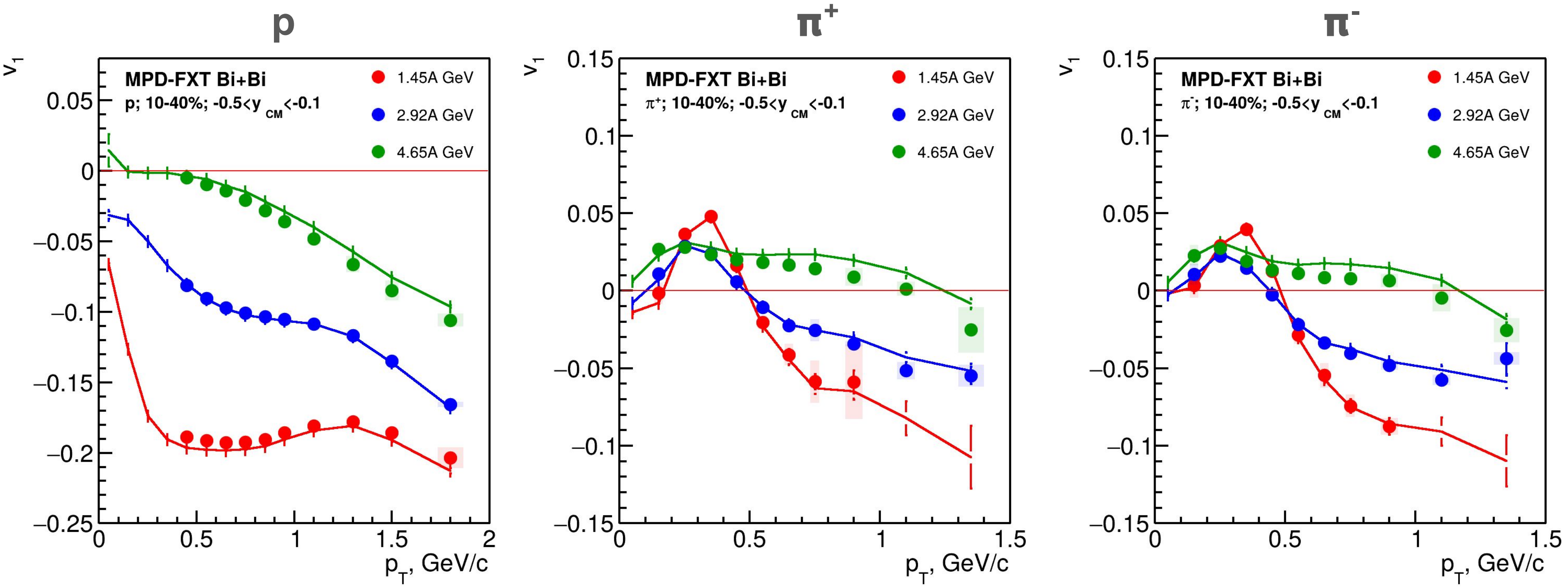
Систематические ошибки:
xxx, xyy



Хорошее согласие с данными из модели

Результаты: $v_1(p_T)$

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



Хорошее согласие с данными из модели