

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МНОЖЕСТВЕННОСТИ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ NICA

Катаребе Лойк, Владимир Коваленко
Санкт-Петербургский государственный университет

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025.
Физика атомного ядра и элементарных частиц.
Ядерно-физические технологии»

Санкт-Петербург, 2025



1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно исследуются свойства сильновзаимодействующей среды в столкновениях адронов и ядер в экспериментах на ускорительных комплексах БНЛ, ЦЕРН и ОИЯИ. В ближайшее время ожидается ввод в эксплуатацию коллайдера NICA (Дубна) и многоцелевого детектора MPD. Ключевым направлением исследований в этих экспериментах является сканирование фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи, изучение фазового перехода между адронным газом и кварк-глюонной плазмой, а также поиск критической точки.

В свете планируемой реализации физической программы эксперимента MPD на коллайдере NICA, особую актуальность приобретают исследования так называемых глобальных наблюдаемых.

В работе исследована зависимость множественности рождающихся заряженных частиц от центральности в столкновениях релятивистских ионов ($\text{Bi}+\text{Bi}$, $\text{Xe}+\text{Xe}$, $\text{Xe}+\text{W}$) при энергиях 2–11 ГэВ.



Распределения множественности при ядерных столкновениях относятся к статистическому распределению числа частиц, образующихся при столкновениях между атомными ядрами при высоких энергиях. Эти распределения предоставляют ценную информацию о динамике процесса столкновения и свойствах вещества, образующегося при таких взаимодействиях.

Цель и задачи работы

В связи с этим целью данной работы являлось построение распределений множественности заряженных частиц в ядро-ядерных столкновениях при энергиях коллайдера NICA и классификация событий по центральности на основе модели Глаубера.



Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести обзор современных теоретических моделей (двухкомпонентная параметризация на основе модели Глаубера, CGC, EKRT), применяемых для описания распределения множественности.
2. Реализовать расчёт числа участников (N_{part}) и числа бинарных столкновений (N_{coll}) с использованием метода Монте-Карло в рамках модели Глаубера.
3. Провести моделирование столкновений для систем Bi-Bi, Xe-Xe и Xe-W, разбить события на классы центральности и определить средние значения N_{part} и N_{coll} .
4. Сравнить предсказания трёх моделей для плотности множественности ($dN/d\eta$) и выявить их соответствие ожидаемым физическим эффектам в условиях NICA.



2. Основные понятия

Классы Центральности

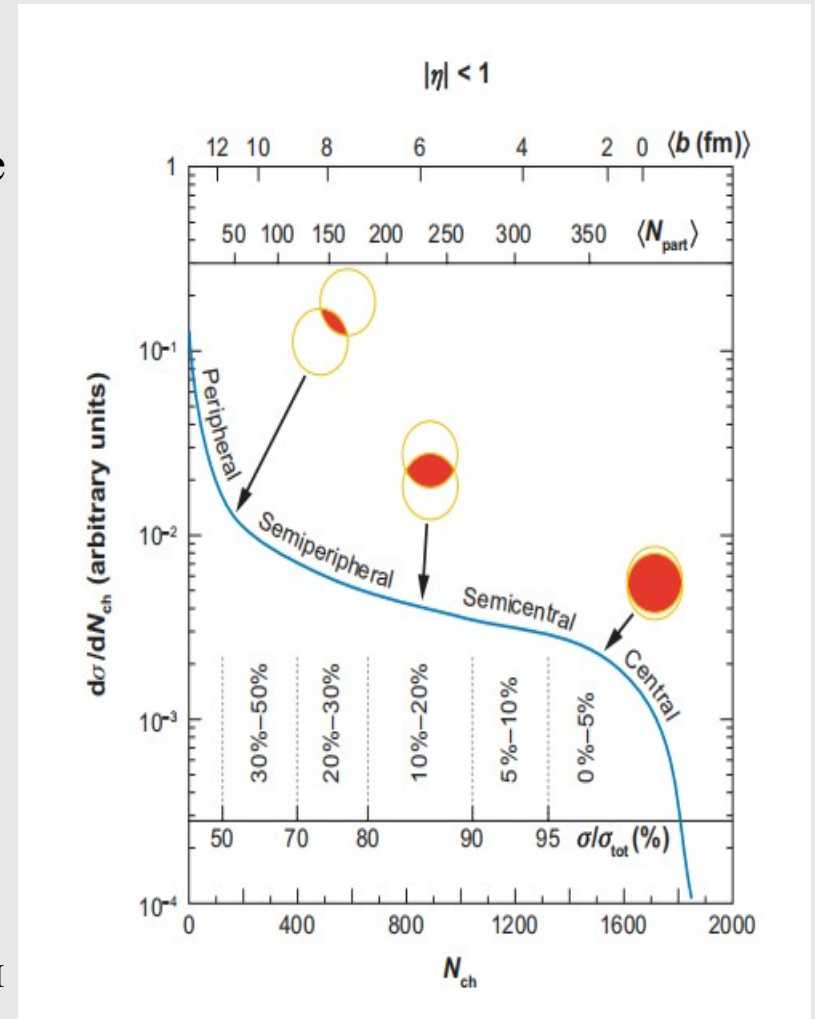
Эксперименты разделяют столкновения на классы центральности, обычно выражаемые в процентах от полного неупругого сечения:

0–10%: Наиболее центральные
(минимальный b , максимальная плотность энергии).

10–20%: Полуцентральные.

90–100%: Наиболее периферийные
(максимальный b , минимальное перекрытие).

Например, класс 0–5% включает столкновения с наименьшими прицельными параметрами (верхние 5% по перекрытию).





2.2 Ядерная плотность

Плотность нуклонов обычно записывается в параметрической форме. Для тяжелых ядер используется распределение Ферми с тремя параметрами (Потенциал Вудса-Саксона):

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1 + \omega \left(\frac{r}{R}\right)^2}{1 + \exp\left(\frac{r - R}{a}\right)}$$

где ρ_0 соответствует плотности нуклонов в центре ядра, R соответствует радиусу ядра, a толщина поверхностного слоя ядра, и w характеризует отклонение от сферической формы.



2.3. Процесс столкновения в Модели Глаубера

Предполагается, что нуклоны движутся по прямолинейной траектории вдоль оси пучка .

Неупругая сечение взаимодействия нуклон-нуклон (σ_{NN}), зависящее только от энергии столкновения, извлекается из данных по протон-протонным столкновениям. При больших энергиях столкновения, например $\sqrt{S_{NN}} = 9.5 \text{ ГэВ}$ как, ожидается в коллайдере NICA, так называемый «диаметр шара» определяется как:

$$D = \sqrt{\sigma_{NN}/\pi}$$

Считается, что два нуклона из разных ядер сталкиваются, если их взаимное поперечное расстояние меньше, чем диаметр шара. Если ни одна пара нуклонов не зарегистрировала столкновения нуклон-нуклон, то считается, что столкновение ядер не произошло.



2.2. Теоретические модели для описания распределений множественности

В нашей работе мы изучаем распределение плотности множественности заряженных частиц при энергиях NICA с помощью трех моделей :

- двух компонентная модель, основанная на модели Глаубера
- модель CGC (Color Glass Condensate, конденсат цветового стекла)
- модель EKRT

Sumit Basu, Sanchari Thakur, Tapan K Nayak and Claude A Pruneau, J. Phys. G. 48 025103 (2021)



Модель Глаубера

В рамках модели Глаубера двухкомпонентная модель soft/hard используется для параметризации образования частиц в зависимости от центра столкновения определяется как:

$$\left. \frac{dN_{ch}}{d\eta} \right|_{AA} = n_{pp} \left[(1 - x) \frac{N_{part}}{2} + x N_{coll} \right]$$

где N_{part} – число нуклонов-участников, N_{coll} – число нуклон-нуклонных столкновений, n_{pp} множественность в pp-столкновениях, x – относительный вклад жестких взаимодействий.

D. Kharzeev, M. Nardi. Phys.Lett.B 507 (2001) 121-128

M. L. Miller, K. Reygers, S. J. Sanders, P. Steinberg, Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 57 (2007) 205-243



Модель CGC

модель CGC обеспечивает основу для прогнозирования плотности множественности частиц при столкновениях с высокой энергией (таких как pp, pA и AA) путем описания распределения глюонов в начальном состоянии до того, как произойдет столкновение; Таким образом, плотность заряженных частиц моделируется следующим образом:

$$\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} \approx M N_{\text{part}}^{\alpha} (\sqrt{s_{\text{NN}}})^{\gamma}$$

D. Kharzeev, E. Levin, Phys. Lett. B 523, 79 (2001)



Модель EKRT

Модель EKRT (названная так по фамилиям авторов) основана на насыщении глюонами конечного состояния. Эта модель предсказывают тенденцию к уменьшению числа заряженных частиц на один участвующий нуклон с увеличением центра столкновения

Он выглядит так

$$\frac{dN_{ch}}{d\eta} = C \frac{2}{3} 1.16 \left(\frac{N_{part}}{2} \right)^{0.92} (\sqrt{s_{NN}})^{0.4},$$

K.J. Eskola, K. Kajantie, P.V. Ruuskanen, K. Tuominen, Nucl. Phys. B 570



3. Практическая часть

Основная цель данной работы — Построить распределение множественности в столкновении ядер в зависимости от центральности. Мы хотим разбить события для системы сталкивающейся ядер конкретные на классы по центральности. Значит, в каждом классе центральности мы хотим определить среднее число нуклонов-участников и среднее число нуклонных столкновений.

Для этой цели была разработана программа на языке C++ с использованием фреймворка ROOT (CERN) предназначенная для анализа данных моделирования релятивистских столкновений тяжелых ионов. Основная задача программы – классификация событий по параметру центральности с последующим расчетом характеристик взаимодействия, таких как среднее число нуклонов-участников (N_{part}) и количество бинарных нуклон-нуклонных столкновений (N_{coll}).



На первом этапе применяется TGlauberMC: ROOT-версия PHOBOS Glauber Monte Carlo, монте-карловская реализация модели Глаубера, используемая в эксперименте PHOBOS на RHIC. Интересно отметить, что это наиболее известная реализация модели Глаубера, и она в дальнейшем легла в основу кода экспериментов на LHC (в т.ч. ALICE). Код этой модели был доработан для учета ядерной плотности требуемых изотопов (Xe-124, Bi-209).

В этой работе мы рассматриваем 3 разных систем сталкивающихся ядер:

- Bi-Bi
- Xe-Xe
- Xe-W

TGlauberMC: A ROOT-based implementation of the PHOBOS Glauber Monte Carlo,
<https://tglaubermc.hepforge.org/>

C. Loizides, J. Nagle, P. Steinberg, SoftwareX 1-2 (2015) 13-18, ArXiv: 1408.2549 [nucl-ex]



Xe-Xe collisions

Centrality, %	N_{partl}	N_{partl}	$N_{partmean}$	$N_{collmean}$
0-5	194.3	241,5	211,8	412,2
5-10	164.6	194,3	178,9	330,1
10-20	117,1	164,6	139,9	239,4
20-30	81,8	117,1	98,7	150,7
30-40	55,4	81,8	67,9	92,2
40-50	35,7	55,4	45,1	53,3
50-60	21,8	35,7	28,1	28,9
60-70	12,4	21,8	16,7	14,9
70-80	6,4	12,4	9,2	7,2
80-90	2,9	6,4	4,3	2,9



Bi-Bi collisions

Centrality, %	N_{partl}	N_{partr}	$N_{partmean}$	$N_{collmean}$
0-5	327,6	404,5	358,4	796,6
5-10	275,6	327,6	300,8	634,2
10-20	195,6	275,6	233,3	455,8
20-30	135,9	195,6	163,9	286,4
30-40	90,9	135,9	111,8	172,2
40-50	57,5	90,9	73,1	97,9
50-60	33,7	57,5	44,7	51,3
60-70	17,9	33,7	24,8	24,1
70-80	8,5	17,9	12,5	10,3
80-90	3,6	8,5	5,7	4,0



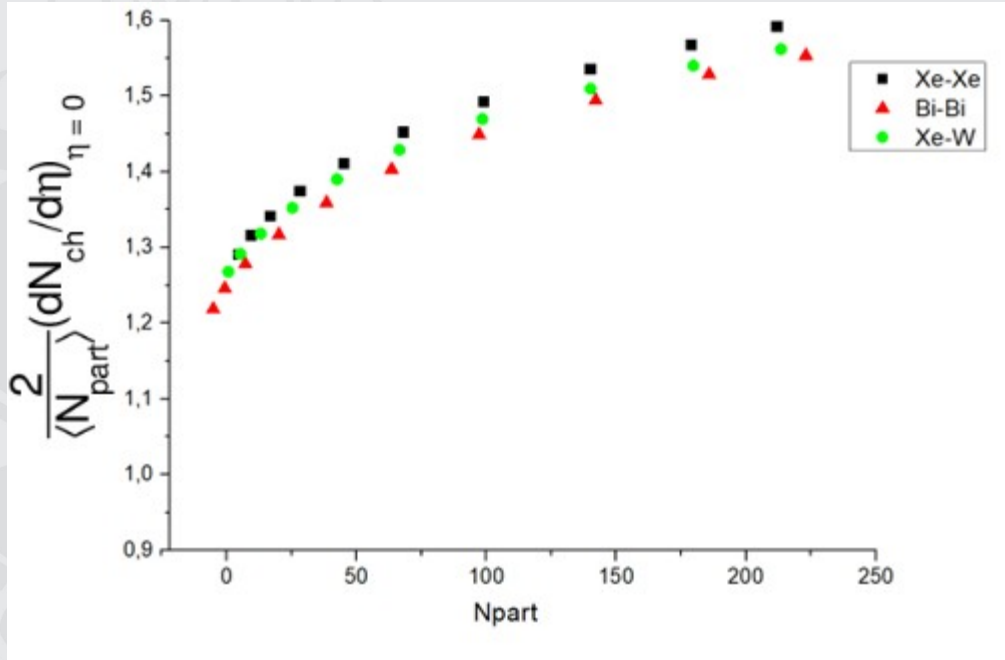
Xe-W collisions

Centrality, %	N_{part1}	N_{part2}	$N_{partmean}$	$N_{collmean}$
0-5	235,9	296,5	256,8	522,2
5-10	199,9	235,9	216,9	419,6
10-20	143,0	199,9	170,2	305,6
20-30	100,2	143,0	121,0	195,3
30-40	67,8	100,2	83,2	118,9
40-50	43,6	67,8	54,8	68,6
50-60	26,2	43,6	34,5	37,3
60-70	14,4	26,2	20,1	18,6
70-80	7,3	14,4	10,7	8,6
80-90	3,3	7,3	5,3	3,7



3.1 Результаты

Модель Глаубера, двухкомпонентная модель



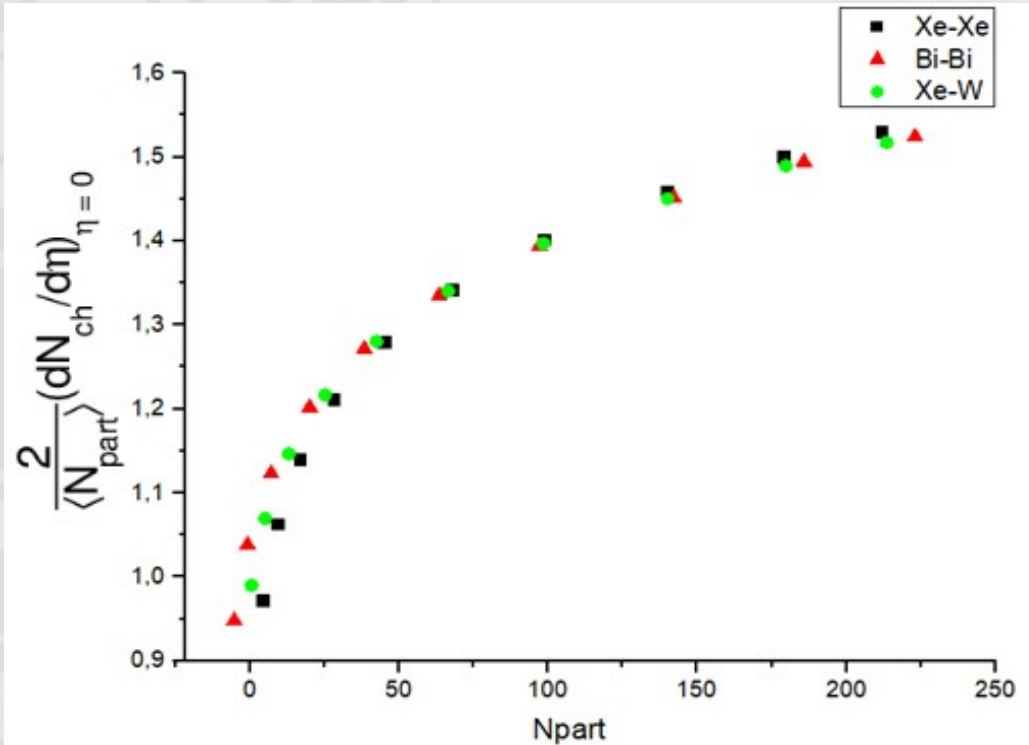
$x=0,12$

$$\left. \frac{dN_{ch}}{d\eta} \right|_{AA} = n_{pp} \left[(1-x) \frac{N_{part}}{2} + x N_{coll} \right]$$

- Четкий монотонный рост
- Поведение практически одинаково для разных систем
- Соотношение вклада двух компонент: "мягкой" (пропорциональной N_{part}) и "жесткой" (пропорциональной N_{coll}) меняется не сильно.
- Присутствует расщепление предсказаний для разных сталкивающихся систем, его поиск в реальном эксперименте представляет интерес



Модель CGC



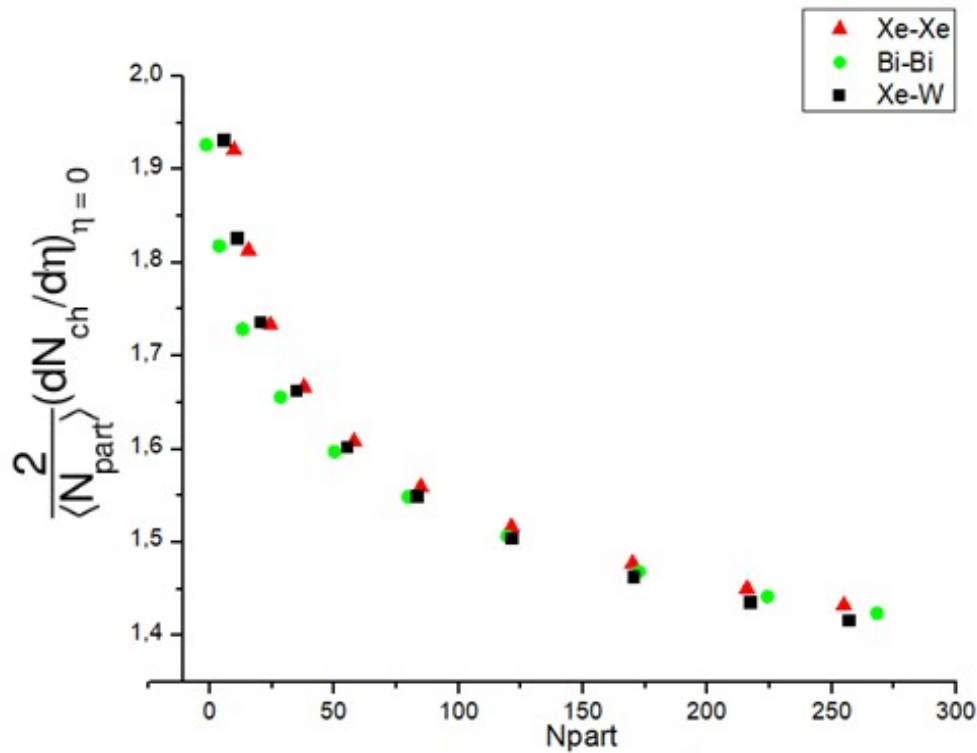
$$\frac{dN_{ch}}{d\eta} \approx M N_{part}^{\alpha} (\sqrt{s_{NN}})^{\gamma}$$

- Более сильный (нелинейный) рост множественности по сравнению с моделью Глаубера, особенно в периферической области.
- Усиленное скейлинговое поведение - кривые для разных систем практически совпадают
- Это связано с учетом эффектов насыщения глюонных полей в начальном состоянии, что приводит к универсальному поведению при высоких плотностях

$$\alpha=1,11, \gamma=0,3, M=0,21$$



Модель EKRT



$$\frac{dN_{ch}}{d\eta} = C \frac{2}{3} 1.16 \left(\frac{N_{part}}{2} \right)^{0.92} (\sqrt{s_{NN}})^{0.4},$$

Четкое уменьшение нормированной множественности с ростом N_{part} , что не соответствует предсказаниям первых двух моделей.

- Физическая причина - механизм насыщения: при увеличении числа участников возрастает плотность глюонных полей, что приводит к их эффективному "гашению" за счет рекомбинационных процессов
- Поведение всех трех сталкивающихся систем одинаково.



Вывод

Проведен анализ распределений множественности заряженных частиц в релятивистских столкновениях ионов $\text{Bi}+\text{Bi}$, $\text{Xe}+\text{Xe}$ и $\text{Xe}+\text{W}$ при энергиях коллайдера NICA.

Основные результаты практической части исследования включают:

1. Использование метода Монте-Карло на основе модели Глаубера обеспечило расчет ключевых параметров столкновений - числа участников (N_{part}) и бинарных столкновений (N_{coll}).
2. Применение трех теоретических подходов позволило выявить характерные зависимости плотности множественности от центральности столкновений и геометрических параметров.

Полученные результаты представляют интерес для интерпретации будущих экспериментальных данных коллайдера NICA и углубленного изучения свойств ядерной материи в условиях высокой барионной плотности.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ