

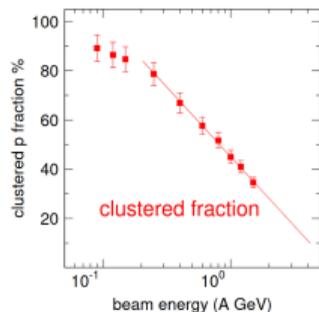
Изучение процессов рождения адронов, образования ядер и гиперядер при столкновениях тяжёлых ионов в модели RHQMD и возможности их исследования на экспериментах ускорительного комплекса NICA

Киреев В.А.

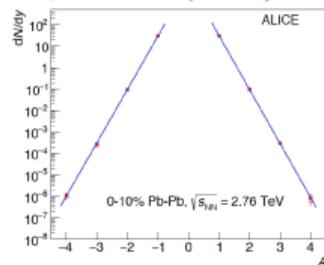
Руководитель: д-р физ.-мат. наук Колесников В.И.

Объединенный Институт Ядерных Исследований
Лаборатория Физики Высоких Энергий

19.05.2022



Nucl.Phys.A 848 (2010) 366-427



Nucl.Phys.A 971 (2018) 1-20

Одним из интересных явлений, наблюдаемым в столкновениях тяжёлых ионов, является рождение ядер и гиперядер, которое в настоящее время активно изучается экспериментально и теоретически. Особый интерес вызывает тот факт, что такие слабо связанные состояния нуклонов могут "выживать" в области перекрытия пучков ионов. Не так давно лёгкие ядра были обнаружены в области центральных быстрых столкновений на экспериментах LHC. Для описания рождения ядер и гиперядер современные генераторы событий часто используют либо алгоритмы коалесценции, либо статистические методы. Наиболее существенным недостатком является возможность применения этих подходов только в конце эволюции реакции, и, таким образом, невозможность дать ответ на вопрос о том, как формируются ядра и что можно узнать с их помощью о динамике реакции. Таким образом, надёжного подхода для описания динамики образования ядер и гиперядер в настоящий момент нет.

Целью диссертационной работы является развитие генератора событий с динамическим образованием ядер и гиперядер Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics (PHQMD) и проведение с его помощью расчетов по выходам ядер и гиперядер для области энергий ускорителя NICA.

Задачи работы:

- Провести детальный анализ энергетической зависимости выходов странных адронов в элементарных $p + p$ столкновениях в области энергий (в системе центра масс) от 3 до 30 ГэВ. Полученные параметризации для сечений рождения адронов, формы быструх распределений и спектров по поперечному импульсу необходимо использовались для развития и тестирования процессов рождения странных частиц в микроскопической транспортной модели PHQMD.
- Развить генератор событий PHQMD для реализации процесса динамического образования лёгких ядер, гиперядер и тяжёлых ядерных фрагментов в столкновения тяжелых ионов. В частности, модель PHQMD необходимо адаптировать к области энергий экспериментов на ускорительном комплексе NICA.
- Разработать и протестировать универсальный алгоритм поиска ядер и гиперядер, который может быть применён с различными генераторами событий.
- С использованием модели PHQMD провести исследование механизмов образования ядер и гиперядер в столкновениях тяжелых ионов в области энергий ускорителя NICA. В частности изучить зависимость выходов ядер от энергии столкновения, атомного веса сталкивающихся ионов, прицельного параметра столкновения, а также от уравнения состояния ядерной материи.
- Провести расчеты по выходам легких ядер и гиперядер в области энергии ускорителя NICA для различных комбинаций пучков в широком диапазоне кинематических переменных реакции.

Научная новизна диссертационной работы включает в себя развитие уникального транспортного подхода PHQMD, в котором ядра и гиперядра формируются динамически. На основе детального моделирования показана возможность изучения рождения ядер и гиперядер в области энергий ускорительного комплекса NICA.

Разработана независимая от транспортных моделей библиотека с открытым исходным кодом “Phase-space Minimum Spanning Tree” (psMST), предназначенная для поиска ядер, в том числе и гиперядер. При помощи библиотеки psMST впервые было проведено исследование и сравнение предсказаний для выходов ядер в различных транспортных подходах с полностью идентичным алгоритмом поиска фрагментов. Наглядно показана чувствительность образования ядер к реализации потенциальных взаимодействий в теоретических подходах. Полученные результаты расширяют наше понимание динамики столкновений тяжелых ионов.

- Проведён детальный анализ энергетической зависимости выходов странных адронов в элементарных $p + p$ столкновениях в области энергий от 3 до 30 ГэВ.
- Развита и адаптирована к области энергий экспериментов на ускорительном комплексе NICA генератор событий RHQMD, в котором впервые реализован процесс динамического образования лёгких ядер, гиперядер и тяжёлых ядерных фрагментов.
- На основе детального Монте-Карло моделирования с использованием генератора событий RHQMD впервые продемонстрированы зависимости выходов ядер и гиперядер от:
 - ▶ энергии столкновения;
 - ▶ атомного веса сталкивающихся ядер;
 - ▶ прицельного параметра столкновения;
 - ▶ уравнения состояния ядерной материи.
- С помощью генератора событий RHQMD проведены расчеты по выходам легких ядер и гиперядер в области энергий ускорителя NICA для различных комбинаций пучков в широком диапазоне кинематических переменных реакции.

- Проведено детальное моделирование столкновений ионов ^{209}Bi при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ и даны оценки множественности рождения гиперядер для планируемого первого периода набора данных эксперимента NICA/MPD.
- Разработан новый универсальный алгоритм для поиска ядер и гиперядер, реализованный в библиотеке "Phase-space Minimum Spanning Tree" (psMST), который может быть применён с различными генераторами событий и интегрирован в экспериментальное программное обеспечение.
- С применением библиотеки "psMST" впервые было 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 было проведено сравнение двух различных алгоритмов поиска ядер, коалесценции и MST, в рамках одного кода, применённого к двум различным транспортным генераторам событий, UrQMD и PHQMD.

Диссертация состоит из шести глав, включая введение и заключения, и двух приложений. Полный объем диссертации 134 страницы текста с 70 рисунками и 2 таблицами. Список используемой литературы содержит 164 библиографические ссылки.

Во **Введении** диссертационной работы обсуждаются цель и актуальность проводимых исследований, рассмотрен исторический обзор по теме диссертации.

Вторая глава посвящена краткому описанию строящегося ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), эксперименту BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) и многоцелевому детектору MPD (Multi Purpose Detector).

В третьей главе дано описание транспортного микроскопического генератора событий "Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics" (PHQMD):

PHQMD = PHSD + QMD + MST & SACA

- **Инициализация и движение барионов:** квантовая молекулярная динамика (QMD)
- **Движение партонов (кварки, глюоны) и мезонов** = взаимодействие адронов и партонов из Parton-Hadron-String Dynamics (PHSD) Phys. Rev. C 78 (2008) 034919; Nucl. Phys. A 831 (2009) 215-242
- **Поиск кластеров (ядер и гиперядер):** Minimum Spanning Tree (MST) или Simulated Annealing Clusterization Algorithm (SACA)

Для элементарных реакций ($p + p$) PHQMD = PHSD.



В алгоритме **Minimum Spanning Tree (MST)** используется информация только о координатном пространстве, поэтому этот метод может идентифицировать ядра только тогда, когда свободные нуклоны и группы нуклонов хорошо разделены в координатном пространстве.

- Два нуклона считаются частью (гипер)ядра, если расстояние между ними меньше радиуса кластеризации $r_0 = 4.0$ фм.
- Частица считается частью ядра если она связана условием выше хотя бы с одним нуклоном ядра.

R. K. Puri, J. Aichelin, J.Comp. Phys. 162 (2000) 245-266

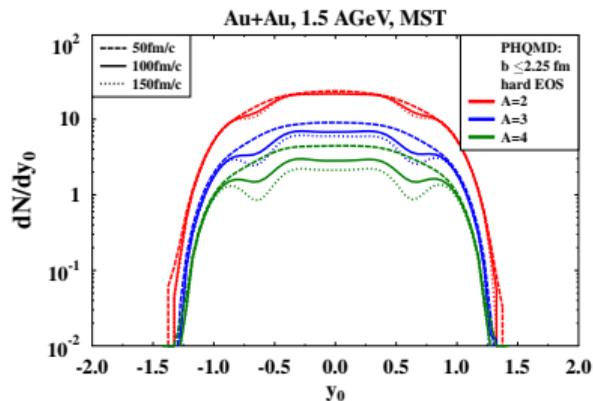
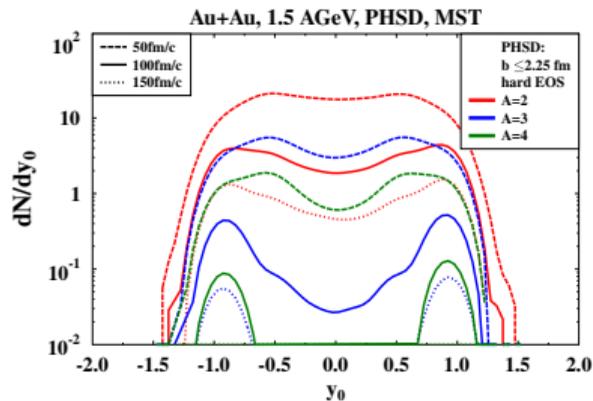
Алгоритм **Simulated Annealing Clusterization Algorithm (SACA)**:

C.Dorso, J.Randrup, Phys.Lett. B 301 (1993) 328

- Использует координаты и импульсы всех нуклонов в некоторое время t .
- Для каждой возможной конфигурации ядер и свободных нуклонов вычисляется полная энергия связи.
- Потенциальным взаимодействием между ядрами пренебрегают.
- Выбирается конфигурация с наибольшей энергией связи.

R. K. Puri, J. Aichelin, PLB301 (1993) 328, J.Comput.Phys. 162 (2000) 245-266;

P.B. Gossiaux, R. Puri, Ch. Hartnack, J. Aichelin, Nuclear Physics A 619 (1997) 379-390

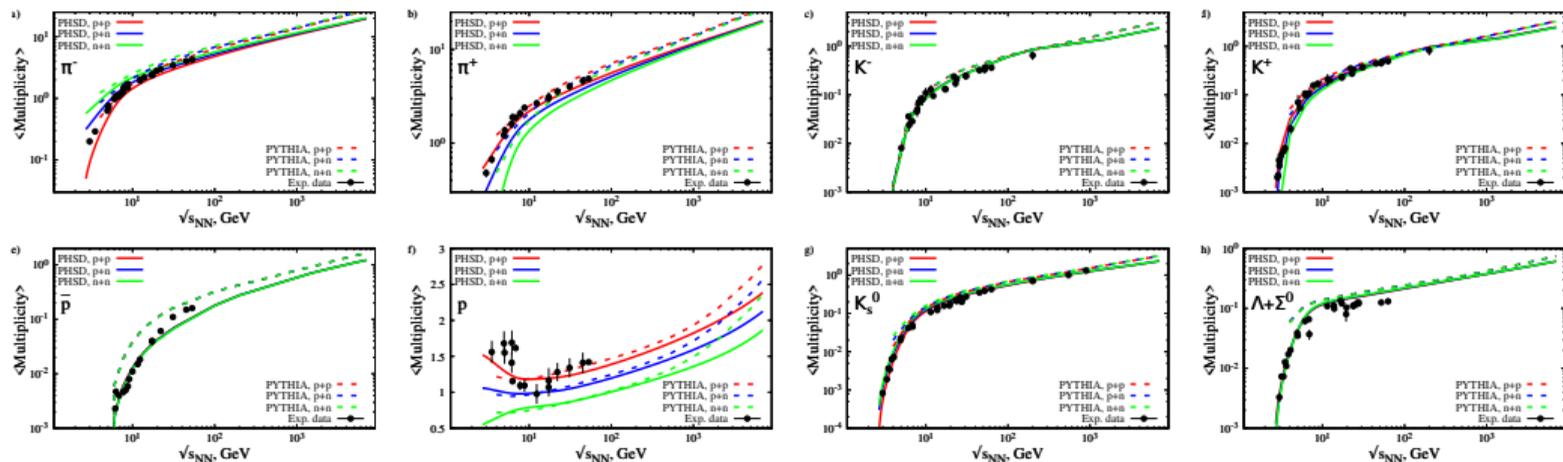


Динамика QMD: число ядер не зависит от времени: алгоритм MST находит при 50 фм/с примерно столько же ядер, сколько и при 150 фм/с).

Динамика среднего поля (MF):

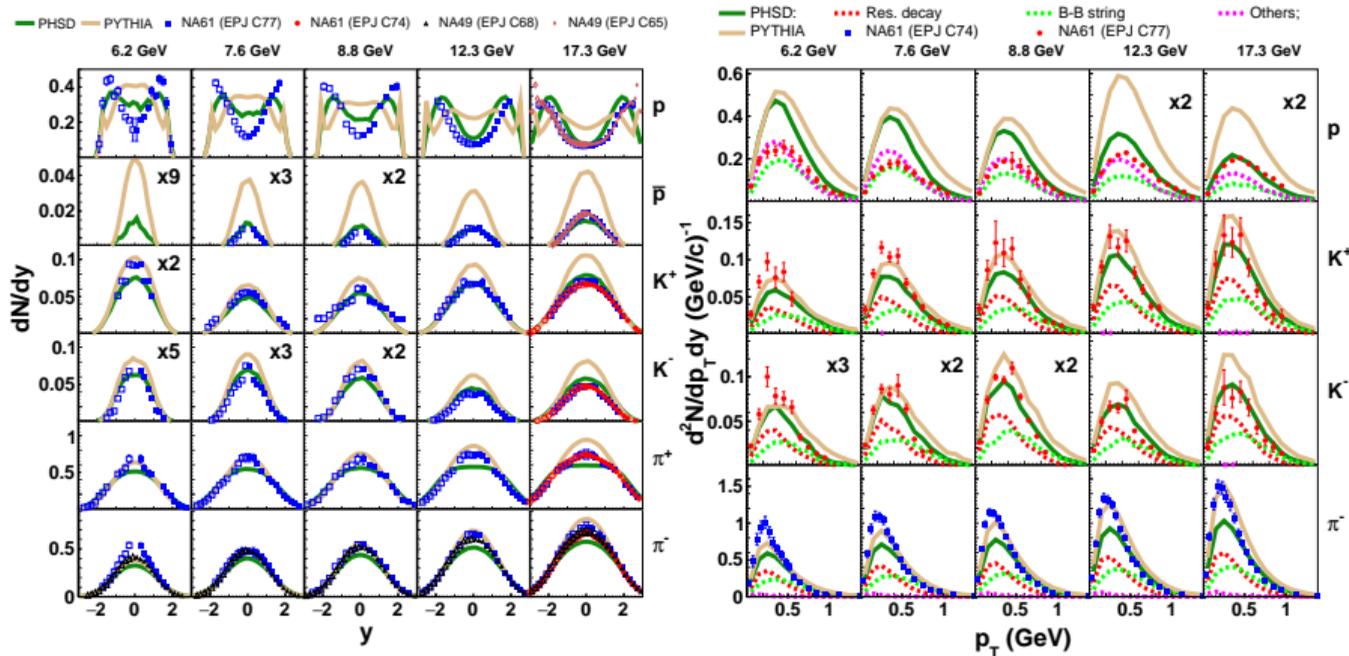
- число ядер сильно зависит от времени
- ядра со временем исчезают
- ядра в центральной области быстро исчезают раньше чем ядра из области наблюдателей.

В четвёртой главе представлены результаты подхода RHQMD – быструные распределения и спектры поперечной массы адронов: протонов, антипротонов, пионов, (анти)каонов и (анти)лямбд при энергиях от SIS до максимальных энергий RHIC, кроме этого представлены результаты подхода RHQMD для ядер и гиперядер.



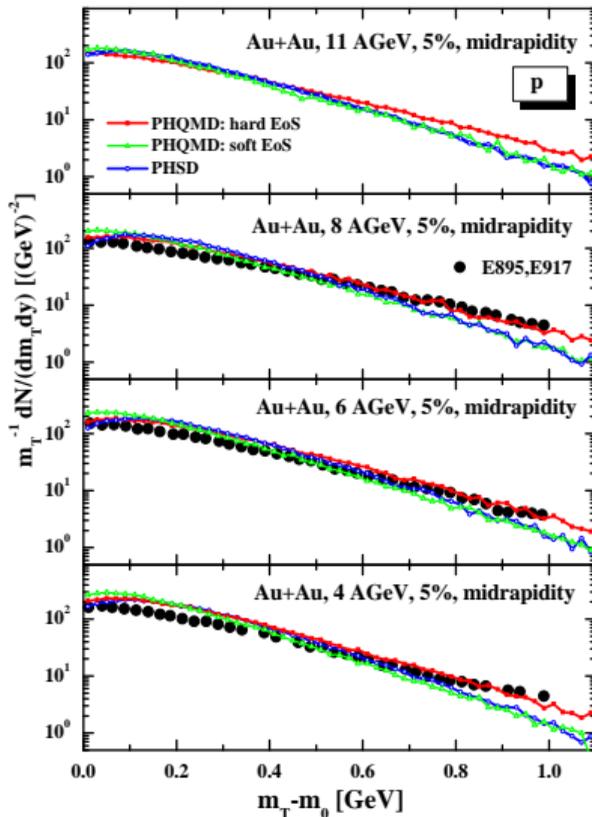
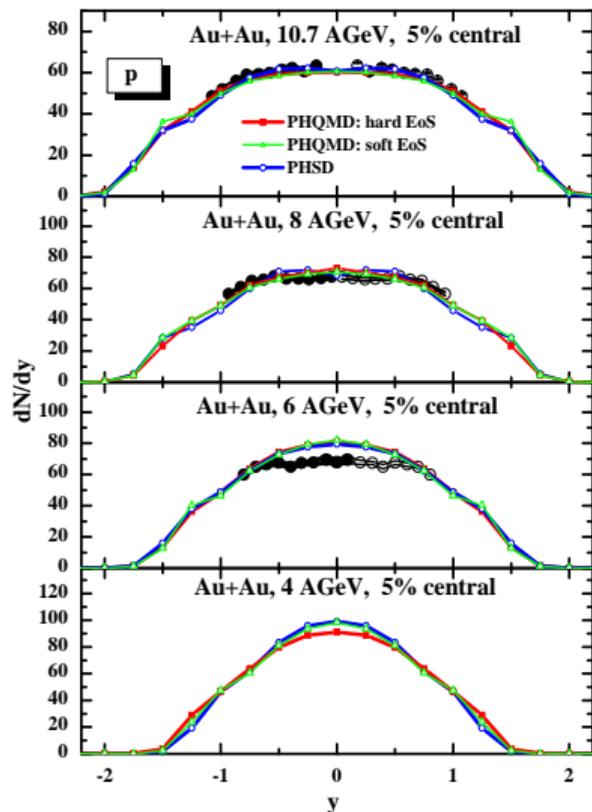
Полные выходы π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} , K_S^0 и $\Lambda + \Sigma^0$ в элементарных $N + N$ столкновениях.

Хорошее согласие с экспериментальными данными в широком диапазоне энергий.



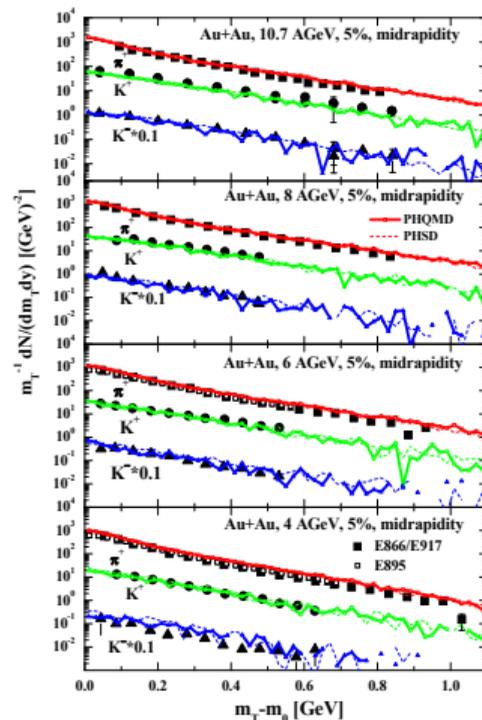
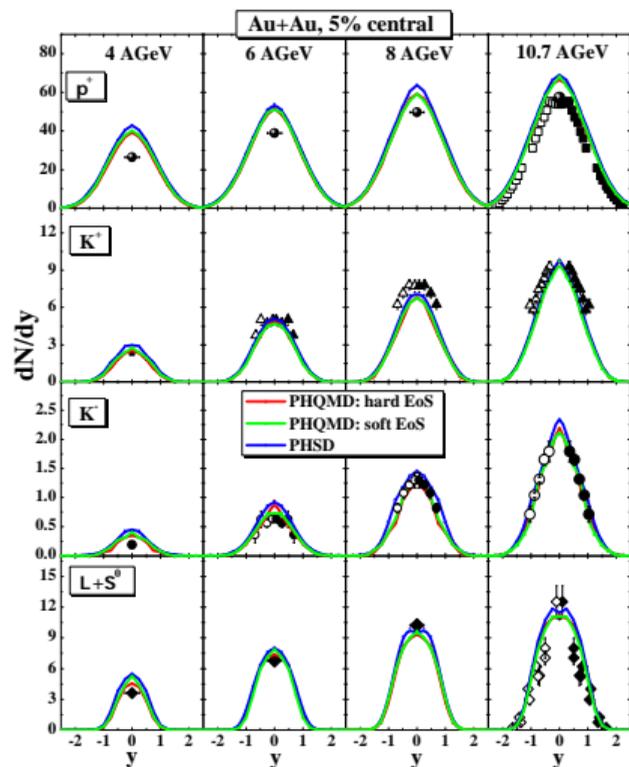
Быстротные и p_T спектры π^\pm , K^\pm , p и \bar{p} , в $p + p$ столкновениях.

PHQMD в "режиме PHSD" хорошо описывает данные эксперимента NA61/SHINE.



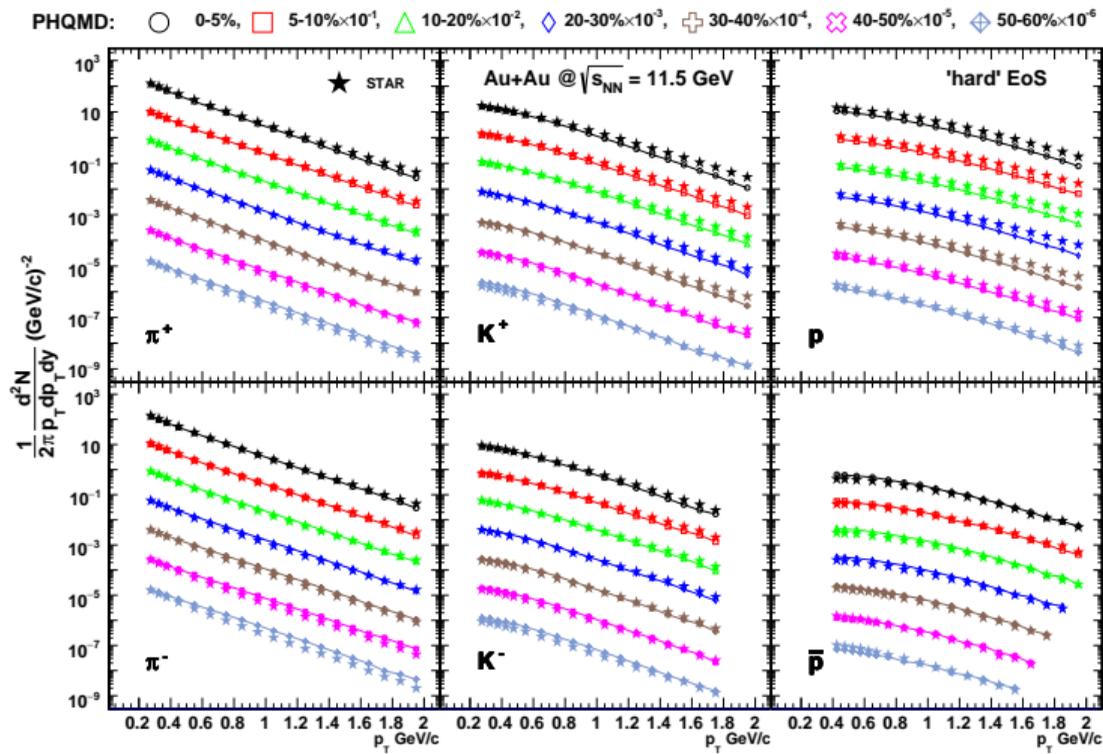
Быстротные распределения и спектры поперечных масс m_T протонов.

Спектры протонов показывают чувствительность к уравнению состояния ядерной материи.



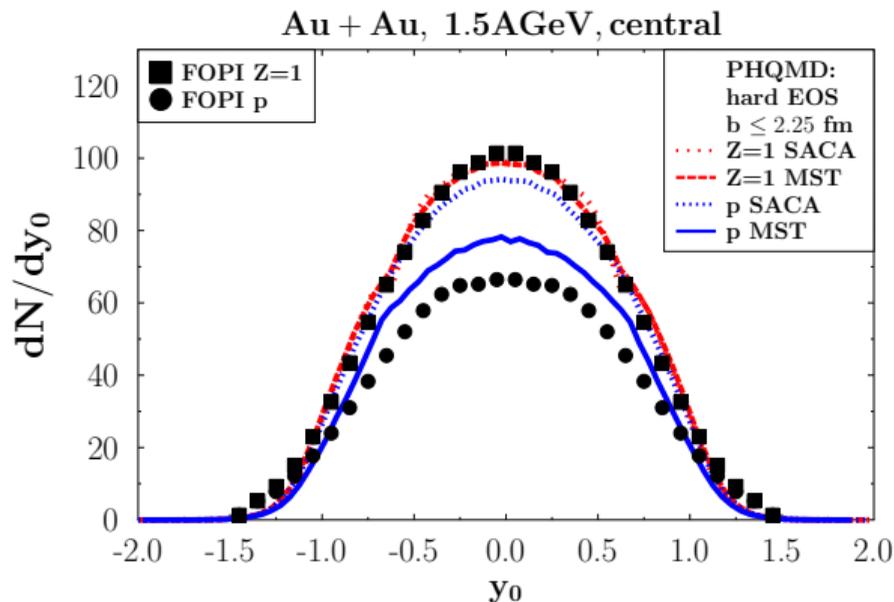
Быстротные распределения и спектры поперечных масс m_T π^+ , K^+ , K^- и $\Lambda + \Sigma^0$.

Спектры вновь рождённых частиц показывают очень лёгкую зависимость от уравнения состояния.



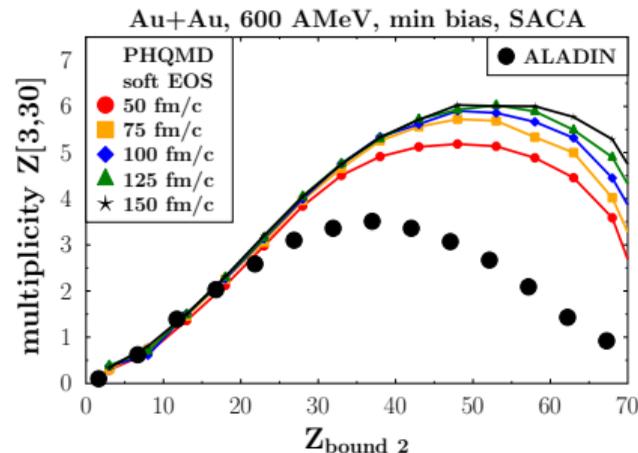
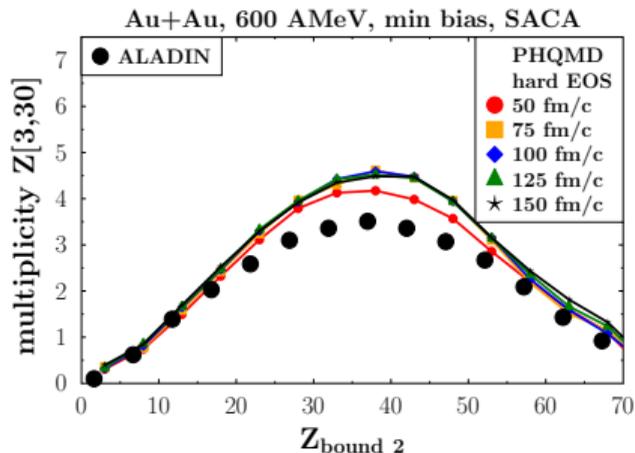
Спектры поперечного импульса p_T π^\pm , K^\pm , p и \bar{p} в области центральных быстрот при различных классах центральности. Только "жёсткое" уравнение состояния.

Разумное описание зависимости от центральности.

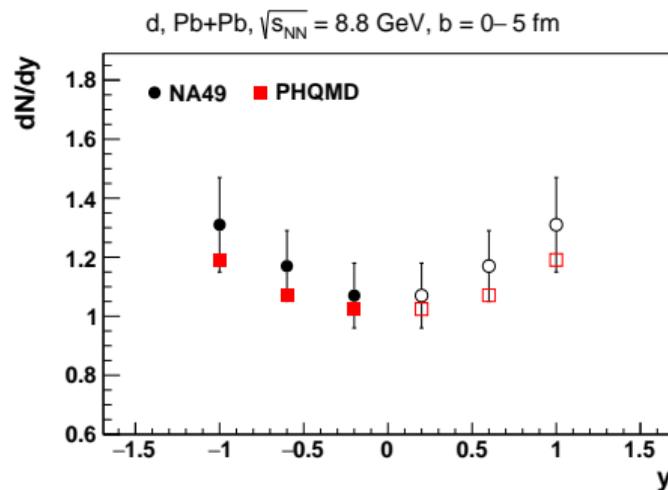
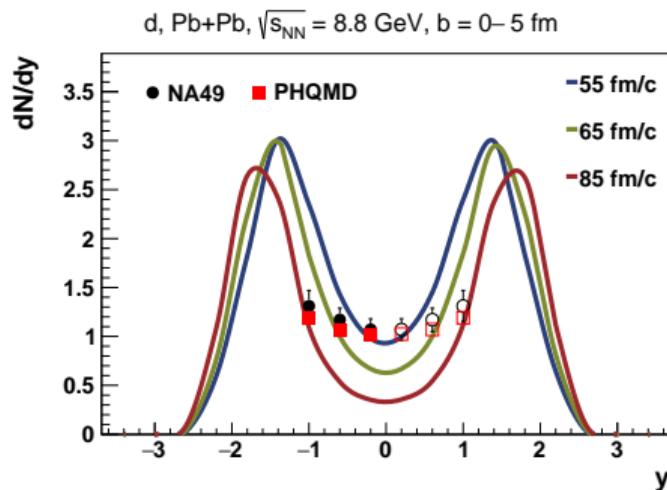


Нормированное быстрое распределение ($y_0 = y/y_{proj}$) всех связанных и несвязанных (свободных) протонов ($Z = 1$), и свободных протонов.

Алгоритм MST менее чувствителен к потенциальному взаимодействию нуклонов и лучше описывает экспериментальные данные \rightarrow больше подходит для описания лёгких ядер.

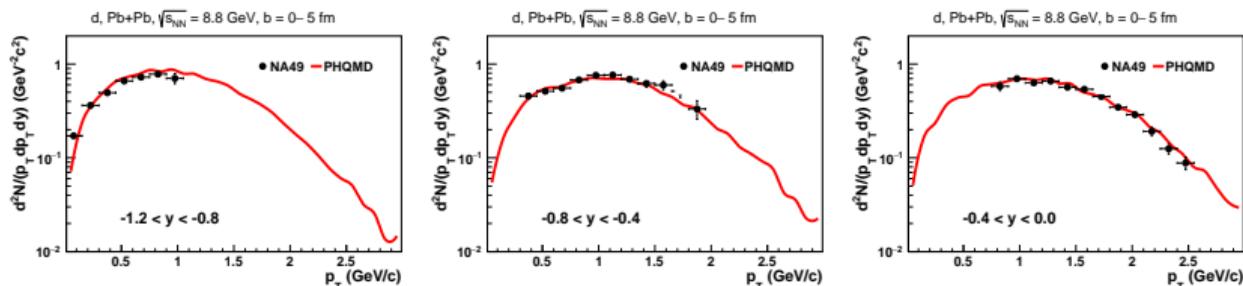


Зависимость множественности ядер с зарядом $Z \in [3, 30]$ от полного связанного заряда $Z_{\text{bound } 2}$. Ядра, навденные алгоритмом SACA стабильны для времён более than 50 фм/с. PHQMD с "жёстким" уравнением состояния воспроизводит экспериментальные данные. Вещество наблюдателей менее стабильно с "мягким" уравнением состояния.

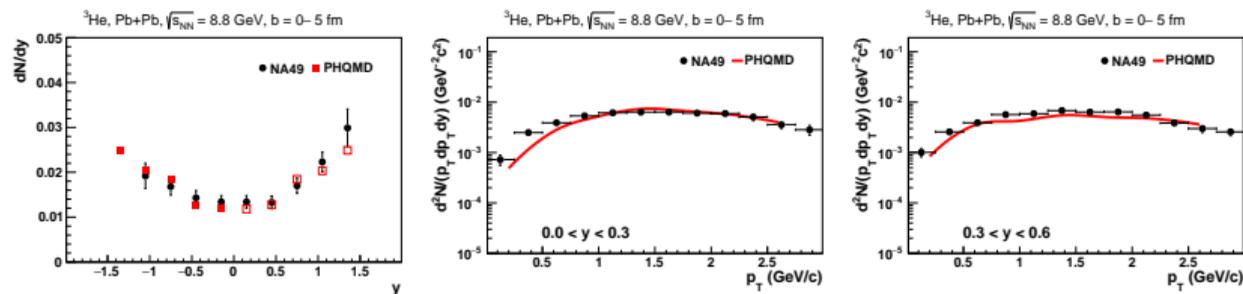


Быстротные распределения дейтронов. Красные квадраты: результаты PHQMD, взятые в физическое время $t = t_0 \cosh(y)$ для $t_0 = 53$ фм/с; линии: без зависимости от быстроты.

Быстротные распределения воспроизводятся в пределах экспериментальных ошибок.

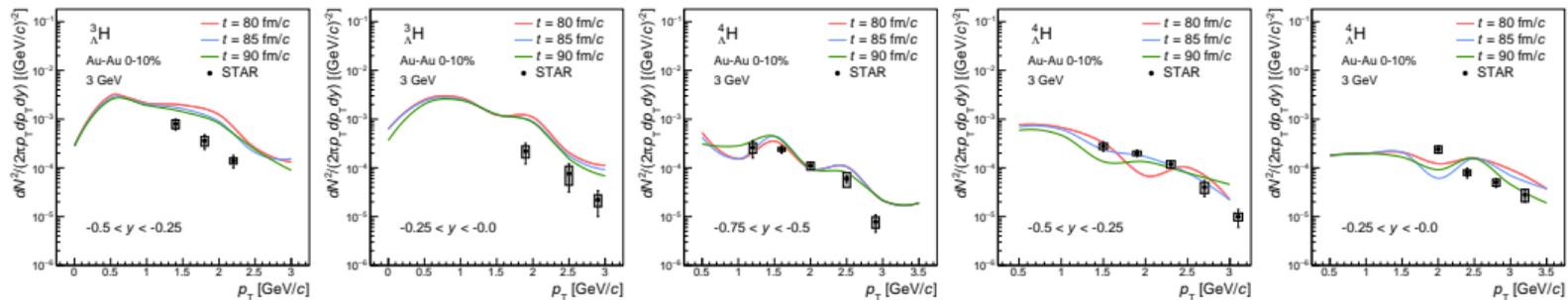


Спектры поперечного импульса дейтронов в центральных столкновениях Pb+Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 8.8$ ГэВ.



Быстротный и спектры поперечного импульса ^3He в центральных столкновениях Pb+Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 8.8$ ГэВ.

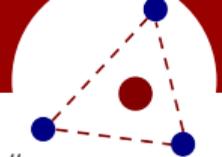
Во всём диапазоне p_T спектры поперечного импульса воспроизводятся RHQMD с алгоритмом MST.



Спектры поперечного импульса ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ и ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ для различных быстрых интервалов в центральных столкновениях Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ.

| H_{Λ}^3 | H_{Λ}^4 | He_{Λ}^4 | He_{Λ}^5 |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $1.2 \cdot 10^5$ | $3.5 \cdot 10^4$ | $3.2 \cdot 10^4$ | $1.6 \cdot 10^4$ |

Выходы гиперядер с учётом полной эффективности в столкновениях $Bi + Bi$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ для запланированного первого периода набора данных NICA/MPD. Полная эффективность включает в себя эффективность реконструкции треков, эффективность ToF мэтчинга, PID, потери из-за критериев отбора треков, потери от распадов и взаимодействия с материалом детектора – Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 1, 46-53.

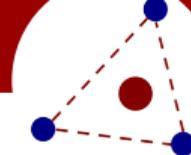


В пятой главе описана библиотека поиска ядер и гиперядер “phase-space Minimum Spanning Tree” (psMST).

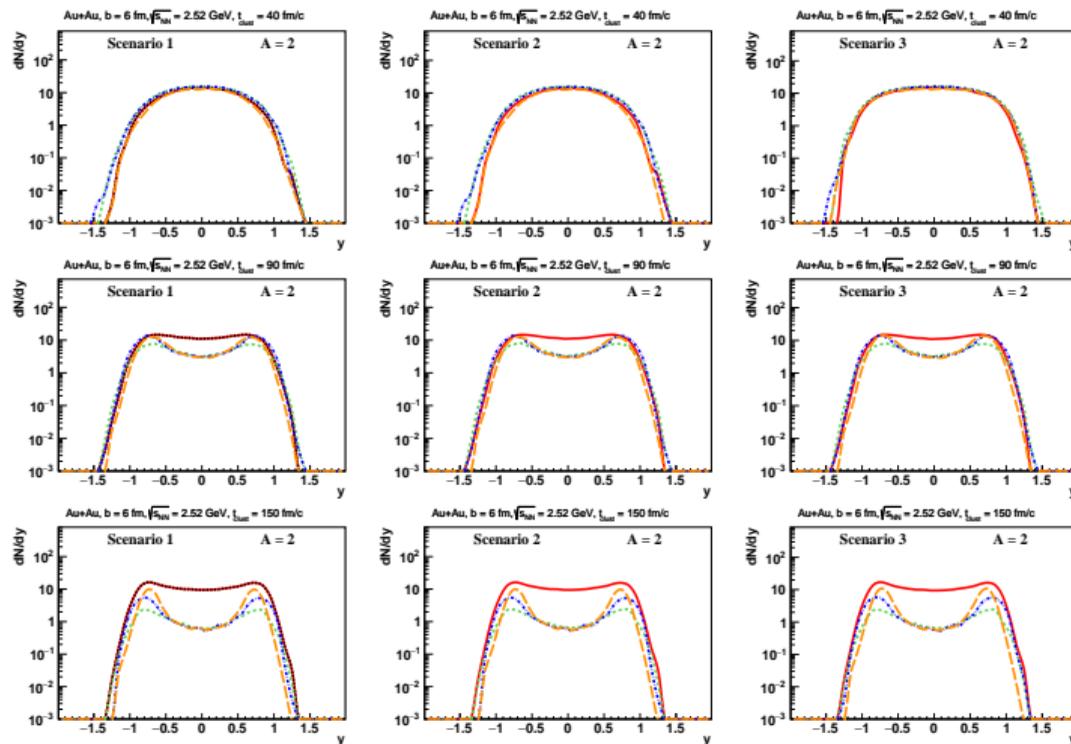
- **Свободная** C++ библиотека, основана на идее алгоритма **MST**.
- **Расширена включением импульсного пространства**: psMST может быть использована для изучения влияния импульсных корреляций на образование ядер и гиперядер.
- Не зависит от генераторов событий: может применяться с PHSD, PHQMD, SMASH, UrQMD и другими теоретическими подходами.

Три различных режима работы алгоритма MST в библиотеке psMST:

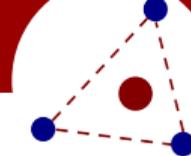
- Режим 1. Как и в подходе MST, алгоритм psMST работает только с координатной информацией для поиска ядер и показывает результаты идентичные результатам оригинальной процедуры MST.
- Режим 2. Первый шаг идентичен «режим 1», затем, после того как будут найдены все возможные ядра, вводится импульсное ограничение: ядра, в которых полный импульс хотя бы одной частицы больше $p' > 300$ МэВ в системе покоя ядра, исключаются из анализа.
- Режим 3. Условие пространственной близости «режима 1» дополнено ограничением в импульсном пространстве, но в отличие от «режима 2», импульсное условие $p' > 300$ МэВ применяется во время поиска ядер, а не после него. Это приводит к разнице в распределении ядер, так как частицы, не прошедшие импульсное условие в одном ядре, могут войти в состав другого ядра.



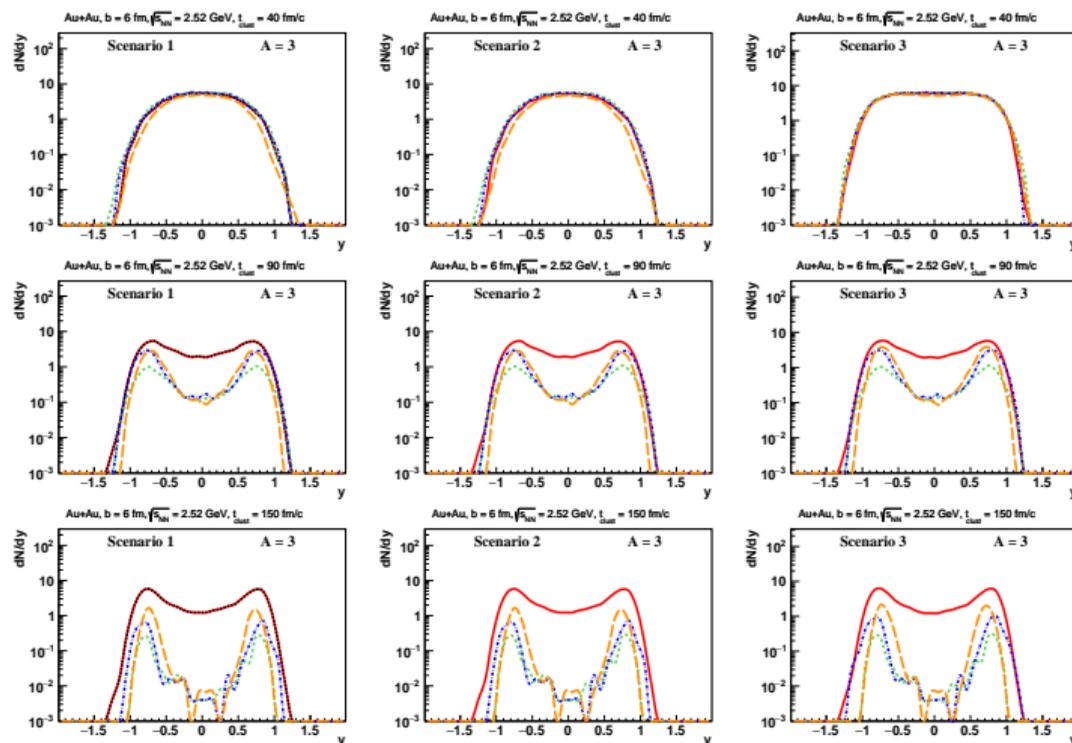
■ PHQMD + MST
 ■ PHQMD + psMST
 ■ PHSD + psMST
 ■ SMASH + psMST
 ■ UrQMD + psMST



Быстротные спектры ядер с массовым числом $A = 2$ в полупериферических ($b = 6$ фм) столкновениях $Au + Au$ при $\sqrt{s} = 2.52$ ГэВ. Раннее время – похожие распределения; позднее время – PHQMD предсказывает больше ядер в центральной области быстрот \rightarrow образование ядер чувствительно к реализации динамики нуклонов.

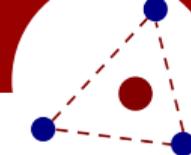


■ ■ ■ PHQMD + MST
 ■ ■ ■ PHQMD + psMST
 ■ ■ ■ PHSD + psMST
 ■ ■ ■ SMASH + psMST
 ■ ■ ■ UrQMD + psMST

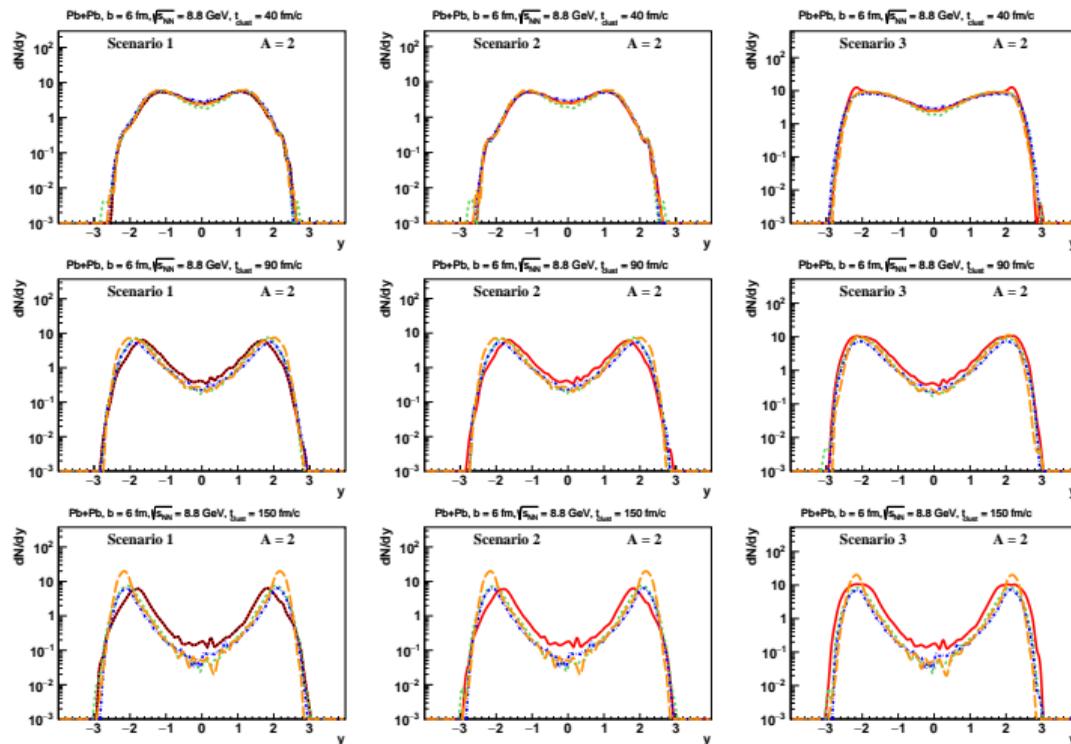


Быстротные спектры ядер с массовым числом $A = 3$ в полупериферических ($b = 6$ фм) столкновениях $Au + Au$ при $\sqrt{s} = 2.52$ ГэВ.

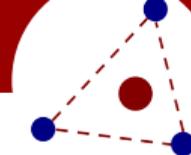
Раннее время – похожие распределения; позднее время – PHQMD предсказывает больше ядер в центральной области быстрот \rightarrow образование ядер чувствительно к реализации динамики нуклонов.



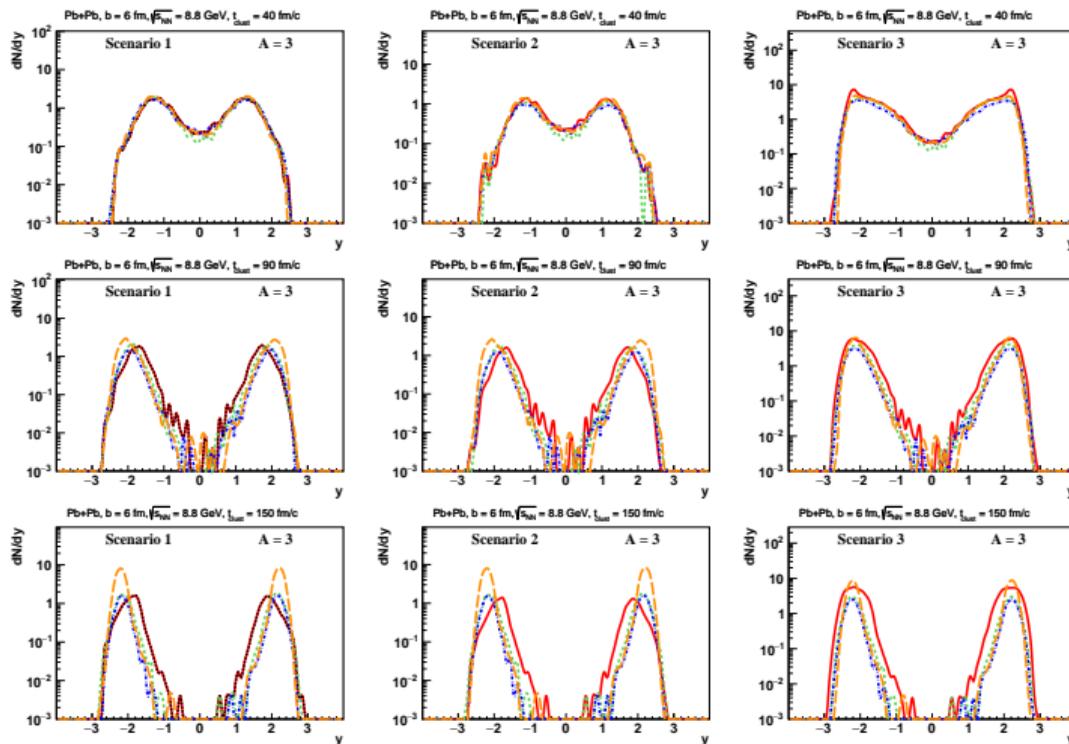
■ PHQMD + MST
 ■ PHQMD + psMST
 ■ PHSD + psMST
 ■ SMASH + psMST
 ■ UrQMD + psMST



Быстротные спектры ядер с массовым числом $A = 2$ в полупериферических ($b = 6$ фм) столкновениях $Pb + Pb$ при $\sqrt{s} = 8.8$ ГэВ. Примерно одинаковые результаты для всех транспортных подходов \rightarrow при высоких энергиях в динамике реакций столкновения преобладают над потенциальными взаимодействиями.

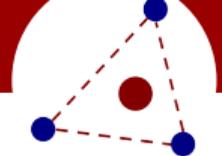


■ PHQMD + MST
 ■ PHQMD + psMST
 ■ PHSD + psMST
 ■ SMASH + psMST
 ■ UrQMD + psMST



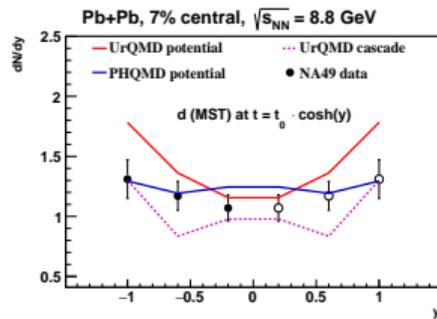
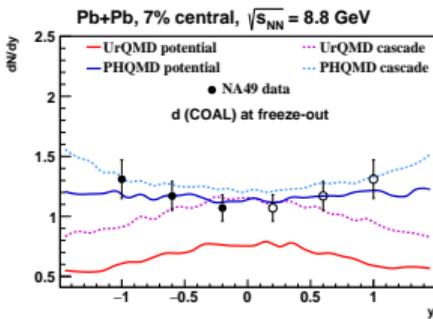
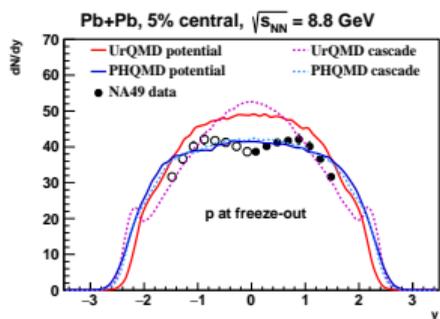
ыстротные спектры ядер с массовым числом $A = 3$ в полупериферических ($b = 6$ фм) столкновениях $Pb + Pb$ при $\sqrt{s} = 8.8$ ГэВ.

Примерно одинаковые результаты для всех транспортных подходов \rightarrow при высоких энергиях в динамике реакций столкновения преобладают над потенциальными взаимодействиями.

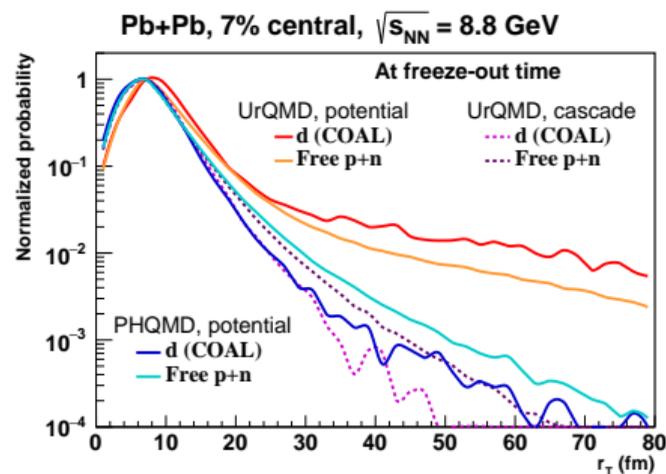
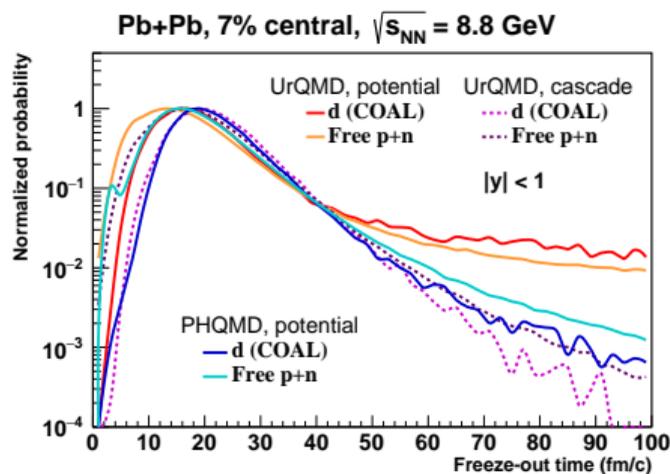
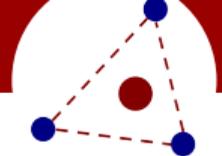


Библиотека psMST также включает в себя алгоритм коалесценции для дейтронов:

1. Вычисляется время последнего рассеяния в паре p-n.
2. Рассчитывается общий центр массы системы и пара p-n интерполируется во время последнего рассеяния из пункта 1.
3. Вычисляются относительные импульс ΔP и расстояние ΔR пары в её системе центра масс. Если $\Delta P < 0.285$ ГэВ и $\Delta R < 3.575$ фм, дейтрон может быть сформирован.
4. Если условие выше выполняется, тогда вероятность того, что дейтрон сформирован задается спин-изоспиновым комбинаторным фактором $P_d = 3/8$.
5. Если дейтрон сформирован, его импульс равен сумме импульсов пары p-n в системе центра масс, рассчитанного в изначальной системе отсчёта.

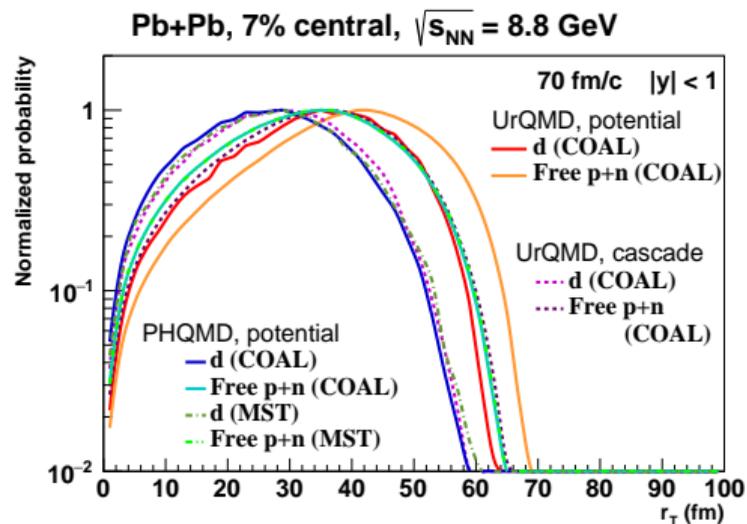
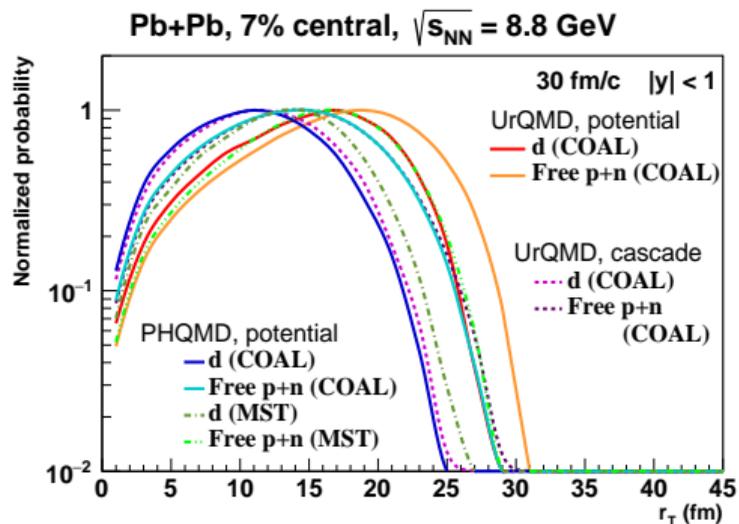
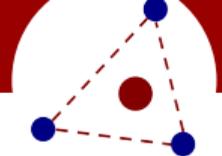


Быстротные распределения протонов (слева) и дейтронов (в середине – коалесценция, справа – MST) в центральных столкновениях Pb+Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 8.8$ ГэВ.



Время "freeze-out" (слева) и поперечное расстояние во время "freeze-out" (справа) свободных нуклонов ($p + n$) и дейтронов (коалесценция).

Систематический сдвиг примерно на 5 фм/с между "freeze-out" временами свободных нуклонов и дейтронов.



Поперечное расстояние свободных нуклонов ($p + n$) и дейтронов на 30 фм/с (слева) и на 70 фм/с (справа). Дейтроны остаются на меньших поперечных расстояниях чем свободные нуклоны.

В **шестой главе** приведены основные результаты и выводы, которые заключаются в следующем:

- Транспортный подход PHQMD был развит и адаптирован для работы в области энергий ускорительного комплекса NICA.
- В результате сравнения влияния динамики QMD и среднего поля (MF) на стабильность образования ядер продемонстрирована важность использования динамики QMD для сохранения корреляций между барионами, что позволяет формировать ядра и гиперядра, стабильные в ходе эволюции реакции.
- На основе детального Монте-Карло моделирования генератора событий PHQMD с динамическим образованием ядер получены оценки множественности рождения гиперядер для экспериментов ускорительного комплекса NICA.
- Разработана и протестирована библиотека для поиска ядер и гиперядер "Phase-space Minimum Spanning Tree" (psMST). Библиотека psMST в трёх режимах работы применялась с четырьмя различными транспортными подходами PHSD-4.0, PHQMD-2.0, SMASH-2.0 и UrQMD-3.4 при двух энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.52$ ГэВ и $\sqrt{s_{NN}} = 8.8$ ГэВ. Полученные быстрое и импульсные распределения барионов (p , n , Λ и Σ^0) всех четырёх моделей схожи на ранних временах эволюции реакции. На более поздних этапах быстрое распределения ядер с массовыми числами $A = 2, 3, [4 - 20]$ сильно различаются при низких энергиях. PHQMD с psMST предсказывает в области центральных быстрого больше ядер чем другие модели. **Это наблюдение показывает чувствительность образования ядер при низких энергиях к реализации потенциальных взаимодействий.** Данная чувствительность гораздо более ярко выражена для ядер, чем для свободных одиночных частиц. При более высоких энергиях все модели дают качественно аналогичные результаты, поскольку динамика в этой области энергий в основном определяется столкновениями и множественным образованием частиц, а не потенциальными взаимодействиями.

- С помощью библиотеки psMST впервые было проведено сравнение двух различных алгоритмов поиска ядер, коалесценции и MST, в рамках одного кода. Было обнаружено, что множественность дейтронов, а так же их быстрое распределения и спектры поперечных импульсов практически не зависят от способа, которым они были получены из первоначального распределения нуклонов. Коалесценция и алгоритм MST дают не только очень похожие предсказания, но также согласуются с экспериментальными данными. Учитывая, что транспортные подходы UrQMD и PHQMD используют различную реализацию для движения барионов, такой результат является довольно интересным. Коалесценция, так же как алгоритм MST, показывает, что в поперечном направлении дейтроны остаются ближе к центру столкновения чем свободные нуклоны. Так как дейтроны не пересекают расширяющийся "файербол", они не разрушаются столкновениями с адронами из него.

Основные результаты работы неоднократно обсуждались на совещаниях коллаборации MPD, на методических семинарах, совещаниях рабочих групп: в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, Центре по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца (Дармштадт), Франкфуртском университете, а также докладывались на международных конференциях: “The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics” (ICPPA 2020, Россия), “Workshop on analysis techniques for centrality determination and flow measurements at FAIR and NICA” (2020, Россия, Германия), “The 18th International Conference on Strangeness in Quark Matter” (SQM 2019, Италия), “The 27th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions” (QM 2018, Италия), “VI International Conference on Particle Physics and Astrophysics” (ICPPA 2018, Россия), “The International Conference on Strangeness in Quark Matter” (SQM 2017, Нидерланды), “The XXIVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems” (2018, Россия), “International Workshop on Simulations of NICA for NICA energies”, (2017, Россия) и др.

- [1] Viktor Kireyeu et al. «Deuteron production in ultrarelativistic heavy-ion collisions: A comparison of the coalescence and the minimum spanning tree procedure». In: *Phys. Rev. C* 105.4 (2022), p. 044909.
- [2] Viktor Kireyeu. «Cluster dynamics studied with the phase-space Minimum Spanning Tree approach». In: *Phys. Rev. C* 103.5 (2021), p. 054905.
- [3] J. Aichelin (...) and 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». In: *Phys. Rev. C* 101.4 (2020), p. 044905.
- [4] S. Gläsel and V. Kireyeu et al. «Cluster and hypercluster production in relativistic heavy-ion collisions within the parton-hadron-quantum-molecular-dynamics approach». In: *Phys. Rev. C* 105.1 (2022), p. 014908.
- [5] V. Kireyeu et al. «Hadron production in elementary nucleon–nucleon reactions from low to ultra-relativistic energies». In: *Eur. Phys. J. A* 56.9 (2020), p. 223.
- [6] V. Kolesnikov and V. Kireyeu et al. «A new review of excitation functions of hadron production in pp collisions in the NICA energy range». In: *Phys. Part. Nucl. Lett.* 17.2 (2020), pp. 142–153.
- [7] V. Kireyeu et al. «Prospects for the study of the strangeness production within the PHQMD model». In: *J. Phys. Conf. Ser.* 1690.1 (2020), p. 012113.
- [8] V. Kireyeu et al. «PHQMD Model for the Formation of Nuclear Clusters and Hypernuclei in Heavy Ion Collisions». In: *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 84.8 (2020), pp. 957–961.

- [9] J. Aichelin (...) and V. Kireyeu et al. «Preliminary Results from the Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics (PHQMD) Transport Approach». In: *J. Phys. Conf. Ser.* 1070.1 (2018), p. 012005.
- [10] Viktor Kireyeu, Arnaud Le Fèvre, and Elena Bratkovskaya. «Study of clusters and hypernuclei production within PHSD+FRIGA model». In: *EPJ Web Conf.* 138 (2017), p. 03004.
- [11] V. Kireyeu. «Study of clusters and hypernuclei production with the NICA/MPD experiment». In: *Phys. Atom. Nucl.* 78.13 (2015), pp. 1508–1510.
- [12] V. Kireyeu. «Study of clusters and hypernuclei production with NICA/MPD and BM@N experiments». In: *PoS BaldinISHEPPXXII* (2015), p. 127.

Спасибо за внимание!