

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 539.17

ЗАВИСИМОСТЬ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СТОЛКНОВЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОТ ЭНЕРГИИ И ТИПА ЯДЕР В МОДЕЛИ МОНТЕ–КАРЛО ГЛАУБЕРА

© 2021 г. А. Андомина^а, *, И. Сегаль^а, И. Селюженков^{а, б}

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^бGSI Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца, Дармштадт, 64291 Германия

*E-mail: andomina.alexandra@gmail.com

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

Наблюдаемые, изучаемые в экспериментах по столкновению релятивистских ядер параметры зависят от начальной геометрии, которая не может быть определена экспериментально. Стандартный метод определения связи между наблюдаемыми величинами и теоретическими параметрами начального состояния основан на модели Глаубера. В работе представлены зависимости параметров начальной геометрии столкновения тяжелых ионов от входных параметров модели Монте–Карло Глаубера, таких как неупругое сечение нуклон–нуклонного взаимодействия, зависящее от энергии столкновения, и форма ядерной плотности.

Ключевые слова: столкновения тяжелых ионов, модель Глаубера, прицельный параметр, центральность, число нуклонов–участников, число бинарных нуклон–нуклонных столкновений

DOI: 10.56304/S2079562920060044

1. ВВЕДЕНИЕ

Столкновения тяжелых ионов при различных условиях (энергиях, плотностях) позволяют изучать свойства сильно взаимодействующей ядерной материи, проявляющиеся при ее различных состояниях. Эти состояния характерны для Вселенной на ранних этапах ее эволюции (например, кварк–глюонная плазма), процесса слияния нейтронных звезд и др. Основными экспериментами по столкновению тяжелых ионов являются проекты на ускорителях в ЦЕРНе (SPS, LHC), в Брукхевенской национальной лаборатории (RHIC) и будущие эксперименты в GSI (FAIR) и в ОИЯИ (NICA). Энергии пучков в экспериментах на этих ускорителях лежат в диапазоне от нескольких гигаэлектронвольт на нуклон (NICA, FAIR, SPS) до сотен гигаэлектронвольт на нуклон (SPS, RHIC) и даже нескольких тераэлектронвольт на нуклон (LHC) [1–5].

Величины, изучаемые при столкновениях релятивистских тяжелых ионов сильно зависят от начальной геометрии: чем больше область перекрытия ядер, тем больше нуклон–нуклонных столкновений и тем больше, к примеру, множественность рожденных частиц и наоборот. Теоретически геометрия описывается прицельным параметром b —

вектором, соединяющим центры ядер в плоскости, поперечной оси пучка, измерить который напрямую в эксперименте невозможно. Экспериментально геометрия столкновения характеризуется центральностью C , которую можно определить, например, по множественности рожденных частиц или энергии нуклонов–спектаторов [3, 6]. Между этими величинами существует прямая связь: небольшим прицельным параметрам соответствуют более центральные столкновения ядер ($b = 0$, $C = 0$), а при больших прицельных параметрах столкновение является периферическим (при $C = 100\%$ ядра пролетают мимо). Модель Монте–Карло Глаубера является стандартным методом определения связи между экспериментальными и теоретическими параметрами, характеризующими начальное состояние ядро–ядерного столкновения. Зная прицельный параметр, в рамках данной модели можно вычислить величины, используемые для описания геометрических свойств столкновения, таких как N_{part} — число нуклонов–участников, т.е. нуклонов, испытавших хотя бы одно столкновение, и N_{coll} — число бинарных нуклон–нуклонных столкновений.

2. МОДЕЛЬ ГЛАУБЕРА

Модель Монте–Карло Глаубера является инструментом для описания начального состояния столкновения тяжелых ионов. В данной работе моделирование производилось с помощью программного кода, разработанного группой эксперимента PNOBOS [7].

В модели Глаубера ядро–ядерное столкновение рассматривается как последовательность независимых нуклон–нуклонных столкновений, при этом нуклоны во время столкновения движутся вдоль прямых и их траектории не зависят от числа испытанных ранее столкновений [8].

2.1. Входные параметры модели Глаубера

Во всех расчетах начальной геометрии с использованием модели Монте–Карло Глаубера некоторые экспериментальные данные передаются в качестве входных параметров модели. Наиболее важными являются ядерная плотность, измеренная в экспериментах по рассеянию электронов низких энергий, и энергетическая зависимость неупругого нуклон–нуклонного сечения.

2.1.1. Распределение ядерной плотности

Ядерная плотность описывается двухпараметрическим распределением Вудса–Саксона:

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

где ρ_0 — плотность нуклонов в центре ядра, R — радиус ядра, a — ядерная толщина и w — параметр, определяющий разницу плотности в центре ядра и на его границах.

В ходе Монте–Карло моделирования расположение нуклонов в ядре выбирается случайным образом согласно распределению $4\pi r^2 \rho(r)$ [3, 8].

2.1.2. Неупругое сечение взаимодействия

В контексте столкновений ядер высоких энергий нас обычно интересуют многочастичные нуклон–нуклонные процессы. Поскольку в сечении присутствуют взаимодействия с малым переданным импульсом, его невозможно рассчитать с помощью теории возмущений КХД. В связи с этим, измеренное неупругое нуклон–нуклонное сечение $\sigma_{\text{inel}}^{NN}$, используемое в качестве входного параметра, обеспечивает единственную зависимость от энергии пучка для глауберовских расчетов. Дифракционные и упругие процессы в столкновении многочастичных ядер с высокой энергией не учитываются [8, 9].

2.2. Моделирование процесса столкновения ядер

В модели Монте–Карло Глаубера сталкивающиеся ядра рассматриваются как набор нуклонов, положение которых моделируется в соответствии с распределением Вудса–Саксона. Прицельный параметр задается случайным образом согласно распределению $db/db = 2\pi b$. Взаимодействие между нуклонами происходит при выполнении условия:

$$d \leq \sigma_{\text{inel}}^{NN}/\pi, \quad ()$$

где d — расстояние между нуклонами в поперечной плоскости к оси пучка. При этом предполагается, что неупругое сечение взаимодействия не зависит от числа нуклон–нуклонных столкновений, испытанных нуклоном ранее [8].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Зависимость распределения n прицельного параметра b от параметров распределения Вудса–Саксона

Для определения связи прицельного параметра с ядерной плотностью были построены зависимости распределения величины b от параметров распределения Вудса–Саксона.

Как говорилось ранее, параметр a — ядерная толщина, которая определяет размытость границ ядра. Представленные на рис. 1 зависимости отражают тот факт, что при увеличении данного параметра хвост распределения прицельного параметра движется в сторону больших b . Это связано с увеличением числа нуклонов на все больших расстояниях от центра ядер.

Для $b = 20$ фм распределение обрывается, что соответствует ограничению на прицельный параметр в программном коде [7]. Зависимость прицельного параметра от параметра w много слабее.

3.2. Зависимость основных геометрических параметров от неупругого нуклон–нуклонного сечения

Различные эксперименты по столкновению тяжелых ядер проводятся в большом диапазоне энергий (от нескольких гигаэлектронвольт до нескольких тераэлектронвольт), поэтому энергетическая зависимость геометрических параметров ядро–ядерных столкновений является одной из важнейших. Для изучения влияния энергии на параметры начальной геометрии столкновения были построены их зависимости от неупругого нуклон–нуклонного сечения. В работе использовались значения $\sigma_{\text{inel}}^{NN}$, приведенные в табл. 1. Для каждого сечения указаны соответствующие энергии, приходящиеся на нуклонную пару в системе центра масс. Здесь моделирование проводилось

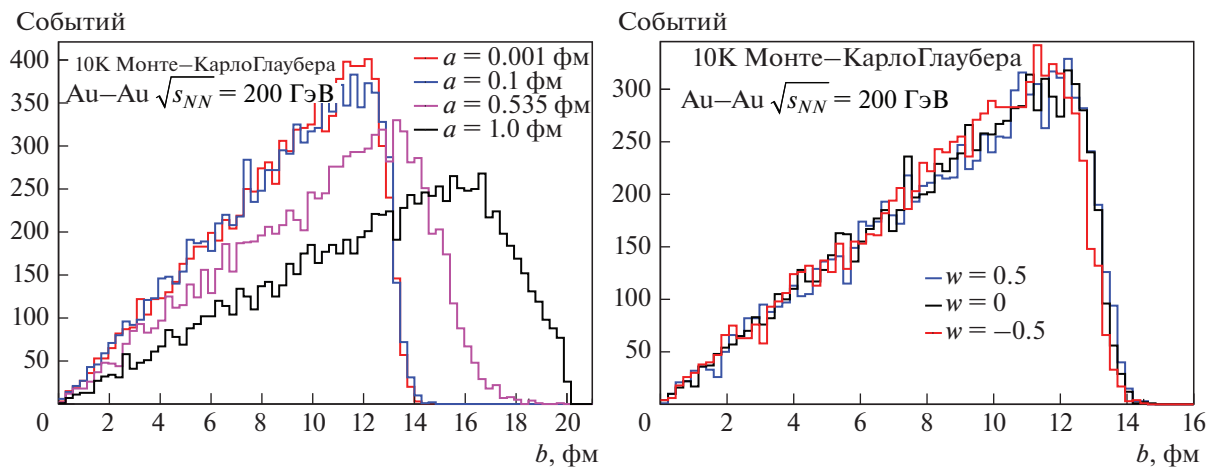


Рис. 1. Зависимость распределения прицельного параметра от параметра a (слева) и w (слева).

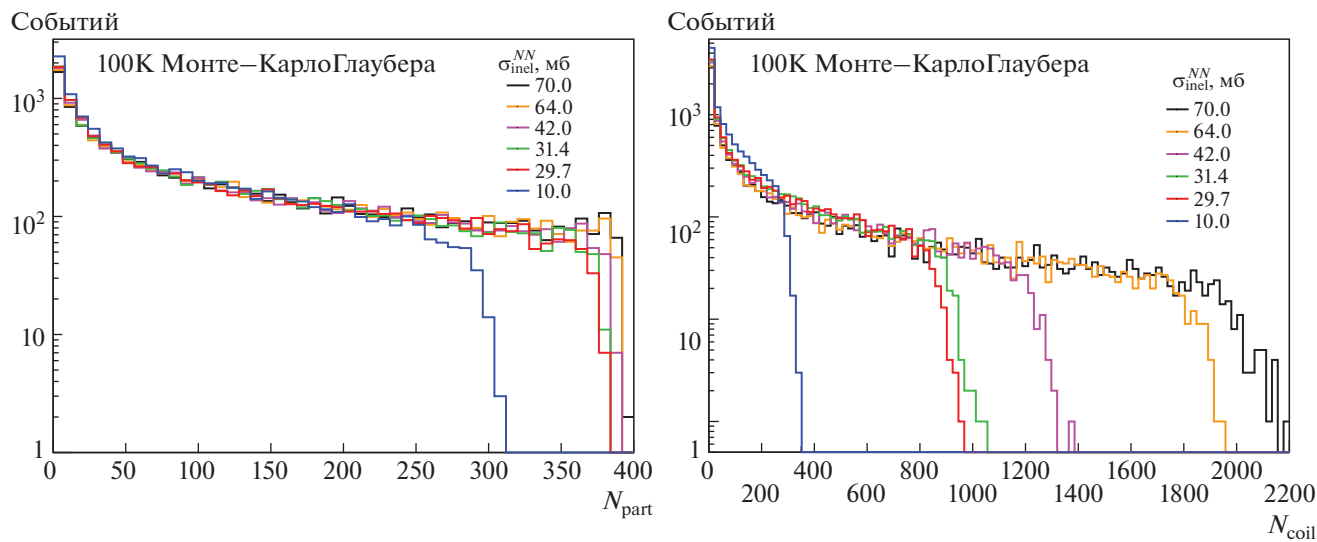


Рис. 2. Энергетическая зависимость распределений числа нуклонов–участников (слева) и числа бинарных нуклон–нуклонных столкновений (справа).

для столкновений ядер золота ^{197}Au с параметрами в распределении Вудса–Саксона: $R = 6.38$ фм, $a = 0.535$ фм, $w = 0$.

Таблица 1.

$\sigma_{\text{inel}}^{\text{NN}}$, мб	$\sqrt{s_{\text{NN}}}$, ГэВ
10.0	2.0
29.7	7.7
31.4	10.0
42	200
64	$3.5 \cdot 10^3$
70	$6 \cdot 10^3$

Зависимости числа нуклонов–участников N_{part} и числа бинарных столкновений N_{coll} от сечения неупругого нуклон–нуклонного взаимодействия приведены на рис. 2. N_{part} ограничено справа числом нуклонов в сталкивающихся ядрах. Для N_{coll} характерна сильная зависимость от сечения: с ростом энергии, все больше нуклонных пар испытывают хотя бы одно столкновение. Также было произведено исследование (здесь не приводится) зависимости прицельного параметра b от сечения. Форма распределений прицельного параметра при разных сечениях совпадает вплоть до $b \approx 12$ фм, что примерно соответствует удвоенному радиусу ядер. С увеличением сечения хвост распределения двигается в сторону больших b , что говорит об увеличении нуклон–нуклонных

$\sigma_{\text{inel}}^{NN}$, столкновений при больших прицельных параметрах с ростом энергии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование зависимостей начальных условий столкновения тяжелых ионов, смоделированных с помощью модели Монте–Карло Глаубера, от сечения неупругого нуклон–нуклонного взаимодействия (от энергии) и распределения материи в сталкивающихся ядрах. Характерными являются сильные зависимости числа бинарных нуклон–нуклонных столкновений от энергии, а также формы распределения прицельного параметра для периферийных столкновений от типа ядер. В дальнейшем планируется использовать модель Монте–Карло Глаубера для определения распределения модельных параметров столкновения в различных классах центральности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект “Фундаментальные свойства элементарных частиц и космология” № 0723-2020-0041, Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках исследователь-

ского проекта № 18-02-40086, программой исследований и инноваций Европейского Союза Horizon 2020 в рамках грантового соглашения № 871072, Национальным исследовательским ядерным университетом “МИФИ” в рамках проекта “Российская академическая подготовка” (контракт № 02.a03.21.0005, 27.08.2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Klochkov V. and Selyuzhenkov I. (CBM) // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012059.
2. Zhrebtsova E., Klochkov V., Selyuzhenkov I., Taranenko A., and Kashirin E. // KnE Energ. Phys. 2018. V. 3. P. 275.
3. Collaboration (ALICE) // ALICE-PUBLIC-2018-011 (2018).
4. Parfenov P., Selyuzhenkov I., Taranenko A., and Trutse A. // Proc. 18th Lomonosov Conf. Elementary Particle Physics. 2019. P. 402–403.
5. Das S.J., Giacalone G., Monard P.-A., and Ollitrault J.-Y. // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 014905.
6. Adamczewski-Musch J. et al. (HADES) // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 85.
7. Loizides C., Nagle J., and Steinberg P. // SoftwareX. 2015. Nos. 1–2. P. 13.
8. Miller M.L., Reygers K., Sanders S.J., and Steinberg P. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2007. V. 57. P. 205.
9. Zyla P. et al. (Particle Data Group) // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. P. 083C01.

Dependence of the Initial Conditions in Relativistic Heavy-Ions Collisions on the Energy and Type of Nuclei in the Monte Carlo Glauber Model

A. Andomina^{1, *}, I. Segal¹, and I. Selyuzhenkov^{1, 2}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, 64291 Germany

*e-mail: andomina.alexandra@gmail.com

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The observed parameters studied in experiments on the collision of relativistic nuclei depend on the initial conditions, which cannot be determined experimentally. The standard method for determining the relationship between observables and theoretical initial state parameters is based on the Glauber model. We present the dependences of the parameters of the initial conditions of the heavy ion collisions on the input parameters of the Monte Carlo Glauber model, such as the inelastic cross section of the nucleon–nucleon interaction, which depends on the collision energy, and the nuclear density.

Keywords: heavy–ion collisions, Monte Carlo Glauber model, impact parameter, number of participating nucleons, binary nucleon–nucleon collision