

Зарядовые корреляции и флуктуации адронов в релятивистских соударениях ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

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.

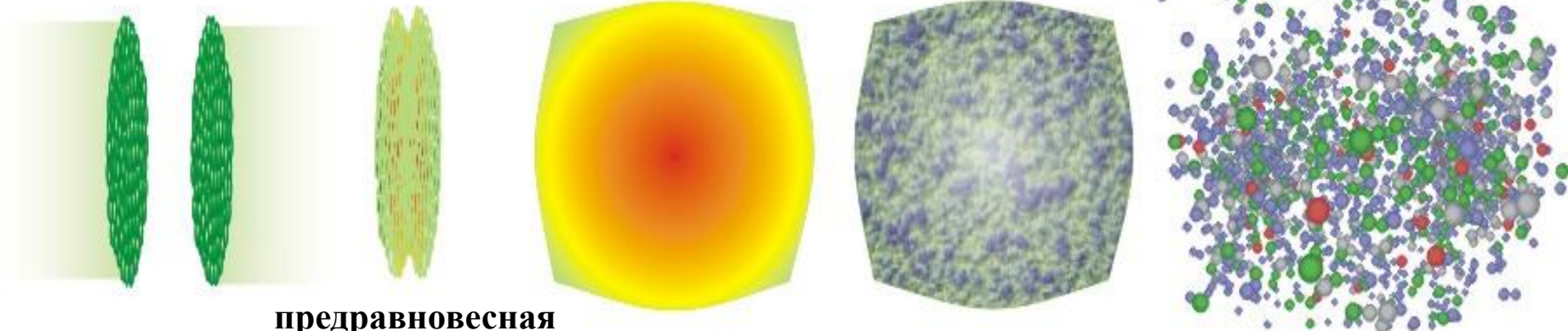
начальное состояние

гидродинамика

адронная стадия и
“вымораживание”

предравновесная
стадия

адронизация



Функция баланса разно-заряженных частиц

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

N^{+-} и N^{++}/N^{--} - количество пар разноименно и одноименно заряженных частиц соответственно с быстротами y_1 и y_2 , $|y_1 - y_2| = \Delta y$ (для $\Delta\varphi$ - аналогично);

N^+ и N^- - 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 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.

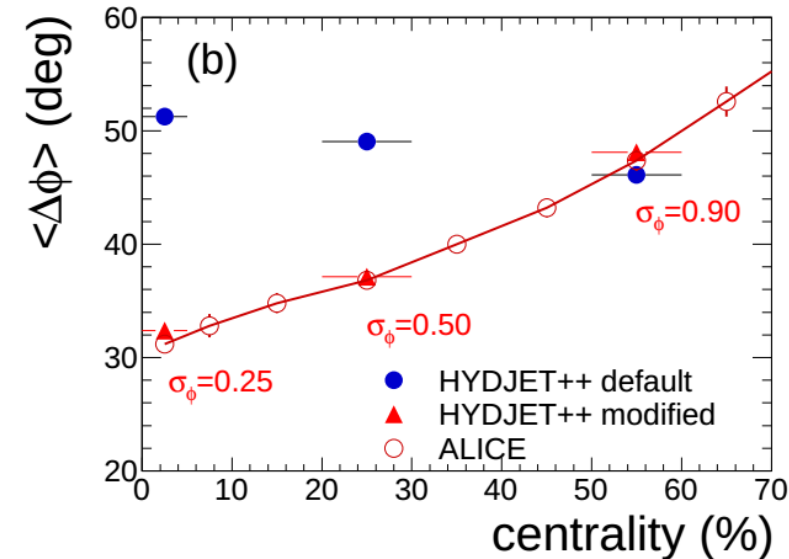
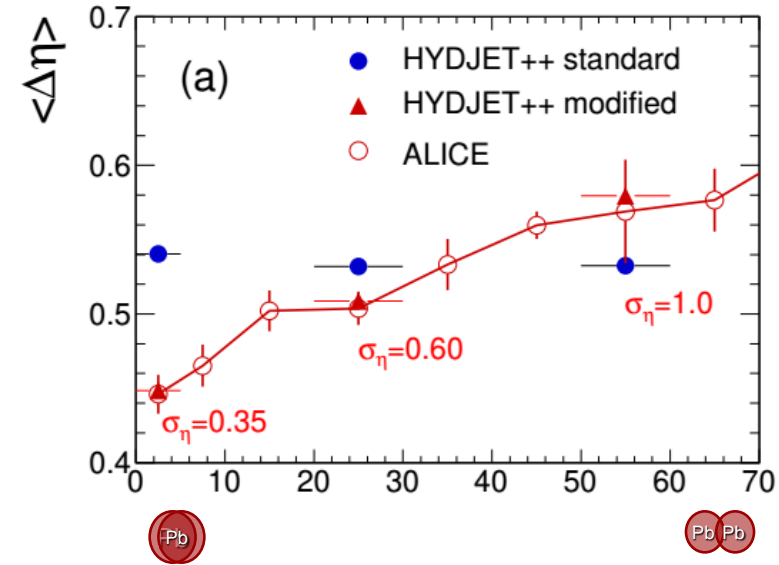
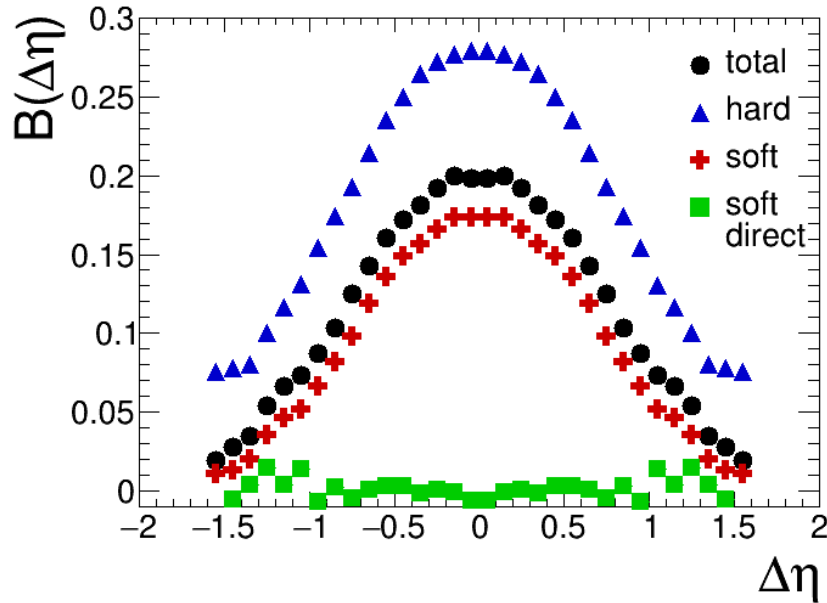
Теоретические модели не описывают ФБ → неучтенные механизмы зарядовых корреляций?

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).

Учет зарядового дисбаланса (RHIC, NICA) в модели HYDJET++

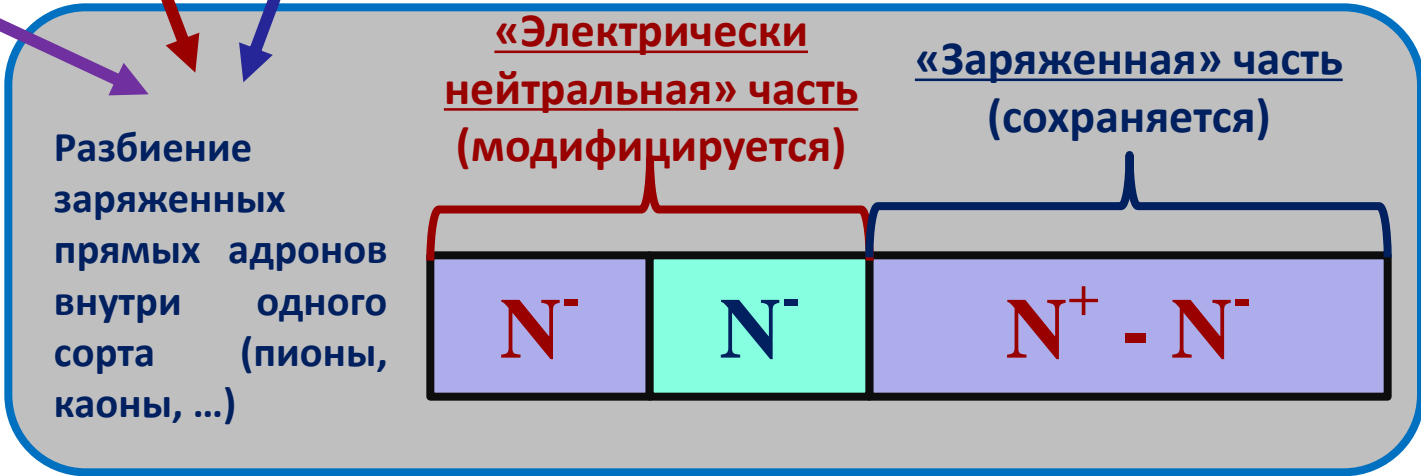
Рождение пар частица-античастица с углами (η_1, φ_1) и (η_2, φ_2) , распределенными по Гауссу со стандартными отклонениями $(\sigma_\eta, \sigma_\varphi)$.

и т.д. ...

Заряженные адроны сорта C

Заряженные адроны сорта B

Заряженные адроны сорта A

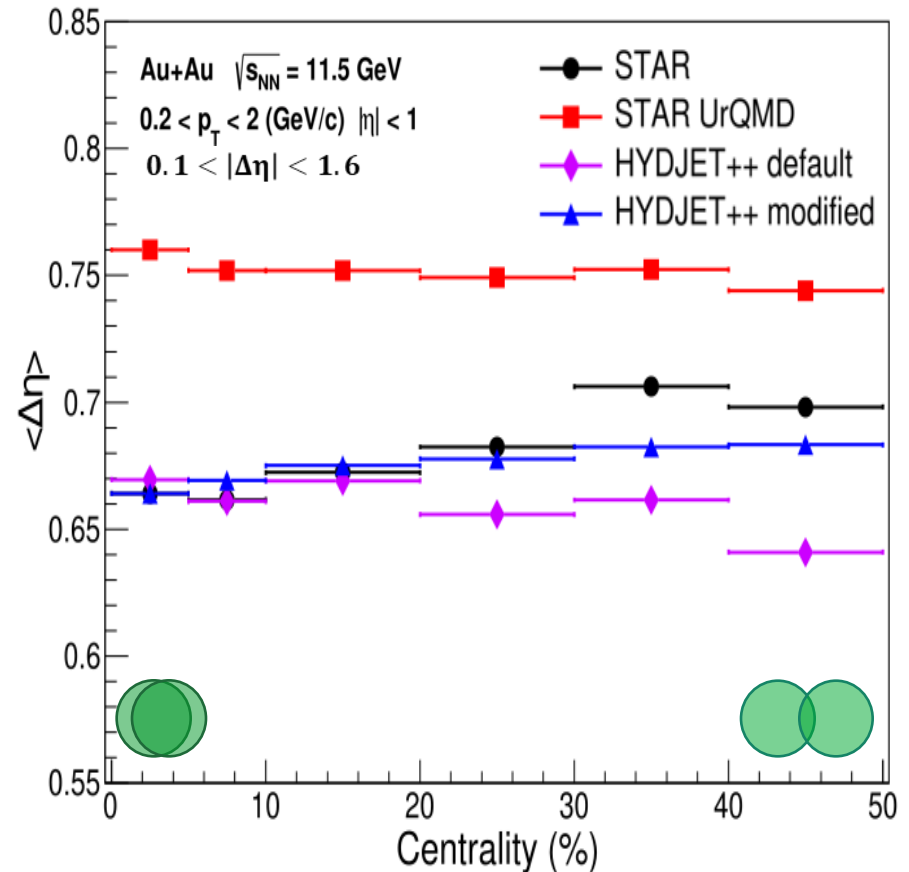
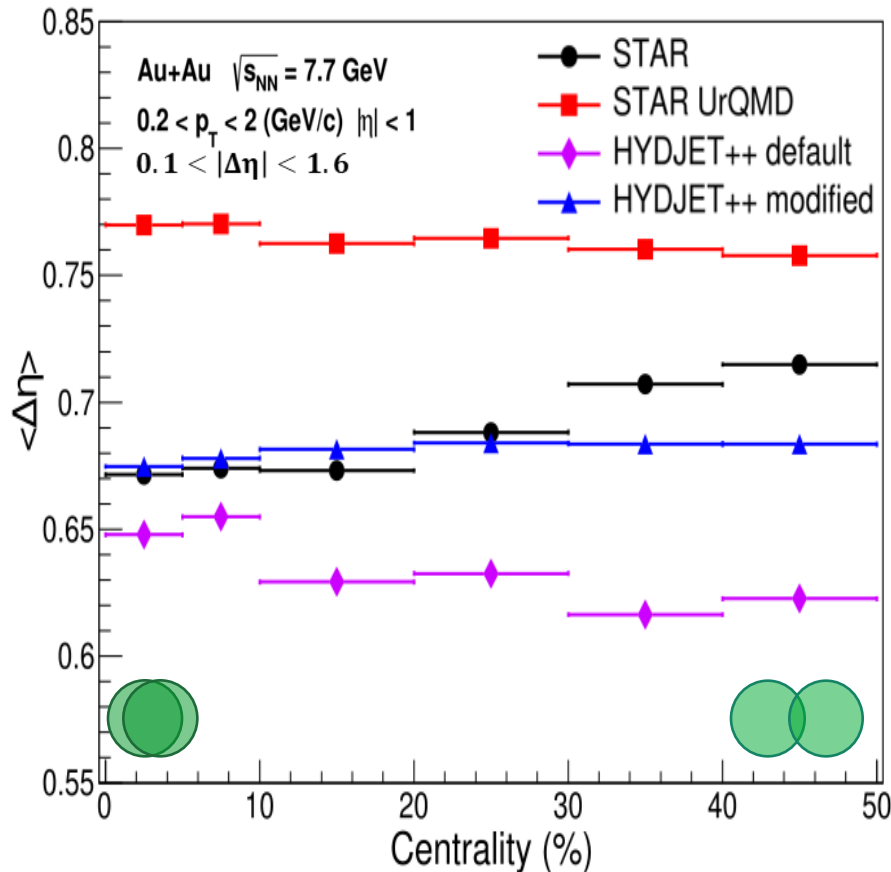


Для учета зарядового дисбаланса, имеющего место при промежуточных энергиях RHIC/NICA, предложенная модификация применяется только к электрически нейтральной части прямых заряженных адронов внутри каждого сорта адронов по отдельности. Данная процедура была реализована в модели HYDJET++.

Функции баланса при энергиях 7.7 и 11.5 ГэВ

“Моделирование зарядовых корреляций адронов при энергиях в соударениях тяжелых ионов при энергиях NICA”

Е.Е.Забродин, В.Л.Коротких, И.П.Лохтин, С.В.Петрушанко, А.М.Снигирев, А.С.Чернышов, Г.Х.Эйюбова, ЖЭТФ 166 (2024) 340



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).

Флуктуации суммарного электрического заряда частиц

$$\nu_{dyn}[+, -] = \frac{\langle N_+(N_+ - 1) \rangle}{\langle N_+ \rangle^2} + \frac{\langle N_-(N_- - 1) \rangle}{\langle N_- \rangle^2} - 2 \frac{\langle N_+ N_- \rangle}{\langle N_+ \rangle \langle N_- \rangle}$$

Флуктуации заряда используются для поиска сигналов КГП → флуктуации заряда в КГП меньше, чем для адронного газа?

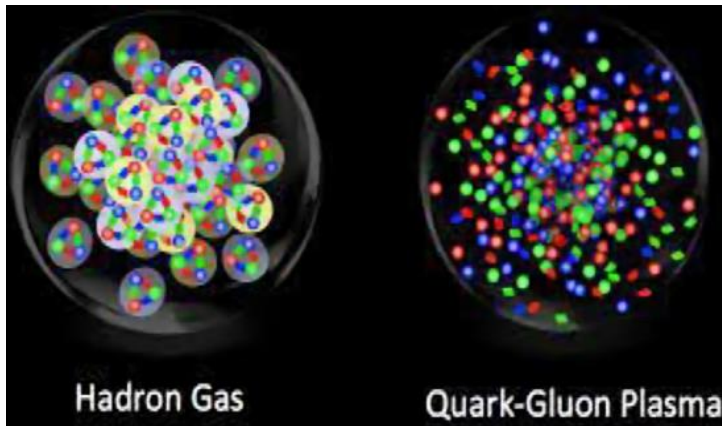
Связь переменной ν с величинами D и Σ (величины, независящие от объема и его флуктуаций):

$$Q = N_+ - N_- \quad D = 4 \frac{\langle (\delta Q)^2 \rangle}{\langle N_{ch} \rangle} = \langle N_{ch} \rangle \langle \nu_{+-, dyn} \rangle + 4$$

$$\Sigma[N_+, N_-] - 1 = \frac{\nu_{dyn}[+, -]}{\frac{1}{\langle N_+ \rangle} + \frac{1}{\langle N_- \rangle}}$$

при $\langle N_+ \rangle \approx \langle N_- \rangle$

Флуктуации заряда пропорциональны q^2



$$q^2=1$$

$$q^2=1/9, 4/9$$

$$D = \begin{cases} 4, \text{HG} & \text{Адронный газ} \\ 3, \text{HRG} & \text{Адронный газ с резонансами} \\ 1 - 1.5, \text{QGP} & \text{КГП} \end{cases}$$

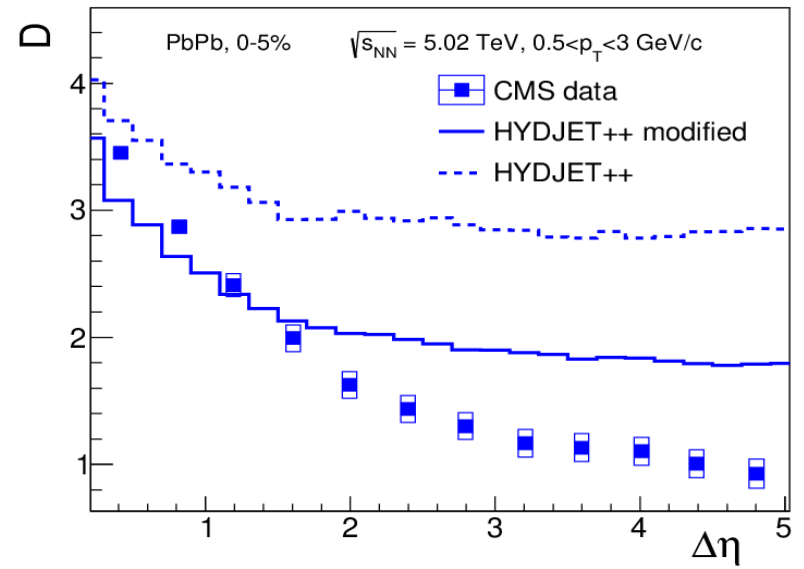
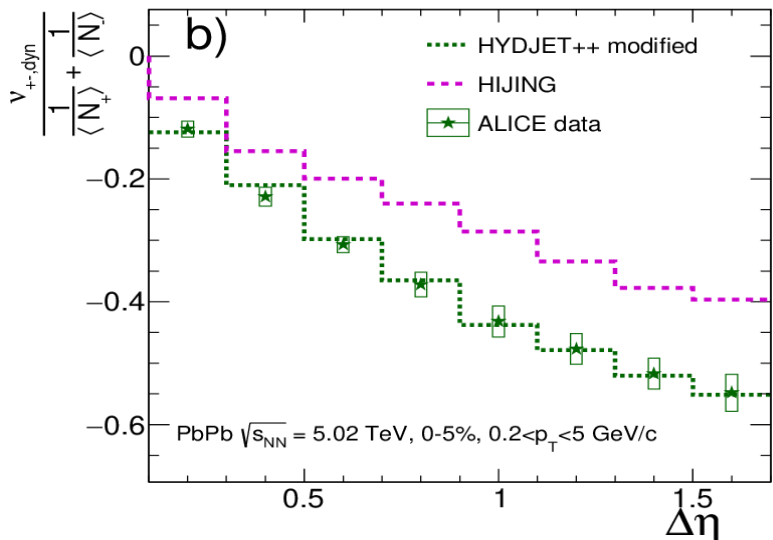
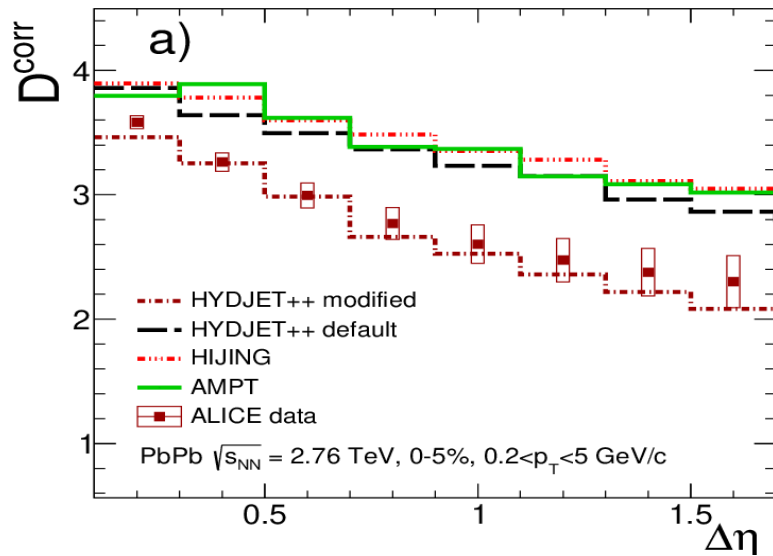
S. Jeon and V. Koch, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 2076

Флуктуации электрического заряда при энергиях ЛHC

“Modeling net-charge fluctuations in heavy-ion collisions at the LHC”

G.O. Ambaryan, A.S. Chernyshov, G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh, I.P. Lokhtin, S.V. Petrushanko, A.M. Snigirev, E.E. Zabrodin,
Chinese Physics C 49 (2025) 014109

Зависимость флуктуаций заряда от фазового окна $|\Delta\eta|$



HIJING, AMPT и стандартная версия HYDJET++ завышают экспериментальные зависимости флуктуаций электрического заряда. Модификация HYDJET++ позволяет описать данные в фазовом окне порядка $|\Delta\eta| < 1.5$.

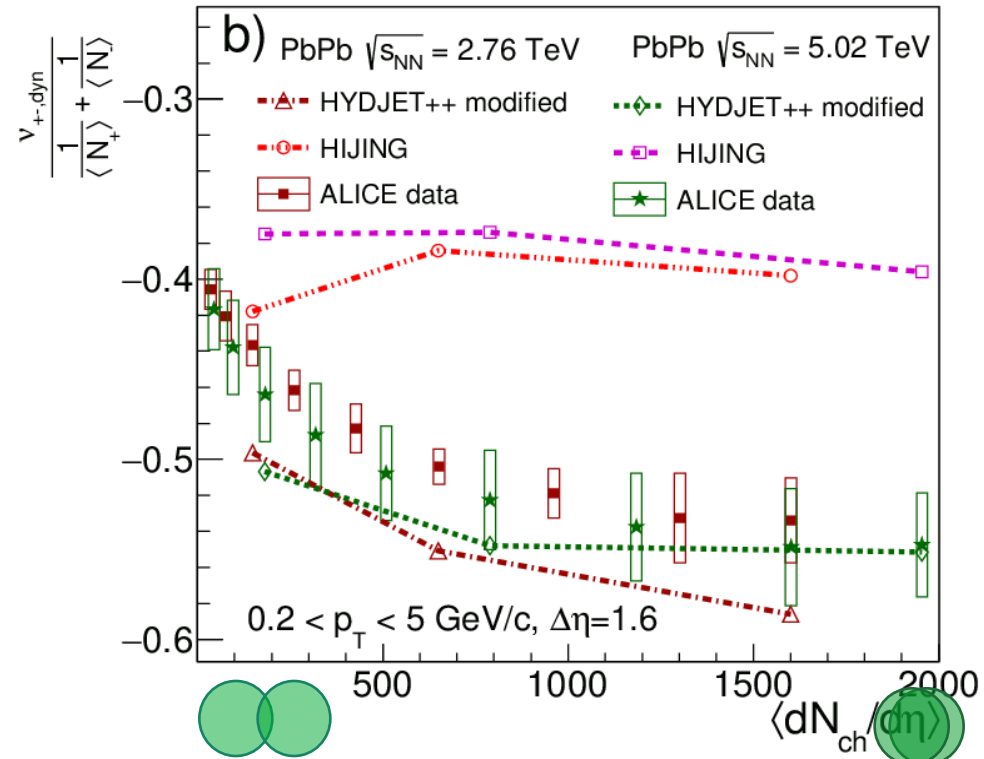
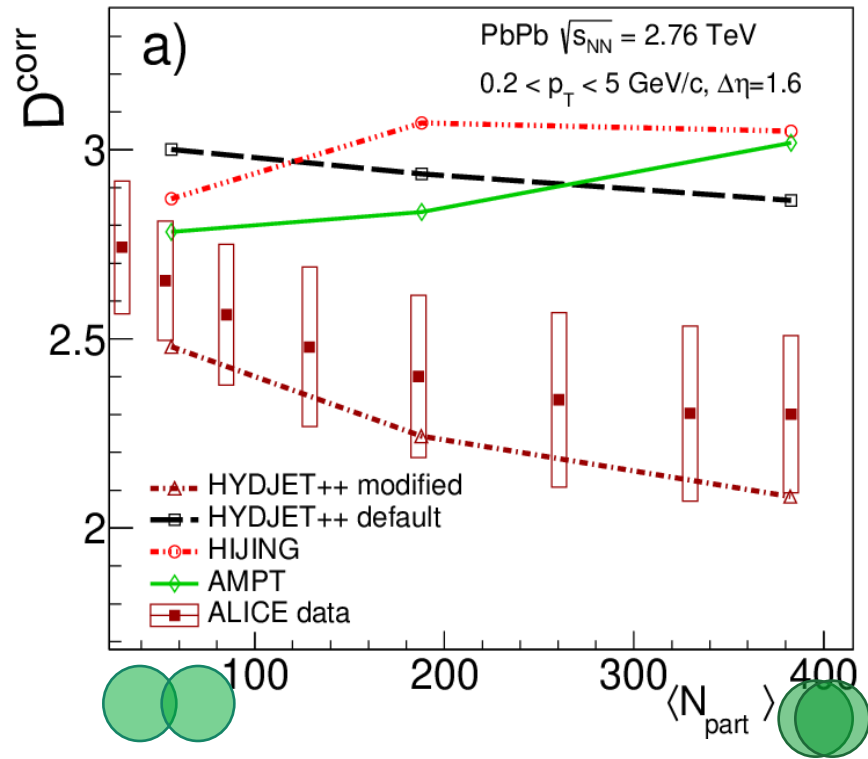
Расхождение результатов при больших $|\Delta\eta|$ может быть связано с возможной зависимостью длины корреляции заряженных пар адронов от η .

Флуктуации электрического заряда при энергиях ЛHC

“Modeling net-charge fluctuations in heavy-ion collisions at the LHC”

G.O. Ambaryan, A.S. Chernyshov, G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh, I.P. Lokhtin, S.V. Petrushanko, A.M. Snigirev, E.E. Zabrodin,
Chinese Physics C 49 (2025) 014109

Зависимость флуктуаций заряда от центральности взаимодействий при $|\Delta\eta| = 1.6$



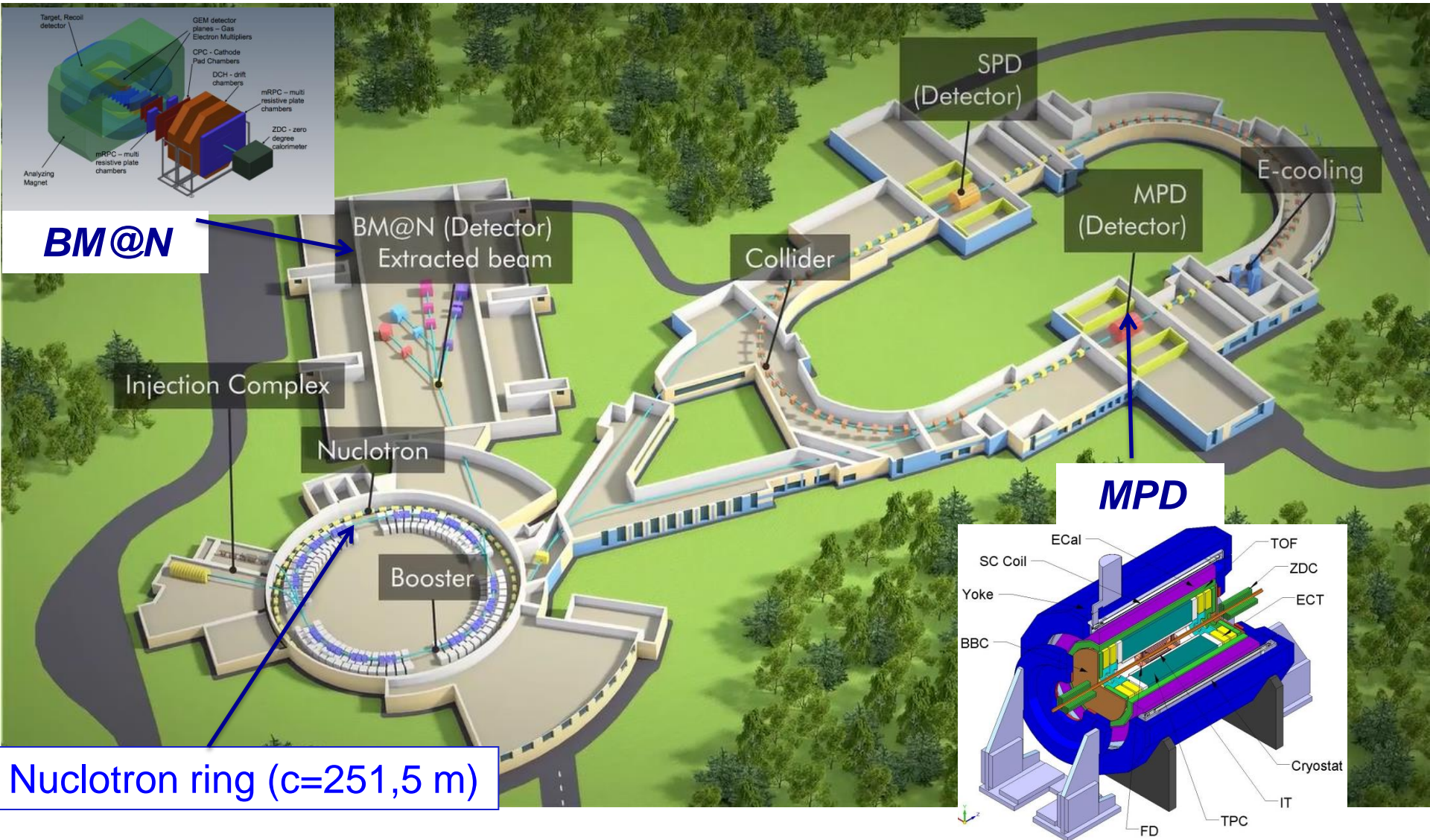
HIJING, AMPT и стандартная версия HYDJET++ не воспроизводят экспериментальные зависимости флуктуаций электрического заряда от центральности.

Модификация HYDJET++ позволяет существенно улучшить описание данных (воспроизводится качественная зависимость от центральности, а также хорошее количественное описание), при этом длина корреляции заряженных пар адронов в модели уменьшается для более центральных столкновений.

Комплекс **NICA** (Дубна, РФ)

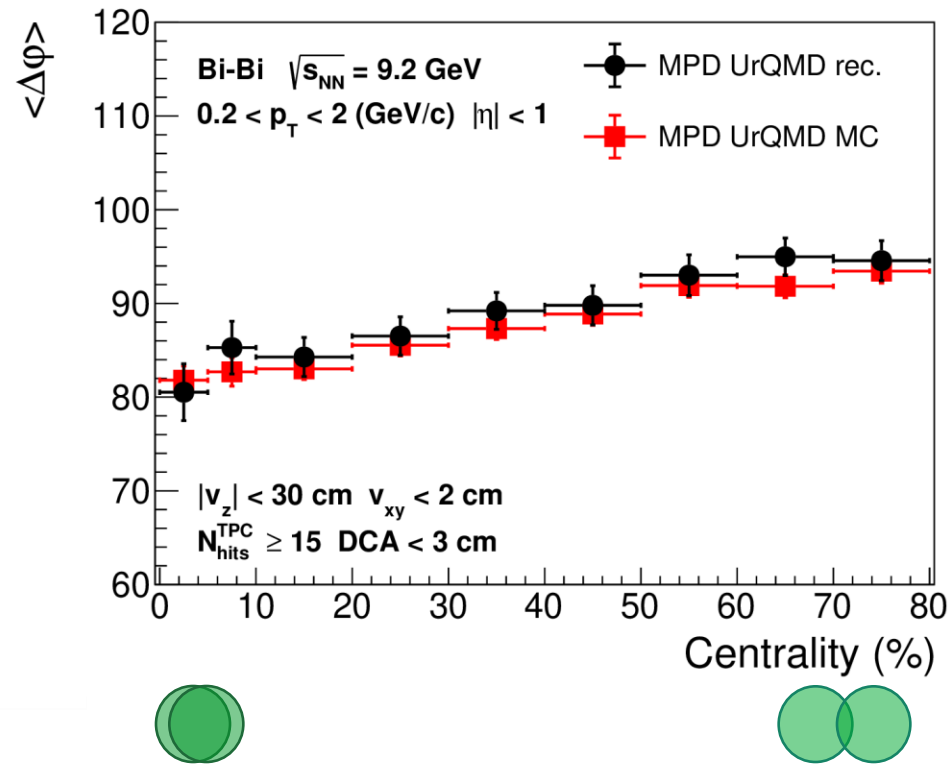
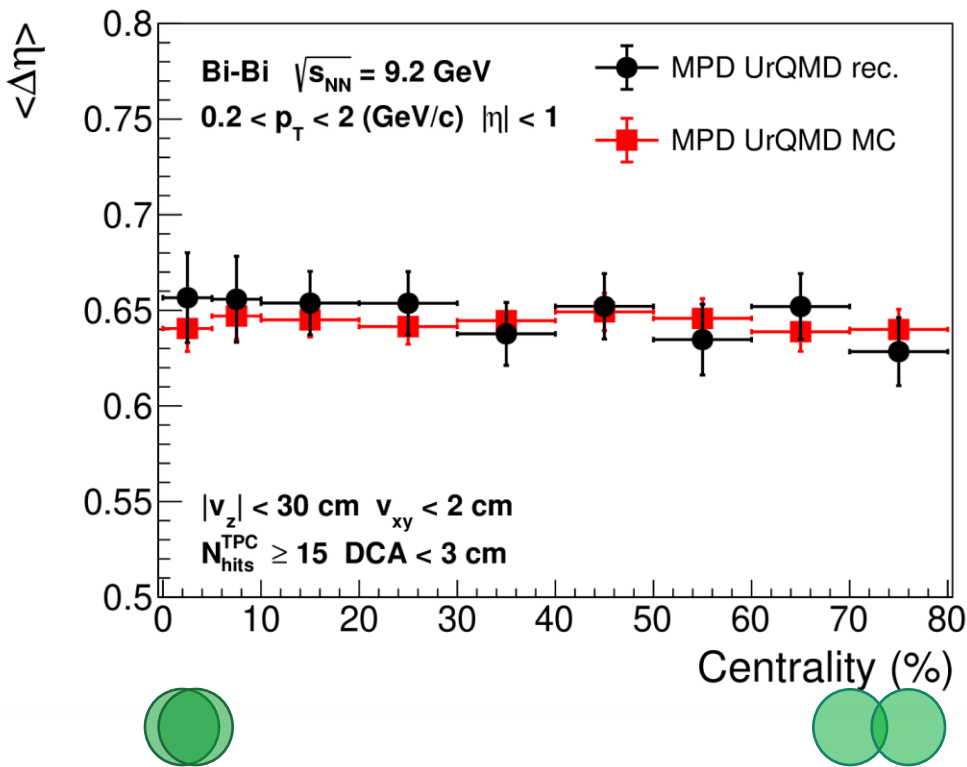
Основные параметры коллайдера (запуск – 2026?)

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



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

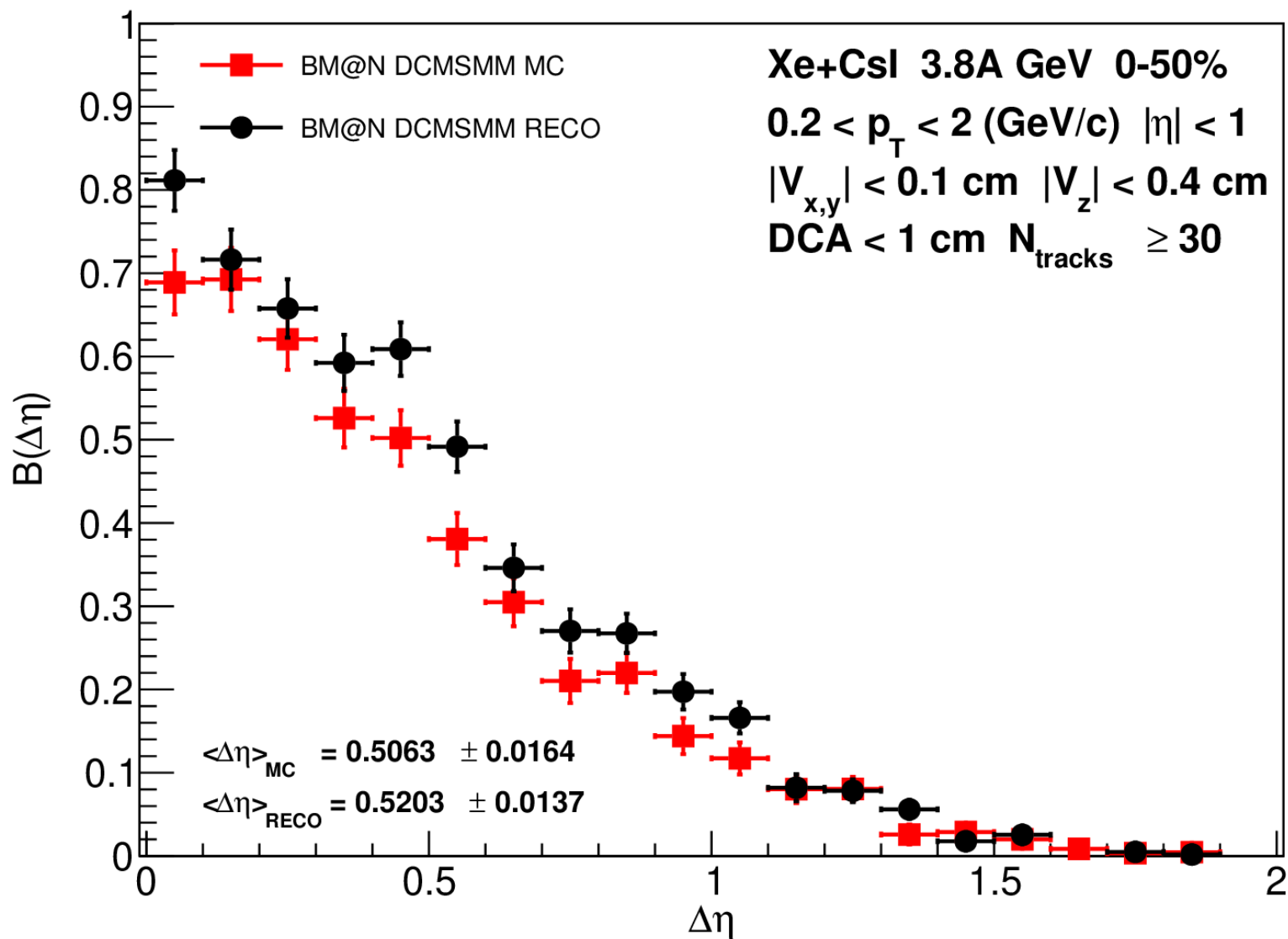
A.S. Chernyshov, I.P. Lokhtin, “Charge balance functions”, prepared for second MPD paper
“MPD physics performance studies in Bi+Bi collisions at $\sqrt{s_{NN}}=9.2$ GeV”



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

Реконструкция ФБ (h^+h^-) в эксперименте BM@N

A.S. Chernyshov, I.P. Lokhtin, in progress



Восстановленные в условиях эксперимента BM@N ширины функций зарядового баланса близки к генераторным ширинам в модели DCMSMM.

Основные результаты

- ✓ Проведено обобщение разработанной ранее в рамках статистического подхода процедуры учета зарядовых корреляций прямых адронов для электрически нейтральных систем (LHC) на случай систем с дисбалансом положительного и отрицательного зарядов (RHIC, NICA), что позволило в модели HYDJET++ описать наблюдаемые зависимости ширины функций баланса разнозаряженных адронов от центральности соударений Au+Au при энергиях $\sqrt{s_{NN}}=7.7$ и 11.5 ГэВ.
- ✓ Показано, что модификация модели HYDJET++, учитывающая пособытийное сохранение электрического заряда образованных частиц в статистической части модели, позволяет одновременно описать флуктуации суммарного заряда и ширины функций баланса в соударениях Pb+Pb при энергиях LHC $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ и 5.02 ТэВ.
- ✓ Разработанный ранее для эксперимента MPD на коллайдере NICA алгоритм реконструкции функций зарядового баланса адронов в соударениях тяжелых ионов адаптирован к условиям эксперимента BM@N на Нуклотроне.

Текущие работы и планы

- ✓ Модельное изучение флуктуаций суммарного электрического заряда частиц при энергиях NICA/RHIC.
- ✓ Разработка алгоритма реконструкции флуктуаций суммарного электрического заряда частиц для эксперимента MPD.
- ✓ Измерение зарядовых корреляций (функций баланса) адронов в эксперименте BM@N на Нуклотроне (взаимодействия Xe+CsI при энергиях пучка ксенона 3.8 ГэВ на пару нуклонов).

Публикации

- 1) “Моделирование зарядовых корреляций адронов при энергиях в соударениях тяжелых ионов при энергиях NICA”, *Е.Е. Забродин, В.Л. Коротких, И.П. Лохтин, С.В. Петрушанко, А.М. Снигирев, А.С. Чернышов, Г.Х. Эйюбова, ЖЭТФ 166 (2024) 340*
- 2) “The charge balance functions with HYDJET++ model in heavy ion collisions at the LHC”, *A.S. Chernyshov, G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh, I.P. Lokhtin, L.V. Malinina, S.V. Petrushanko, A.M. Snigirev, E.E. Zabrodin, International Journal of Modern Physics A 39 (2004) 2443201*
- 3) “Modeling net-charge fluctuations in heavy-ion collisions at the LHC” , *G.O. Ambaryan, A.S. Chernyshov, G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh, I.P. Lokhtin, S.V. Petrushanko, A.M. Snigirev, E.E. Zabrodin, Chinese Physics C 49 (2025) 014109*

Доклады на конференциях

- 1) A.S. Chernyshov, “Modeling of charge particle correlations in nucleus-nucleus interactions at NICA and RHIC energies”, The 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, October 22-25 2024
- 2) E.E. Zabrodin, “HYDrodynamics with JETs (HYDJET++): Latest developments and results”, XIII International Conference on New Frontiers in Physics, Crete, Greece, August 25 – September 5 2024
- 3) А.С. Чернышов, “Зарядовые корреляции адронов в соударениях тяжелых ионов: от LHC до NICA”, Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, Дубна, Россия, 1-5 апреля 2024
- 4) Г.Х. Эйюбова, “Модельное описание флуктуаций суммарного заряда в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях”, Научная конференция "Ломоносовские чтения-2024", Москва, Россия, 21 марта - 1 апреля 2024
- 5) И.П. Лохтин, “Моделирование зарядовых корреляций адронов в соударениях тяжелых ионов при энергиях NICA”, Научная конференция "Ломоносовские чтения-2024", Москва, Россия, 21 марта - 1 апреля 2024

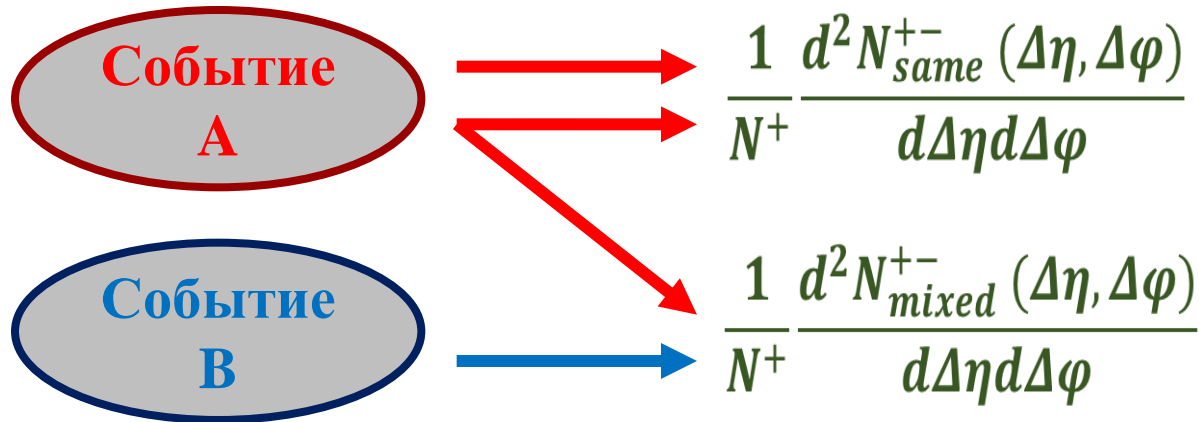
Спасибо за внимание!

Дополнительные слайды

Расчет и коррекция функций зарядового баланса

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

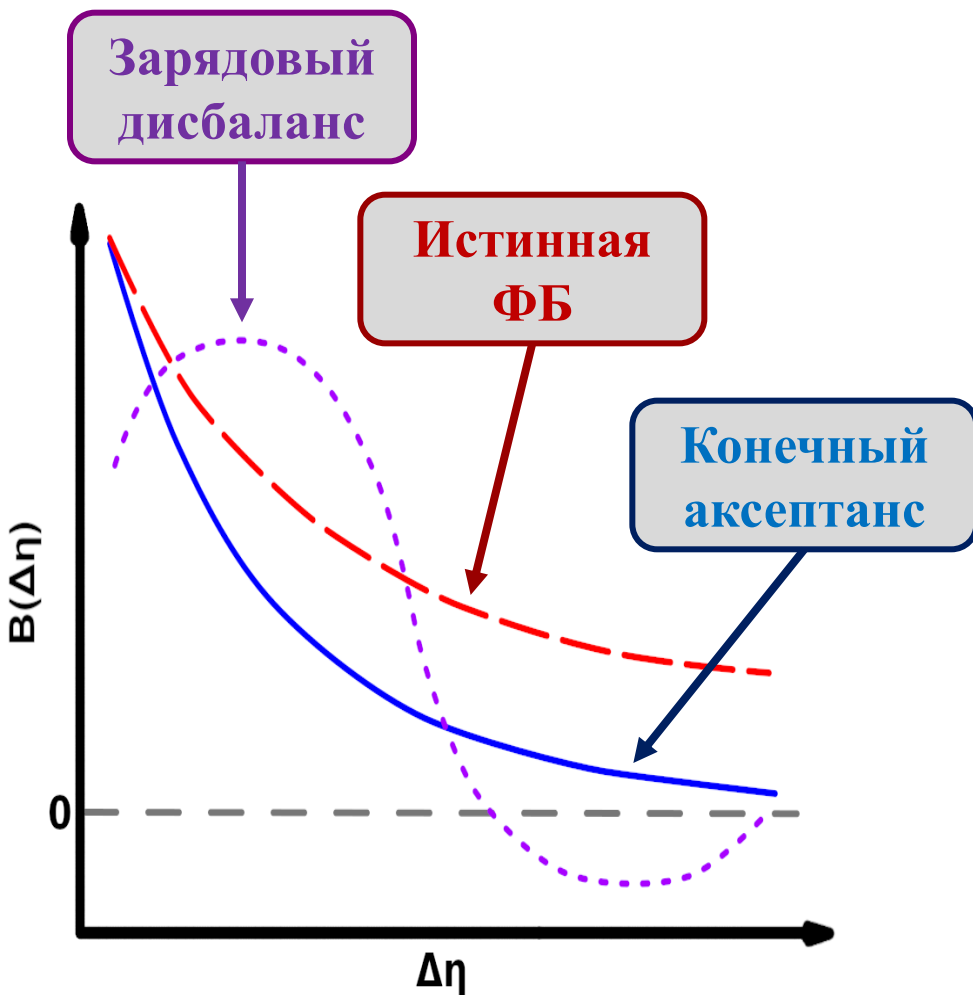
N^+ — число положительных адронов, $d^2 N^{+-}/d\Delta\eta d\Delta\varphi$ — распределение положительно-отрицательных пар адронов по относительным псевдобыстроте и азимутальному углу.



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 (2016) 024909], 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++ (HYDrodynamics & JETs)

Модель HYDJET++ ([http://lav01,sinp.msu.ru/~igor/hydjet++](http://lav01.sinp.msu.ru/~igor/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 (2009) 779*].

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.

Параметры HYDJET++ при энергиях RHIC/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	

$\sqrt{s_{NN}}$ – 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.

Настройка 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.

Настройка HYDJET++ для энергий RHIC/NICA

	$\sqrt{s_{NN}} = 7.7 \text{ ГэВ } 0\text{-}5\%$ $0.2 < p_T < 2 \text{ (ГэВ/с)} \quad y < 0.1$		
	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

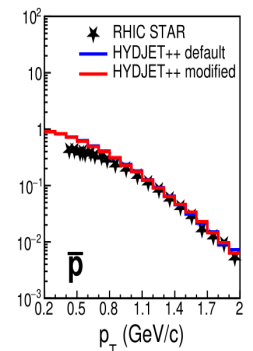
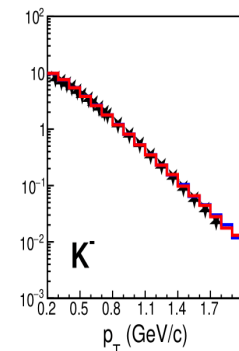
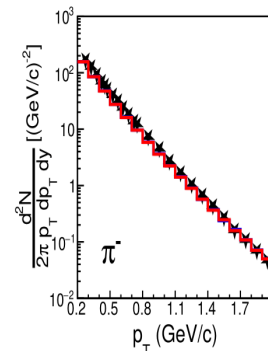
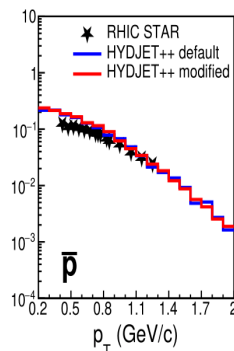
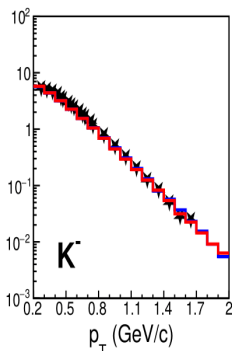
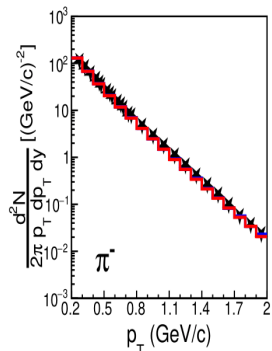
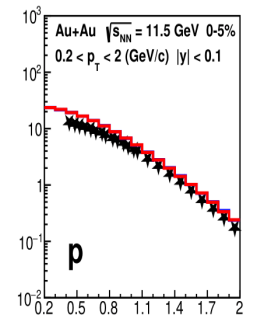
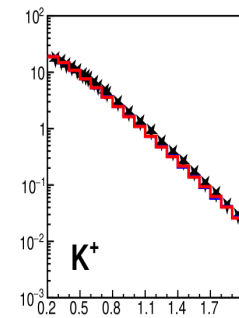
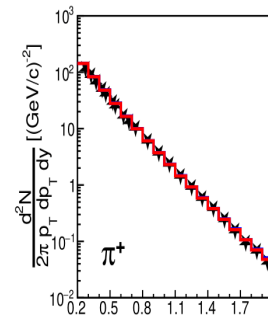
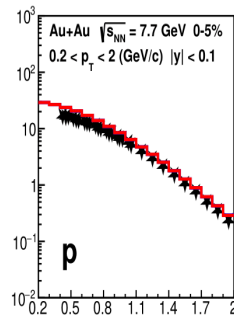
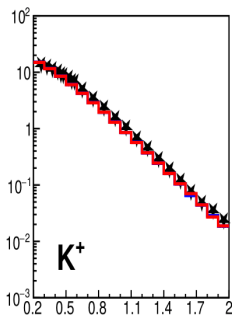
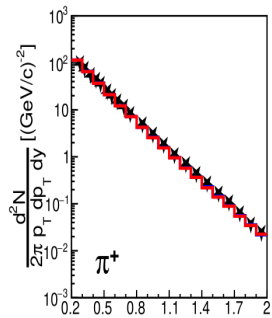
	$\sqrt{s_{NN}} = 11.5 \text{ ГэВ } 0\text{-}5\%$ $0.2 < p_T < 2 \text{ (ГэВ/с)} \quad y < 0.1$		
	RHIC STAR	Станд. HYDJET++	Мод. HYDJET++
π^+	124	118	117
π^-	130	127	126
K^+	25.0	23.4	23.4
K^-	12.3	11.7	11.7
p	44.0	57.5	57.5
\bar{p}	1.5	2.1	2.0
$\pi+K+p$	337	339	338

Экспериментальные выходы идентифицированных заряженных адронов удовлетворительно описываются стандартной и модифицированной версиями модели HYDJET++

Настройка HYDJET++ для энергий RHIC/NICA

$\sqrt{s_{NN}} = 7.7 \text{ ГэВ}$

$\sqrt{s_{NN}} = 11.5 \text{ ГэВ}$



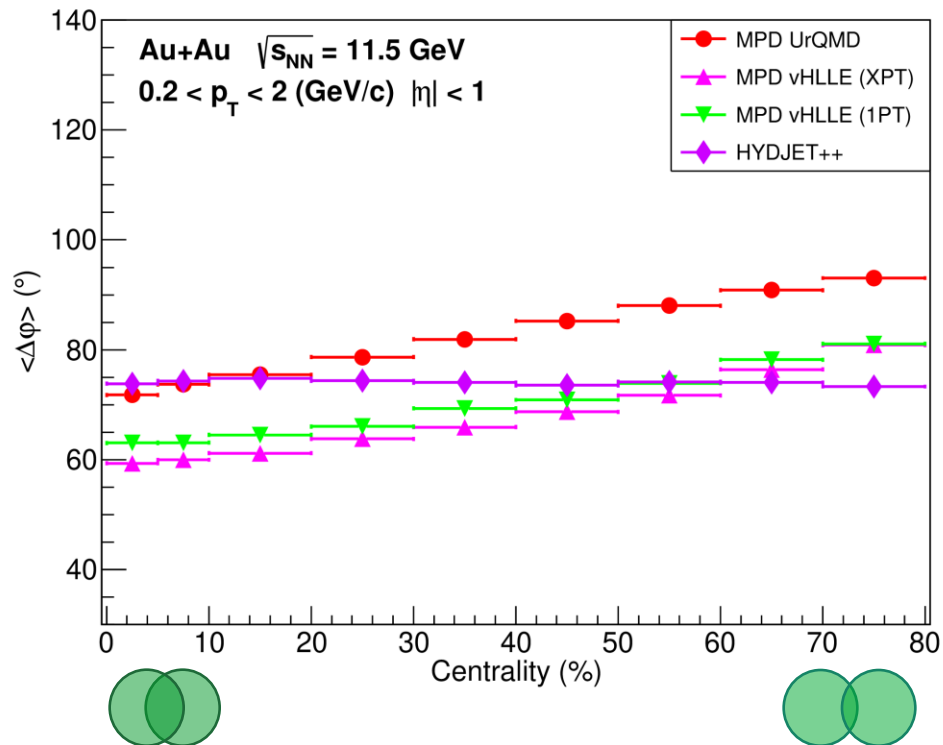
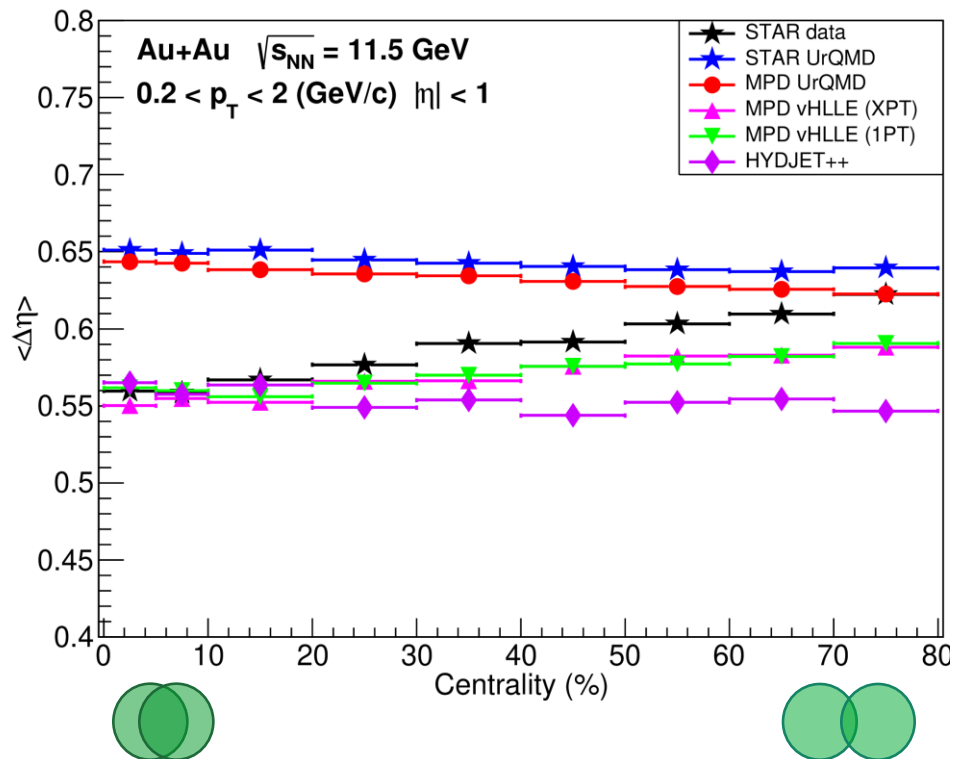
Экспериментальные спектры идентифицированных адронов удовлетворительно описываются стандартной и модифицированной версиями модели HYDJET++ (хорошо для заряженных пионов и каонов, несколько хуже для (анти)протонов).

Параметры для зарядовых корреляций прямых адронов в модели HYDJET++ при энергиях RHIC/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

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

Функции баланса разно-заряженных адронов (RHIC_BES/NICA)

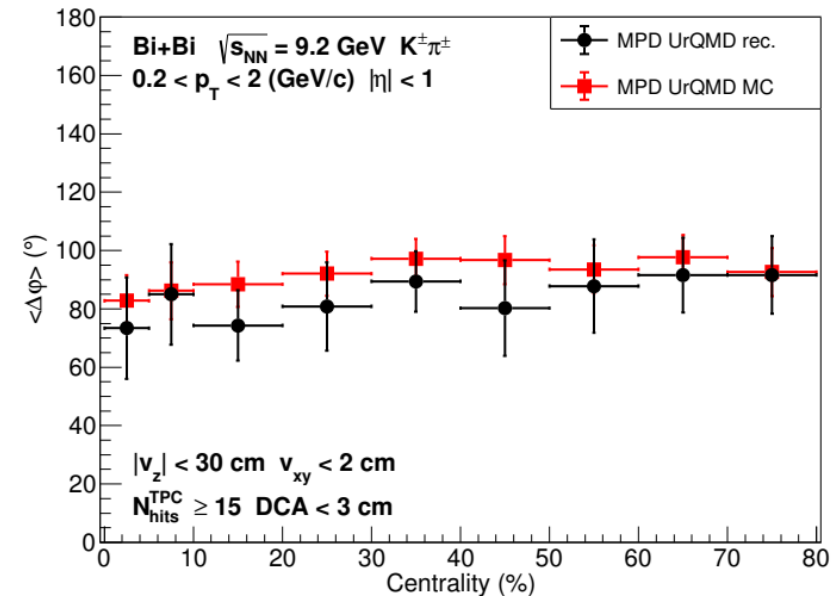
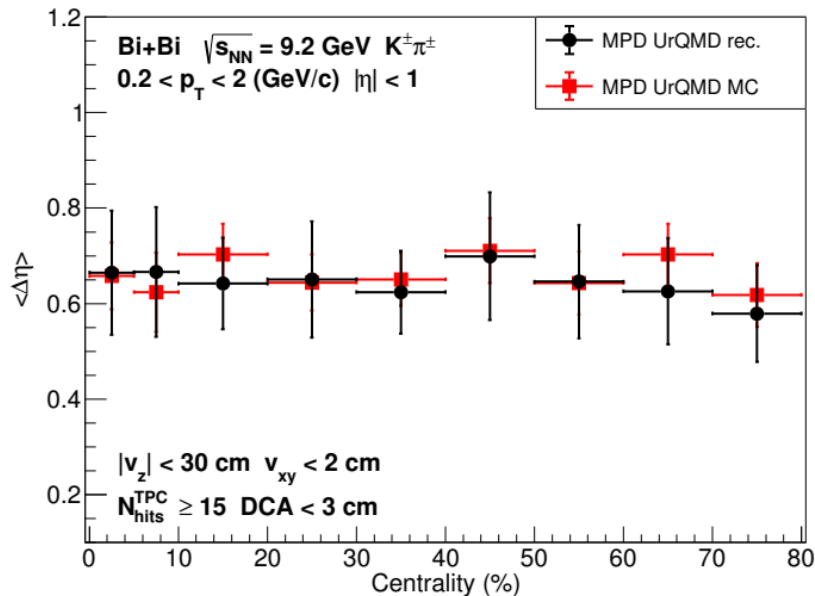
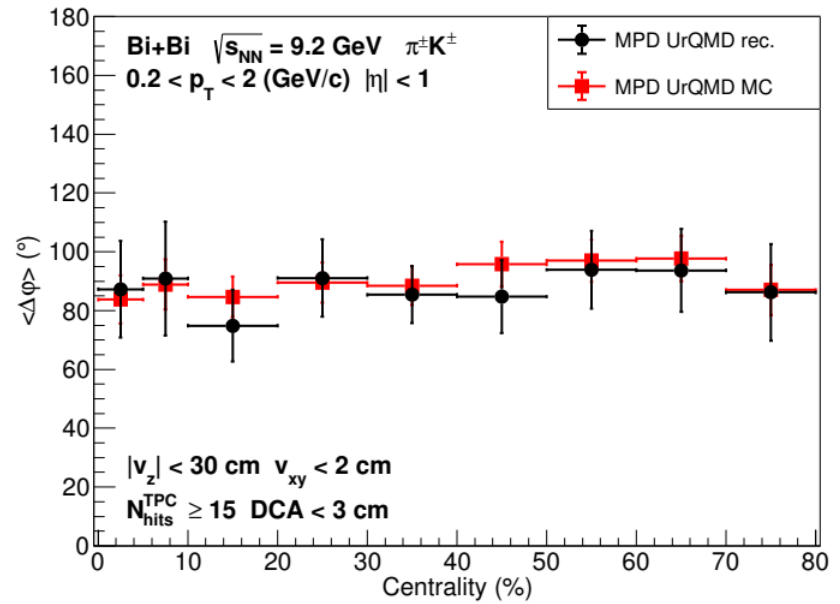
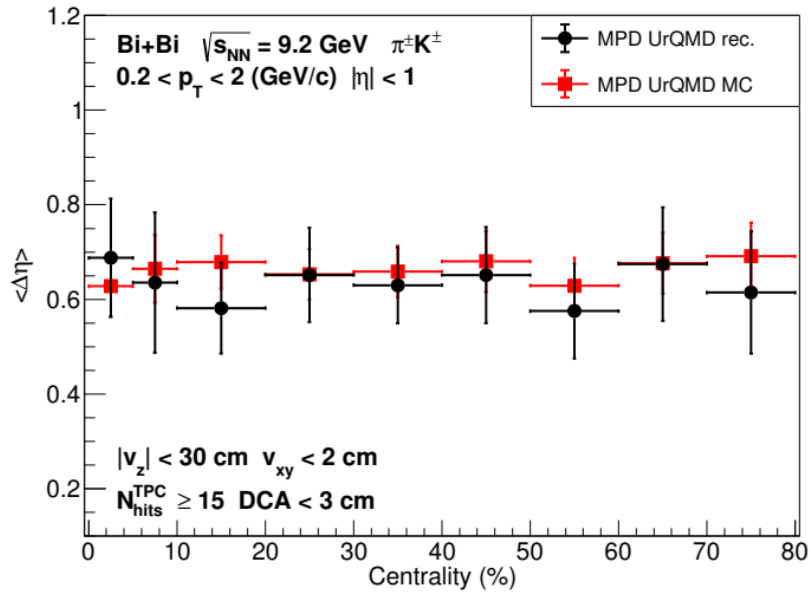


Проведено модельное исследование ФБ с различными генераторами событий для соударений AuAu при энергиях 7.7 и 11.5 ГэВ на пару нуклонов:

- модели 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.

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



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

