

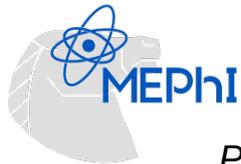
Измерение анизотропного потока и спектра нейтральных пионов в столкновениях V_i+V_i при энергии 9.2 ГэВ в эксперименте MPD



Гордеев Павел



НИЦ "Курчатовский институт"
НИЯУ МИФИ



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

17 февраля 2025

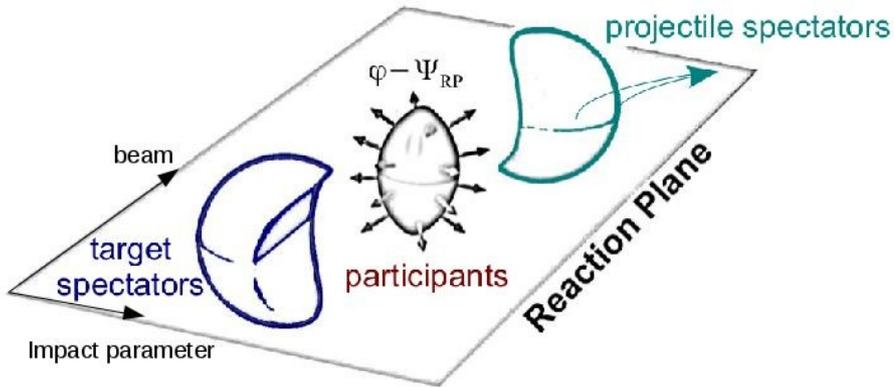
Анизотропный поперечный поток

Асимметрия в координатном пространстве вследствие взаимодействия преобразуется в асимметрию импульса относительно плоскости симметрии столкновения:

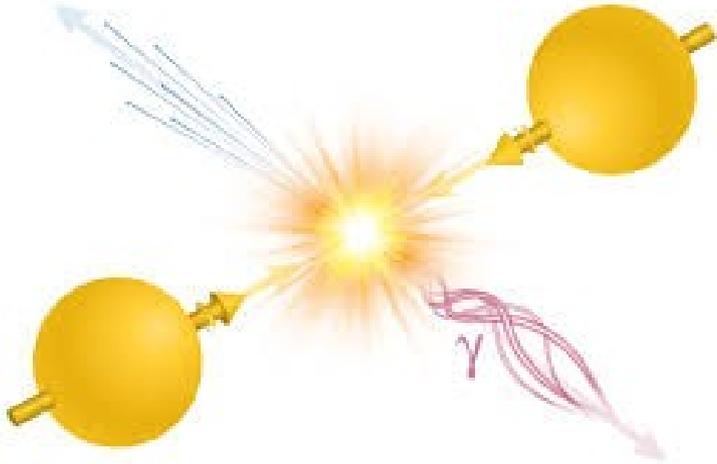
$$\rho(\phi) = \frac{1}{2\pi} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos(n(\phi - \Psi_s)) \right]$$

$$v_n = \langle \cos(n[\phi - \Psi_s]) \rangle$$

$v_n = v_n(p_T, y, \text{центральность, тип адрона})$
 ψ_s – плоскость симметрии



Анизотропный поток прямых фотонов



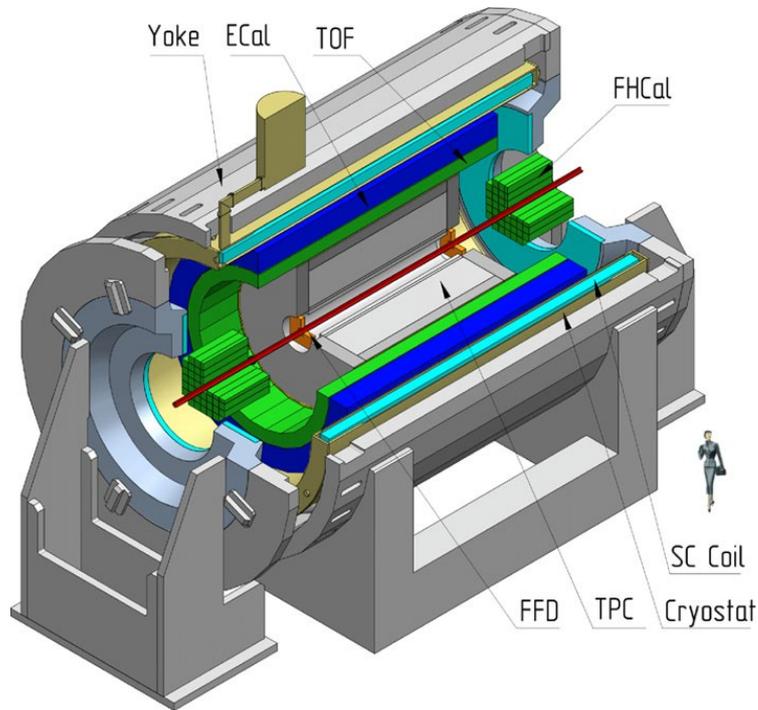
Прямые фотоны

- образуются в электромагнитных процессах при столкновениях тяжелых ядер
- не взаимодействуют с другими частицами в области столкновения

Коллективные потоки прямых фотонов

- может пролить свет на механизмы формирования анизотропного потока, включая самые ранние стадии столкновения
- для количественной оценки необходимо измерить анизотропный поток инклюзивных и распадных фотонов (основной источник - нейтральные пионы)

MPD @ NICA



- **Цель** - исследование фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи в области высокого барионного химического потенциала
- Регистрация продуктов столкновений тяжелых ионов при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ.

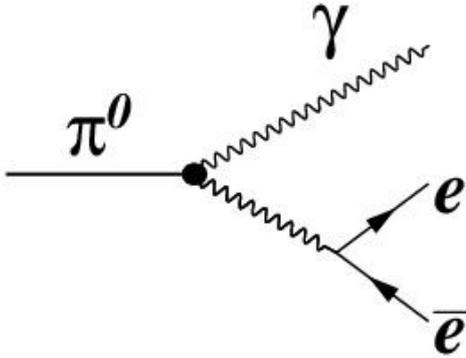
Основные подсистемы

- Время-проекционная камера (TPC)
- Время-пролетная система (TOF)
- Электромагнитный калориметр (ECal)
- Передние адронные калориметры (FHCAL)

Описание исследования

- **Цель:** оценка эффективности измерения анизотропного потока инклюзивных фотонов и π^0 , и спектра π^0 в эксперименте MPD @ NICA
- **Набор данных:** 50М реконструированных событий, UrQMD, $Bi+Bi$ @ 9.2 ГэВ
- Отбор событий:
 - успешно реконструированная вершина в пределах 50 см от центра TPC
 - ~25М событий после отбора
- Плоскость симметрии определяется по асимметрии выделения энергии спектраторов в FHCaI

Методы реконструкции γ и π^0



Два метода для реконструкции фотонов:

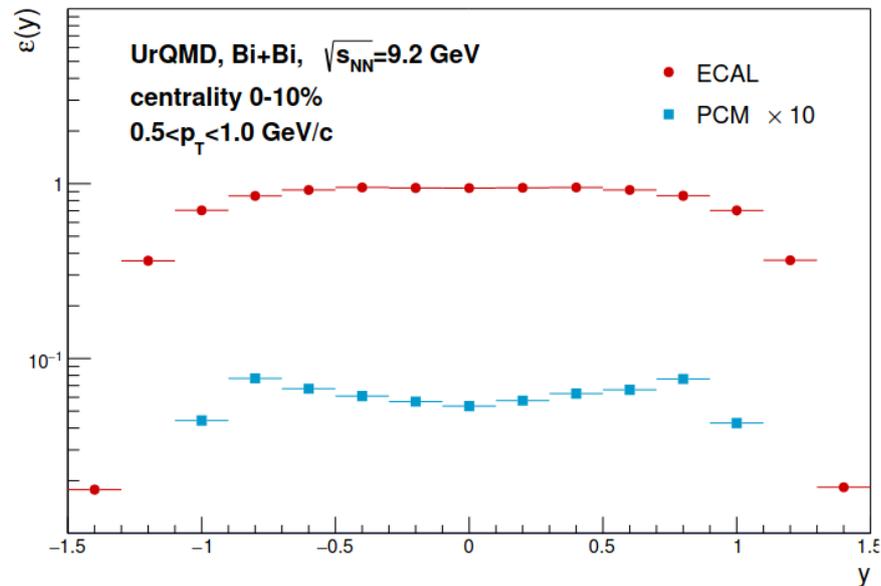
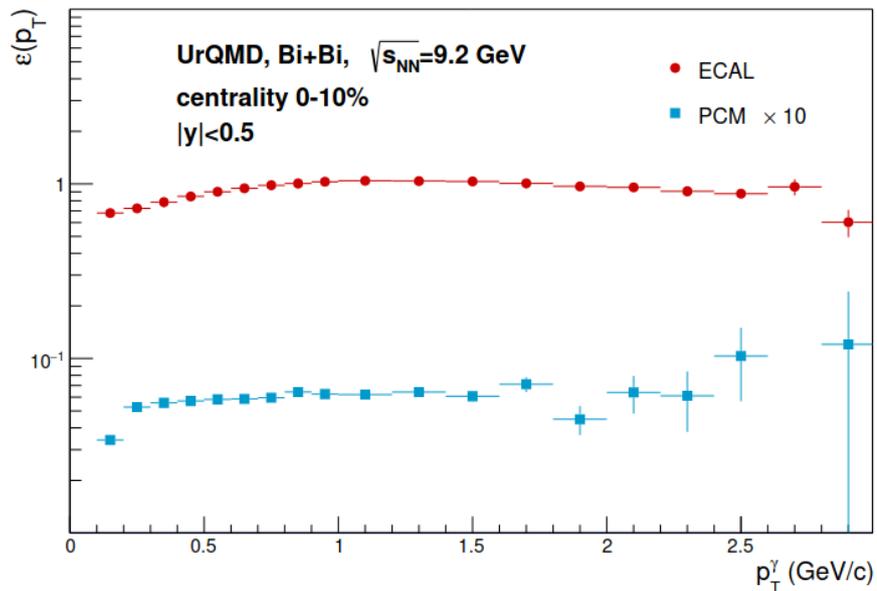
- Сигнал в калориметре (ECal)
- e^+e^- пары в TPC от конверсионных фотонов

Три метода реконструкции π^0 :

- Калориметр (оба фотона реконструированы в ECal)
- Гибридный (ECal + конверсионный фотон)
- Конверсия (два конверсионных фотона, РСМ)

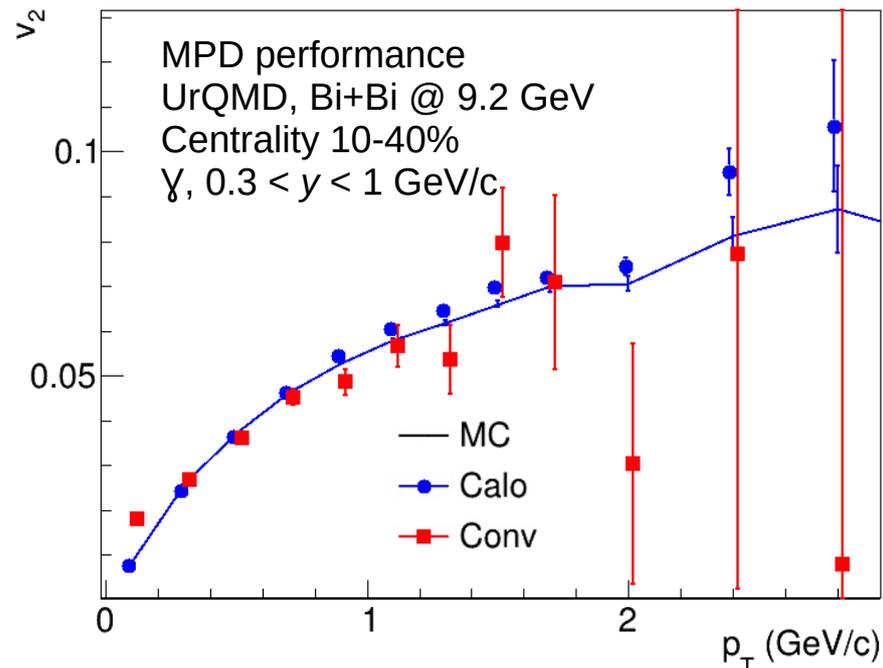
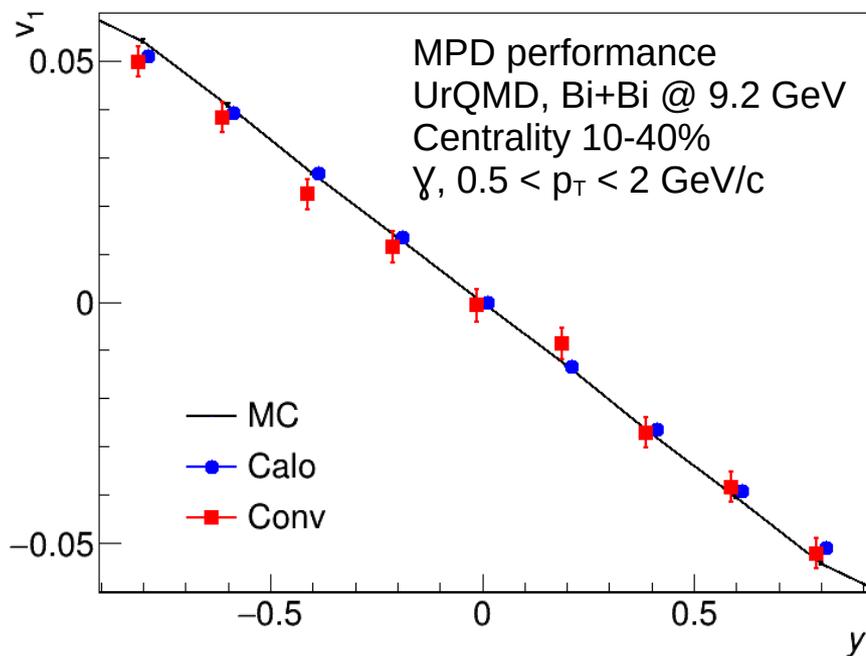
Конверсионный метод дает значительно лучшее разрешение по импульсу, но гораздо меньшую эффективность реконструкции

Эффективность реконструкции фотонов



- Эффективность близка к единице в широком интервале p_T -у при использовании калориметра
- Низкая эффективность для метода конверсии

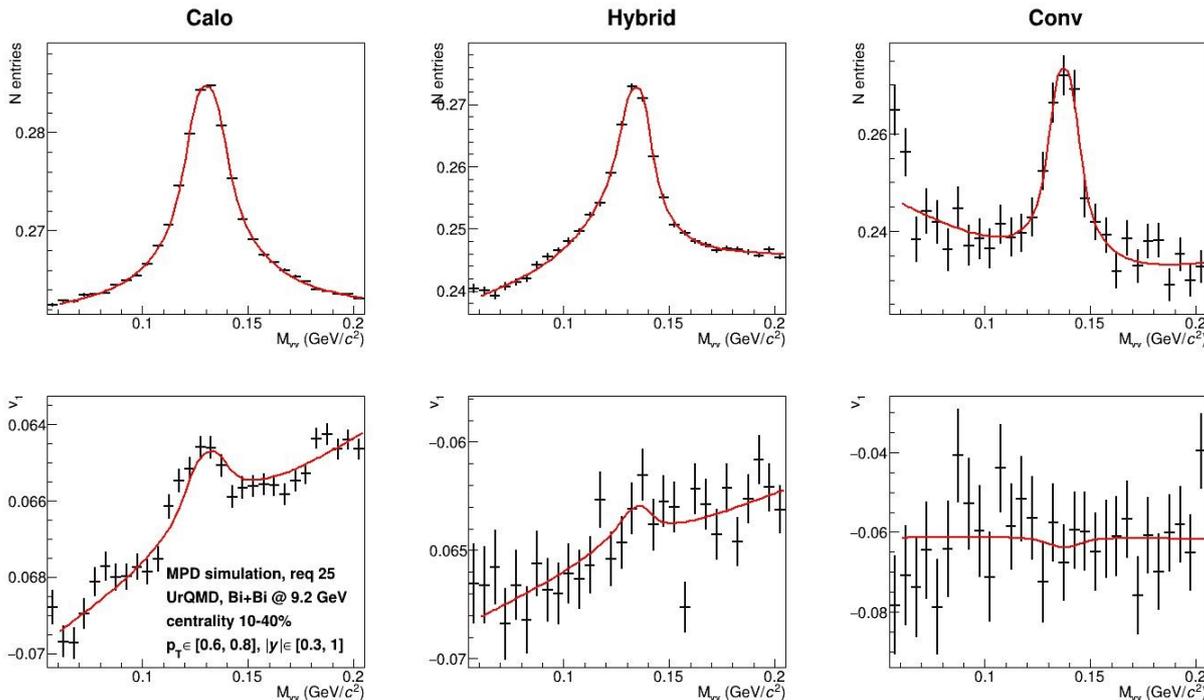
ПОТОК ИНКЛЮЗИВНЫХ ФОТОНОВ



- Хорошее согласие обоих методов с предсказанием модели
- Конверсионный метод требует большей статистики

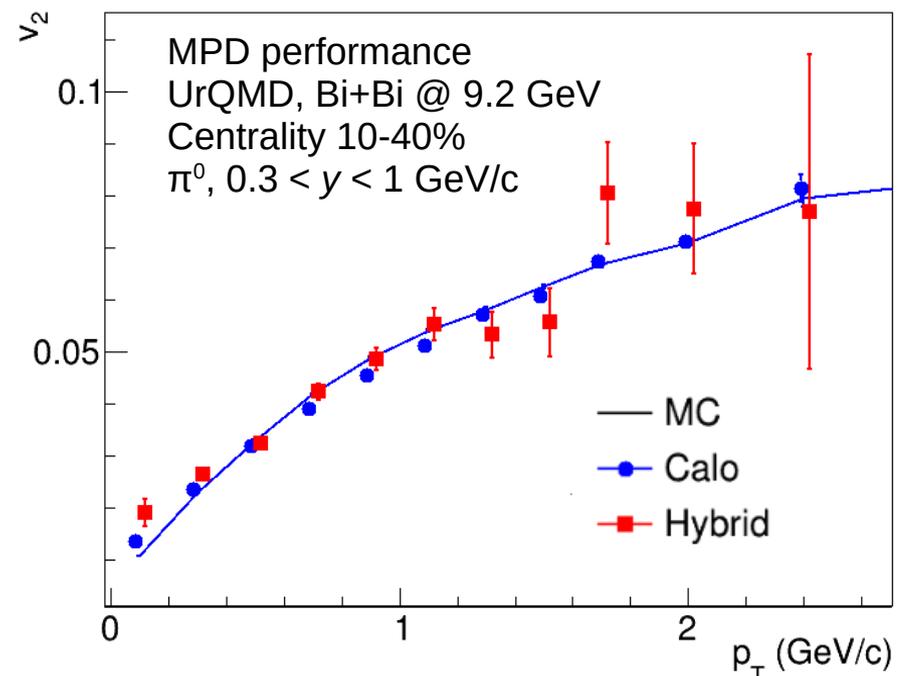
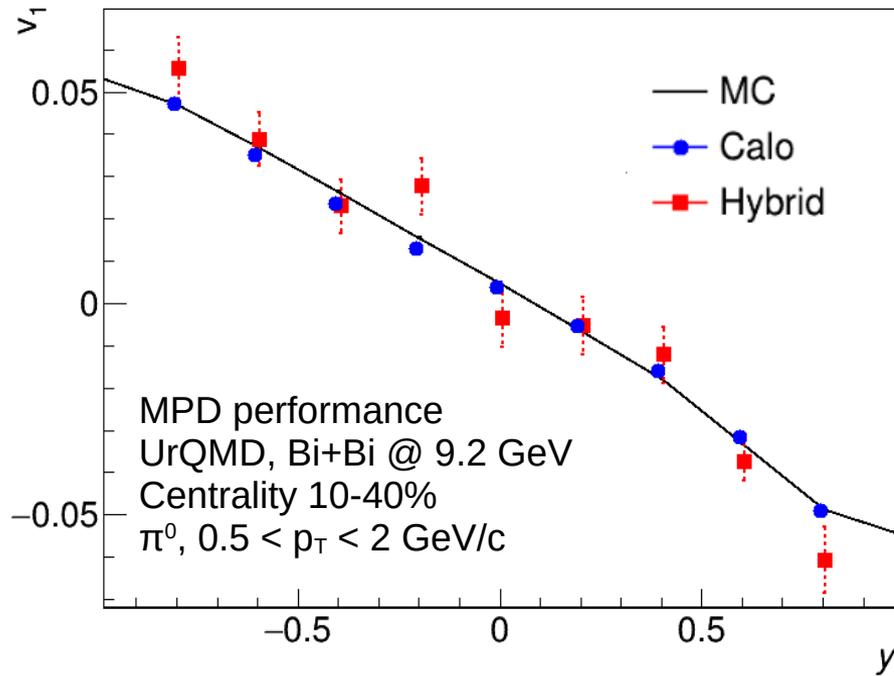
Вычисление потока нейтральных пионов

- Фит зависимости v_n от инвариантной массы пары фотонов с помощью функции ниже
- v_{sig} и v_{bg} – свободные параметры, n_{sig} и n_{bg} определяются фитированием распределения инвариантной массы пары фотонов с помощью двухсторонней Crystall Ball function + полином второй степени
- Конверсионный метод требует большей статистики



$$v_{all}(M_{inv}) = \frac{n_{sig}(M_{inv})v_{sig} + n_{bg}(M_{inv})(v_{bg}^{const} + v_{bg}^{lin} * M_{inv})}{n_{sig}(M_{inv}) + n_{bg}(M_{inv})}$$

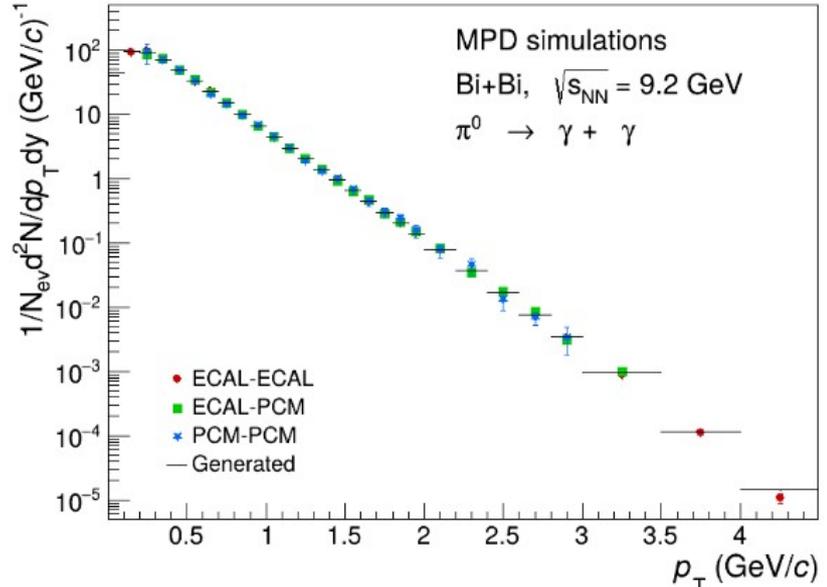
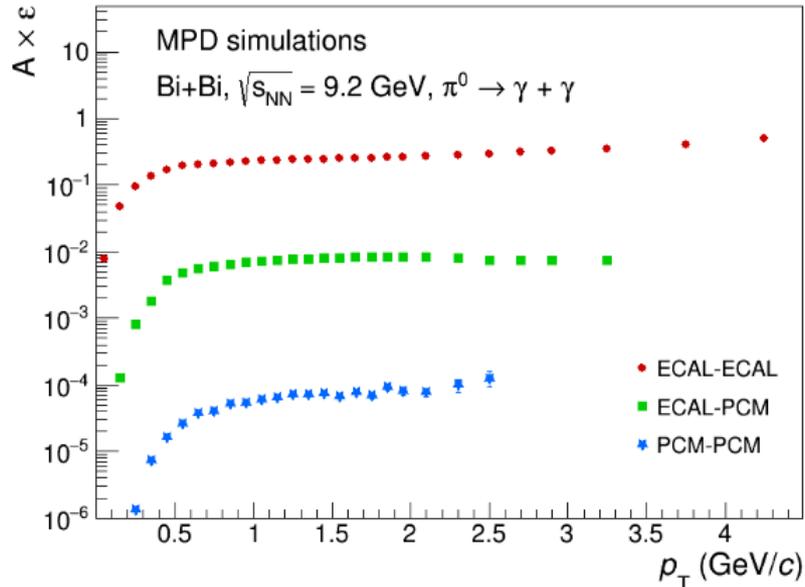
Поток нейтральных пионов



- Удовлетворительное согласие с моделью обоих методов
- Дополнительная статистика требуется для гибридного метода

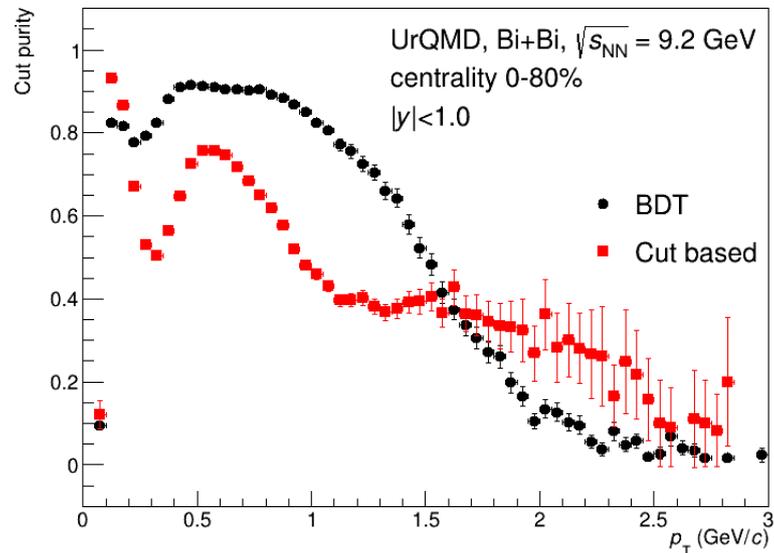
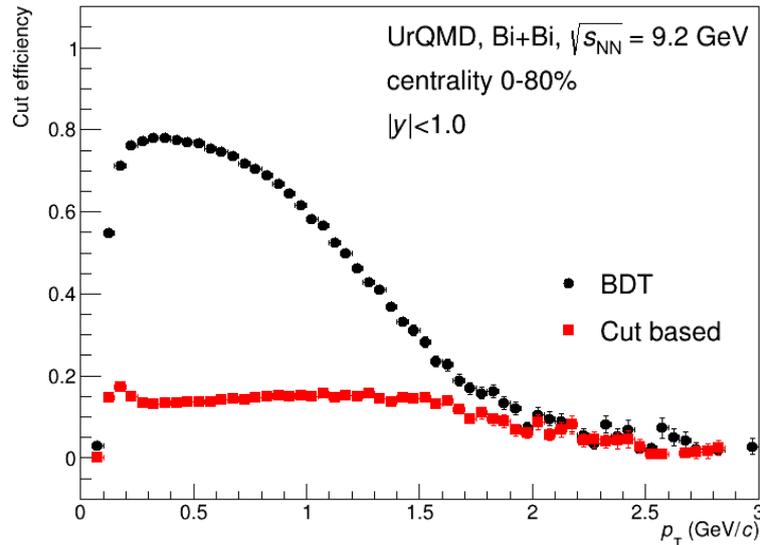
Спектр нейтральных пионов

- Метод ECAL-ECAL обладает наибольшей эффективностью, но измерения при низких импульсах характеризуются довольно плохим энергетическим разрешением, высоким адронным и комбинаторным фоном
- РСМ-РСМ использует преимущества гораздо лучшего энергетического разрешения трекингowej системы и превосходной чистоты реконструкции фотонов при низких импульсах, что приводит к гораздо более узким реконструированным пикам и меньшему фону



Машинное обучение. Boosted Decision Trees

- Рассматривается возможность использования машинного обучения для увеличения эффективности конверсионного метода
- Применение машинного обучения показывает значительный прирост в эффективности без потери чистоты



Заключение

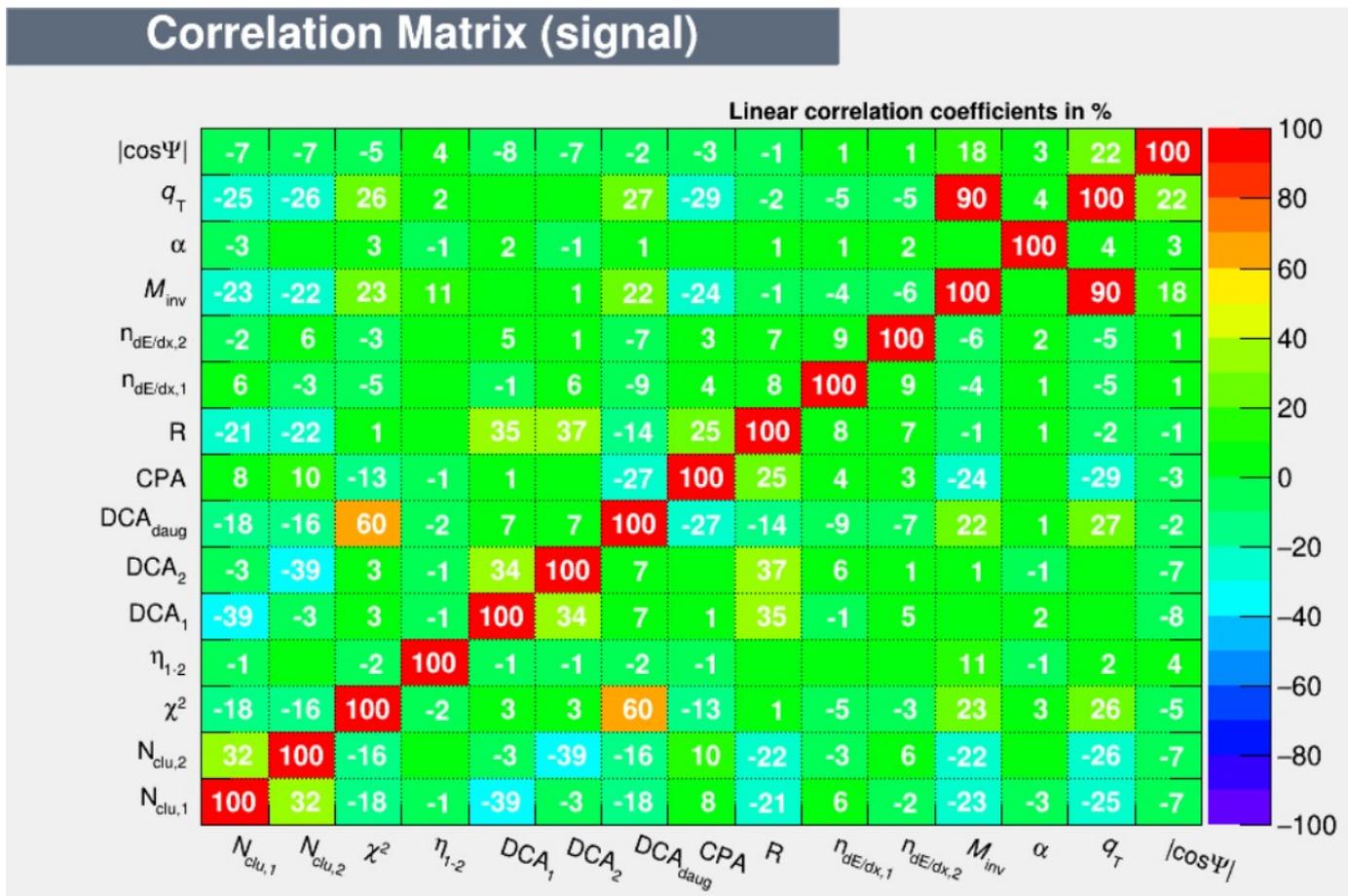
- Дифференциальное измерение направленного и эллиптического потоков инклюзивных фотонов и нейтральных пионов, а также спектра нейтральных пионов в столкновениях V_i+V_i @ 9.2 ГэВ должно быть осуществимо в эксперименте MPD @ NICA
- Перекрестная проверка измерений гибридным и конверсионным методами будет возможна при разумной статистике
- Требуется оптимизация отборов для конверсионного метода, с целью увеличения эффективности при высоком уровне чистоты
- Планируется оценка возможности использования машинного обучения (BDT) для конверсионного метода

Спасибо за внимание!

Отбор кластеров и e^+e^- пар

- Отбор кластеров в Ecal:
 - $E_{\text{core}} > 50$ МэВ
 - минимальное количество ячеек – 2
 - расстояние до ближайшего экстраполированного трека > 1 см
 - максимальное время пролета
- Отбор треков для реконструкции конверсионных фотонов:
 - > 10 хитов в TPC
 - $|\eta| > 1$
 - $p_T > 0.05$ ГэВ/c
 - $dE/dx < 5\sigma$ от электронной линии
- Отбор пар e^+e^-
 - треки с противоположными зарядами
 - $M_{\text{inv}} < 50$ МэВ/c²
 - DCA треков < 1.2 см
 - отбор по критерию Арментероса-Подольянского
 - отбор на качество реконструированной вторичной вершины

Корреляционная матрица для сигнала



Обучение Boosted Decision Trees

- For training: $S=15'000$ and $B=15'000$
- For testing: $S=15'000$ and $B=38'000'000$
- In the data sample we have ~ 2500 background to 1 real conversion photon

Variables for training

- N_{clu} - number of TPC clusters
- χ^2 - obtained from Kalman filter
- η_{1-2} - difference of pseudorapidity of tracks
- DCA - Distance of Closest Approach to PV for tracks
- DCA_daug - DCA between positively and negatively charged tracks
- CPA - Cosine of Pointing Angle
- R - conversion radius, distance from PV to SV
- $n_{dE/dx}$ - PID of tracks based on specific loss in TPC, number of σ from electron/positron line
- M_{inv} - invariant mass of track pair
- Armenteros-Podolanski variables - q_T and α
- $|\cos\Psi|$ - cosine of angle between pair plane and magnetic field (for Dalitz decays reduction)

