

УДК 539.144:539.14

## ФОРМИРОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ КЛАСТЕРОВ И ГИПЕРЯДЕР В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В МОДЕЛИ RHQMD

© 2020 г. В. Киреев<sup>1</sup>\*, Й. Айхелин<sup>2</sup>, Е. Братковская<sup>3,4</sup>, А. Ле Февр<sup>3</sup>, В. Ленивенко<sup>1</sup>,  
В. Колесников<sup>1</sup>, И. Лейфелс<sup>3</sup>, В. Воронюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Университет Нант, Нант, Франция

<sup>3</sup>Центр по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца, Дармштадт, Германия

<sup>4</sup>Франкфуртский университет имени Иоганна Вольфганга Гёте, Институт теоретической физики,  
Франкфурт-на-Майне, Германия

\*E-mail: vkireyeu@jinr.ru

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Новая динамическая транспортная модель RHQMD (Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics) была использована для описания столкновений тяжелых ионов, образования кластеров и гиперядер. Представлены первые результаты предсказаний модели по выходам странных барионов, ядерных кластеров и гиперядер в элементарных столкновениях и в столкновениях тяжелых ионов при энергиях NICA. Исследована зависимость некоторых наблюдаемых к “жесткому” и “мягкому” уравнению состояния ядерной материи в модели RHQMD.

DOI: 10.31857/S0367676520080177

### ВВЕДЕНИЕ

Основной целью новых готовящихся экспериментов NICA-MPD и BM@N в Дубне и CBM в Дармштадте является изучение фазовой диаграммы КХД при относительно низких температурах и высоких барионных плотностях в соударениях тяжелых ионов при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} < 11$  ГэВ.

Столкновения тяжелых ионов представляют уникальную возможность создавать и изучать горячую и плотную материю в лабораторных условиях. При релятивистских энергиях, на начальных этапах столкновения, образуется новый вид материи, кварк-глюонная плазма, в то время как по мере расширения и остывания материи проходят процессы адронизации и образования кластеров. Захват образованных гиперонов кластерами нуклонов ведет к образованию гиперядер, что является очень редким процессом, когда реакцию протекает при пороговых энергиях рождения странности. Динамическое формирование фрагментов может привести к более точному описанию распределения поперечного импульса и коллективных анизотропных потоков частиц. Это может также помочь в исследовании таких явлений как образование гиперядер, фазового перехода первого рода, обра-

зование фрагментов при ультрарелятивистских энергиях.

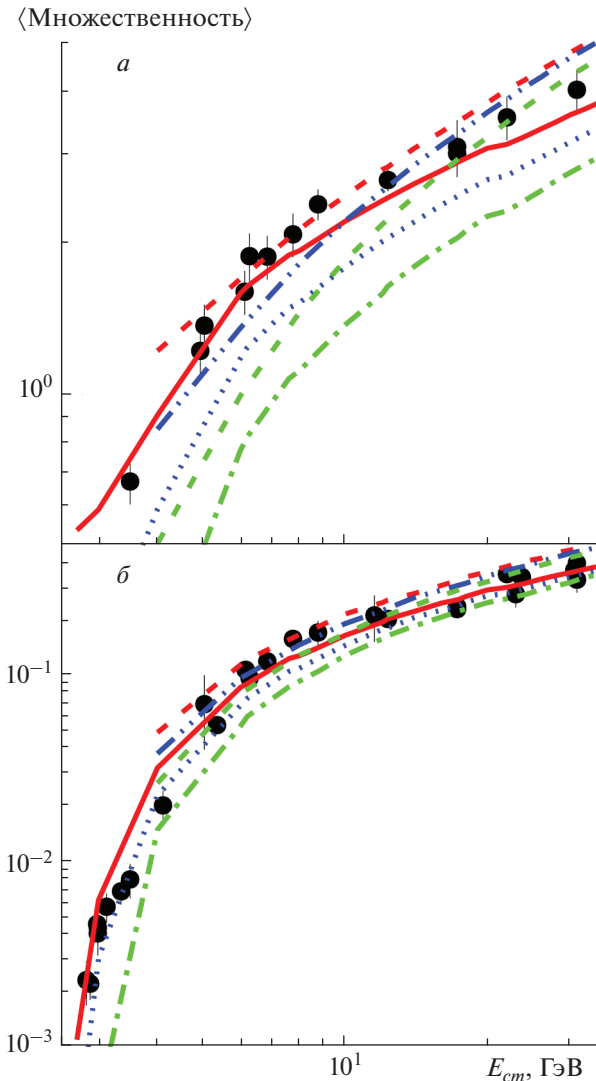
### МОДЕЛЬ RHQMD

Транспортная “*n*-body” модель RHQMD [1] является развитием широко известной модели Parton-Hadron-String Dynamics (PHSD) [2], которая включает в себя партонную фазу (кварки и глюоны), уравнение состояния для партонной фазы из решеточной КХД, динамическую адронизацию и упругие и неупругие столкновения адронов в конечном состоянии вместе с двухчастичными потенциальными взаимодействиями между барионами как в подходе квантовой молекулярной динамики (Quantum Molecular Dynamics, QMD) [3], где барионы описываются волновыми функциями гауссова типа. Это позволяет выбрать уравнение состояния материи с различным модулем сжимаемости. Образование кластеров, включая гиперядра, реализовано с помощью алгоритма Simulated Annealing Clusterization Algorithm (SACA) [6].

Неупругие адрон-адронные столкновения при высоких энергиях в подходе RHQMD (также, как и в PHSD) описываются струнными моделями FRITIOF 7.02 и PYTHIA (v. 6.4). При низких

**Таблица 1.** Набор параметров уравнения состояния в модели RHQMD

	$\alpha$ , МэВ	$\beta$ , МэВ	$\gamma$	$K$ , МэВ
S	-390	320	1.14	200
H	-130	59	2.09	380



**Рис. 1.** Средняя множественность пионов  $\pi^+$  (а) и каонов  $K^+$  (б) рожденных в неупругих столкновениях нуклонов. Предсказания модели RHSD показаны сплошными красными линиями для столкновений  $p + p$ , синими точечными линиями для  $p + n$  и зелеными штрих-пунктирными линиями для  $n + n$ . Предсказания модели RYTHIA показаны красными штриховыми линиями для  $p + p$ , синими штрих-пунктирными линиями с двумя точками для  $p + n$  и зелеными штриховыми линиями для  $n + n$ . Черные кружки показывают набор экспериментальных данных для  $p + p$  столкновений [7–14].

энергиях описание адрон-адронных столкновений основано на экспериментальных нуклон-нуклонных, мезон-нуклонных и мезон-мезонных сечениях в широком кинематическом диапазоне. В режиме “среднего поля” инициализация нуклонов ядра в координатном пространстве реализована с помощью точечных тестовых частиц, распределенных случайным образом в соответствии с плотностью Вудса–Саксона, в импульсном пространстве в соответствии с распределением Томаса–Ферми. В режиме “QMD” используется одночастичная плотность Вигнера. Взаимодействие между нуклонами состоит из двух частей, локального потенциала Скирма и кулоновского взаимодействия:

$$V_{i,j} = V(\vec{r}_i, \vec{r}_j, \vec{r}_{i0}, \vec{r}_{j0}, t) = V_{Skyrme} + V_{Coul} = \frac{1}{2} t_1 \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) + \frac{1}{\gamma + 1} t_2 \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \times \rho^{\gamma-1}(\vec{r}_i, \vec{r}_j, \vec{r}_{i0}, \vec{r}_{j0}, t) + \frac{Z_i Z_j e^2}{2 |\vec{r}_i - \vec{r}_j|}, \quad (1)$$

где  $\vec{r}_i, \vec{r}_j, \vec{r}_{i0}, \vec{r}_{j0}$  – координаты нуклонов,  $\gamma$  – параметр потенциала и  $\rho$  – барионная плотность (см. уравнение 10 в [1]). Для потенциала Скирма используется аналитическая форма:

$$\langle V_{Skyrme}(\vec{r}_{i0}, t) \rangle = \alpha \left[ \frac{\rho_{int}(\vec{r}_{i0}, t)}{\rho_0} \right] + \beta \left[ \frac{\rho_{int}(\vec{r}_{i0}, t)}{\rho_0} \right]^\gamma, \quad (2)$$

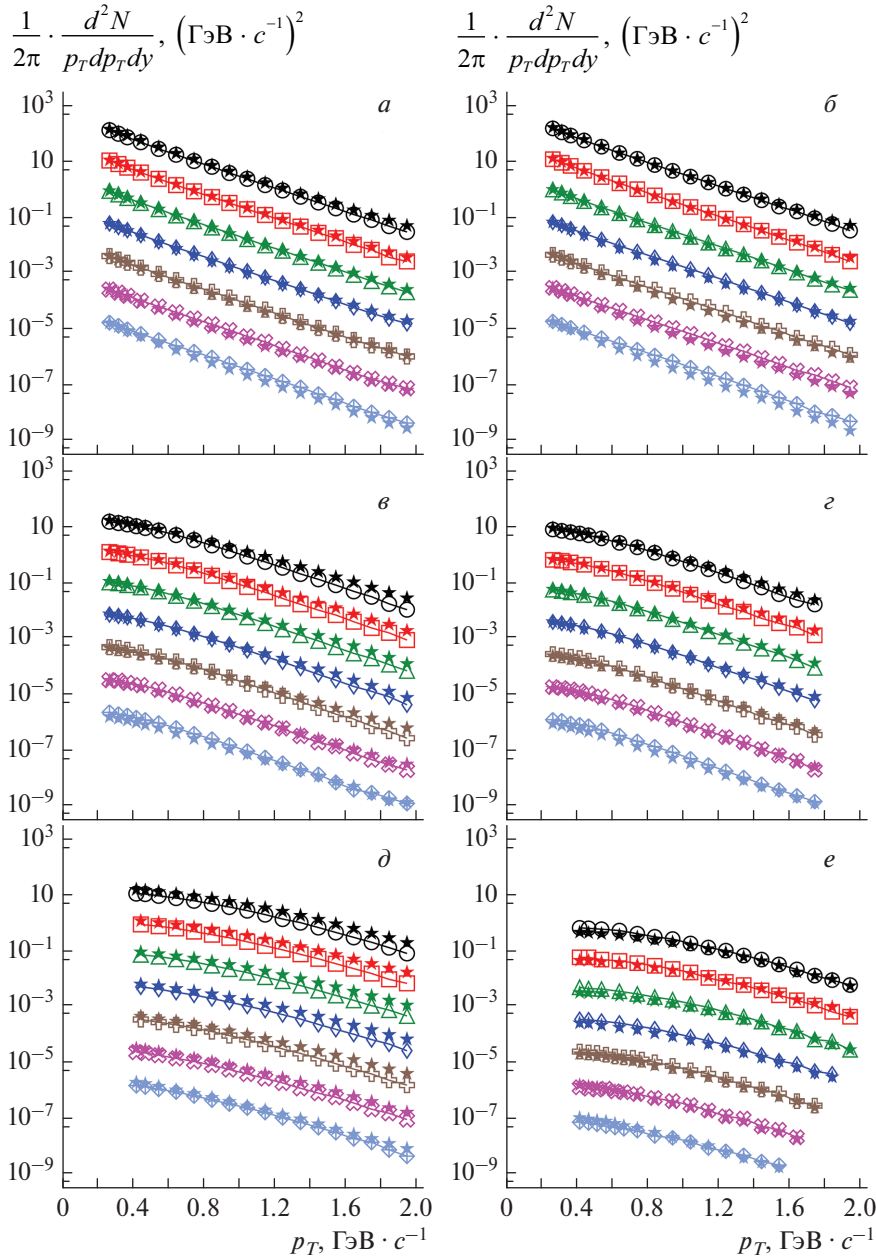
где  $\rho_{int}$  – это плотность взаимодействия, полученная сверткой распределения плотности частицы с функциями распределения всех других частиц окружения,  $\rho_0 = 0.168 \text{ фм}^{-3}$  – нормальная барионная плотность.

Для определенного значения  $\gamma$  параметры  $t_1, t_2$  в выражении (1) соответствуют уникальным образом коэффициентам  $\alpha, \beta$  из выражения (2). Набор параметров для ядерного уравнения состояния, используемый в RHQMD, приведен в табл. 1.

Уравнение состояния с относительно низким значением модуля сжимаемости  $K$  приводит к слабому отталкиванию ядерной материи и таким образом описывает “мягкую” материю (далее обозначено как “S”). Высокое значение  $K$  приводит к сильному отталкиванию ядерной материи при сжатии, такое уравнение состояния называется “жестким” (далее обозначено как “H”).

## ОБРАЗОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ

Модель RHQMD сохраняет корреляции в системе и не подавляет флуктуации. Так как кластеры являются многочастичными, эта модель хорошо подходит для изучения образования кластеров и их эволюции с течением времени.



**Рис. 2.** Поперечный импульс  $p_T$  в области средних быстрот  $y$  для  $\pi^+$  (а),  $\pi^-$  (б),  $K^+$  (в),  $K^-$  (г),  $p$  (д) и  $\bar{p}$  (е) в столкновениях ядер золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$  ГэВ. Показаны предсказания модели RHQMD с “жестким” уравнением состояния в сравнении с данными эксперимента STAR (показаны звездами) из [15] для различных классов центральности. Спектры разных центральностей нормированы на соответствующие коэффициенты для лучшего отображения: 0–5% · 1 (круги); 5–10% ·  $10^{-1}$  (квадраты); 10–20% ·  $10^{-2}$  (треугольники); 20–30% ·  $10^{-3}$  (ромбы); 30–40% ·  $10^{-4}$  (кресты); 40–50% ·  $10^{-5}$  (повернутые кресты); 50–60% ·  $10^{-6}$  (повернутые квадраты с крестом).

Простейшие способы обнаружить фрагменты — это использование коалесценции или минимального остовного дерева (MST). Первый способ требует большого числа свободных параметров, второй может быть использован для идентификации фрагментов только в конце эволюции реакции, когда группы нуклонов хорошо разделены в

координатном пространстве, что исключает изучение происхождения фрагментов [4].

Для того, чтобы выйти за предел ограничения того, что фрагменты могут быть идентифицированы только на финальных этапах реакции, можно использовать информацию о координатном

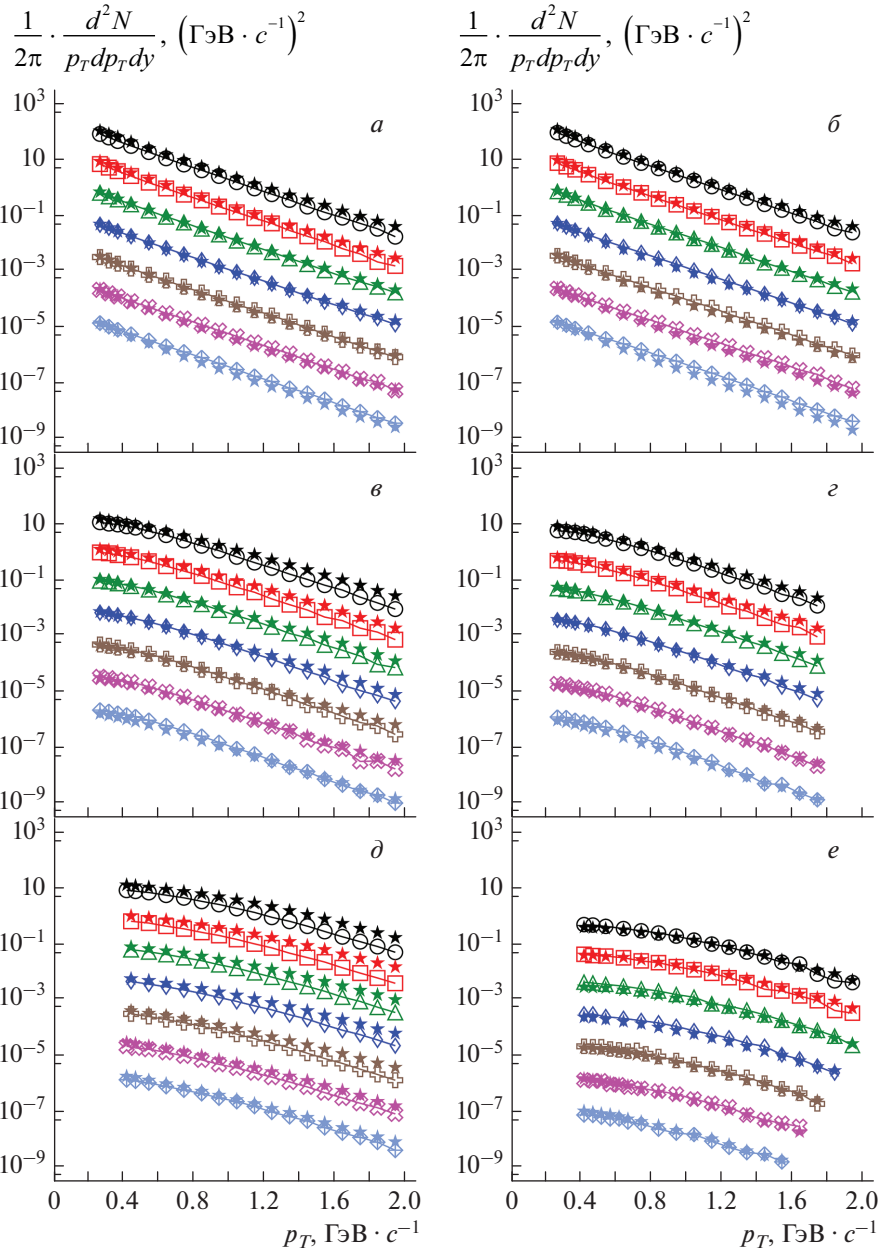


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но с “мягким” уравнением состояния.

пространстве вместе с импульсным. Эта идея была предложена Дорсо и др. в работе [5] и получила развитие в алгоритме “Simulated Annealing Clustering Algorithm” (SACA).

Алгоритм SACA состоит из следующих шагов: вначале алгоритм собирает координаты и импульсы всех нуклонов в выбранный момент времени  $t$ , чтобы определить кластеры в фазовом пространстве с помощью техники MST. На втором шаге MST-фрагменты и отдельные частицы комбинируются всеми возможными способами во фрагменты или оставляются отдельными нук-

лонами так, чтобы найти конфигурацию с наиболее высокой энергией связи. Эта процедура повторяется очень много раз в так называемом алгоритме Метрополиса, что автоматически приводит к наиболее связанной конфигурации. Мы отмечаем, что в области спекторов кластеры, выбранные подобным образом на ранних этапах, являются пре-фрагментами финальных кластеров, так как фрагменты – это не случайный набор частиц в конце реакции, а корреляция “начальный–финальный этапы”.

ПРЕДСКАЗАНИЯ МОДЕЛИ

*Элементарные столкновения*

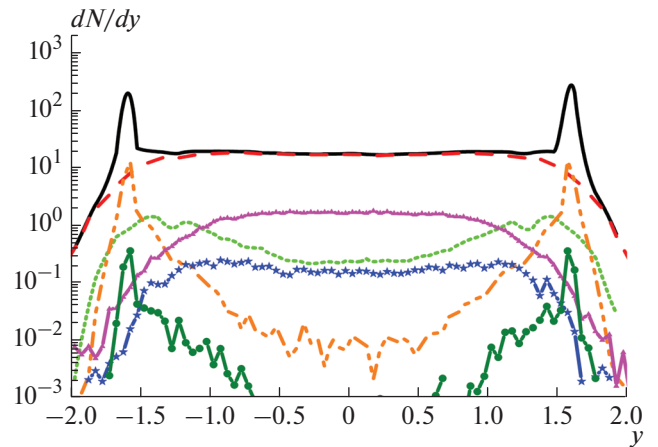
Для того, чтобы быть уверенным в описании рождения частиц в столкновениях тяжелых ионов, нужно убедиться в правильности образования частиц в элементарных столкновениях. Это нетривиальная задача из-за отсутствия экспериментальных данных, особенно о мультистранных гиперонах в области энергий коллайдера NICA. Более того, так как в столкновениях тяжелых ионов во взаимодействии принимают участие и протоны, и нейтроны, очень важно иметь корректное изоспиновое разложение для рожденных частиц в реакциях  $p + p$ ,  $p + n$  и  $n + n$ . Например, рис. 1 показывает энергетическую зависимость средней множественности рождения положительно заряженных пионов (рис. 1а) и каонов (рис. 1б) в неупругих столкновениях  $p + p$ ,  $p + n$  и  $n + n$  в сравнении с компиляцией существующих экспериментальных данных (кружки) для  $p + p$  столкновений [7–14]. Предсказания модели RHQMD показаны сплошными линиями. Так как для элементарных реакций в модели RHQMD было введено множество модификаций (“tune”) из PHSD для лежащей в основе струнной модели (FRITIOF 7.02 and PYTHIA6.4), на рис. 1 показаны также предсказания модели PYTHIA 8.2 (штрихованные линии) со стандартными настройками. Как видно из рис. 1, модель RHQMD с “PHSD tune” хорошо описывает экспериментальные данные выходов пионов и каонов в столкновениях  $p + p$ .

*Столкновения тяжелых ионов*

На рис. 2 и 3 показаны поперечные импульсы протонов, анти-протонов и рожденных мезонов в сравнении с данными эксперимента STAR для столкновений ядер золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$  ГэВ [15] для “мягкого” и “жесткого” уравнения состояния (Equation of State, EoS) соответственно. Зависимость спектров от центральности хорошо описывается, “жесткое” уравнение состояния увеличивает наклон спектра при высоких значениях поперечного импульса  $p_T$  в сравнении с “мягким” уравнением состояния, однако наклон спектра протонов немного недооценен при больших  $p_T$ .

*Образование гиперядер*

На рис. 4 показано быстрое распределение частиц с зарядами  $Z = 1$ ,  $Z = 2$ , более тяжелых кластеров ( $Z > 2$ ),  $\Lambda$  гиперонов, легких ( $A \leq 4$ ) и тяжелых ( $A > 4$ ) гиперядер идентифицированных алгоритмом MST в столкновениях ядер золота при  $10 A \cdot$  ГэВ. Мы наблюдаем увеличение выходов более тяжелых фрагментов и гиперядер в обла-



**Рис. 4.** Предсказания модели RHQMD (“жесткое” уравнение состояния, алгоритм MST) для быстрых распределений всех заряженных частиц (сплошная черная линия), частиц с  $Z = 1$  (красная штриховая линия), кластеров с  $Z = 2$  (зеленая точечная линия),  $Z > 2$  (оранжевый штрихпунктир с двумя точками),  $\Lambda$  гиперонов (пурпурная линия с треугольниками) а так же легких гиперядер с  $A \leq 4$  (синяя линия со звездами) и тяжелых гиперядер с  $A > 4$  (зеленая сплошная линия с точками) как функций быстроты в центральных столкновениях ядер золота при  $10 A \cdot$  ГэВ.

сти фрагментации мишени и пучка, и практически равномерное распределение частиц с зарядом  $Z = 1$  между этими областями. В области центральных быстрот только небольшое количество гиперонов связано в гиперядра, тогда как в области быстрот мишень/пучок множество образованных гиперонов связано в более крупные гиперядра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены базовые идеи транспортной модели RHQMD, которая в данный момент находится в активной разработке. Модель сочетает в себе подходы “среднего поля” и QMD, что позволяет изучать различные описания столкновений тяжелых ионов. Интегралы столкновений взяты из модели PHSD, поиск фрагментов реализован алгоритмом SACA или более простой техникой MST. Показано, что модель RHQMD с настройками “PHSD tune” струнной модели показывает хорошее согласие с экспериментальными данными выходов пионов и каонов в элементарных столкновениях  $p + p$  в области энергий NICA. Обнаружено, что спектр поперечного импульса адронов чувствителен к уравнению состояния ядерной материи (EoS). Модель RHQMD находит кластеры в центральной области быстрот, так же, как и в области фрагментации мишени/пучка. Следаны предсказания по образованию фрагментов и гипер ядер для будущих экспериментов NICA.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 19-42-04101 и Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aichelin J.* // ArXiv: 1907.03860. 2019.
2. *Cassing W., Bratkovskaya E.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. Art. № 034919.
3. *Aichelin J., Stöcke H.* // Phys. Lett. B 1988. V. 176. P. 14.
4. *Gossiaux P.B., Puri R., Hartnack Ch., Aichelin J.* // Nucl. Phys. A. 1997. V. 619. P. 379.
5. *Dorso C.O., Randrup J.* // Phys. Lett. B. 1993. V. 301. P. 328.
6. *Puri R.K., Aichelin J.* // J. Comput. Phys. 2000. V. 162. P. 245.
7. *Abgrall N., Aduszkiewicz A., Ali Y. et al. (NA61/SHINE Collaboration)* // Eur. Phys. J. C. 2014. V. 74. P. 2794.
8. *Aduszkiewicz A., Ali Y., Andronov E. et al. (NA61/SHINE Collaboration)* // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 671.
9. *Alt C., Anticic T., Baatar B. et al. (NA49 Collaboration)* // Eur. Phys. J. C. 2006. V. 45. P. 343.
10. *Anticic T., Baatar B., Bartke J. et al. (NA49 Collaboration)* // Eur. Phys. J. C. 2010. V. 68. P. 1.
11. *Anticic T., Baatar B., Bartke J. et al. (NA49 Collaboration)* // Eur. Phys. J. C. 2010. V. 65. P. 9.
12. *Gazdzicki M., Röhlich D.* // Z. Phys. C. 1996. V. 71. P. 55.
13. *Baldini A., Flaminio V., Moorhead W.G., Morrison Douglas R.O.* Landolt-Bornstein. New Series. Group I. Vol. 12. Berlin: Springer, 1988. 409 p.
14. *Antinucci M., Bertin A., Capiluppi P. et al.* // Lett. Nuovo. Cim. Soc. Ital. Fis. 1973. V. 6. P. 121.
15. *Adamczyk L., Adkins J., Agakishiev G. et al. (STAR Collaboration)* // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. № 4. Art. № 044904.