УТВЕРЖДАЮ

И.О. директора Лаборатории физики высоких энергий

им.В.И.Векслера и А.М.Балдина

Кекелидзе В.Д.

«\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2022 года

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Научно-технического совета

Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина

Объединенного института ядерных исследований

Диссертация «**Изучение процессов рождения адронов, образования ядер и гиперядер при столкновениях тяжёлых ионов в модели PHQMD и возможности их исследования на экспериментах ускорительного комплекса NICA**» выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина.

В период подготовки диссертации с 2012 по 2022 гг. соискатель **Киреев Виктор Александрович** работал в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина в должности младшего научного сотрудника, затем научного сотрудника.

В 2012 году Киреев Виктор Александрович окончил физический факультет Гомельского Государственного Университета имени Ф. Скорины по специальности «Физика (производственная деятельность)».

Экзамены кандидатского минимума сданы, удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2022 году Объединённым институтом ядерных исследований (справка №49).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Колесников Вадим Иванович, начальник сектора №2 НЭОФСТИ Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований.

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

 Диссертационная работа посвящена развитию генератора событий «Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics» с динамическим образованием ядер и проведение с его помощью расчетов по выходам ядер и гиперядер для области энергий ускорителя NICA.

Актуальность темы диссертационной работы обуславливается активным экспериментальным и теоретическим изучением образования ядер и гиперядер в настоящее время. Особый интерес вызывает тот факт, что такие слабо связанные состояния нуклонов с энергией связи для лёгких ядер до 10 МэВ могут выживать в области перекрытия пучков ионов с окружающими температурами порядка 100 МэВ и выше. Кроме того, относительно недавно лёгкие ядра с массовым числом до A=4 были обнаружены в центральной области быстрот при экстремально высоких энергиях коллайдера LHC. При этом надёжного теоретического подхода, который мог бы описать рождение и динамику ядер, нет. В связи с вышесказанным, актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

 Научная новизна и практическая значимость работы заключается в следующем:

Развит и адаптирован к области энергий экспериментов на ускорительном комплексе NICA генератор событий PHQMD, в котором впервые реализован процесс динамического образования ядер и гиперядер. Проведён детальный анализ энергетической зависимости выходов странных адронов в элементарных «p+p» столкновениях в области энергий от 3 до 30 ГэВ. На основе детального Монте-Карло моделирования с использованием транспортного подхода PHQMD продемонстрированы зависимости выходов ядер от: энергии столкновения, атомного веса сталкивающихся ядер, прицельного параметра столкновения, уравнения состояния ядерной материи. С помощью генератора событий PHQMD проведено детальное моделирование столкновений ионов 209Bi с энергией в системе центра масс 9.2 ГэВ, даны оценки множественности рождения гиперядер для планируемого первого периода набора данных эксперимента NICA/MPD. Разработана новая универсальная библиотека поиска ядерных фрагментов «Phase-space Minimum Spanning Tree», которая может применяться совместно с различными генераторами событий. С использованием библиотеки psMST впервые проведено исследование зависимости множественности рождения ядер и гиперядер от реализации динамики нуклонов в различных генераторах событий в диапазоне
энергий комплекса NICA. С помощью библиотеки psMST впервые в рамках одной кодовой базы проведено сравнение двух различных алгоритмов поиска дейтронов, коалесценции и MST, с двумя транспортными подходами PHQMD и UrQMD. Показана стабильность получаемых результатов вне зависимости от выбранного подхода и алгоритма поиска дейтронов.

Личный вклад соискателя:

* Соискатель принял непосредственное участие в реализации, тестировании и оптимизации транспортного подхода PHQMD для динамического описания рождения ядер и гиперядер. Личный вклад также включает в себя создание комплекса программ для запуска, тестирования и валидации модельных предсказаний.
* Соискателем были проведены многочисленные перекрестные проверки, необходимые для согласованности и достоверности полученных результатов.
* Разработка универсальной библиотеки поиска ядер и гиперядер и исследование различий в описаниях транспортных подходов и их влияния на динамику образования ядер выполнены исключительно соискателем.

В целом диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, содержащее новые результаты, которые важны для понимания процессов образования ядер и гиперядер, рождающихся в столкновениях тяжелых ионов. Диссертация написана ясным языком. Ее результаты являются новыми и достоверными, исследования по теме диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, прошли апробацию на различных международных совещаниях и конференциях.

**Основные результаты диссертационной работы докладывались автором:**

1. 22nd Particles and Nuclei International Conference (PANIC-2021), Лиссабон, Португалия
2. 1st workshop on "Physics performance studies at FAIR and NICA" (FANI-2020), Онлайн
3. The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2020), National Research Nuclear University “MEPhI”, Москва, Россия
4. The 18th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2019), Бари, Италия
5. LXIX International Conference on Nuclear Physics "Nucleus 2019", ОИЯИ, Дубна, Россия
6. Quark Matter 2018 – the XXVIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Венеция, Италия
7. The 4th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2018), Москва, Россия
8. The XXIVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, ОИЯИ, Дубна, Россия
9. International Workshop on Simulations of HIC for NICA energies, ОИЯИ, Дубна, Россия

**Содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. V. Kireyeu et al, Deuteron production in ultrarelativistic heavy-ion collisions: A comparison of the coalescence and the minimum spanning tree procedure // Phys.Rev.C **105** (2022) 4, 044909, arXiv:2201.13374 [nucl-th]
2. Susanne Gläßel, Viktar Kireyeu et al., Cluster and hypercluster production in relativistic heavy-ion collisions within the parton-hadron-quantum-molecular-dynamics approach // Phys. Rev. C **105**, 014908 2022
3. V. Kireyeu, Cluster dynamics studied with the phase-space minimum spanning tree approach // Phys. Rev. C **103**, 054905, 2021
4. V. Kireyeu et al., Hadron production in elementary nucleon–nucleon reactions from low to ultra-relativistic energies, Eur. Phys. Journal A 56, 223, 2020
5. V. Kireyeu et. al, Prospects for the study of the strangeness production within the PHQMD model // J. Phys.: Conf. Ser. **1690** 012113, 2020
6. J. Aichelin, …, V. Kireyeu et al., Parton-hadron-quantum-molecular dynamics: A novel microscopic n-body transport approach for heavy-ion collisions, dynamical cluster formation, and hypernuclei production // Phys. Rev. C **101**, 044905, 2020
7. V. Kolesnikov, V. Kireyeu et al., A New Review of Excitation Functions of Hadron Production in pp Collisions in the NICA Energy Range // Physics of Particles and Nuclei Letters volume 17, pages 142–153, 2020
8. V. Kireyeu и др. PHQMD Model for the Formation of Nuclear Clusters
and Hypernuclei in Heavy Ion Collisions // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.
84.8, 957 – 961, 2020
9. J. Aichelin, …, V. Kireyeu Preliminary Results from the Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics (PHQMD) Transport Approach // J. Phys. Conf.Ser.1070.1, 2018
10. V. Kireyeu et al. Study of clusters and hypernuclei production within PHSD+FRIGA model // EPJ Web Conf. 138, 2017
11. V. Kireyeu. Study of clusters and hypernuclei production with the NICA/MPD experiment // Phys. Atom. Nucl. 78.13 (2015), с. 1508—1510
12. V. Kireyeu. Study of clusters and hypernuclei production with NICA/MPD and BM@N experiments // *PoS* BaldinISHEPPXXII 127, DOI: 10.22323/1.225.0127, 2015

Диссертация «Изучение процессов рождения адронов, образования ядер и гиперядер при столкновениях тяжёлых ионов в модели PHQMD и возможности их исследования на экспериментах ускорительного комплекса NICA» Киреева Виктора Александровича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований. Проголосовало \_\_ членов НТС ЛФВЭ из полного состава численностью \_\_ человек. Результаты голосования: «за» - \_\_ чел., «против» - \_\_, «воздержалось» - \_\_,    протокол № \_ от г.

Заключение составил Б.В Батюня

доктор физ.-мат. наук

 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Председатель НТС ЛФВЭ Е.А. Строковский

доктор физ.-мат. наук

 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ С.П. Мерц

кандидат физ.-мат. наук

 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_