

Зарядовые корреляции адронов в релятивистских соударениях тяжелых ионов: от LHC до NICA

И.П.Лохтин

(Лаборатория сильных взаимодействий ОЭФВЭ)



Фундаментальная цель исследований с пучками релятивистских тяжелых ионов: *свойства экстремального состояния субъядерной материи - кварк-глюонной плазмы, образующейся при сверхвысоких плотностях энергии и температурах.*

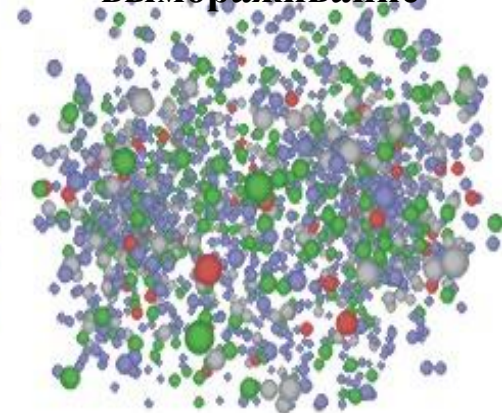
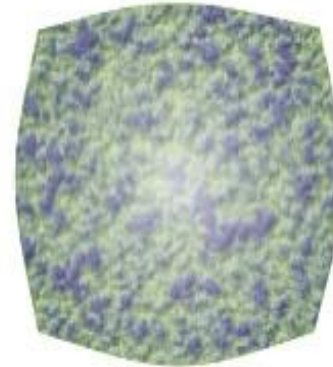
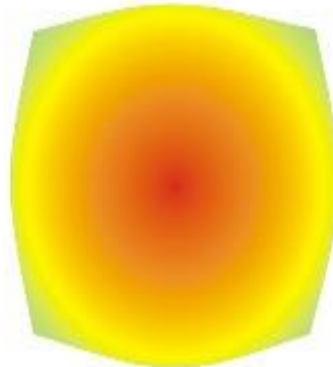
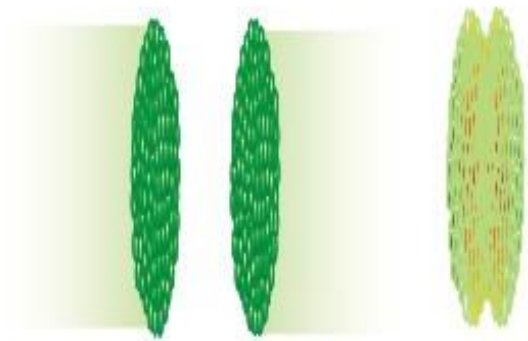
- **Максимально достижимые на сегодняшний день энергии (коллайдер LHC):** высокотемпературное состояние кварк-глюонной среды, близкое к “протоматерии” в ранней Вселенной.
- **Промежуточные энергии (коллайдер NICA):** динамика кварк-адронных фазовых переходов (включая поиск «критической точки») вблизи их границы.

Эти две взаимодополняющие задачи являются одними из актуальнейших в современной ядерной физике высоких энергий.

начальное состояние

гидродинамика

адронная стадия и
“вымораживание”



предравновесная
стадия

адронизация

Функции баланса разно-заряженных частиц

$$B(\Delta y, \Delta \varphi) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\langle N_{pn}(\Delta y, \Delta \varphi) \rangle - \langle N_{pp}(\Delta y, \Delta \varphi) \rangle}{\langle N_p \rangle} + \frac{\langle N_{np}(\Delta y, \Delta \varphi) \rangle - \langle N_{nn}(\Delta y, \Delta \varphi) \rangle}{\langle N_n \rangle} \right\},$$

N_{pn} и N_{pp}/N_{nn} - количество пар разноименно и одноименно заряженных частиц соответственно с быстрыми y_1 и y_2 , $|y_1 - y_2| = \Delta y$ (для $\Delta \varphi$ - аналогично);

N_p и N_n - множественности положительно и отрицательно заряженных частиц.

Функция баланса (ФБ) - плотность вероятности того, что разноименно заряженные частицы разделены определенными интервалами (псевдо-) быстрой и азимутального угла.

ФБ характеризуется быстрой и азимутальными ширинами:

$$\langle \Delta \eta \rangle = \frac{\sum_i B_i \Delta \eta_i}{\sum_i B_i} \quad \langle \Delta \varphi \rangle = \frac{\sum_i B_i \Delta \varphi_i}{\sum_i B_i}$$

Ширины ФБ чувствительны к времени разделения электрического заряда в ходе эволюции системы
→ информация о пространственно-временных характеристиках области испускания частиц
(включая наличие и тип кварк-адронного фазового перехода)

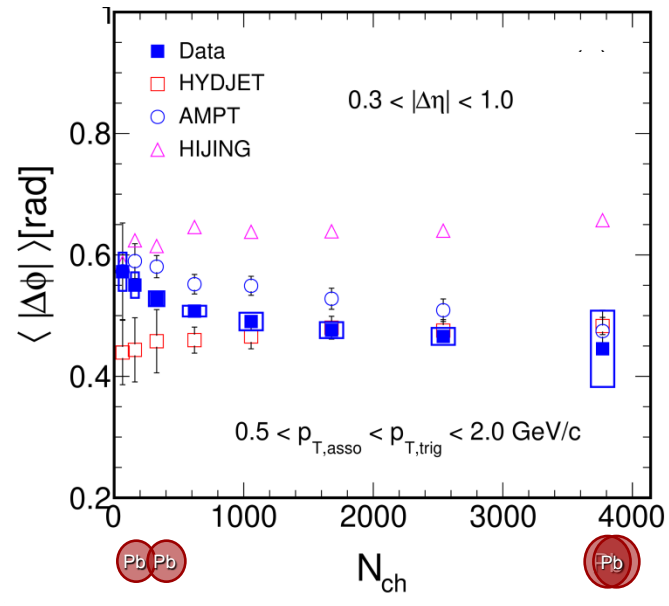
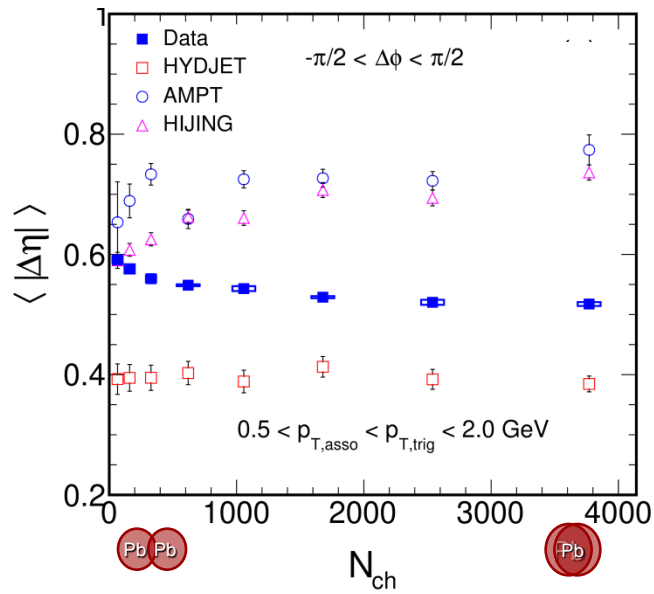
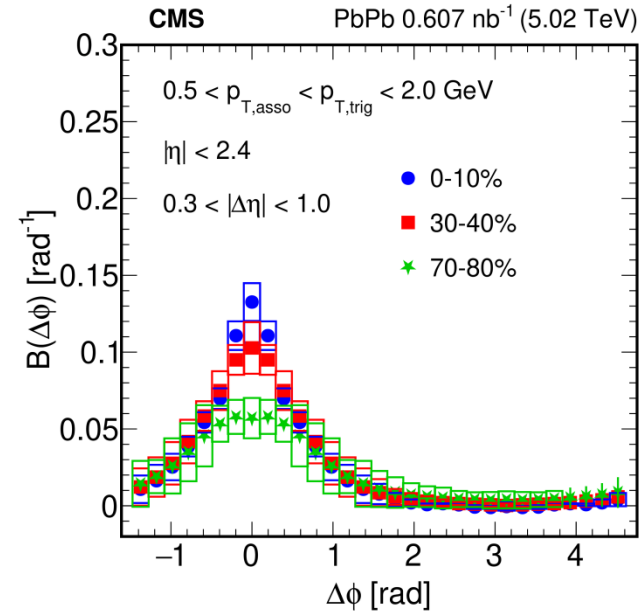
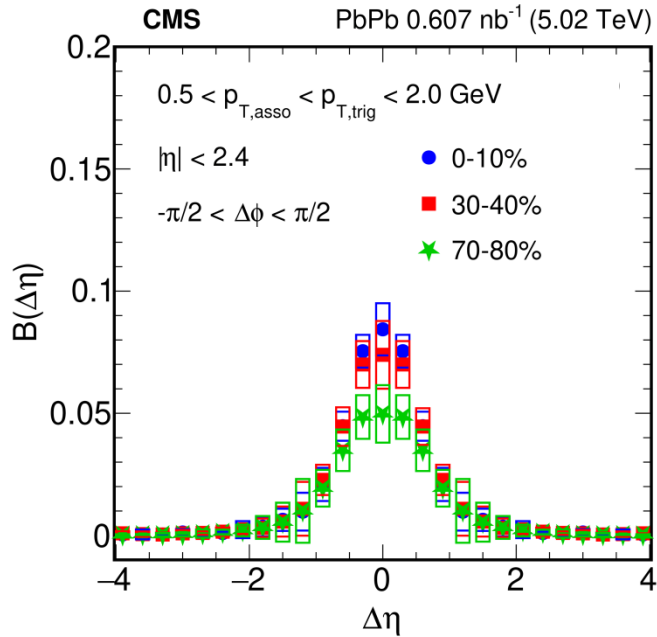
Дальнодействующие зарядовые корреляции (широкое распределение) → раннее разделение заряда
Короткодействующие зарядовые корреляции (узкое распределение) → позднее разделение заряда

ФБ измерялись в экспериментах с тяжелыми ионами на ускорителях SPS, RHIC и LHC.

Теоретические модели не описывают ФБ → неучтенные механизмы зарядовых корреляций?

Функции баланса разно-заряженных частиц

“Multiplicity and transverse momentum dependence of charge-balance functions in pPb and PbPb collisions at LHC energies “,
CMS Collaboration, arXiv 2307.11185, submitted to JHEP

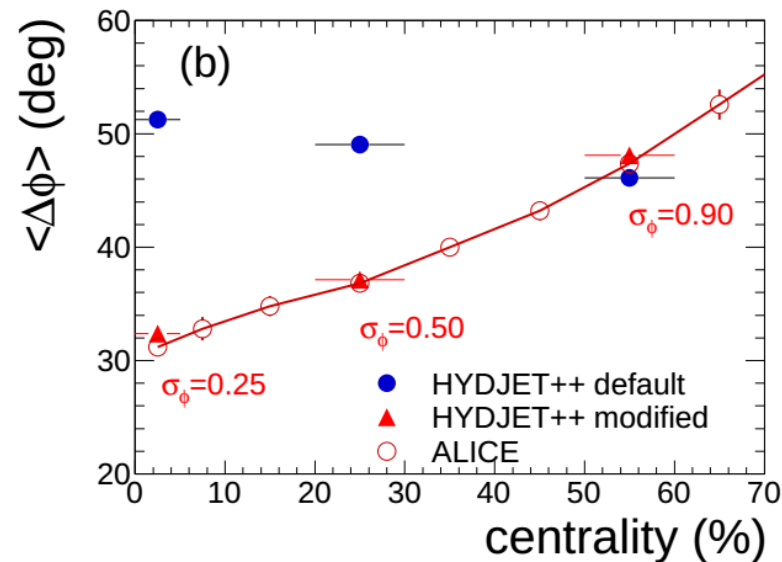
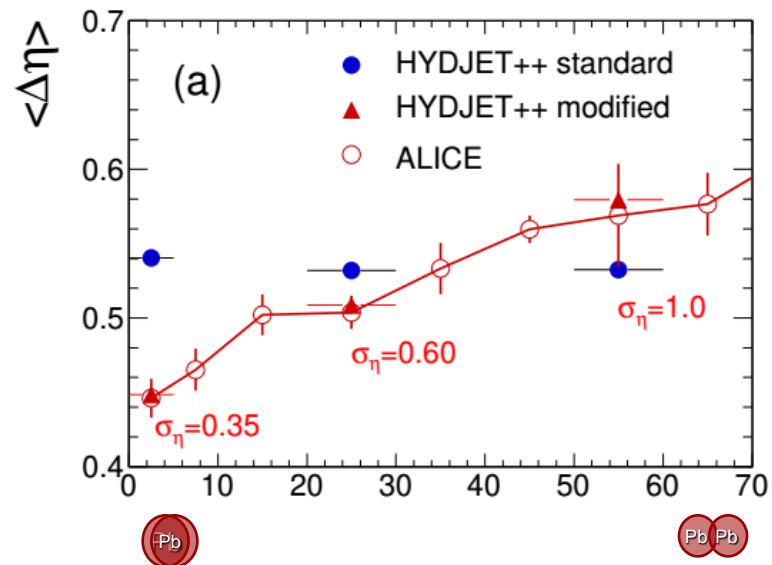
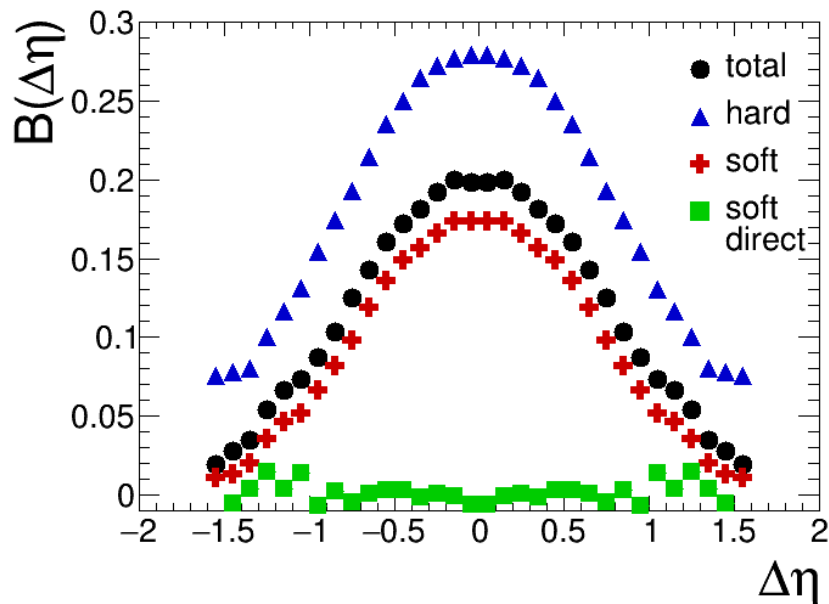


Модификация зарядовых корреляций в статистической модели

“Towards the centrality dependence description of the charge balance function in the HYDJET++ model”

A.S. Chernyshov, G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh, I.P. Lokhtin, L.V. Malinina, S.V. Petrushanko, A.M. Snigirev, E.E. Zabrodin

Chinese Physics C 47 (2023) 084107

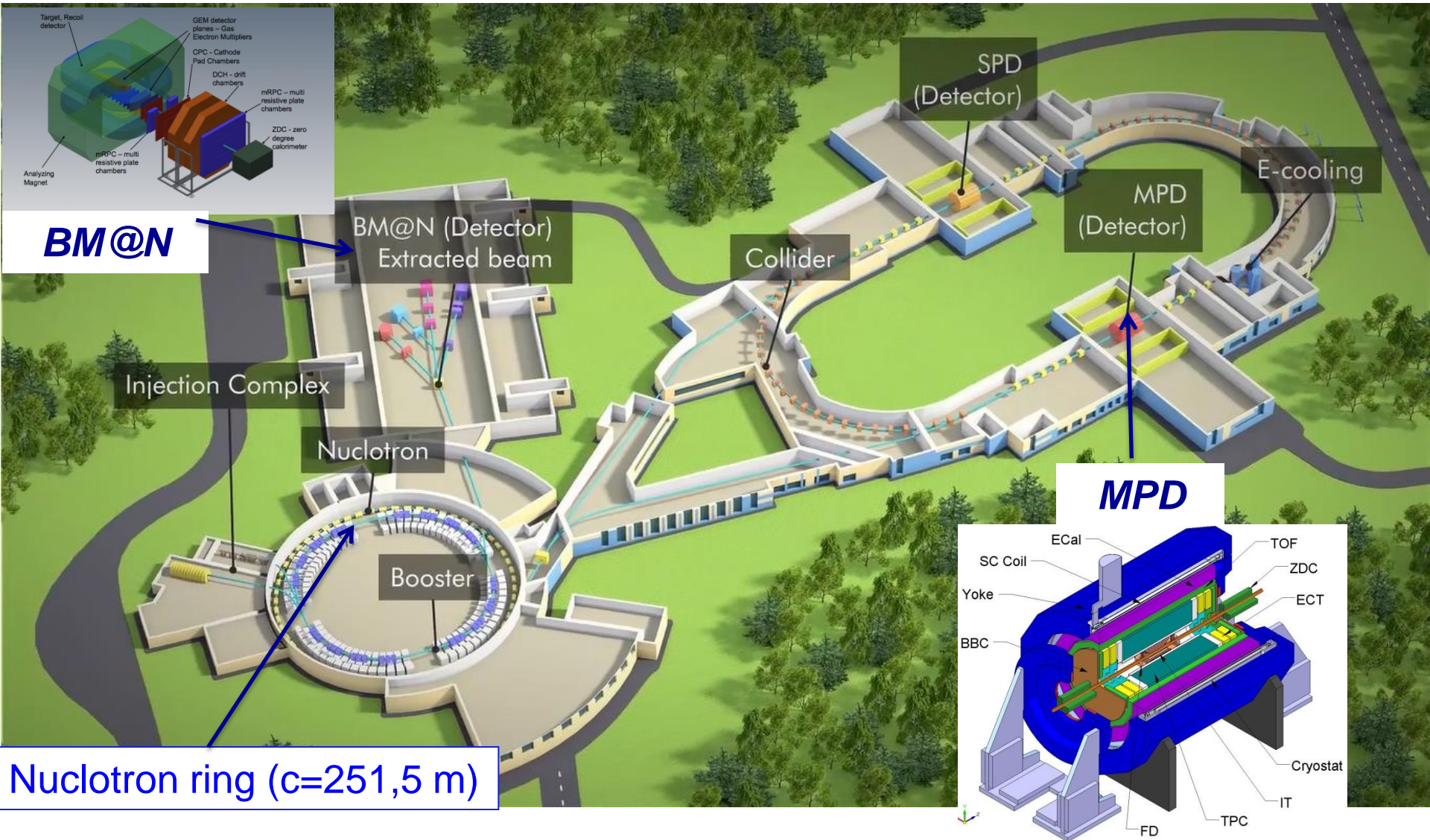


- Модельное исследование ФБ в соударениях PbPb при энергии ЛНС 2.76 ТэВ показало, что зарядовые корреляции частиц в конечном состоянии (распад резонансов и фрагментация струй) в модели HYDJET++ недостаточны для описания данных ALICE по зависимости ширины ФБ от центральности.
- Предложена модификация статистического рождения прямых заряженных адронов в модели HYDJET++ с событийным сохранением заряда на стадии вымораживания:
рождение пар частица-античастица с углами (η_1, ϕ_1) и (η_2, ϕ_2) , распределенными по Гауссу с ширинами σ_η, σ_ϕ
Развитый подход позволил описать данные по ФБ
(σ_η, σ_ϕ увеличиваются для периферических столкновений).

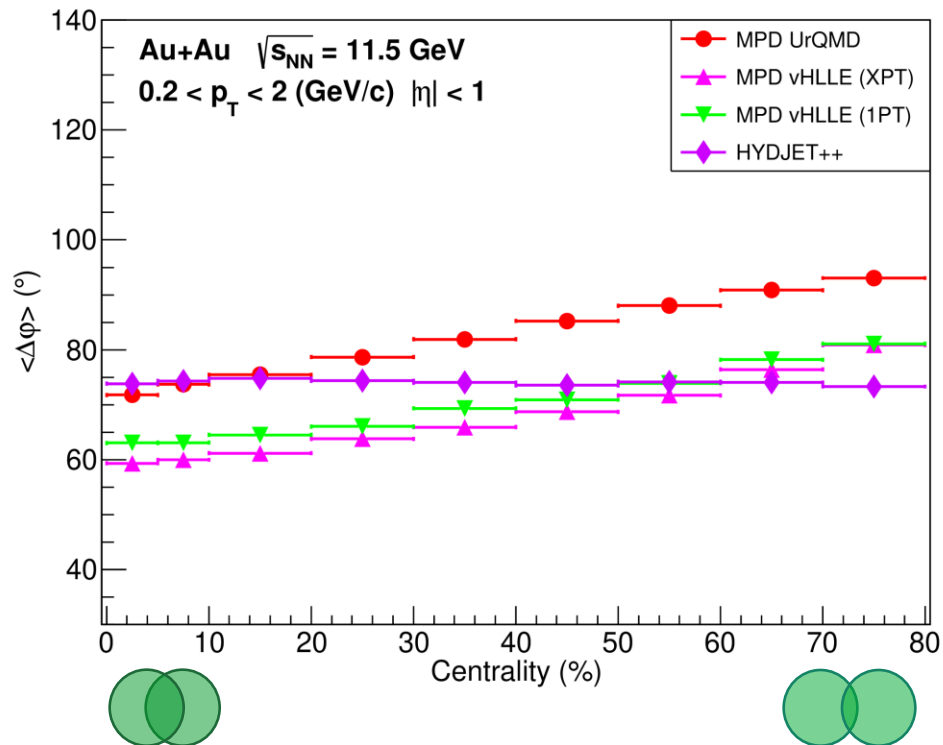
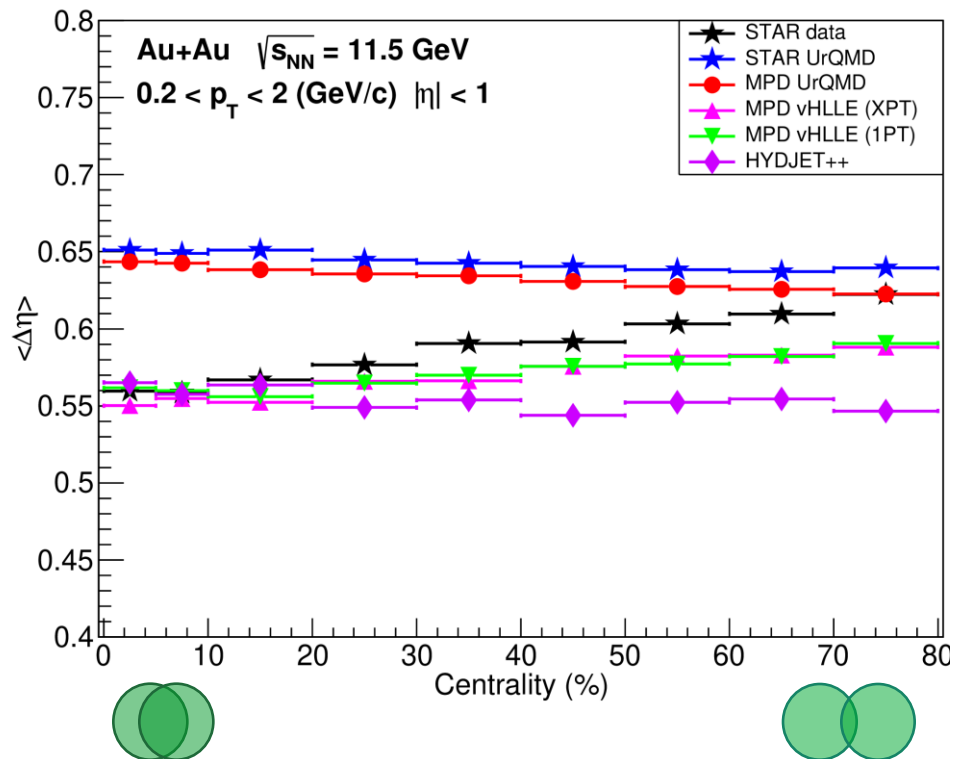
Комплекс **NICA** (Дубна, РФ)

Основные параметры коллайдера (*запуск – 2025?*)

$\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ; пучки: от p до Au, Bi; $L \sim 10^{27}$ cm⁻² c⁻¹ (Au), $\sim 10^{32}$ cm⁻² c⁻¹ (p)



Функции баланса разно-заряженных адронов (RHIC_BES/NICA)

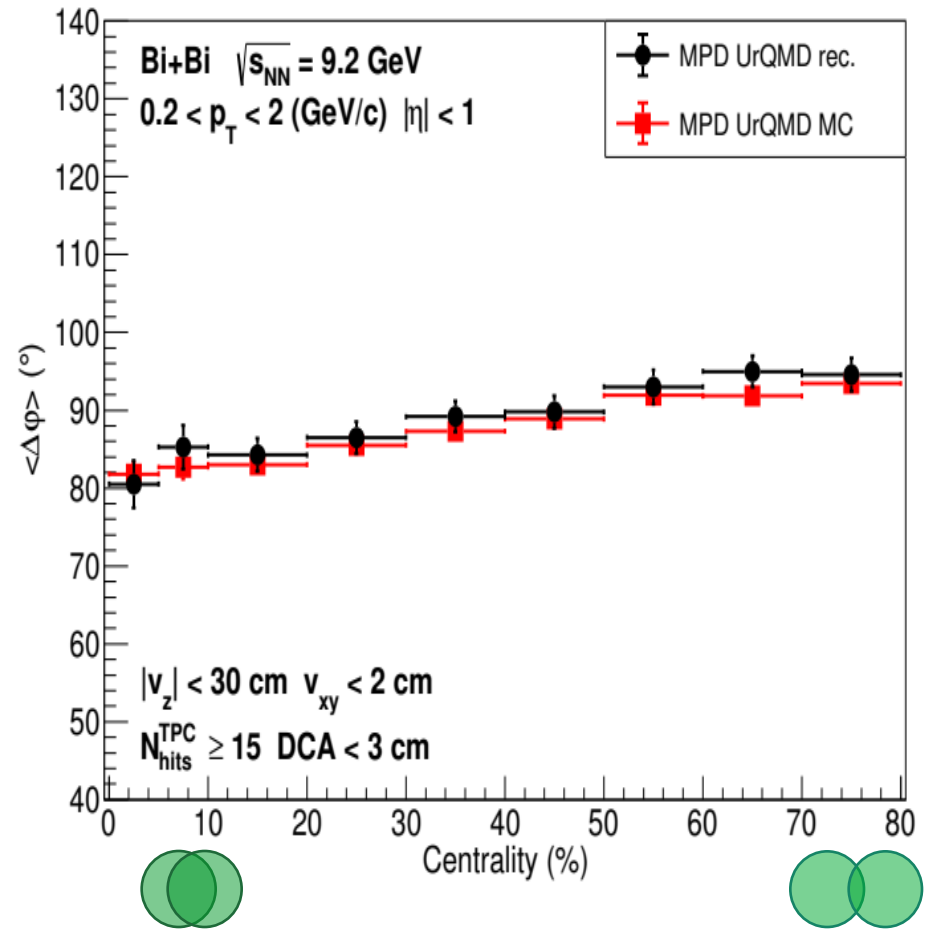
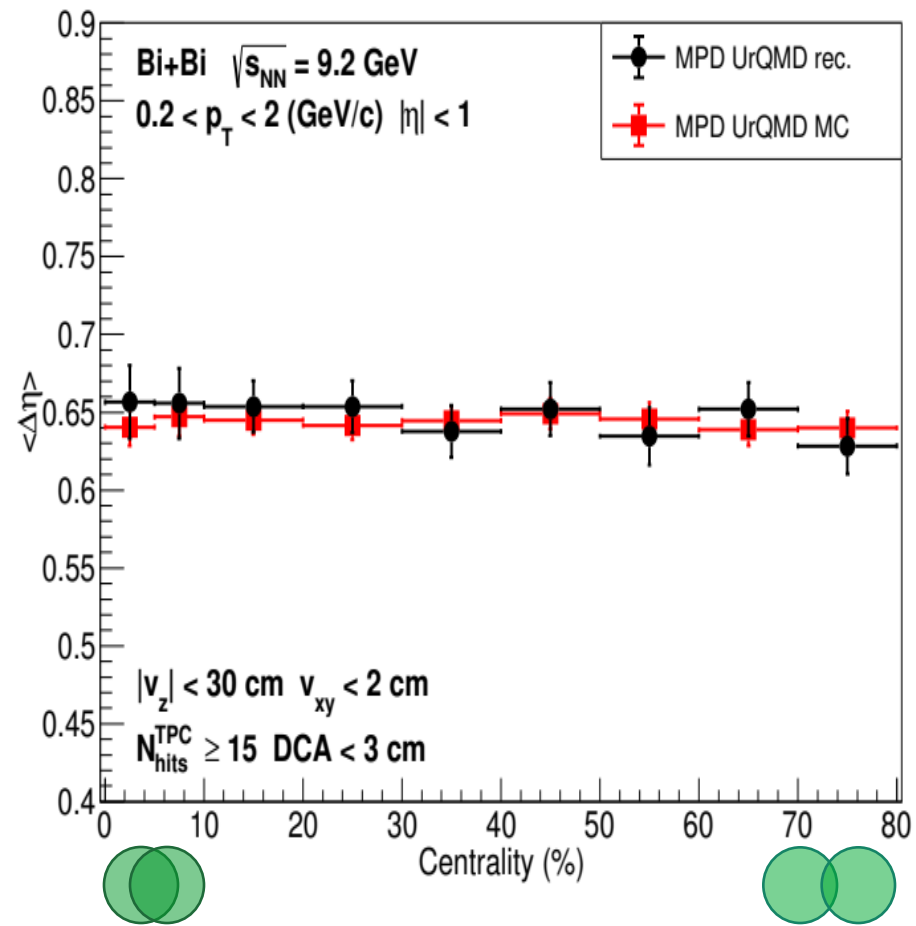


Проведено модельное исследование ФБ с различными генераторами событий для соударений AuAu при энергиях 7.7 и 11.5 ГэВ на пару нуклонов:

- модели vHLE и HYDJET++ воспроизводят данные STAR/RHIC по ширинам быстрой ФБ в центральных соударениях, модель UrQMD – в периферических соударениях;
- ни одна из моделей не описывает зависимость ширины быстрой ФБ от центральности взаимодействий
 → *неучтенные механизмы зарядовых корреляций частиц в этих моделях?*

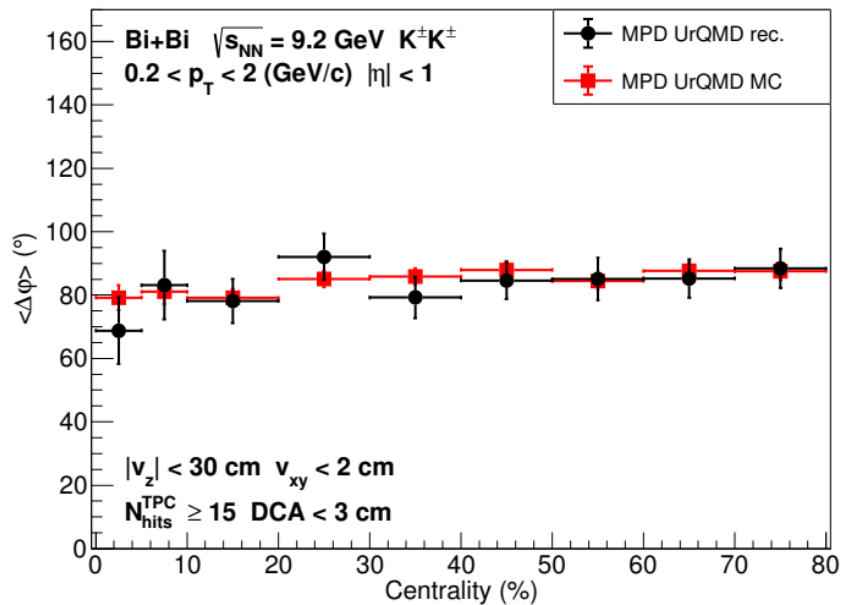
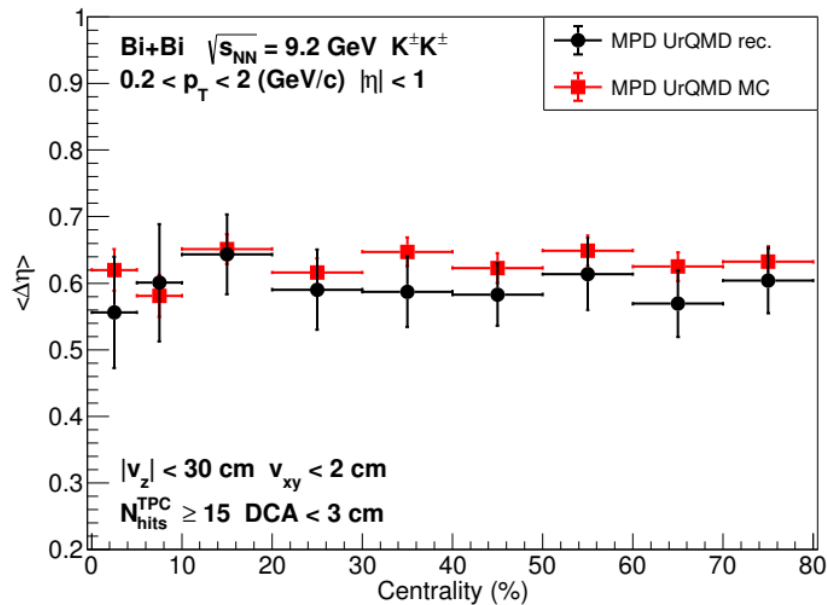
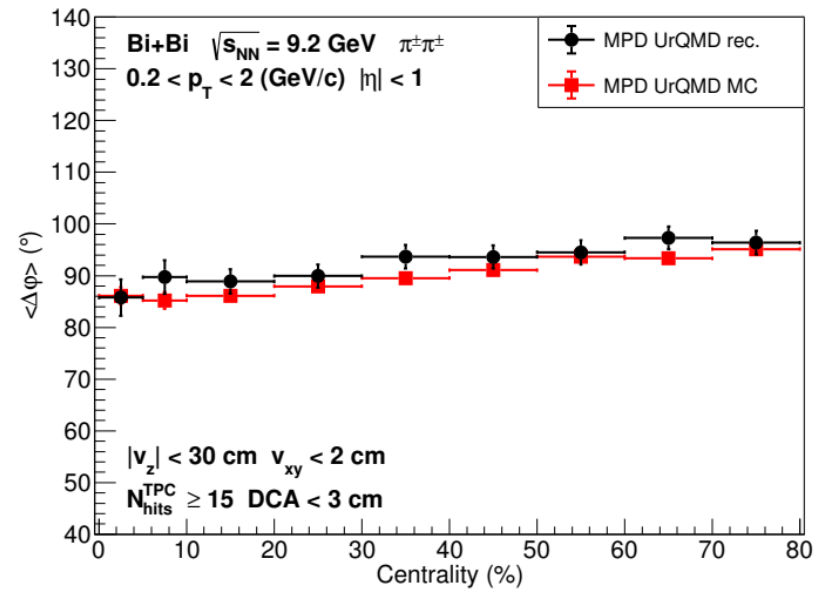
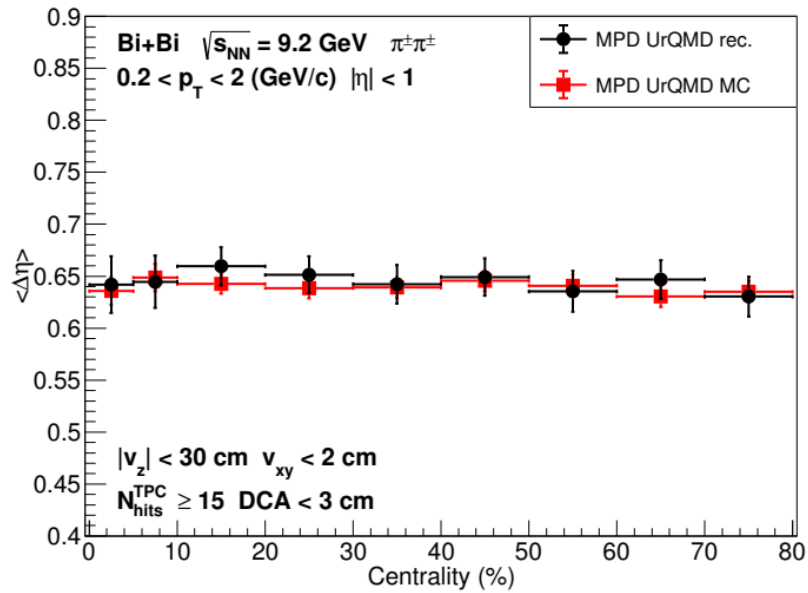
Программный код для построения ФБ (включая корректировки на зарядовый дисбаланс и аксептанс) встроен в MpdRoot для анализа смоделированных событий с учетом откликов детекторов.

Реконструкция ФБ в эксперименте MPD/NICA (инклюзивные адроны, h^+h^-)

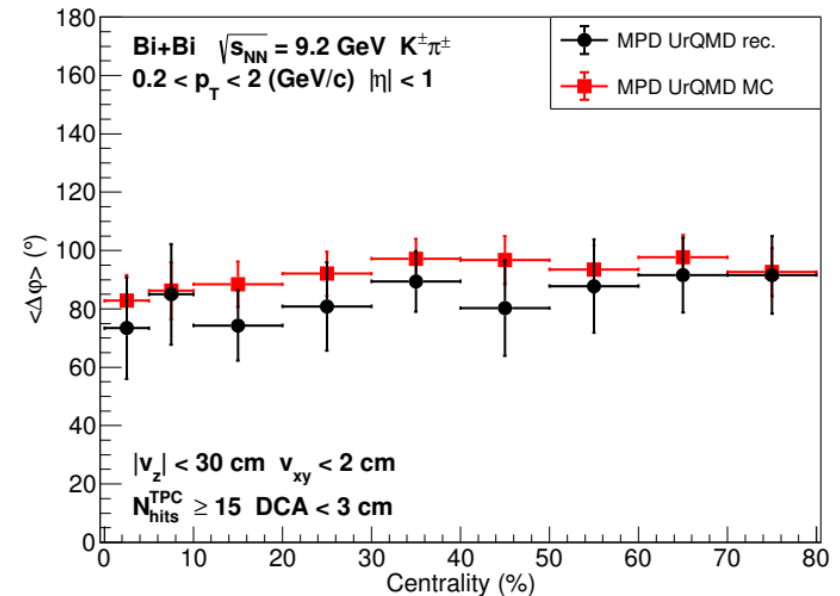
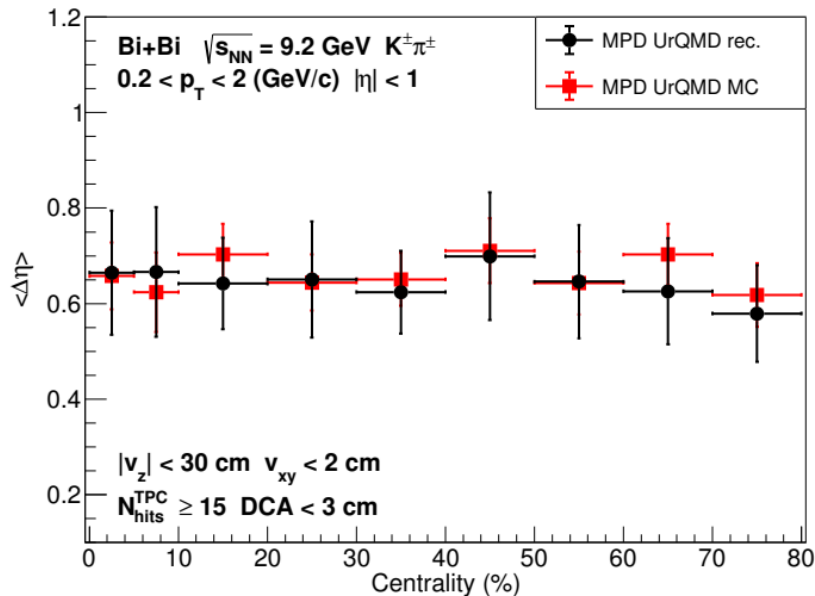
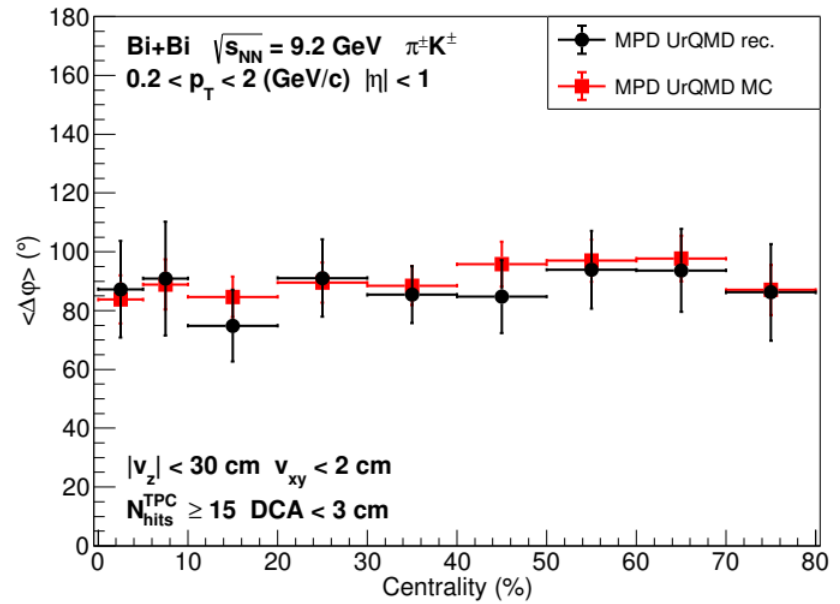
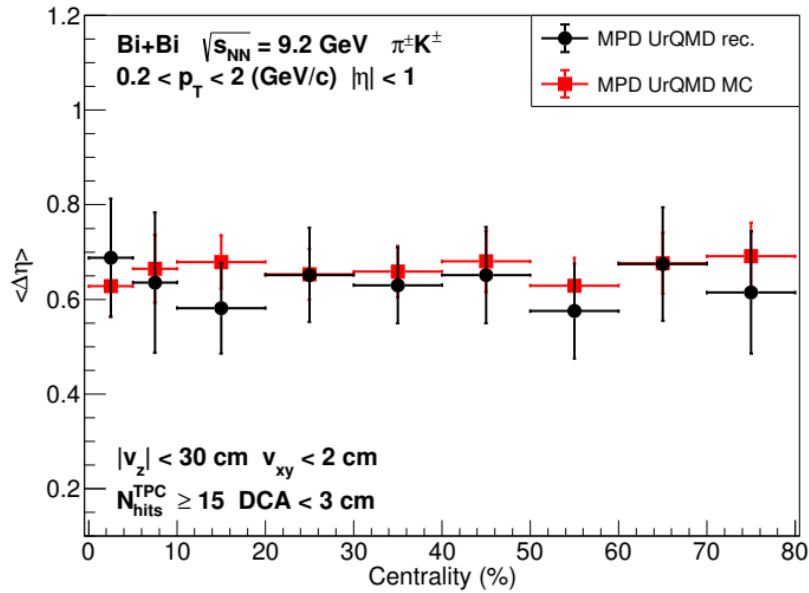


Восстановленные в условиях эксперимента MPD ширины функций зарядового баланса близки к генераторным ширинам в модели UrQMD (в пределах 3% для псевдобыстротных $\langle \Delta\eta \rangle$ и 5% для азимутальных $\langle \Delta\phi \rangle$).

Реконструкция ФБ в эксперименте MPD/NICA ($\pi^+\pi^-$, K^+K^-)



Реконструкция ФБ в эксперименте MPD/NICA (π^+K^- , π^-K^+)



Основные результаты

- ✓ Разработана и реализована в модели HYDJET++ процедура учета зарядовых корреляций прямых адронов, позволившая воспроизвести экспериментально наблюдаемую зависимость ширин функций баланса разно-заряженных адронов от центральности соударений Pb+Pb при энергии LHC.
- ✓ Исследована возможность реконструкции функций баланса разно-заряженных адронов в соударениях $Vi+Vi$ в условиях эксперимента MPD на коллайдере NICA. Показано, что разработанный алгоритм построения ФБ позволяет достаточно точно восстановить быстротные и азимутальные ширины зарядовых корреляций как инклюзивных, так и идентифицированных адронов.

Текущие работы и планы

- ✓ Обобщение разработанной процедуры учета зарядовых корреляций прямых адронов на случай энергий NICA/RHIC_BES (конечные значения барионного, странного и изоспинового химических потенциалов) и ее реализация в модели HYDJET++.
- ✓ Апробация разработанного алгоритма реконструкции функций баланса на модельных и реальных данных эксперимента VM@N на Нуклотроне (взаимодействия Xe+CsI при энергиях пучка ксенона 3.0 и 3.8 ГэВ на пару нуклонов).

Спасибо за внимание!