

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

УДК 539.121.667

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Физика тяжелых ионов и изучение программного пакета STARlight

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

_____ С. Л. Тимошенко

Студент

_____ А. М. Захаров

Москва 2020

Содержание

Введение	2
Эксперименты по взаимодействию тяжелых ионов	2
Классификация реакций с тяжелыми ионами	4
Цель работы	6
1 Основы изучения программного пакета STARlight	8
1.1 Взаимодействие тяжелых ионов	8
1.2 Процедура Монте-Карло моделирования	9
1.3 Возможности STARlight	10
2 Процесс работы и результаты	12
2.1 Параметры	12
Заключение	13
Список используемых источников	14

Введение

Физика тяжелых ионов стала в последние годы одним из основных направлений науки о ядерном ядре. 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. Уникальные свойства тяжелых ионов позволяют получать и исследовать ядра, существенно отличающиеся от известных по нуклонному составу, либо находящиеся в необычных состояниях. Исключительное многообразие ядерных реакций с тяжелыми ионами, огромное число возможных комбинаций ионов — ядро мишени открывают благоприятные перспективы для получения изотопов известных элементов с большим избытком или недостатком нейтронов, лежащих на границе, или даже за границей нуклонной стабильности. Только в реакциях с тяжелыми ионами можно получать ядра с атомным номером на 20-30 единиц больше, чем самые тяжелые ядра мишени. Тяжелые ионы позволяют также получать ядра с очень высокой энергией возбуждения до 300–400 МэВ и с предельно большим угловым моментом, т. е. «бешено» вращающиеся ядра.

Эксперименты по взаимодействию тяжелых ионов

Экспериментальные исследования с использованием пучков радиоактивных ядер являются новым, интенсивно развивающимся направлением физики тяжёлых ионов. Исследования в этом направлении расширяются, что объясняется появлением во многих странах мира новых мощных ускорителей тяжёлых ионов средних и промежуточных энергий — ускорительный комплекс *UNILAC – SIS – ESR* в Дармштадте (ФРГ), ускоритель-

ный комплекс *GANIL* в Кане (Франция), *RIKEN* (Япония) циклотронный комплекс тяжёлых ионов и многие другие. Среди самых известных обычно отмечают следующие три: *RHIC* (Брукхейвенская национальная лаборатория, Нью-Йорк), *SPS* (Super Proton Synchrotron)(Швейцария, Женева, ЦЕРН) и *LHC* (Large Hadron Collider)(Швейцария, Женева, ЦЕРН).

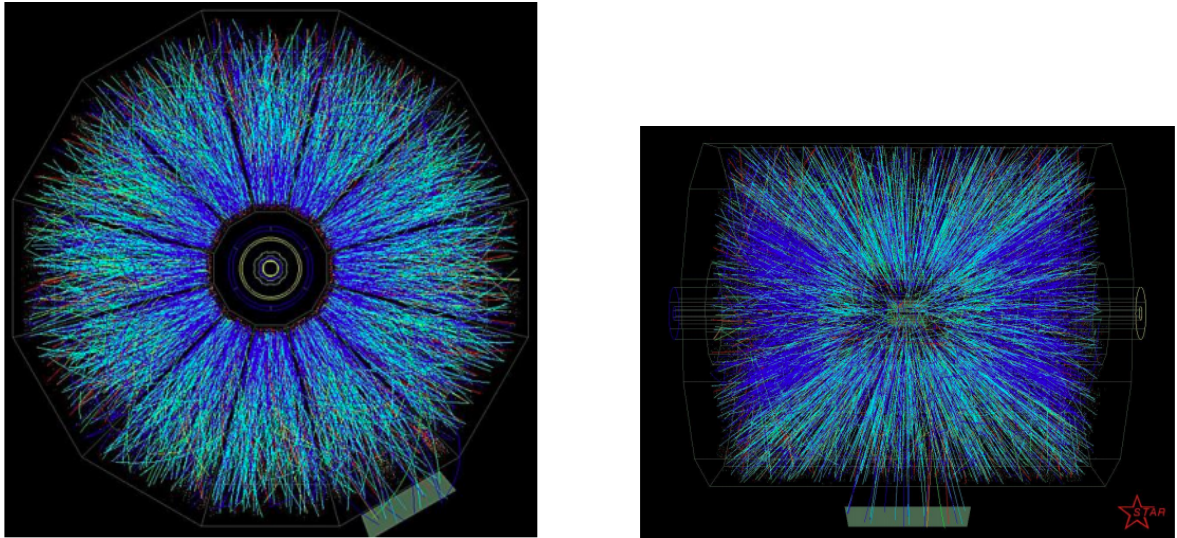


Рисунок 1 — Столкновение ионов Au-Au, зарегистрированное в детекторе STAR на коллайдере RHIC (энергия в центре масс 130 ГэВ/нуклон)

Современные детекторы оптимизированы для изучения столкновений тяжелых ионов с энергией в системе центра масс от 2.76 до 6.5 ТэВ на ядерную пару. В результате соударения ожидается плотность энергии и температуры, необходимые для образования кварк-глюонной плазмы — состояния материи, в котором кварки и глюоны находятся в свободном виде. Считается, что похожие условия существовали в первые доли секунды после Большого Взрыва, пока кварки и глюоны не связались вместе с формированием адронов и более тяжелых частиц.[1]

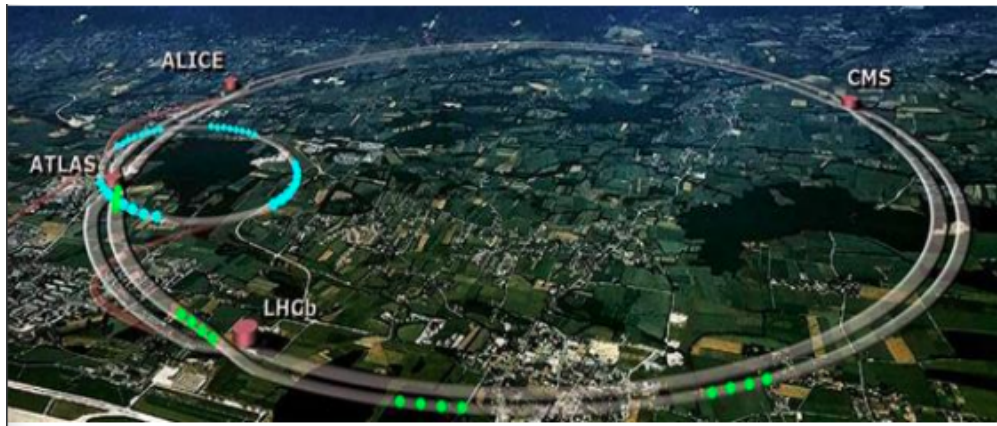


Рисунок 2 — Большой адронный колайдер, Швейцария, Женева

Классификация реакций с тяжелыми ионами

Классификация реакций тяжелых ионов с ядрами основана на их параметре столкновения b . В зависимости от величины этого параметра различают три типа реакций — дальние, касательные и близкие (лобовые) (рис. 3)

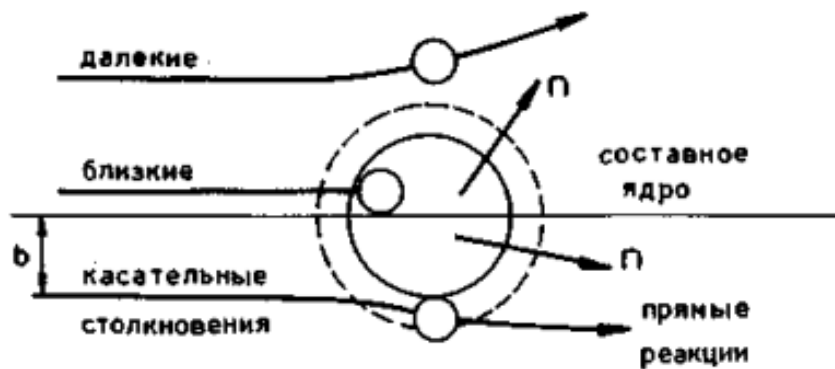


Рисунок 3 — Схематическое представление взаимодействий тяжелых ионов с ядрами в классическом приближении

При дальних столкновениях ($b > R$) поверхности ядер не соприкасаются, и между ядрами действуют лишь электромагнитные силы. В этом случае из-за взаимодействия электрических мультипольных моментов ядра

с переменным электромагнитным полем, возникающим при прохождении быстрого тяжелого иона вблизи мишени, происходит возбуждение ядерных уровней. С наибольшей вероятностью возбуждаются уровни, связанные с коллективным движением (вращением ядра или колебанием его поверхности).

При касательных взаимодействиях ($b \sim R$) поверхности ядер частично перекрываются, и в действие вступают ядерные силы, определяющие характер реакции. В этом случае может происходить упругое и неупругое рассеяние тяжелого иона на ядре мишени, передача одного или нескольких нуклонов от иона к ядру или обратно, обмен нуклонами, развал налетающего иона на фрагменты и нуклоны. Соотношение между вероятностями этих процессов зависит от энергии иона, а также от структура обоих ядер (энергии связи внешних нуклонов, соотношения чисел протонов и нейтронов в ядре, параметров деформации).

При лобовых столкновениях ($b \sim 0$) или близких к ним ($b < R$) происходит слияние ядер и образование составного ядра. Энергия возбуждения составного ядра складывается из кинетической энергии налетающего иона и энергии реакции, определяемой из соотношения масс иона, ядра-мишени M и составного ядра M_0 :

$$E = E_{ion} \frac{M}{m + m} + (m + M - M_0)c^2, \quad (1)$$

где E_{ion} – энергия иона.

Угловой момент составного ядра заключен в диапазоне от 0 до l_{max} , в котором еще не происходит развала ядерной системы под действием кулоновских и центробежных сил.

Составное ядро может характеризоваться большими значениями энергии возбуждения и углового момента, и это определяет многообразие путей его распада — эмиссия нейтронов, протонов, α -частиц, γ -квантов, а также деления. Последний процесс становится существенным для тяжелых составных ядер.

большое разнообразие реакций с тяжелыми ионами представлено схематически на рис. 4

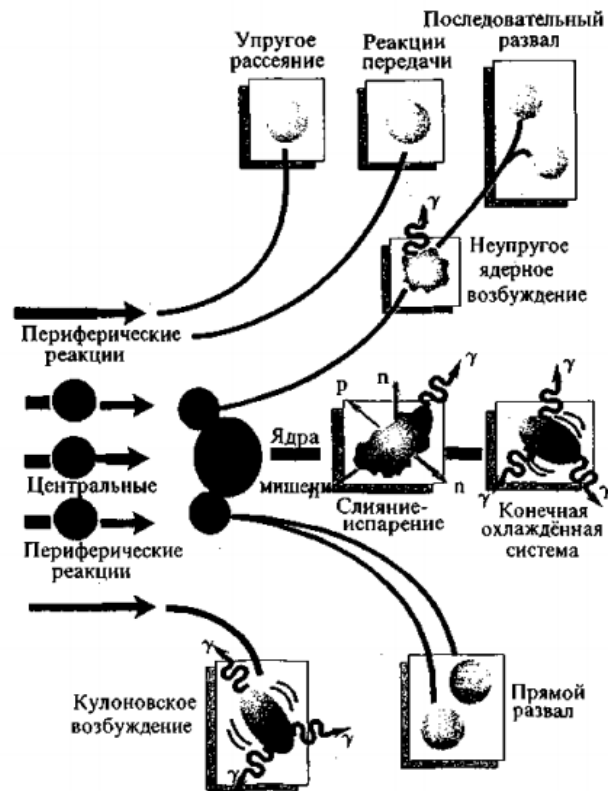


Рисунок 4 — Схематическое представление далеких, касательных и близких (лобовых) взаимодействий тяжелых ионов с ядрами в классическом приближении

Цель работы

Целью работы является изучение программы STARlight и физики взаимодействий, лежащей в ее основе. STARlight - это Монте-Карло генератор, моделирующий двухфотонное и фотон-померонное взаимодействие между релятивистскими ядрами и протонами. Программа производит множество конечных состояний. Для двух фотонов она моделирует лептонные пары и множество мезонов, а для фотоядерных взаимодействий она моделирует образование когерентных и некогерентных векторных мезонов. Необходимо так же отметить такие программные пакеты, как PYTHIA и ROOT. PYTHIA - это программа для генерации событий физики высоких энергий, т.е. для описания столкновений при высоких энергиях между эле-

ментарными частицами, такими как e^+ , e , и p в различных комбинациях. Она содержит теорию и модели для ряда аспектов физики, включая жесткие и мягкие взаимодействия, партонные распределения, партонные ливни в исходном и конечном состоянии, многопартонные взаимодействия, фрагментацию и распад. Он в значительной степени основан на оригинальных исследованиях, но также заимствует многие формулы и другие знания из литературы. ROOT же, в свою очередь, является пакетом для обработки

данных, зародившимся в ЦЕРНе, в центре исследований в области физики высоких энергий. Ежедневно тысячи физиков используют приложения ROOT для анализа своих данных или для проведения симуляций.

Среди прочего, были поставлены следующие задачи:

1. Получение ρ_0 -мезона ρ_0 и анализ с помощью программного пакета ROOT;
2. Создание нового канала $\varphi \rightarrow K_S^0 K_L^0$ для дальнейшего анализа в ROOT, моделирования в RUTHIA, сравнение результатов с экспериментом ATLAS (в случае успешного выполнения задания 1).

1 Основы изучения программного пакета STARLIGHT

1.1 Взаимодействие тяжелых ионов

Как описывалось ранее, различают три вида соударений тяжелых ионов на ускорителях - дальние, касательные и близкие. Для анализа был выбран случай периферического взаимодействия, при котором столкновение ядер происходит при больших значениях прицельного параметра b между центрами ядер, превышающем сумму радиусов ядер, то есть $b > (R_1 + R_2)$ (рис. 5). [2] [3]

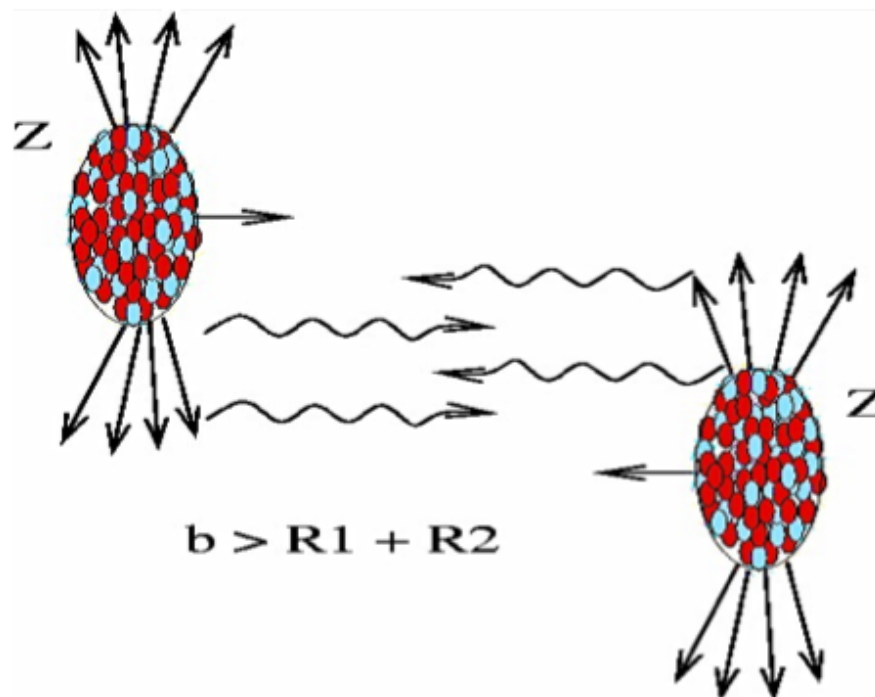


Рисунок 5 — Периферическое взаимодействие ионов

Быстро движущиеся высокозаряженные ионы несут в себе сильные электромагнитные поля, которые действуют как пучок фотонов. При таких параметрах адронные взаимодействия невозможны, и ионы взаимо-

действуют через фотонные и фотон-фотонные столкновения, известные как ультра-периферийные (UPC). Ультрапериферические адрон-адронные столкновения предоставляют уникальные возможности для изучения электромагнитных процессов. [4]

Программа STARlight рассчитывает поперечные сечения для различных конечных состояний UPC, а также создает с помощью моделирования Монте-Карло события для определения эффективности детектора. [5]

1.2 Процедура Монте-Карло моделирования

Позиции нуклонов в ядре распределены согласно функции ядерной плотности, определенной через модифицированное распределение Вудса-Саксона (двухпараметрическое распределение Ферми):

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1 + \omega \frac{r^2}{R}}{1 + \exp\left(\frac{r - R}{a}\right)} \quad (1.1)$$

Параметры подбираются из данных по столкновениям на низких энергиях: ρ_0 - нормировочный коэффициент, $R = (6,62 \pm 0,06)$ фм - радиус ядра ^{208}Pb , $a = (0,546 \pm 0,010)$ фм - характерная толщина границы ядра. Дополнительный параметр ω соответствует максимуму плотности в точке $r > 0$ для ядер свинца $\omega = 0$. В процедуре Монте-Карло генерации столкновений радиальная координата нуклона выбирается случайным образом в соответствии с распределением $4\pi r^2 \rho(r)$, а ρ_0 в 1.1 определяется из условия нормировки:

$$\int \rho(r) d^3r = A \quad (1.2)$$

Используется дополнительное условие – ограничение жестких сфер, предполагающее наличие радиуса, ближе которого нуклоны в ядре находиться не могут. Экспериментально не известно, чему равно это расстояние, принято полагать его равным $d_{min} = 0.4 \pm 0.4$ фм. Моделирование столкновения проходит в несколько этапов. Прицельный параметр выбирается случайным образом из геометрического равномерного распределения $dP/db \sim b$

вплоть до максимального значения $b_{max} \simeq 20 \text{ фм} > 2R_{Pb}$. Значение b_{max} выбирается таким образом, чтобы включать достаточно широкий диапазон, за пределами которого вероятность столкновения становится равной нулю. Для столкновения ядер используются основные принципы модели Глаубера: нуклоны претерпевают серию бинарных нуклон - нуклонных столкновений, двигаясь по прямым линиям и сталкиваясь друг с другом с одинаковым сечением неупругого рассеяния, не зависящим от числа столкновений, которые нуклон претерпевает на своем пути. Для столкновения нуклонов может быть использована модель черных дисков, когда предполагается, что столкновение произошло, если расстояние между центрами нуклонов меньше сечения неупругого нуклон-нуклонного рассеяния $d < \sqrt{\sigma_{NN}^{in}/\pi}$. Условия модели могут быть ослаблены предположением "серых дисков" с гауссовым профилем. Но это не приводит к значительным изменениям в наблюдаемых величинах, характеризующих событие.

1.3 Возможности STARLIGHT

Протон-протонный канал включает в себя достаточно разнообразный список возможных результатов, которые можно получить в ходе симуляции изменяя определенные параметры настроек. Так, протон-протонное взаимодействие может быть представлено:

Particle	Jetset
e^+e^- пара	11
$\mu^+\mu^-$ пара	13
$\tau^+\tau^-$ пара	15
$\tau^+\tau^-$, поляризованный распад	10015
ρ^0 пара	33

Таблица 1 — Двух-протонный канал

И остальные пока не интересующие нас взаимодействия. Также представлен протон-померонный канал, или канал векторных мезонов:

Particle	Jetset
$\rho^0 \longrightarrow \pi^+\pi^-$	113
$\omega \longrightarrow \pi^+\pi^-$	223
$\phi \longrightarrow K^+K^-$	333
$J/\Psi \longrightarrow e^+e^-$	443011
$J/\Psi \longrightarrow \mu^+\mu^-$	443013
$\Psi(2S) \longrightarrow e^+e^-$	444011
$\Psi(2S) \longrightarrow \mu^+\mu^-$	444013
$Y(1S) \longrightarrow e^+e^-$	553011
$Y(1S) \longrightarrow \mu^+\mu^-$	553013
$Y(2S) \longrightarrow e^+e^-$	554011
$Y(2S) \longrightarrow \mu^+\mu^-$	554013
$\rho' \longrightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	999

Таблица 2 — Протон-померонный канал

2 Процесс работы и результаты

2.1 Параметры

После изучения теоретической части вопроса были проведены попытки практического использования программного пакета STARlight. Для его использования необходимо не только понимание используемых команд и параметров, а также и умения работать в операционной системе linux. Закончив курс по изучению данной операционной системы, можно было приступить к практической части заданий.

Для получения $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ протон-померонного канала в конфигураторе STARlight были изменены (по сравнению с иначальными) следующие параметры:

PROD_MODE = 3 – Интересующее взаимодействие. В данном случае цифра 3 используется исключительно для образования ρ_0 . Цифра 1 означала бы протон-протонное взаимодействие;

N_EVENTS = 10000 – Количество симуляций выбранного взаимодействия. Чем больше симуляций, тем точнее результаты опыта;

PROD_PID = 113 – Интересующий канал. Возможные каналы уже были описаны выше в таб. 2, в данном случае 113 - это $\rho_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$.

Полученный результат предполагалось изучить более детально с помощью пакета ROOT. Однако на данном этапе возникли трудности, вследствие несовершенного знания программы по анализу данных и ограниченности времени.

Заключение

В процессе работы были изучены некоторые основы физики тяжелых ионов и расчет их взаимодействия при различных параметрах прицельного параметра b . Более детально было изучено периферическое взаимодействие тяжелых ионов. Это позволило приступить к изучению различных программных пакетов, таких как STARlight и ROOT. В работе приведены методы и возможности первого.

В дальнейшем планируется изучить более детально такие программные пакеты как ROOT и PYTHIA, решить возникшей трудности и приступить к заданию 2. Так же знакомство с новыми каналами взаимодействий STARlight, их анализ и сравнение с реальными экспериментами ATLAS, ALICE и HLIC.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *and Z. C.* Heavy Ion Physics with ATLAS // Journal of Physics: Conference Series. — 2013. — т. 455. — с. 012011.
2. STARlight: A Monte Carlo simulation program for ultra-peripheral collisions of relativistic ions / S. R. Klein [и др.] // Computer Physics Communications. — 2017. — т. 212. — с. 258–268. — ISSN 0010-4655.
3. *Bertulani C.* Peripheral Collisions of Relativistic Heavy Ions // Acta Physica Hungarica A) Heavy Ion Physics. — 2001. — т. 14, № 1–4. — с. 51–61. — ISSN 1588-2675.
4. *Baur G.* Coherent $\gamma\gamma$ and γA interactions in very peripheral collisions at relativistic ion colliders // Physics Reports. — 2002. — т. 364, № 5. — с. 359–450. — ISSN 0370-1573.
5. *Jowett J. M.* The LHC as a nucleus–nucleus collider // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 2008. — т. 35, № 10. — с. 104028.