

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

*Е.Е.Забродин, В.Л.Коротких, И.П.Лохтин, С.В.Петрушанко,
А.М.Снигирев, А.С.Чернышов, Г.Х.Эйюбова*

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова



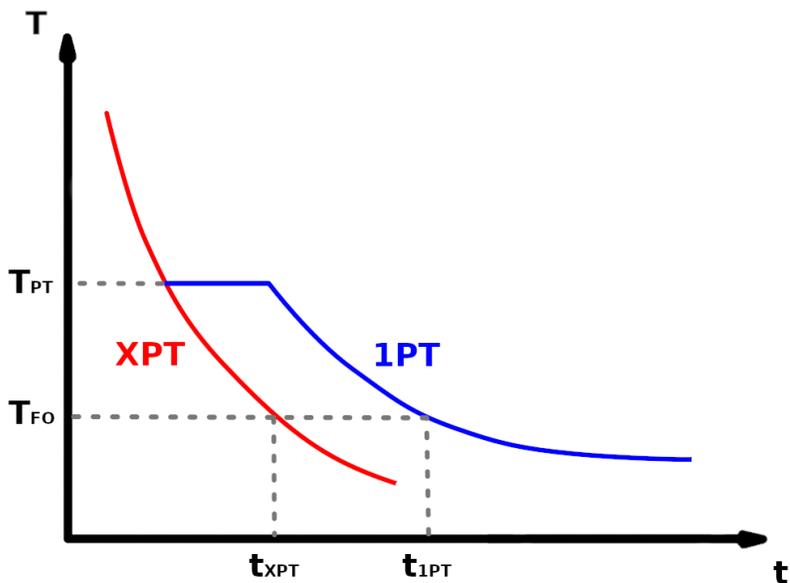
Содержание

- **Функции баланса (ФБ) – общие сведения**
- **Моделирование ФБ при энергиях LHC**
- **Моделирование ФБ при энергиях RHIC/NICA**
- **Выводы**

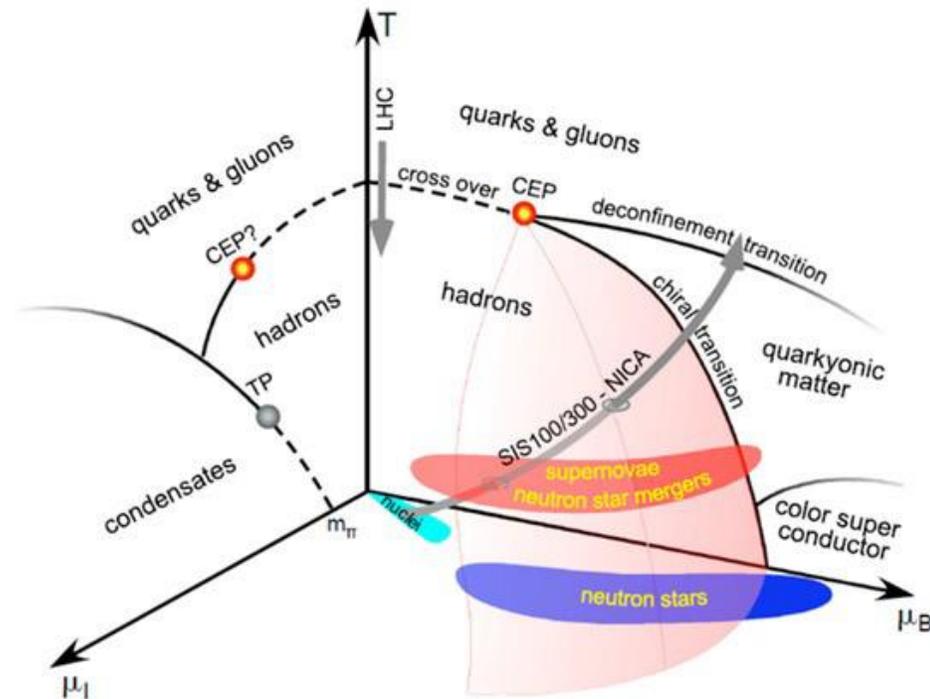
Фундаментальная цель исследований с пучками релятивистских тяжелых ионов – изучение свойств экстремального состояния субъядерной материи, кварк-глюонной плазмы (КГП), образующейся при сверхвысоких плотностях энергии и температурах.

- ❖ 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 наиболее актуальных в современной ядерной физике высоких энергий.



Варьирование энергии столкновений релятивистских тяжелых ионов позволяет исследовать различные области фазовой диаграммы КХД. Ожидается, что при высоких энергиях коллайдеров RHIC и LHC переход от КГП к адронному газу осуществляется за счет фазового перехода (ФП) типа «crossover» (XPT), в то время как при промежуточных энергиях предсказывается наблюдение фазового перехода первого рода (1PT) и критической точки (CEP).



Функция зарядового баланса разноименно заряженных частиц

$$B(\Delta y, \Delta \varphi) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{N^{+-} \langle (\Delta y, \Delta \varphi) \rangle - \langle N^{++}(\Delta y, \Delta \varphi) \rangle}{\langle N^+ \rangle} + \frac{\langle N^{-+}(\Delta y, \Delta \varphi) \rangle - \langle N^{--}(\Delta y, \Delta \varphi) \rangle}{\langle N^- \rangle} \right\},$$

где N^+ — количество пар разноименно заряженных частиц, быстроты y_1 и y_2 которых удовлетворяют условию $|y_1 - y_2| = \Delta y$, для $\Delta \varphi$ аналогично. N^+ и N^- — соответственно множественности положительно и отрицательно заряженных частиц.

Функция баланса (ФБ) — плотность вероятности того, что разноименно заряженные частицы разделены определенными интервалами (псевдо-)быстроты и азимутального угла. ФБ характеризуется бысротной и азимутальными ширинами:

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

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) \longrightarrow раннее разделение заряда
Короткодействующие зарядовые корреляции (узкое распределение) \longrightarrow позднее разделение заряда

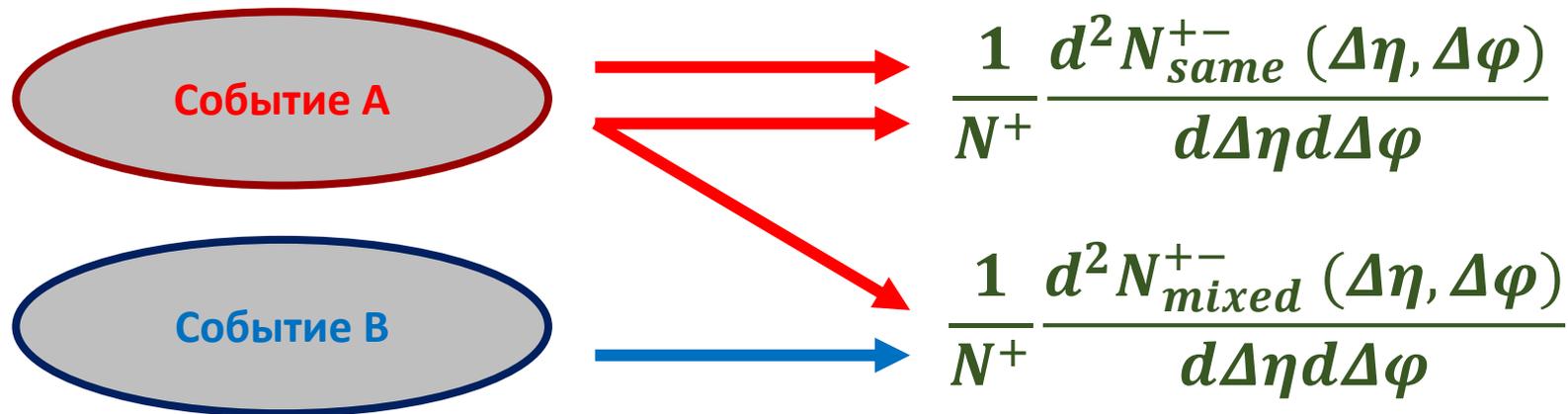
ФБ измерялись в экспериментах с тяжелыми ионами на ускорителях SPS, RHIC и LHC.

Современные теоретические модели плохо описывают ФБ \longrightarrow неучтенные механизмы корреляций?

Расчет и коррекция функций зарядового баланса

$$\frac{P^{+-}}{P^+} = \frac{P^{+-}(\Delta\eta, \Delta\varphi)}{P^+} \longrightarrow \frac{1}{N^+} \frac{d^2 N^{+-}(\Delta\eta, \Delta\varphi)}{d\Delta\eta d\Delta\varphi}$$

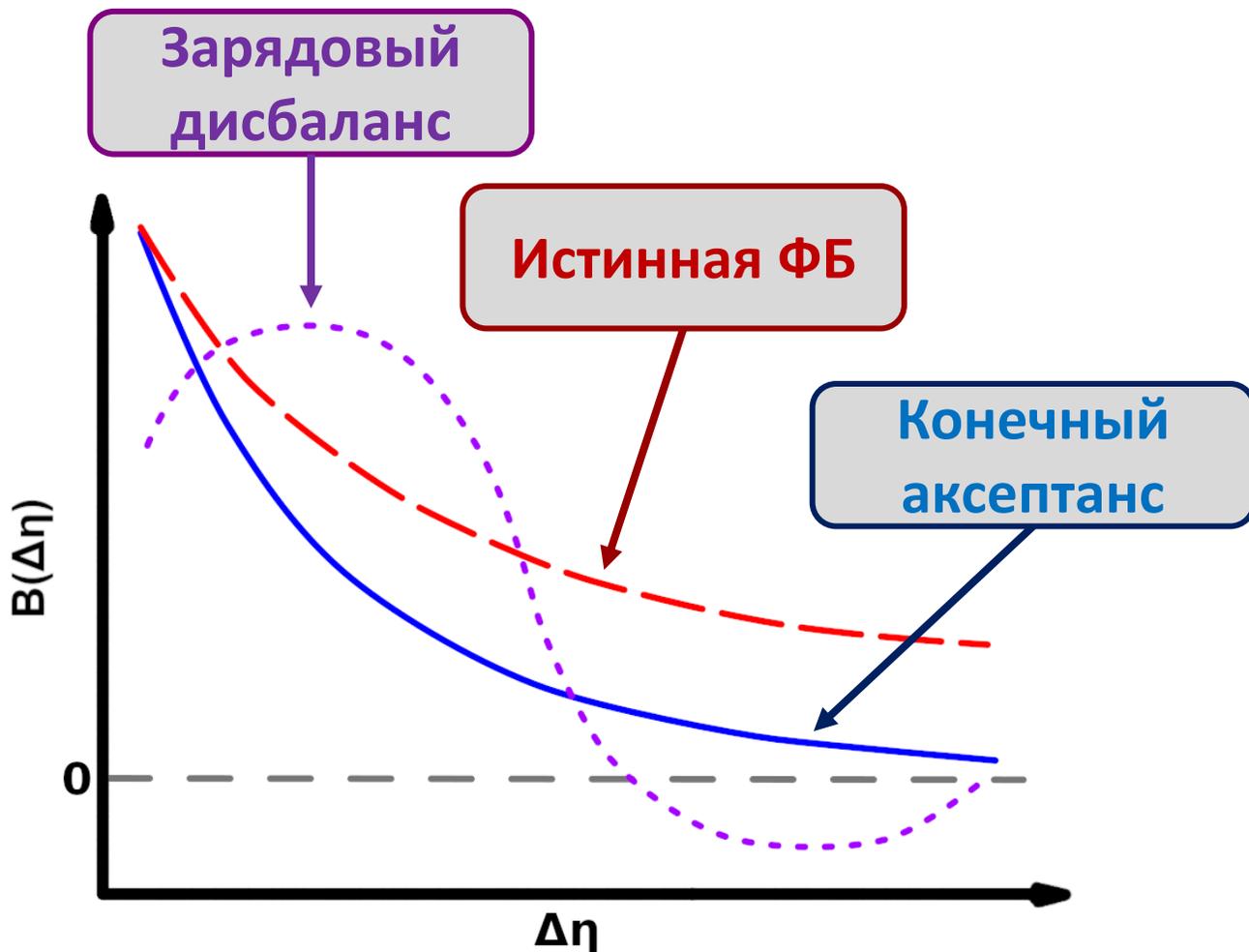
Здесь N^+ — число положительных адронов, $d^2 N^{+-}/d\Delta\eta d\Delta\varphi$ — распределение положительно-отрицательных пар адронов по относительным псевдобыстроте и азимутальному углу.



В случае избытка положительного заряда (NICA/RHIC) для подавления искажения ФБ должны быть скорректированы согласно формуле ниже:

$$\frac{1}{N^+} \frac{d^2 N^{+-}(\Delta\eta, \Delta\varphi)}{d\Delta\eta d\Delta\varphi} = \frac{1}{N^+} \frac{d^2 N_{same}^{+-}(\Delta\eta, \Delta\varphi)}{d\Delta\eta d\Delta\varphi} - \frac{1}{N^{(p)}} \frac{d^2 N_{mixed}^{+-}(\Delta\eta, \Delta\varphi)}{d\Delta\eta d\Delta\varphi}$$

Расчет и коррекция функций зарядового баланса



Для учета влияния конечного углового акцептанса детектора при моделировании или экспериментальном анализе используется метод, описанный в [STAR Coll., Phys. Rev. C 94 (2) 024909 (2016)], в котором поправленная на зарядовый дисбаланс ФБ умножается на весовые коэффициенты:

$$B(\Delta\eta|\infty) = \frac{B(\Delta\eta|\Delta\eta_{max})}{\left(1 - \frac{\Delta\eta}{\Delta\eta_{max}}\right)}$$

В случае азимутальной герметичности детектора коррекция азимутальной ФБ не требуется.

Модель HYDJET++ (HYDroynamics & JETs)

Модель HYDJET++ (<http://lokhtin.web.cern.ch/lokhtin/hydjet++>) — генератор событий для изучения различных характеристик множественного рождения адронов, образующихся в релятивистских столкновениях тяжелых ионов в широком диапазоне энергий [I.P.Lokhtin et al., *Comp. Phys. Com.* **180**, 779 (2009)].

Конечное состояние ядерной реакции в HYDJET++ представляет собой суперпозицию двух независимых компонент:

- ❖ термального адронного состояния (мягкая компонента), основанного на параметризации уравнений релятивистской гидродинамики;
- ❖ многопартонного струйного состояния (жесткая компонента), получаемого модификацией характеристик адронных струй генератора PYTHIA.

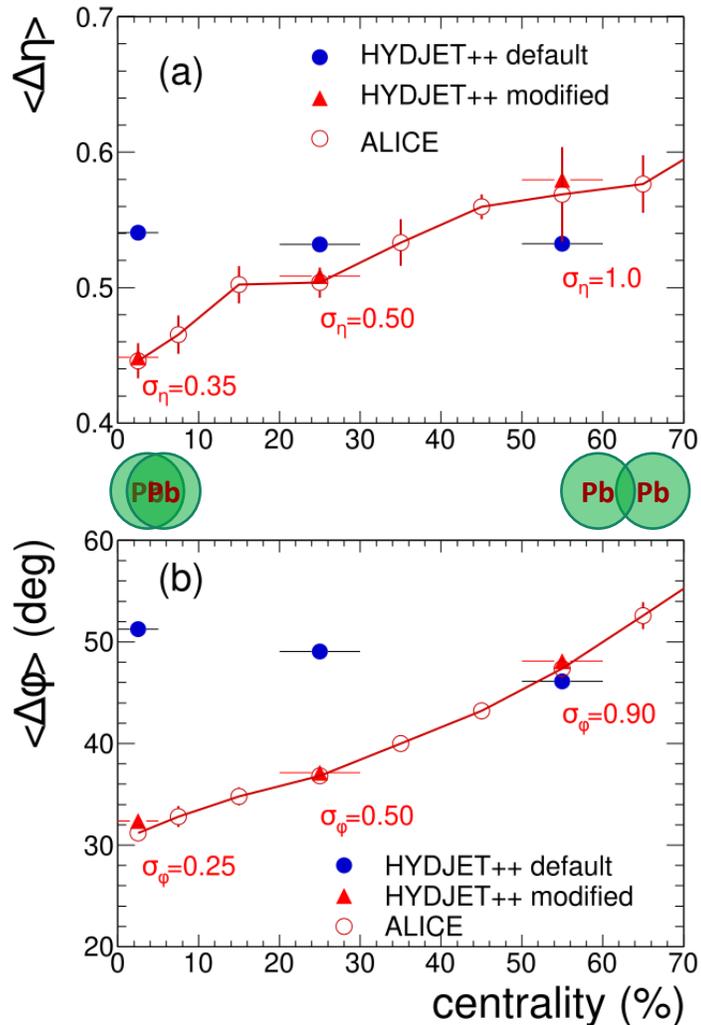
Пакет программ для моделирования мягкой компоненты HYDJET++ написан на объектно-ориентированном языке C++ и использует ряд библиотек программной среды ROOT (<https://root.cern.ch>). Пакет программ для моделирования жесткой компоненты написан на языке FORTRAN. Представленные результаты получены с использованием HYDJET++ версии 2.4.

Введение зарядовых корреляций в статистическую модель

«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 Pb+Pb при энергии LHC 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 (мягкого) рождения прямых заряженных адронов в модели HYDJET++ с сохранением заряда в каждом событии на стадии вымораживания: рождение пар частица-античастица с углами (η_1, φ_1) и (η_2, φ_2) , распределенными по Гауссу со стандартными отклонениями $(\sigma_\eta, \sigma_\varphi)$.

Развитый подход позволил описать данные по ФБ (σ_η и σ_φ увеличиваются с периферийностью столкновений).

Учет зарядового дисбаланса при энергиях RHIC/NICA в модели HYDJET++

Рождение пар частица-античастица с углами (η_1, φ_1) и (η_2, φ_2) , распределенными по Гауссу со стандартными отклонениями $(\sigma_\eta, \sigma_\varphi)$.

и т.д. ...

Заряженные адроны сорта C

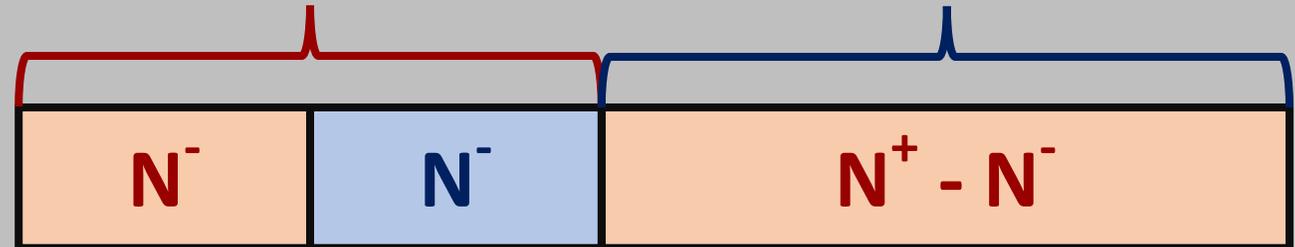
Заряженные адроны сорта B

Заряженные адроны сорта A

Разбиение заряженных прямых адронов внутри одного сорта (пионы, каоны, ...)

«Электрически нейтральная» часть
(модифицируется)

Заряженная часть
(сохраняется)



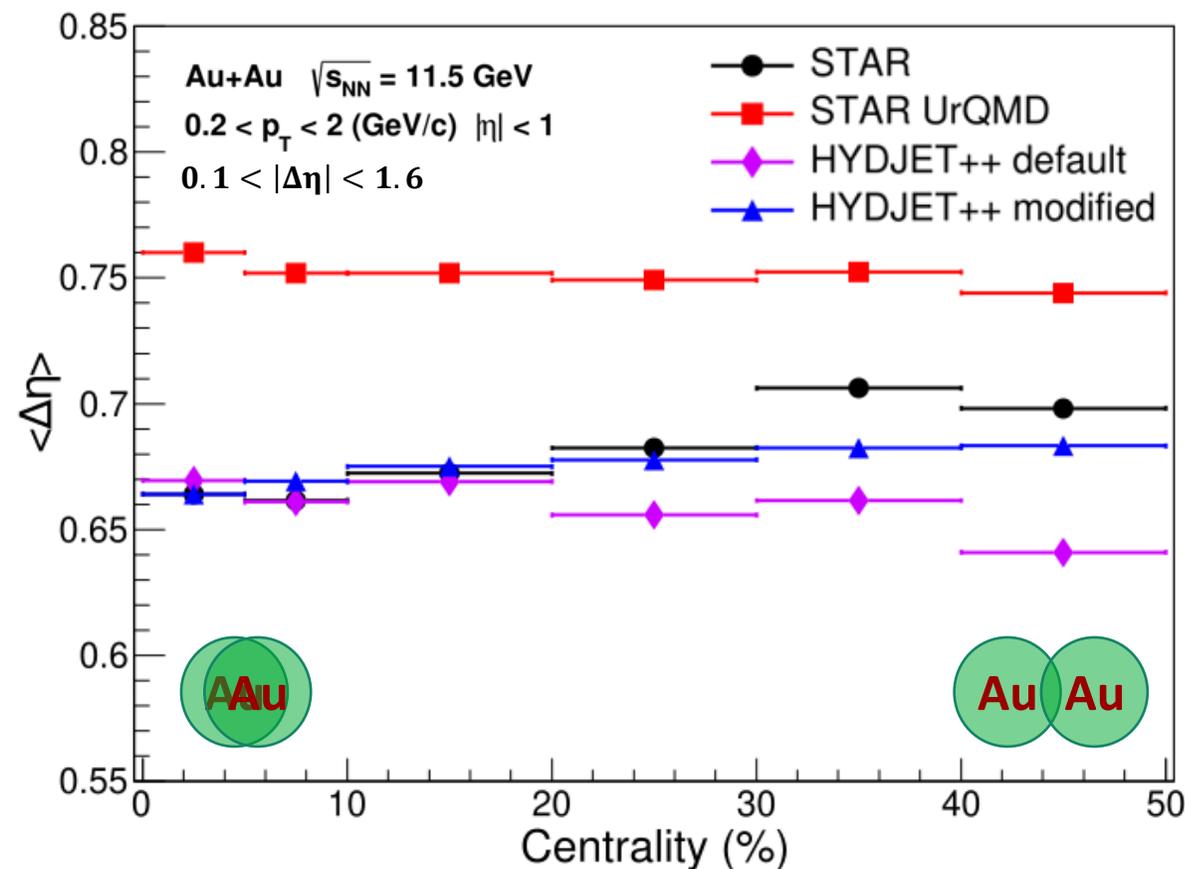
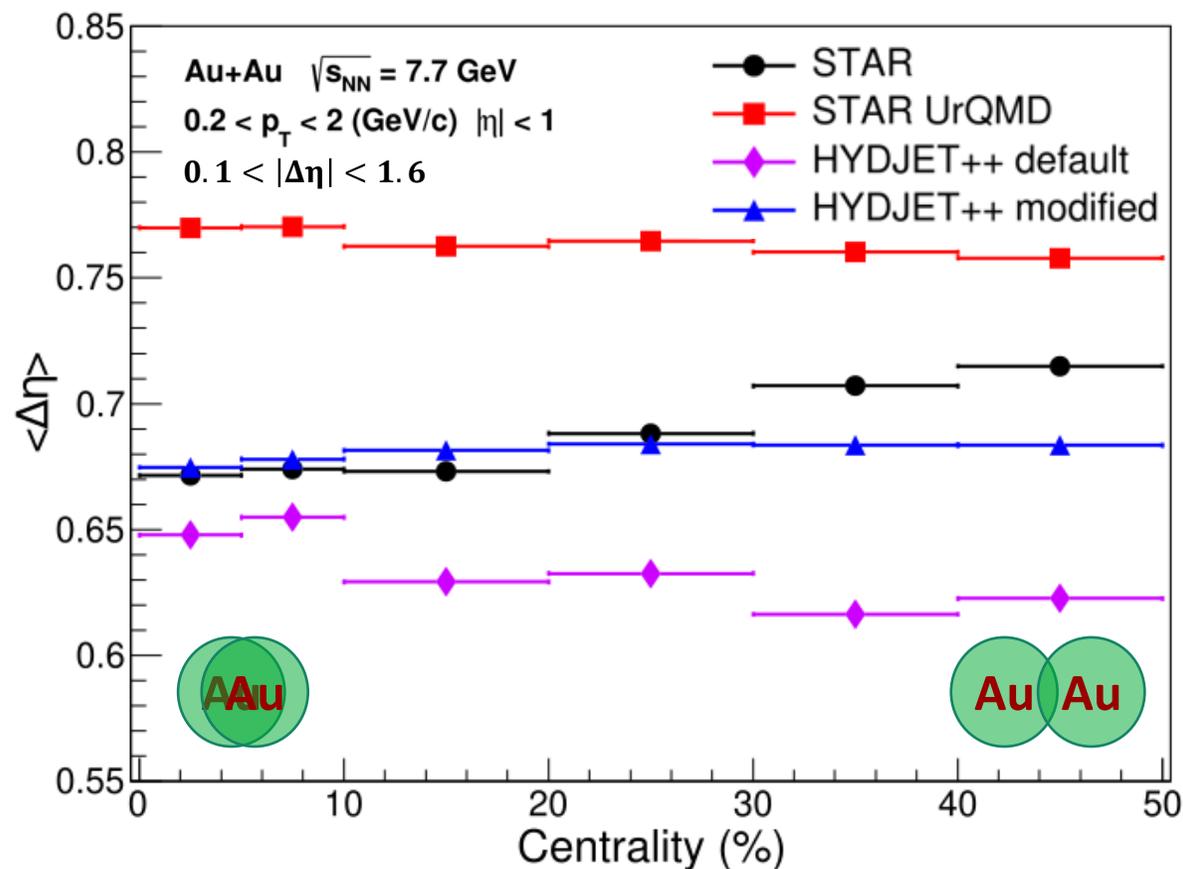
Для учета зарядового дисбаланса, имеющего место при промежуточных энергиях NICA, предложенная модификация применяется только к электрически нейтральной части прямых заряженных адронов внутри каждого сорта адронов по отдельности. Данная процедура была реализована в модели HYDJET++.

Настройка модели HYDJET++ для энергий RHIC/NICA по данным STAR

		π^+/π^-	K^+/K^-	p/\bar{p}
7.7 ГэВ	RHIC STAR	0.93 ± 0.12	2.70 ± 0.31	141 ± 24
	HYDJET++	0.89	2.70	130
	$\mu_{I,S,B}$ (МэВ)	6	100	429
11.5 ГэВ	RHIC STAR	0.95 ± 0.14	2.03 ± 0.28	29.3 ± 5.3
	HYDJET++	0.93	1.99	28.2
	$\mu_{I,S,B}$ (МэВ)	7	72	313

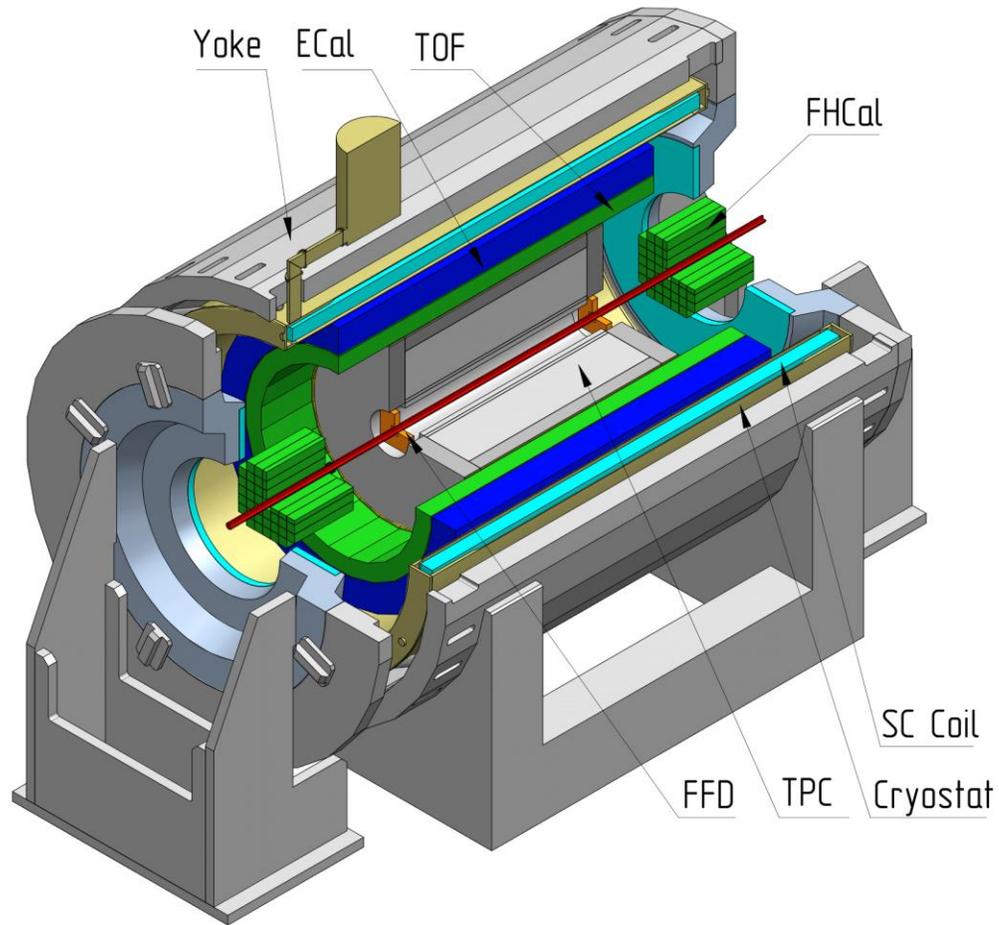
Отношения множественностей разноименно заряженных адронов в центральных соударениях Au+Au при энергиях RHIC и значения химических потенциалов (μ_I – изопсиновый, μ_S – странный, μ_B – барионный) в модели HYDJET++. Экспериментальные выходы достаточно хорошо описываются моделью при ненулевых химических потенциалах.

Функции баланса при энергиях 7.7 и 11.5 ГэВ в модели HYDJET++



UrQMD и стандартная версия HYDJET++ не воспроизводят экспериментальные зависимости быстрой ширины ФБ от центральности. Модификация HYDJET++ позволяет существенно улучшить описание данных (хорошо воспроизводит ширины до 30% центральности, но имеет место некоторая недооценка данных для более периферических соударений).

Экспериментальный комплекс MPD на коллайдере NICA



$|\eta| < 1.6$ — Время-проекционная камера
(Time Projection Chamber, TPC)

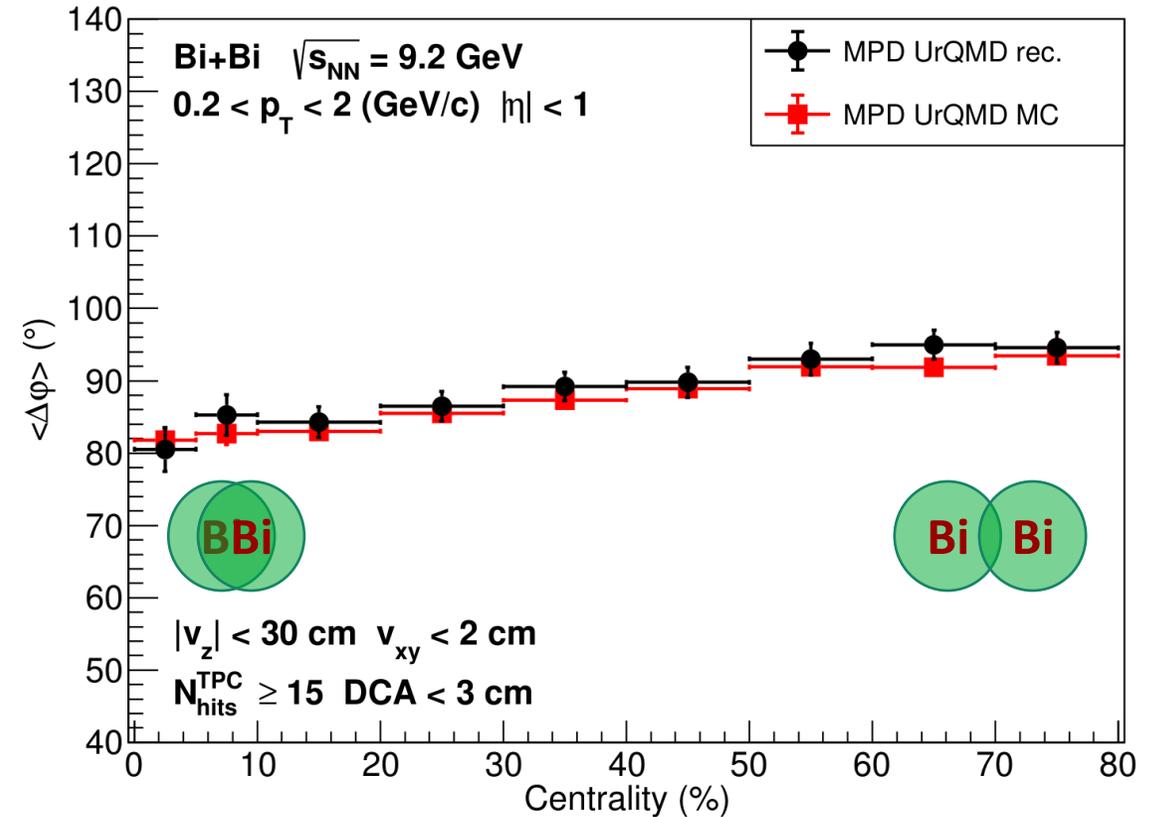
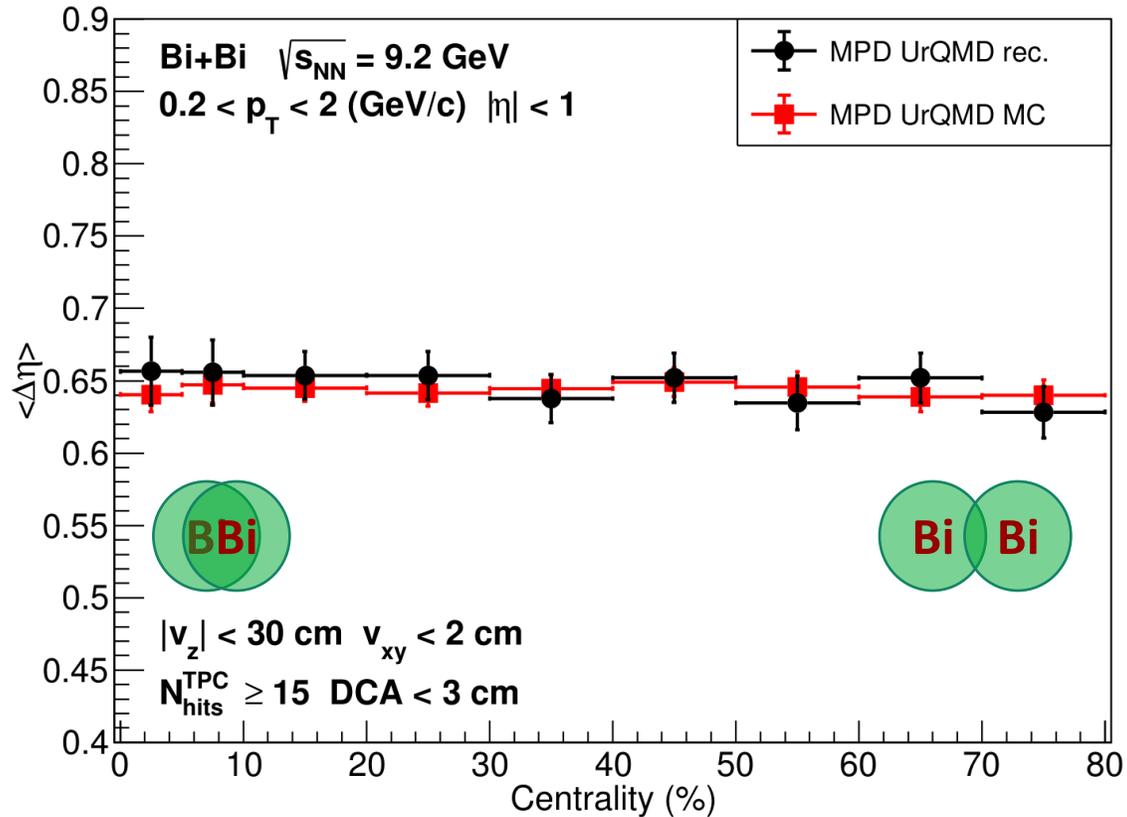
$|\eta| < 1.4$ — Время-пролетный детектор
(Time-of-Flight sensor, TOF)

$|\eta| < 1.4$ — Электромагнитный калориметр
(Electromagnetic Calorimeter, ECal)

$2.9 < |\eta| < 3.3$ — Детектор передней области быстрой
(Fast Forward Detector, FFD)

$2.0 < |\eta| < 5.0$ — Передний адронный калориметр
(Forward Hadronic Calorimeter, FHCAL)

Реконструкция ФБ в эксперименте MPD/NICA (инклюзивные адроны)



MPD Cross-PWG Meeting, 13 июня 2023 г.

Восстановленные в условиях эксперимента MPD ширины функций зарядового баланса близки к генераторным ширинам в модели UrQMD.

Выводы

- ✓ Предложена и разработана процедура введения зарядовых корреляций прямых адронов в модель HYDJET++ для «электрически нейтральных» систем (энергии LHC), учитывающая поособьитное сохранение электрического заряда. **Данная процедура позволила воспроизвести экспериментально наблюдаемые зависимости быстрой и азимутальной ширин ФБ от центральности соударений Pb+Pb при энергии LHC 2.76 ТэВ на пару нуклонов.**
- ✓ Проведено обобщение процедуры учета зарядовых корреляций прямых адронов для «электрически нейтральных» систем на случай систем с дисбалансом заряда (NICA и RHIC). **Введение такой процедуры в модель HYDJET++ одновременно с учетом конечных значений изоспинового, странного и барионного химических потенциалов позволило воспроизвести экспериментально наблюдаемые зависимости быстрой ширин ФБ от центральности соударений Au+Au 7.7 и 11.5 ГэВ.**
- ✓ Таким образом, предложенный подход для модификации статистического рождения адронов позволяет описать зарядовые корреляции адронов в широком диапазоне энергий (от LHC до NICA).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 24-22-00011

Спасибо за внимание!

Дополнительные слайды

Параметры модели HYDJET++ при энергиях NICA и LHC

Параметр	Значение			Размерность
$\sqrt{s_{NN}}$	7.7	11.5	2760	ГэВ
A_w	197	197	208	
T^{ch}	155	162	165	МэВ
T^{th}	115	115	105	МэВ
μ_B	429	313	0	МэВ
μ_S	100	72	0	МэВ
μ_I	6	7	0	МэВ
τ	6.8	7.2	12.2	фм/с
σ_τ	1.5	1.5	3.5	фм/с
R	7.8	8.6	13.45	фм
Y_L^{max}	1.2	1.2	4.5	
U^{max}	0.74	0.74	1.265	

Здесь $\sqrt{s_{NN}}$ – энергия на пару нуклонов в системе центра масс, A_w – атомный вес (номер) ядра, T^{ch} – температура химического вымораживания, T^{th} – температура термального вымораживания, μ_B – барионный химический потенциал на единицу заряда, μ_S – химический потенциал “странности” на единицу заряда, μ_I – изоспиновый химический потенциал на единицу заряда, τ – собственное время при термальном вымораживании в центральных соударениях, σ_τ – время испускания при термальном вымораживании в центральных соударениях, R – максимальный поперечный радиус при термальном вымораживании в центральных соударениях, Y_L^{max} – максимальная быстрота продольного потока при термальном вымораживании, U^{max} – максимальная быстрота поперечного потока при термальном вымораживании в центральных соударениях.

Параметры модели HYDJET++ при энергиях NICA

Центральность, %	σ_η	
	7.7 ГэВ	11.5 ГэВ
0-5	1.25	1.00
5-10	1.35	1.08
10-20	1.47	1.17
20-30	1.62	1.30
30-40	1.80	1.44
40-50	2.00	1.60

Здесь σ_η – дисперсия распределения сгенерированных пар-античастиц в процедуре учета зарядовых корреляций.

Настройка модели HYDJET++ для энергий NICA

	$v_{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ 0-5% $0.2 < p_T < 2$ (ГэВ/с) $ y < 0.1$		
	RHIC STAR	Станд. HYDJET++	Мод. HYDJET++
π^+	93.4	90.8	90.5
π^-	100	102	101
K^+	20.8	18.5	18.4
K^-	7.7	6.8	6.8
p	54.9	71.2	71.3
\bar{p}	0.39	0.53	0.55
$\pi+K+p$	277	289	289

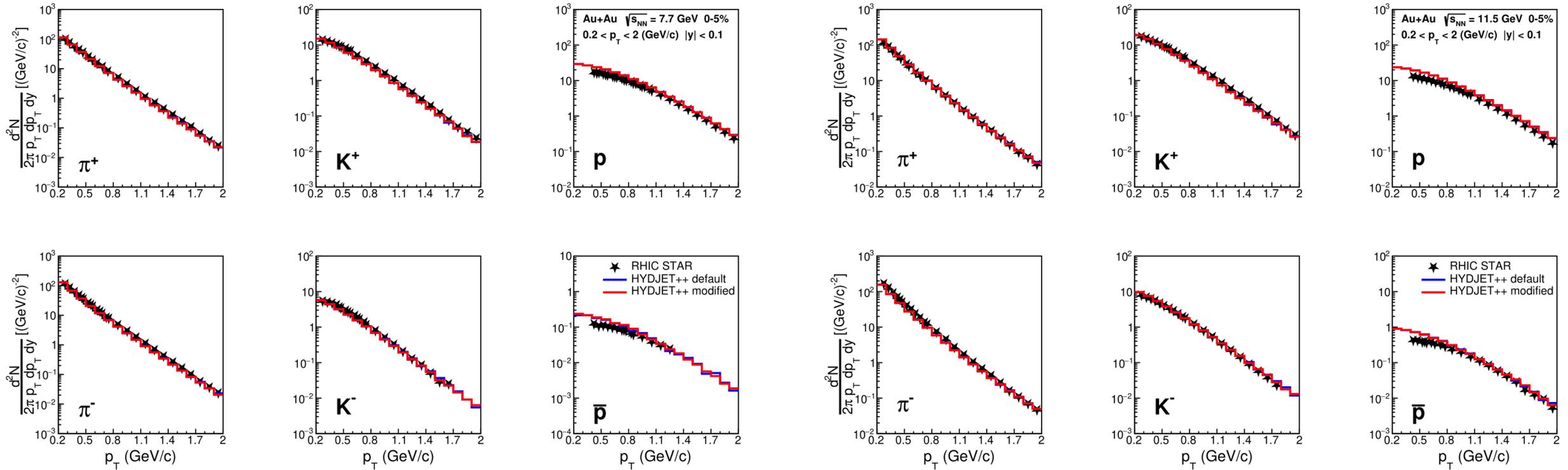
	$v_{s_{NN}} = 11.5$ ГэВ 0-5% $0.2 < p_T < 2$ (ГэВ/с) $ y < 0.1$		
	RHIC STAR	Станд. HYDJET++	Мод. HYDJET++
π^+	124	118	117
π^-	130	127	126
K^+	25.0	23.4	23.4
K^-	12.3	11.7	11.7
p	44.0	57.5	57.5
\bar{p}	1.5	2.1	2.0
$\pi+K+p$	337	339	338

Модельные и экспериментальные выходы идентифицированных заряженных адронов достаточно неплохо воспроизводятся стандартной и модифицированной версиями модели HYDJET++.

Настройка модели HYDJET++ для энергий NICA

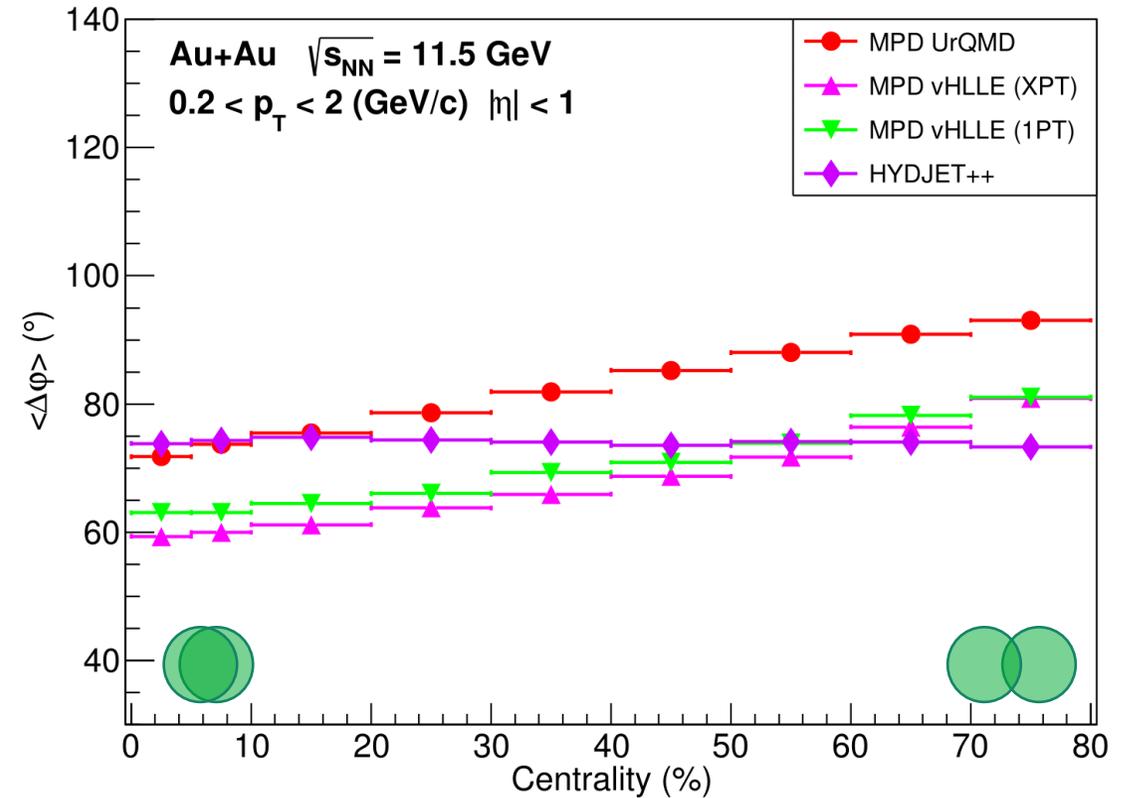
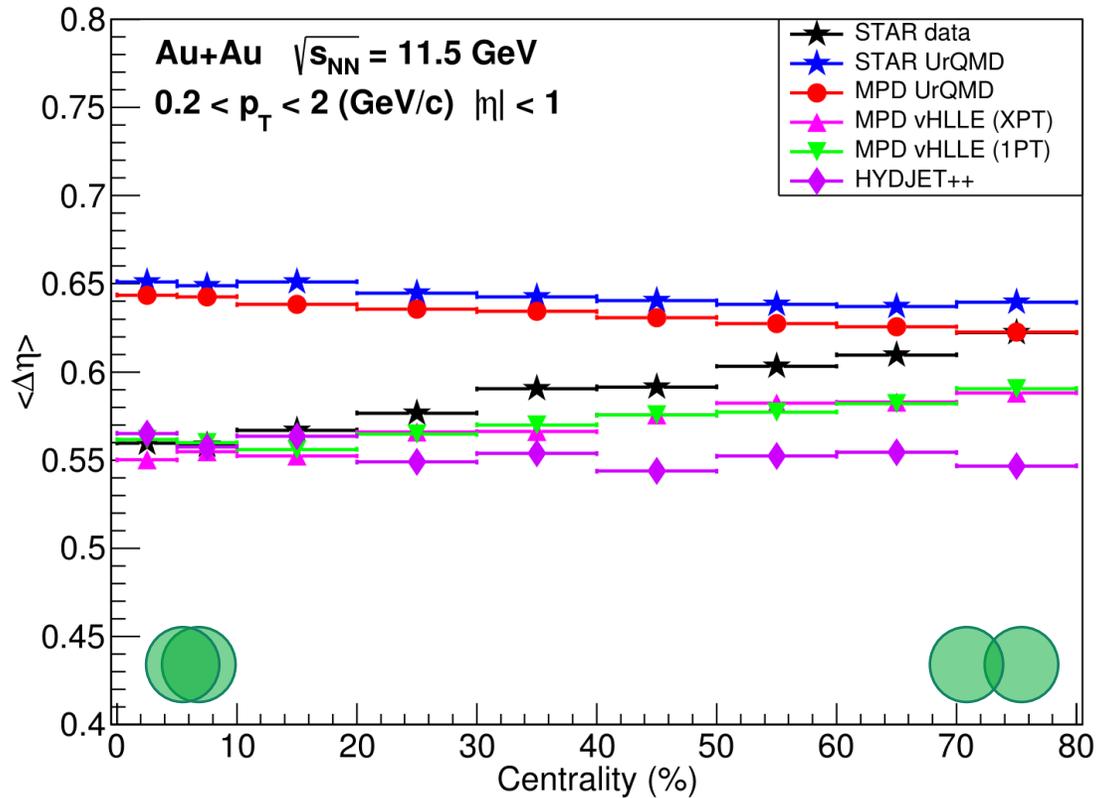
$\sqrt{s_{NN}} = 7.7 \text{ ГэВ}$

$\sqrt{s_{NN}} = 11.5 \text{ ГэВ}$



Спектры идентифицированных адронов в стандартной и модифицированной версиях модели HYDJET++ хорошо описывают экспериментальные распределения (несколько хуже для протонов, но достаточно удовлетворительно для заряженных пионов и каонов).

Функция баланса разноименно заряженных адронов (RHIC/NICA)



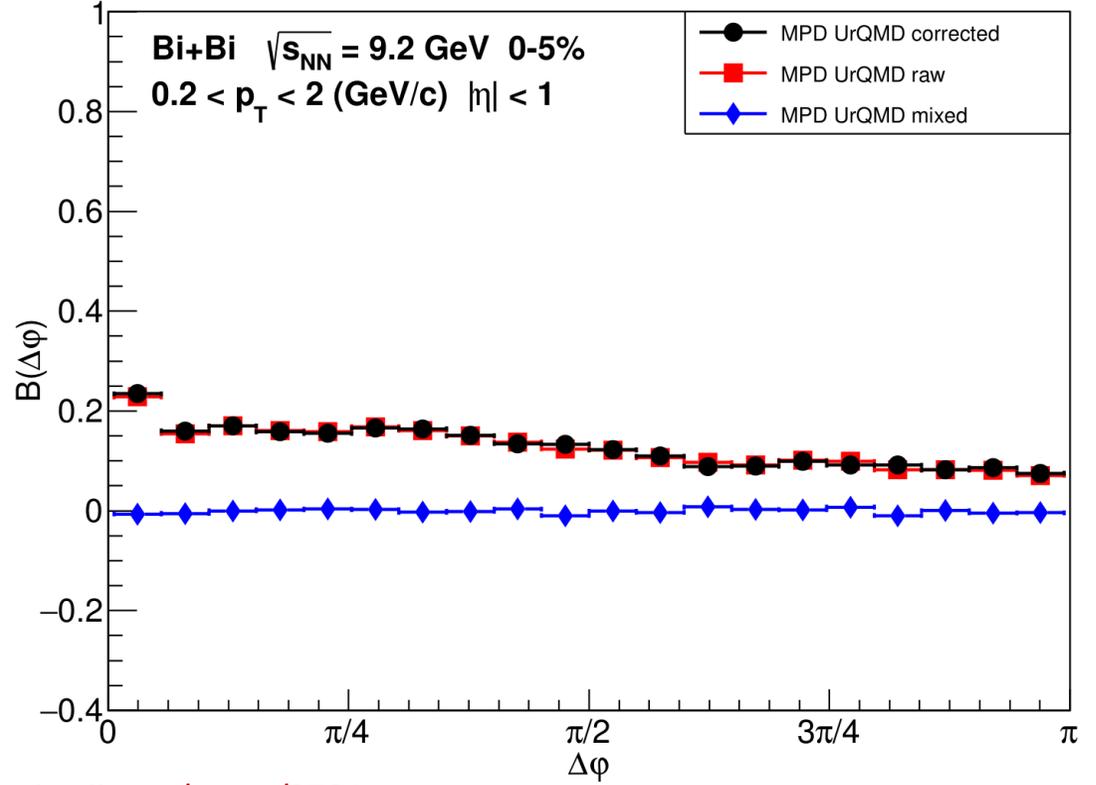
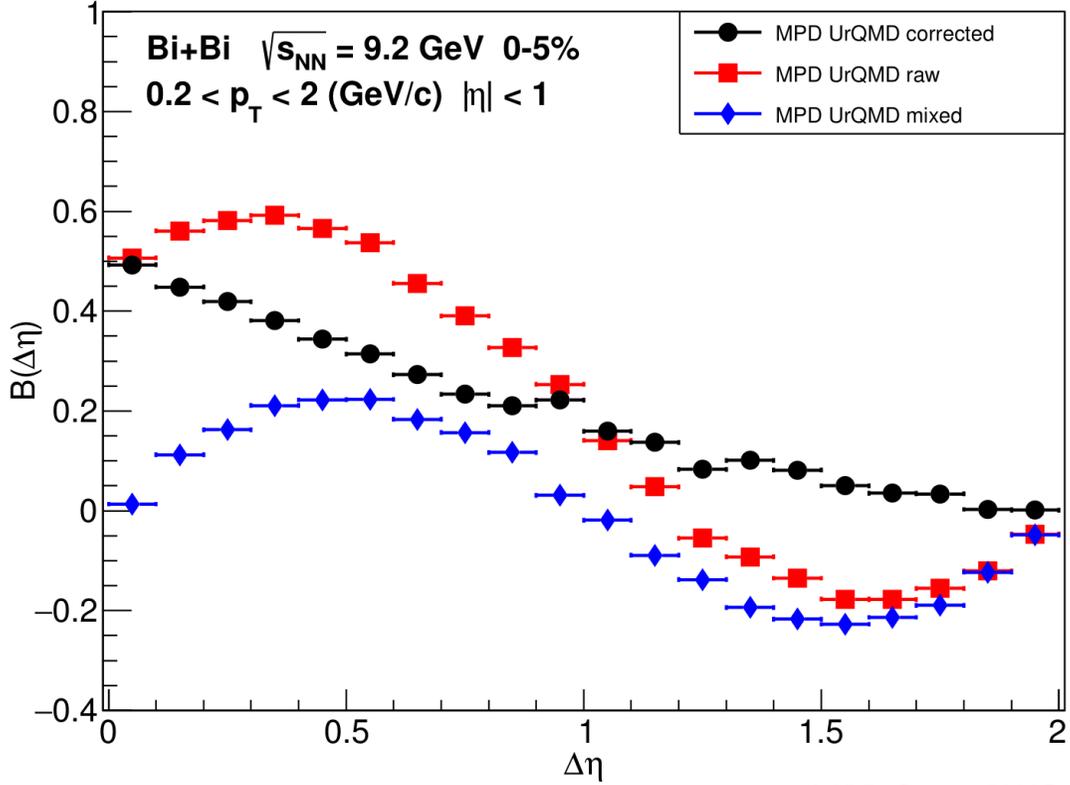
Проведено модельное исследование ФБ с различными генераторами событий для соударений Au+Au при энергиях 7.7 и 11.5 ГэВ на пару нуклонов (*MPD Cross-PWG <https://indico.jinr.ru/event/3784>*):

❑ модели vHLL 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.

Восстановление функций зарядового баланса в условиях эксперимента MPD

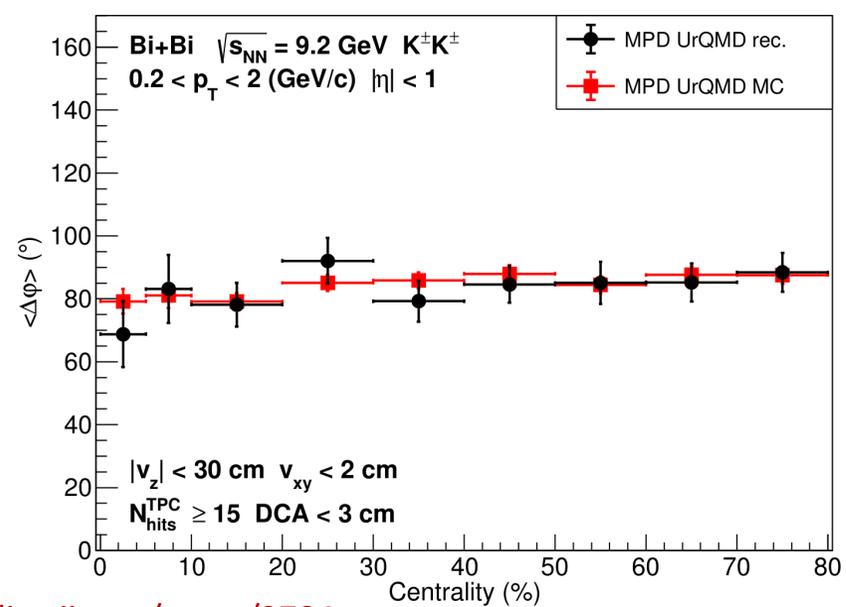
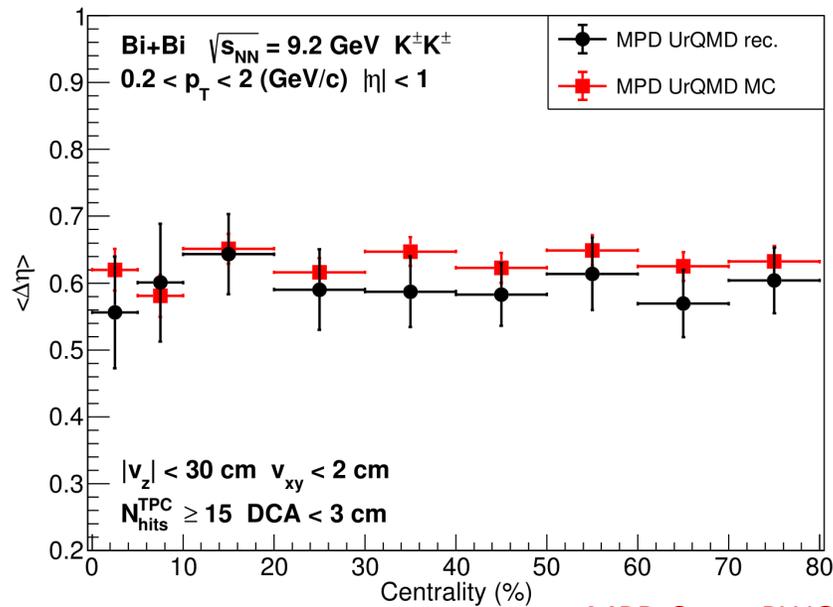
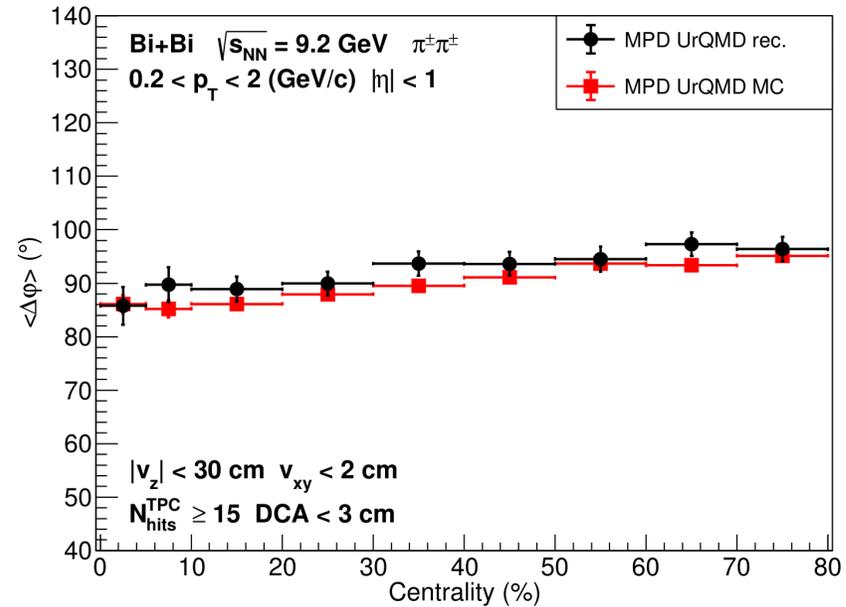
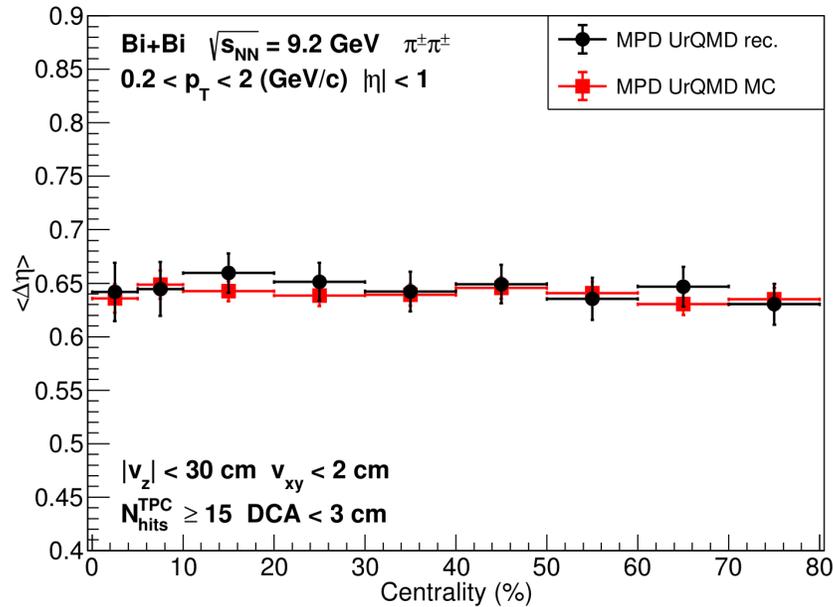


MPD Cross-PWG <https://indico.jinr.ru/event/3784>

Процедура коррекции генераторных функций зарядового баланса в модели UrQMD в соударениях Bi+Bi при энергии NICA $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ. Синие ромбы — нескорректированная функция зарядового баланса, черные точки — скорректированная функция, красные квадраты — функция баланса, построенная из смешанных событий.

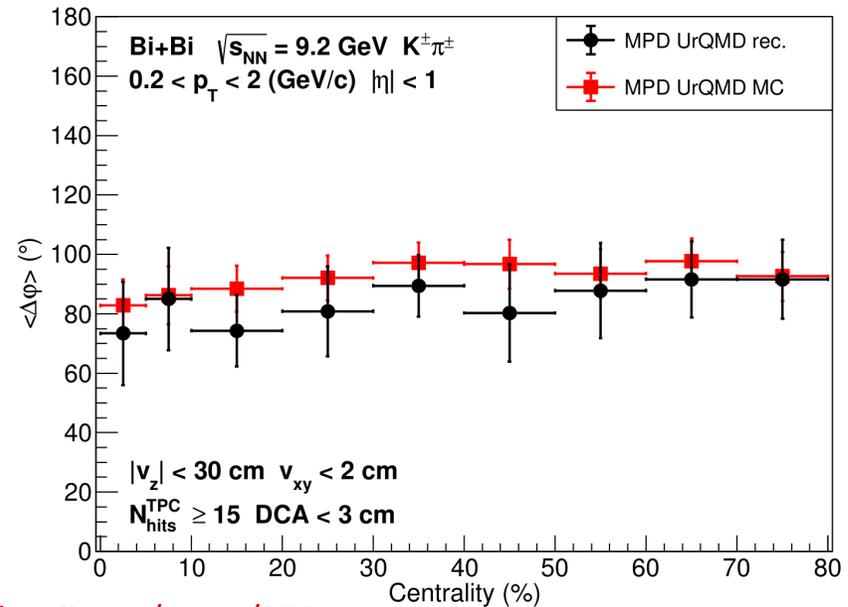
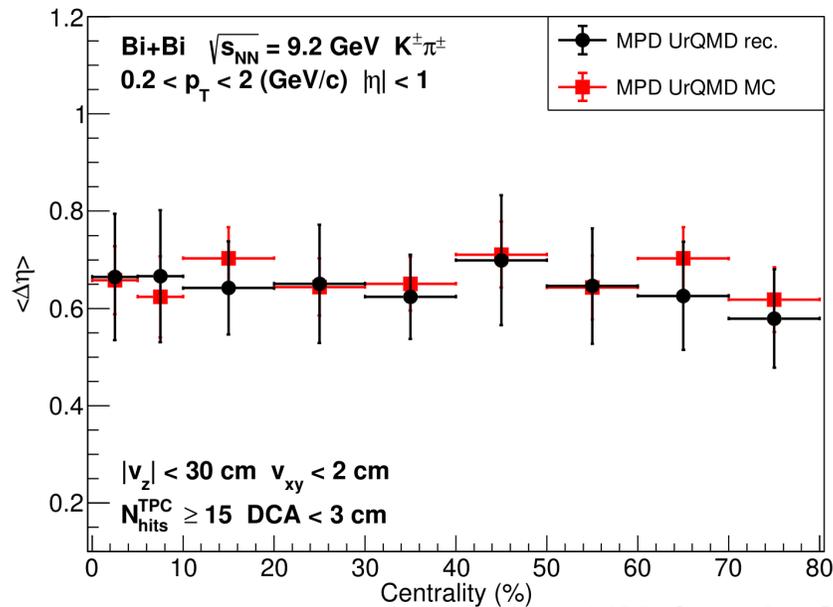
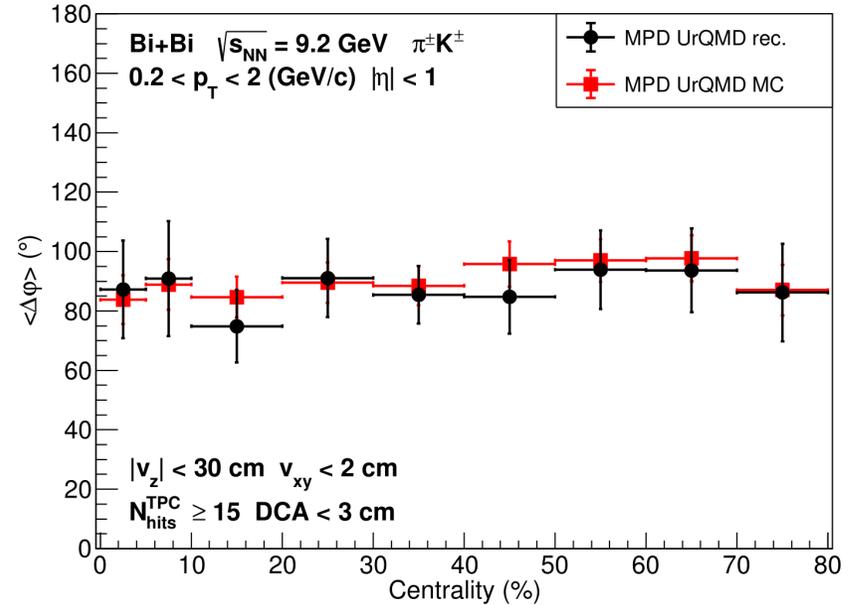
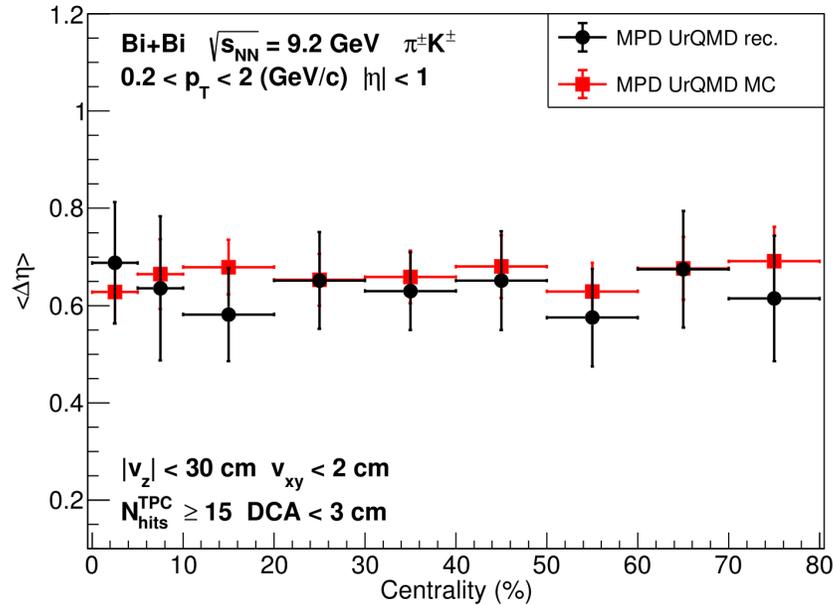
Влияние несбалансированного положительного заряда (от протонов) при энергии NICA искажает функцию зарядового баланса. Для подавления этого эффекта из искаженной функции баланса вычитается функция баланса, построенная из смешанных событий.

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



MPD Cross-PWG <https://indico.jinr.ru/event/3784>

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



MPD Cross-PWG <https://indico.jinr.ru/event/3784>