

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Институт ядерной физики и технологий  
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПАРЫ  
ЛЕГКИХ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ В  
УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В  
УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS**

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доц.

\_\_\_\_\_ С.Л.Тимошенко

Студент

\_\_\_\_\_ А. Э. Дадашова

Москва 2022

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Экспериментальные установки, изучающие физику тяжелых ионов	4
2 Ультрапериферические взаимодействия	6
3 Образование векторного мезона в ультрапериферических столкновениях ядер.	7
4 Двойное рассеяние векторных мезонов	9
Заключение	11
	12

# ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые ионы — это ионы элементов с  $Z > 2$  и  $A > 4$  (тяжелее гелия). Взаимодействие тяжелых ионов с ядрами характеризуется коренной перестройкой участвующих в реакции ядерных систем, содержащих сотни нуклонов. Все это приводит к разнообразию каналов реакции — путей, по которым проходят изменения взаимодействующих ядер. При этом может происходить как полное слияние иона с ядром, так и передача от иона к ядру (или наоборот) различного числа нуклонов (от одного до нескольких десятков или целого сгустка ядерной материи). Образующаяся ядерная система может быть неустойчивой и распадаться за очень короткое время, а может достигнуть теплового равновесия и существовать очень большое по ядерным масштабам время. Распад этой системы может быть связан как с эмиссией отдельных нуклонов, так и с развалом ее на две примерно равные части. Таким образом, изучение ядерных реакций с тяжелыми ионами позволяет получать важные данные о коллективном ядерном движении большой амплитуды, которая характеризуется предельно большим изменением ядерной формы, сильным и неоднократным перераспределением энергии между различными степенями свободы системы. [1]

Особенности взаимодействия тяжелых ионов:

- Передача больших импульсов
- Передача больших моментов
- Обмен большим количеством нуклонов
- Большое и многократное кулоновское возбуждение, сильная ионизация и т.д.

Для того, чтобы произошла реакция между двумя ядрами, необходимо столкнуть их с энергиями, определяющими их кулоновское рассталкивание.

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2 + b}, \quad (0.1)$$

Если энергия иона постоянна, то взаимодействие определяется параметром  $b$ , называемым прицельным параметром.

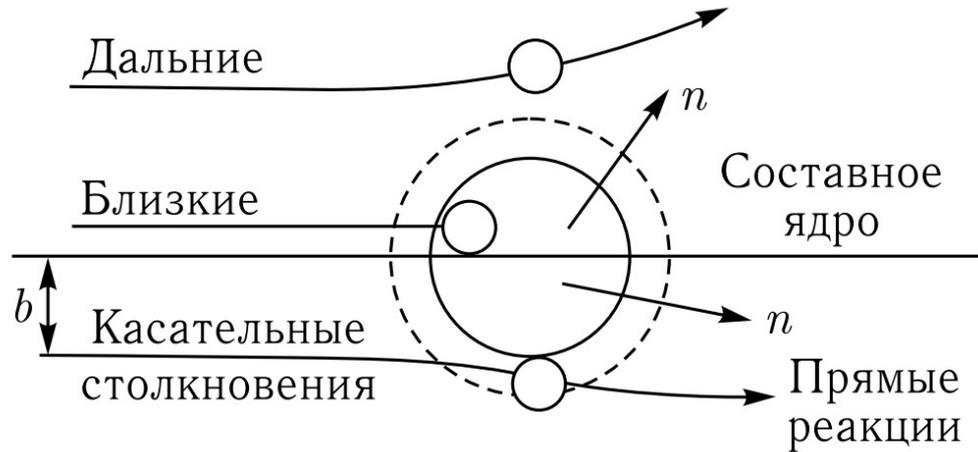


Рисунок 1

Классификация взаимодействий тяжелых ионов по прицельному параметру  $b$ :

- $b < R$  - центральное взаимодействие
- $b \sim R_1 + R_2$  - периферическое взаимодействие
- $b > R_1 + R_2$  - ультрапериферическое взаимодействие

Данная работа нацелена на анализ литературы, посвященной ультрапериферическим взаимодействиям тяжелых ионов и образованию в ходе этих реакций векторных мезонов.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ, ИЗУЧАЮЩИЕ ФИЗИКУ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Активное изучение взаимодействий тяжелых ионов началось на релятивистском коллайдере RHIC, на котором проводились эксперименты STAR, PHENIX, PHOBOS, BRAHMS. В экспериментах STAR и PHENIX была впервые получена экспериментально кварк-глюонная плазма. Основными открытиями на ныне выведенном из эксплуатации детекторе PHENIX были - первое экспериментальное наблюдение эффекта гашения струй, про-

являющегося в подавлении выхода адронов с большими поперечными импульсами и первое измерение спектров рождения мягких прямых фотонов, что позволило оценить температуру образующейся в столкновениях кварк-глюонной плазмы.

Один из основных детекторных комплексов RHIC – STAR (Solenoidal Tracker At RHIC) предназначен для детектирования заряженных и нейтральных частиц, возникающих в результате взаимодействия релятивистских тяжелых ионов. В каждом столкновении ультрарелятивистских ионов рождается большое количество частиц. Так при центральных столкновениях Au–Au образуется свыше 1000 первичных частиц. Кроме того при взаимодействии первичных частиц с веществом детектора и распаде короткоживущих частиц возникают большие потоки вторичных частиц.

Сердцевиной детекторного комплекса STAR является большой детектор – время-проекционная камера. Она покрывает диапазон по псевдобыстроте  $|\eta| \leq 1.8$  и азимутальному углу  $\Delta\phi = 2$ , и является основным средством идентификации частиц с помощью измерения удельных потерь. [6]

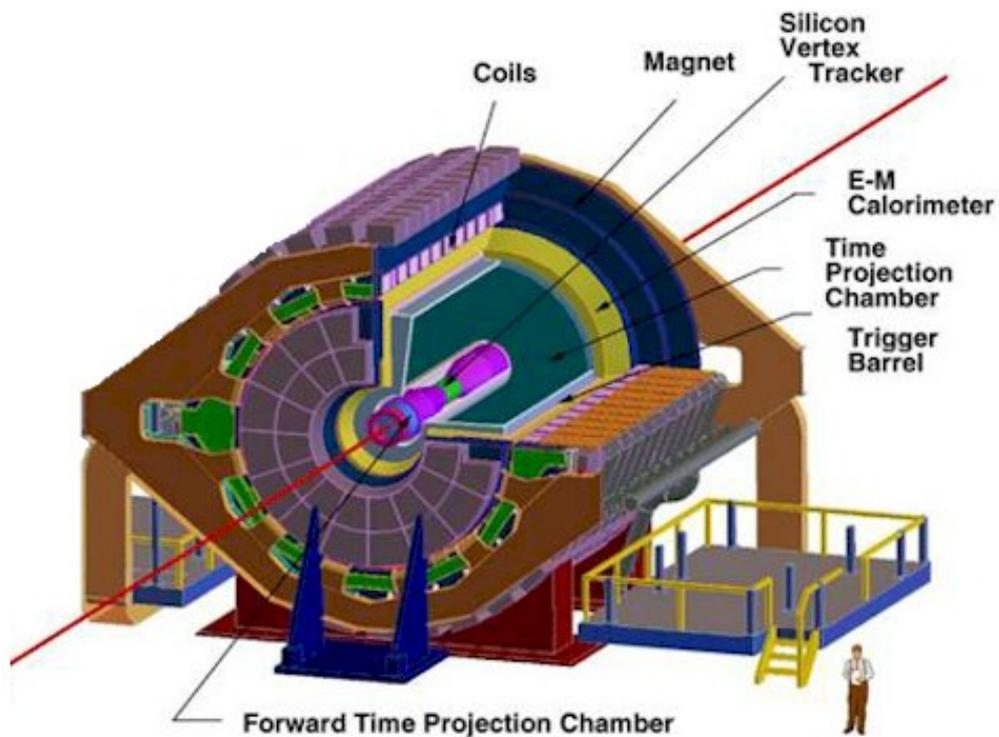


Рисунок 2

На данный момент исследованиями физики тяжелых ионов на LHC занимаются эксперименты ALICE, CMS и ATLAS, основными задачами ко-

того являются:

- Изучение Стандартной Модели в новом диапазоне энергий
- Поиск новой физики за пределами СМ
- Исследование бозона Хиггса и суперсимметрии

Задачи ATLAS определили требования, которым должен удовлетворять этот детектор. В детекторе было необходимо реализовать достаточные точности измерений при высоком быстродействии, обеспечить эффективный отбор полезных событий при значительном подавлении фоновых процессов, долговременную стабильность работы в условиях высоких радиационных нагрузок и идентификацию частиц. В установках достигнуты максимальные для физики коллайдеров размеры. [7]

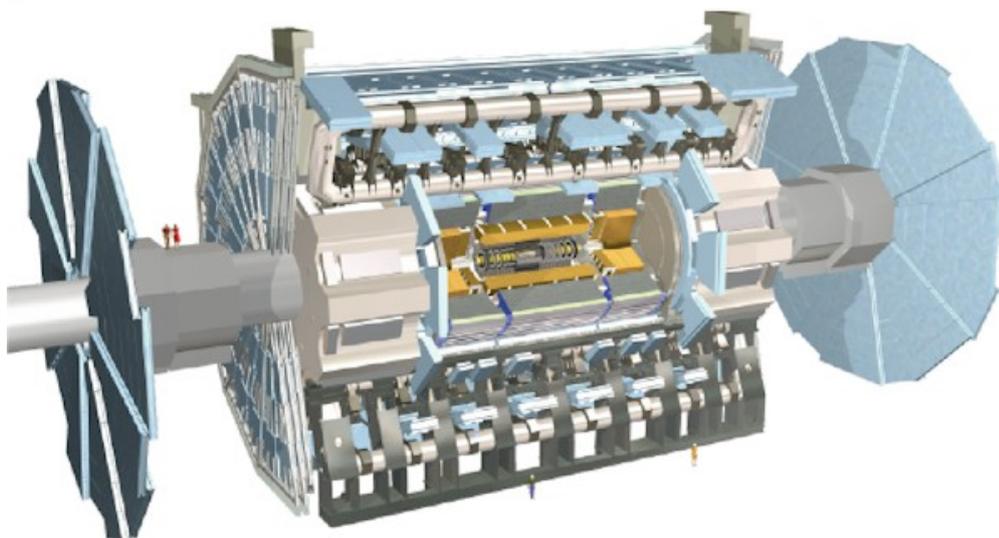


Рисунок 3

## 2. УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов прицельный параметр больше суммы радиусов налетающих частиц, поэтому адронные взаимодействия подавлены, а электромагнитные преобладают. Результатом адронных взаимодействий является взаимное разрушение сталкива-

ющихся ядер и множественное рождение частиц. Конкуренцию сильным взаимодействиям могут составить фотон-фотонные, фотон-померонные и померон-померонные взаимодействия ядер. Два ядра могут обмениваться одним или несколькими фотонами, при этом одно из них или оба ядра возбуждаются в состояние гигантского дипольного резонанса или другие возбужденные состояния. Другая возможность — фотон некогерентно взаимодействует с нуклоном другого ядра (фотоядерная реакция). В двухфотонных взаимодействиях каждое ядро испускает фотон, затем эти фотоны взаимодействуют. Фотон (померон) одного ядра может провзаимодействовать с когерентным мезонным или померонным полем другого ядра. Условие когерентности на фотонные и померонные поля сильно ограничивает кинематические характеристики рожденных частиц. Когерентность для фотонных полей означает, что это поле связано целиком с зарядом ядра, а не с зарядами отдельных протонов, составляющих ядро. Точно так же когерентное поле померона связано с сильными взаимодействиями всех нуклонов ядра. [2]

На данный момент ультрапериферические столкновения ядер является активно исследуемым направлением в релятивистской ядерной физике

### **3. ОБРАЗОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО МЕЗОНА В УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР.**

Движущийся электрический заряд является источником электромагнитного поля, для более удобного описания которого пользуются методом эквивалентных фотонов, состоящий в том, что кулоновское поле ультрарелятивистской заряженной частицы аппроксимируется пакетом свободных электромагнитных волн. Такая аппроксимация позволяет дать приближенное описание многих электромагнитных процессов, происходящих при взаимодействии быстрых частиц с различными мишенями. [3]

Векторные мезоны в АА-ультрапериферических взаимодействиях могут образоваться в когерентных реакциях, то есть в таких реакциях, когда

исходные ядра находятся в основном состоянии. Сечение эксклюзивного векторного мезона  $V$  в АА-ультрапериферических столкновениях рассчитывается по формуле:

$$\sigma(AA \rightarrow AAV) = 2 \int dk \frac{dN_\gamma(k)}{dk} \sigma(\gamma A \rightarrow VA), \quad (3.1)$$

Как видно, оно явно зависит от сечения фотоядерного образования мезона, которое может быть параметризовано, его зависимость от энергии мезонов изображена на рис.4

При малых энергиях фотонов (меньше  $10^2$  ГэВ) формфактор ядра подавляет когерентное рождение. Поперечные сечения рождения векторных мезонов для RHIC(Au+Au) и LHC(Pb+Pb) приведены на рис.5. На рис.6 указаны частоты рождения с учетом светимости ускорителей. Как можно заметить, частоты полученных векторных мезонов подобным образом достаточно велики, что позволяет исследовать их на RHIC.

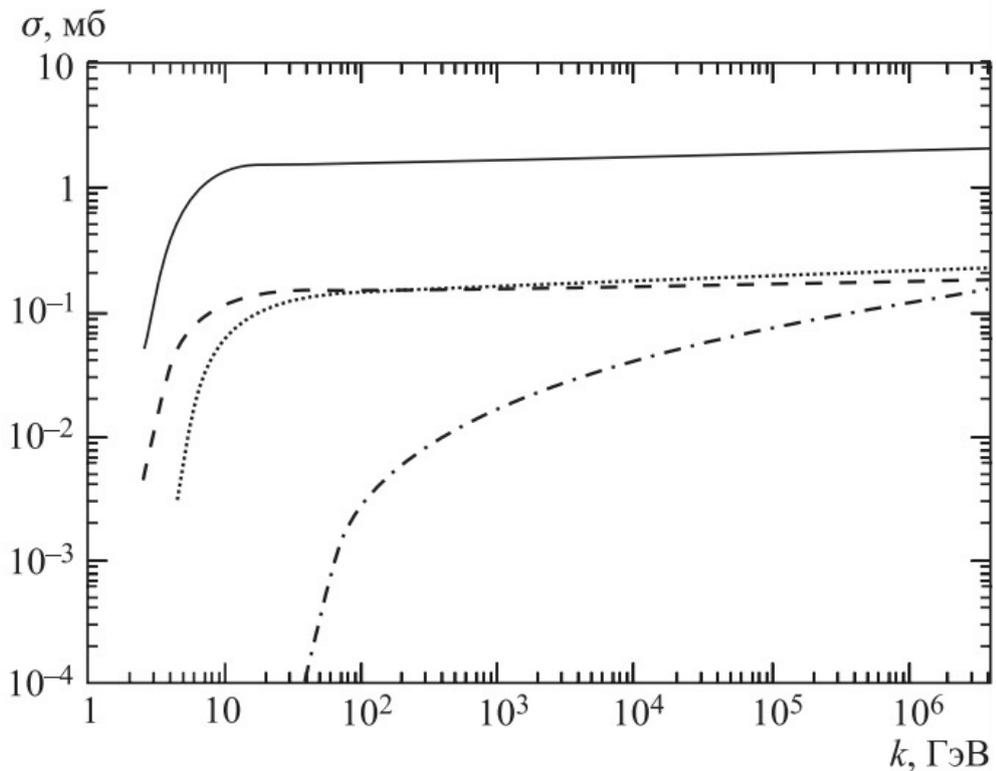


Рисунок 4

Meson	Au+Au, RHIC $\sigma(\text{mb})$	Pb+Pb, LHC $\sigma(\text{mb})$	Meson	Pb+Pb, LHC $\sigma(\text{mb})$
			$\rho^0\rho^0$	8,8
$\rho^0$	590	5200	$\omega\omega$	0,073
$\omega$	59	490	$\phi\phi$	0,076
$\phi$	39	460	$\rho^0\omega$	1,6
J/ $\psi$	0.29	32	$\rho^0\phi$	1,6
$\Upsilon$		150 $\mu\text{b}$	$\rho^0\text{J}/\psi$	0,2

Рисунок 5

Мезон	$\nu$ (RHIC), Гц	$\nu$ (LHC), Гц
$\rho^0$	120	520
$\omega$	12	49
$\phi$	7,9	46
J/ $\psi$	0,058	3,2

Рисунок 6

Образование векторных мезонов также возможно с сопровождением взаимной возбужденности сталкивающихся ионов. Каждое ядро испускает фотон, поглощаемый другим ядром, что и приводит их в возбужденное состояние. В таком состоянии ядра обычно испускают нейтроны, движущимися в продольном направлении с примерно тем же импульсом, что и исходное ядро. Это явление позволяет идентифицировать полученные таким образом векторные мезоны от их эксклюзивного рождения . [4]

## 4. ДВОЙНОЕ РАССЕЯНИЕ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ

Общие схемы производства двойного рассеяния по механизму фотон-померонного или померон-фотонного обмена показаны на рисунке 7.

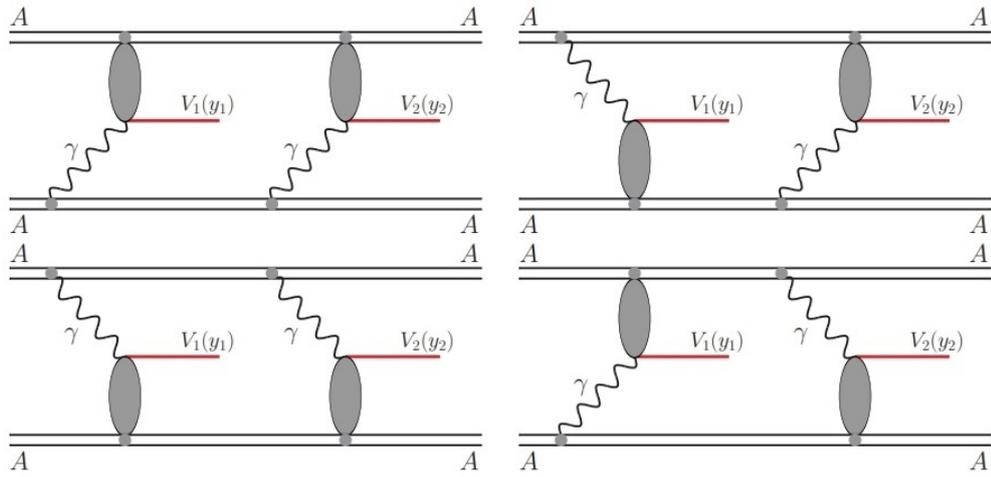


Рисунок 7

В статье [5] впервые было рассчитано распределение двойных  $\rho_0$  мезонов через механизм двойного рассеяния. Полученные результаты расчетов сравнивались с результатами коллобарации STAR по произведению четырех заряженных пионов в ходе фотон-фотонного образования  $\rho_0$  мезонов.

На рисунке 8 показано распределение по скоростям одного  $\rho_0$  мезона, полученного через механизм двойного рассеяния (красная линия), а также распределение для прямого и обратного  $\rho_0$  мезона, образованного путем фотон-фотонного слияния. Можно заметить явное преобладание компоненты двойного рассеяния над фотон-фотонной при энергиях 200 ГэВ.

На данный момент два механизма получения пионов, описанных выше, не могут быть разделены и идентифицированы в ходе экспериментов, так как это требует довольно сложных корреляционных исследований для четырех заряженных пионов. [5]

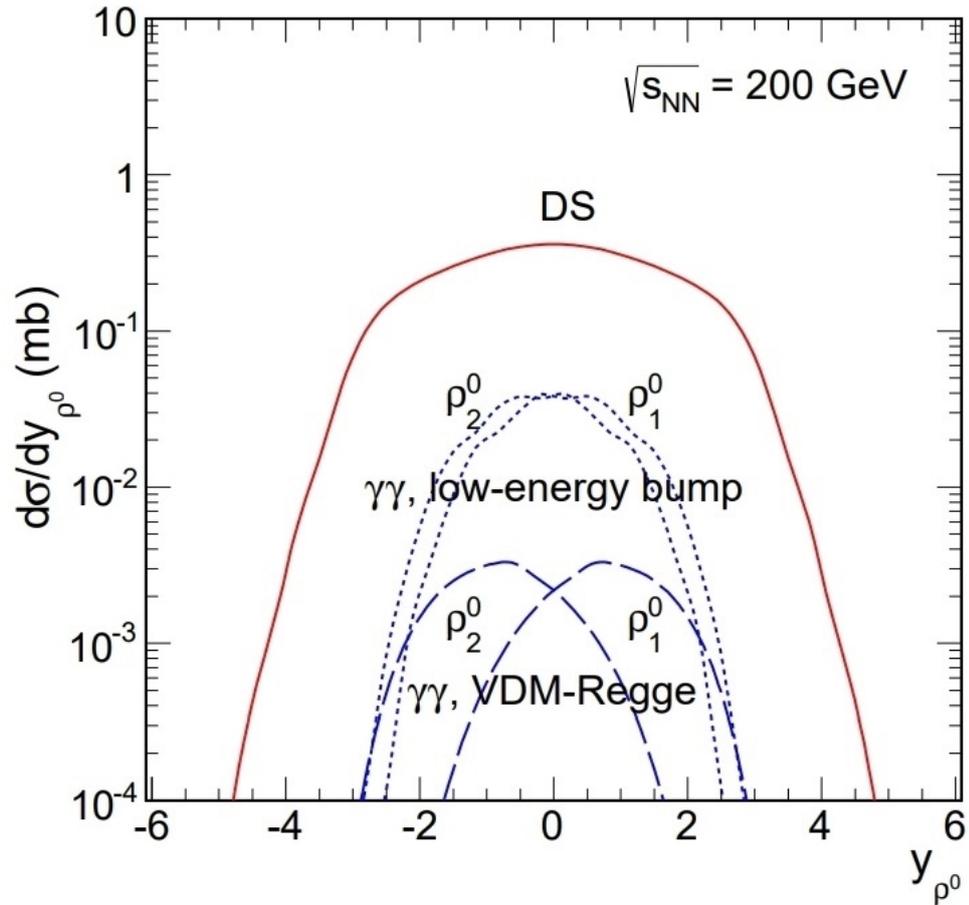


Рисунок 8

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как было сказано выше, механизм двойного рассеяния  $\rho_0$  мезонов еще нельзя идентифицировать, поэтому в заключении хотелось бы огласить дальнейший план работы по освещенной теме:

- Провести моделирование образования пары векторных мезонов при энергиях БАК с помощью пакета программ StarLight
- По полученным данным из Starlight провести полное моделирование на ATLAS
- Анализируя результаты полного моделирования, попытаться найти алгоритм идентификации двойного рассеяния векторных мезонов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Оганесян Ю. Ц., Пенионжкевич Ю. Э., Григорьев В. А. "Физика тяжелых ионов и ее приложения: Учебное пособие. 7 (2021)
- [2] Ю.П. Гангрский, В.А. Григорьев, В.М. Емельянов, К.О. Лapidус, Ю.Ц. Оганесян, Ю.Э. Пенионжкевич, Ю.В. Пятков "Введение в физику тяжелых ионов. 257 (2008)
- [3] Сыщенко В.В., Шульга Н.Ф., Шульга С.Н. "Метод эквивалентных фотонов и эйкональное приближение в теории переходного излучения". 1 (2010)
- [4] С.Л. Тимошенко, В.М. Емельянов "Рождение векторных мезонов в ультрапериферических ядро-ядерных взаимодействиях".(2006)
- [5] Mariola Klusek-Gawenda, Antoni Szczurek "Double-scattering mechanism in exclusive  $AA \rightarrow AA\rho_0\rho_0$  reaction at ultrarelativistic collisions"(2018)
- [6] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/detc/STAR.htm>
- [7] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ATLAS/atlas1.htm>