

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. СКОБЕЛЬЦЫНА**

А. Н. Соломин

**Новый метод поиска критической окрестности
параметров релятивистских столкновений тяжёлых ионов,
где плотная адронная материя переходит в кварк-глюонную материю,
и предложение его реализации в экспериментах $BM@N$ и MPD
на ускорительном комплексе NICA**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2018-2/893

Москва, 2018 г.

А. Н. Соломин

e-mail: anatoly.solomin@sinp.msu.ru

**Новый метод поиска критической окрестности
параметров релятивистских столкновений тяжёлых ионов,
где плотная адронная материя переходит в кварк-глюонную материю,
и предложение его реализации в экспериментах BM@N и MPD
на ускорительном комплексе NICA**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2018-2/893

Аннотация

Экспериментальное обнаружение критической окрестности фазового перехода плотной адронной материи в кварк-глюонную материю является одной из главных целей физики релятивистских столкновений тяжёлых ионов. Предложен новый метод поиска такой окрестности, заключающийся в отборе событий ультрацентральных столкновений на основе критерия азимутальной изотропии распределения образовавшихся в событии частиц и в поиске смены режима поведения, например, двумерной зависимости определённой наблюдаемой величины от энергии столкновения и массы одного из сталкивающихся ядер. Местоположение и размеры критической окрестности могут быть оценены с помощью подходящей параметризации, а идентифицировать возможный тип фазового перехода можно будет из физического содержания моделей, способных наиболее адекватно воспроизвести наблюдаемую зависимость, включая смену режима. Преимущество критерия центральности, основанного на азимутальной изотропии, — его независимость, по большому счёту, от энергии столкновения и от масс сталкивающихся ядер, а также от физики моделей, используемых для калибровки метода, в отличие от критериев, основанных на множественности.

A. N. Solomin

**Novel method for searching critical vicinity
of relativistic heavy-ion collision parameters,
where dense hadronic matter transits into quark-gluon matter,
and proposal for its implementation at the BM@N and MPD experiments
at the NICA accelerator complex**

Preprint MSU SINP 2018-2/893

Abstract

Experimental detection of the critical vicinity of the phase transition of dense hadronic matter into quark-gluon matter is one of the main goals of the relativistic heavy-ion collisions physics. A novel method for searching such a vicinity is proposed. Its essence is in selection of ultracentral collision events, based on the azimuthal isotropy of the distribution of the particles produced in an event and in search for the behaviour regime change of, for instance, two-dimensional dependence of a certain observable on the collision energy and mass of one of the colliding nuclei. Location and size of the critical vicinity can be estimated using an appropriate parametrization, while identification of the phase transition will stem from the physical contents of the models, most adequately reproducing the observed dependence, including the regime change. The advantage of the centrality criterion, based on the azimuthal isotropy, — its independence, to a large extent, of the collision energy and of the masses of the colliding nuclei, as well as of physics of the models, used for the method calibration, in contrast to criteria, based on multiplicity.

1. Введение

Исследование свойств ядерной материи в экстремальных условиях — одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной физики. Эксперименты по столкновению тяжёлых ионов, в которых создаются условия сверхвысоких температур и плотностей, интенсивно ведутся или планируются на ускорителях в различных научных центрах Европы и США (RHIC, LHC, NICA, FAIR).

Интерес к таким исследованиям обусловлен тем, что эти эксперименты дают возможность изучить параметры уравнения состояния (EoS) сильно-взаимодействующей материи при высоких температурах и плотностях, при которых проявляется кварк-глюонная структура нуклонов и создаются условия для фазового перехода — образования кварк-глюонной плазмы (КГП), нового состояния ядерной материи, когда адроны как составные объекты, теряют свою идентичность и растворяются в некую субстанцию из своих своих конститuentов — кварков и глюонов.

Существование этой новой фазы материи было предложено в середине 70-х годов [1, 2] и вскоре после этого стало понятно, что неабелева полевая теория межкварковых сил — квантовая хромодинамика (КХД) [3], предсказывает так называемую асимптотическую свободу — ослабление этих сил на коротких расстояниях [4, 5], что в свою очередь стало отправной точкой в нашем понимании фазовых переходов, современный сценарий которых предполагает серию фазовых переходов первого или второго рода, связанных с различными спонтанными нарушениями симметрии неабелевых калибровочных полей [6, 7].

Исследование фазовой диаграммы КХД является одним из самых захватывающих и фундаментальных проектов физики столкновения ионов при высоких энергиях. В частности, исследование ядерной материи при высоких барионных плотностях даёт возможность найти характерные указания, например, на фазовый переход первого рода с областью сосуществования фаз и критической конечной точкой. Экспериментальное открытие этих важных составляющих фазовой диаграммы КХД будет большим прорывом в нашем понимании свойств ядерного вещества. Рис. 1 на стр. 4 суммирует имеющиеся на текущий момент представления о фазовой диаграмме КХД [8, 9].

Приведённая диаграмма иллюстрирует предполагаемые фазы ядерной материи и их границы в зависимости от температуры и плотности барионного заряда ($n_0 \sim 16 \text{ fm}^{-3}$ — плотность барионов в атомных ядрах). В экспериментах на LHC и при максимальных энергиях RHIC материя образуется при очень высоких плотностях энергии и с равным числом частиц и античастиц, т.е. почти с нулевым барионным химическим потенциалом, отражающим среднюю плотность барионов. После адронизации файерболла происходит его химическое замораживание при температуре 155–165 MeV [10]. Эта температура совпадает с критической температурой, предсказываемой расчётами КХД на решётке для кирального фазового перехода [11, 12], который, согласно расчётам, представляет собой плавный переход (кросс-овер+) от партонной к адронной материи [13].

Хотя расчёты КХД на решётке для конечного барионного химического потенциала находятся ещё в начальной стадии, тем не менее, эти расчёты предсказывают некую критическую точку на фазовой диаграмме КХД с последующим фазовым переходом первого рода [14] при низких температурах и высоком барионном химическом потенциале, что делает эксперименты

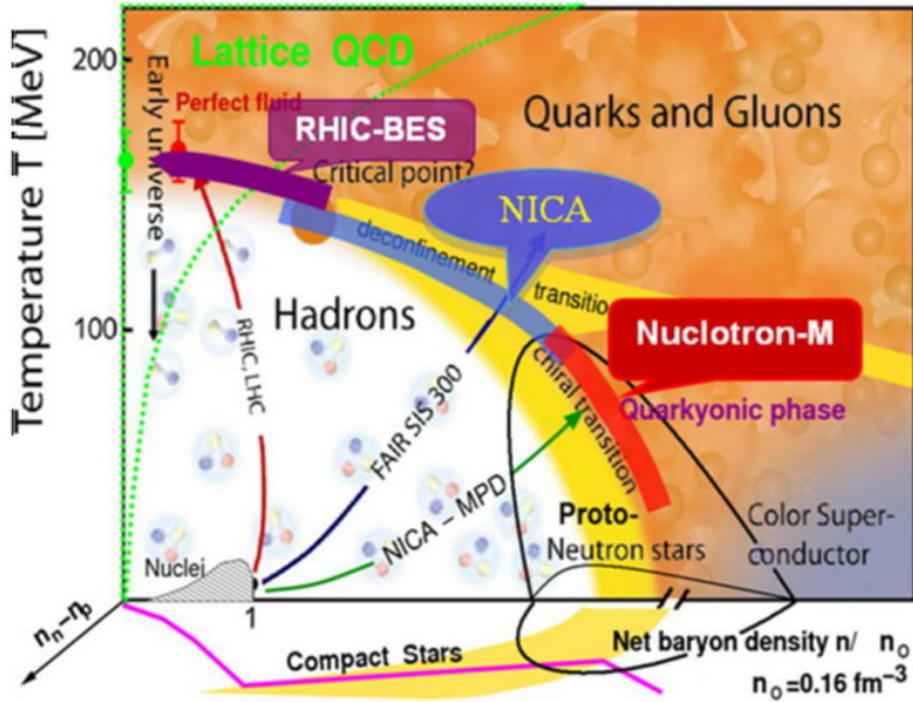


Рис. 1: Схематичная фазовая диаграмма КХД в терминах температуры и плотности барионов [9].

при энергиях FAIR и NICA особенно актуальными.

Эксперименты на комплексах FAIR в GSI в Германии и NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Объединенном Институте Ядерных Исследований затрагивают фундаментальные вопросы по фазовой структуре ядерной материи, конфайнменту и киральной симметрии. В этом аспекте экспериментальные наблюдаемые включают коллективные потоки, спектры поперечных масс, открытый и скрытый чарм, выход странных частиц. Важную роль играет определение области возможного образования фазовых переходов с помощью методов фемтоскопии, а также интерес представляют выходы дилептонов, странных частиц, флуктуации и корреляции рождённых частиц [15].

Для измерения этих переменных с большой статистикой необходимы установки с большим акцептансом и высокоскоростные детекторные системы с идентификацией частиц и возможностью триггирования событий. MPD детектор коллайдера NICA будет выполнять измерения при энергиях столкновения между $\sqrt{s_{NN}} = 6$ и 11 ГэВ, что превышает энергии столкновения NA61 в ЦЕРНе и STAR на коллайдере RHIC на 1–2 порядка. Эксперимент CBM на ускорительном комплексе FAIR / SIS100 имеет уникальный потенциал для исследования при энергиях ниже $\sqrt{s_{NN}} = 5$ ГэВ в силу уникальных возможностей детектора, который будет работать при высоких загрузках и интенсивностях взаимодействий.

Эксперимент BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) на фиксированной мишени является первой очередью комплекса NICA для изучения свойств барионной материи в экстремальных условиях. Модельные расчеты по QGSM [16] при энергиях Нуклотрона плотность нуклонов в зоне столкновения двух ядер золота превышает плотность насыщения в 3–4 раза. В таких экстремальных условиях могут проявляться признаки, характерные для восстановления киральной симметрии, хотя кварки по-прежнему связаны в адронах, также возможно, что партонные степени свободы могут проявиться в динамике конечных адронных состояний [17].

В рамках данного проекта на первом этапе планируется использовать для анализа события, полученные в пучках Ag с энергией 3.2 ГэВ и Kг с энергией 2.3 ГэВ в 2018 году.

2. Направление исследования проекта

Общим направлением данного проекта является поиск и исследование наблюдаемых, чувствительных к новым фундаментальным явлениям в плотной адронной и кварк-глюонной материи, разработка методов их анализа и применение разрабатываемого подхода в эксперименте. В частности, это одно из важнейших направлений исследований проекта NICA, поэтому конкретная реализация данного проекта планируется на экспериментальных установках BM@N и MPD комплекса NICA.

3. Цель и задачи проекта

Выдвигаемый подход заключается в поиске критической окрестности параметров столкновения тяжёлых ионов, таких как энергия и массы, в которой наблюдается смена режима поведения зависимости известных и новых наблюдаемых от этих параметров.

Цель проекта — для экспериментов BM@N и MPD комплекса NICA разработать и применить выдвигаемый в данном проекте новый подход и методы его реализации к исследованию свойств ядерной материи в экстремальных условиях.

Планируется цикл экспериментальных исследований на основе выдвигаемого подхода. Этот цикл предполагается выполнять по мере осуществления проекта NICA в целом.

Предлагаемый подход состоит из трёх ключевых компонентов (в порядке действий):

1. проведение серии сеансов при оптимизированном наборе энергий и сочетаний сталкивающихся ядер;
2. отбор, с помощью нового метода, событий ультрацентральных столкновений;
3. специализированный математический анализ зависимости ряда наблюдаемых от энергии, масс сталкивающихся ядер и других переменных и, идентификация наблюдаемых особенностей при помощи сопоставления с соответствующими результатами, получаемыми в моделях.

Разработка и оптимизация всех трёх компонентов является необходимым условием для получения новых и конкурентоспособных по точности физических результатов по исследованию фазовых переходов ядерной материи.

Рассмотрим новый подход (и его методы) к исследованию свойств ядерной материи в экстремальных условиях, выдвигаемый в данном проекте, (в порядке логики его идеи).

3.1. Отбор событий ультрацентральных столкновений

1. Отбираются события ультрацентральных столкновений ионов.

С физической точки зрения такой отбор обеспечивает минимальный прицельный параметр столкновения, а следовательно — максимальную «одинаковость» отобранных событий при каждом сочетании сталкивающихся ядер и энергии столкновения (на одно нуклон-нуклонное взаимодействие в системе их центра масс). И прежде всего, с точностью до разного рода естественных флуктуаций в этих событиях будет одно и то же число т. н. нуклонов-участников. Как одно из следствий этого, будет минимальной дисперсия любых распределений по множественности, например, отрицательно заряженных частиц или странных барионов, что сделает сами величины средних множественностей более статистически точными.

На порядки улучшатся условия сравнения с широким спектром моделей, т.к. для основной части физического анализа достаточно будет разыгрывать события только с нулевым прицельным параметром. Для калибровки метода, определения эффективности, чистоты и т. д. и разного рода поправок потребуется генерировать события с естественным распределением прицельных параметров, но уже только с использованием узкого круга моделей.

Самосогласованность выдвигаемого подхода как раз и обеспечивается тем, что предельно доступное сходство событий в каждой подгруппе компенсирует относительную редкость таких событий.

2. События ультрацентральных столкновений отбираются по критерию максимальной азимутальной изотропии двумерного распределения образовавшихся частиц по полярному и азимутальному углам.

Общепотребительным (но по характеру своему весьма неточным) критерием центральности является относительно высокая множественность образовавшихся частиц. Этот критерий зависит от энергий, масс сталкивающихся ядре и самое главное — от самой фазы, в которой находится образовавшийся промежуточный файербол. Поэтому этот критерий принципиально модельнозависим. В противоположность этому, наблюдаемая в данном событии азимутальная изотропия распределения образовавшихся частиц по полярному и азимутальному углам (а также, и по импульсам) является более непосредственным признаком центральности, хотя бы даже из самых общих соображений.

В $BM@N$ селекция событий ультрацентральных столкновений планируется производить следующим образом.

- (a) Первой ступенью отбора будет триггер центральности на основе существующего триггерного детектора, который может регистрировать только азимутальный угол вылета продуктов взаимодействия. Приблизительная азимутальная изотропия сработавших стрипов будет критерием срабатывания данного триггера.

Планируется провести анализ возможности и целесообразности усложнения триггера в сотрудничестве с соответствующей группой его разработчиков. Желательное усовершенствование состоит в регистрации не только количества сработавших стрипов этого детектора, но и амплитуд сигналов со сработавших стрипов для уточнения количества частиц образовавшихся под данным азимутальным углом. В случае положительного вывода, будет планироваться совместное с его разработчиками

осуществление такого усовершенствования.

- (b) Вторая ступень отбора будет состоять в использовании существующего кремниевого трекера для более точного триггирования азимутально изотропных событий на уровне двумерного (азимут – полярный угол) распределения хитов.

Для этого потребуются выбор и адаптация быстрого алгоритма оценки степени изотропности распределения, калибровка критерия положительного решения с помощью моделированных событий и при необходимости — включение буферизации и распараллеливания. Отобранные события сохраняются.

- (c) Наконец после полной реконструкции треков в сохранённых событиях, для физического анализа отбираются события со уточнённой степенью изотропии в некотором оптимальном интервале. Способ оценки степени изотропии будет более детальным, чем на стадии триггирования, и будет заключаться в оценке определённых параметров двумерного (азимут — полярный угол) распределения треков в событии. Возможно — и трёхмерного, включающего и импульс.

Отбор в MPD будет принципиально аналогичным отбору в BM@N.

- (a) Триггерный детектор...
- (b) Угловое распределение хитов...
- (c) угловое распределение треков...

Вся процедура отбора событий ультрацентральных столкновений потребует разработку алгоритмов, их настройку и оптимизацию критериев отбора для каждого детектора отдельно с помощью симуляции.

Одним из принципиальных моментов алгоритма должны быть преобразование системы отсчёта в такую, где соударение происходит соосно, а также поворот системы координат таким образом, чтобы она была выстроена по форме разлёта образовавшихся частиц, т. е. ось z должна быть ориентирована в направлении максимальной продольной вытянутости импульсно-углового их распределения, а начало отсчёта азимутального угла должно находиться в плоскости максимального поперечного размера этой формы. Такие преобразования позволят откалибровать оптимальные допуски параметров критерия и максимизировать эффективность и чистоту отбора.

3.2. Оптимизация набора энергий и сочетаний сталкивающихся ядер

1. В эксперименте BM@N налетающей частицей должно быть только какое-то одно большое ядро, вероятнее всего — Au, а варьироваться должны только ядра мишени, поскольку трекинг возможен в основном в области фрагментации снаряда. Таким образом, понадобятся облучения определённого набора различных мишеней в пучках Au с энергиями ($E = \sqrt{s_{NN}}$), равномерно покрывающими весь доступный диапазон энергий Нуклотрона в нескольких, оптимально выбранных точках.

2. В эксперименте MPD, в духе предлагаемого подхода, оптимально использовать тот же ряд сочетаний сталкивающихся ядер, что и в BM@N, т. е. ядром одного пучка тоже всегда должно быть золото, а ядра второго пучка должны быть в идеале те же, что и ядра мишени в BM@N и при таких настройках ускорителя, чтобы для всего набора ядер другого пучка энергия столкновения ($E = \sqrt{s_{NN}}$) была бы одинакова в каждой серии облучений, представляющей одну «точку» по энергии.

Потребуется оптимизация набора ядер и «точек» по энергии во всём диапазоне NICA путём симуляции.

3.3. Специализированный математический анализ

Для нахождения и измерения окрестности энергии фазового перехода, специальным методом анализируются зависимости определённых наблюдаемых от масс и энергий сталкивающихся ядер. Суть этого метода легче всего раскрывается на гипотетическом примере анализа крайне упрощённой картины подобной зависимости (см. Рис. 2 на стр. 8). Заметим, что в наборе энергий и масс ядер здесь соблюден принцип, определённый в разделе 3.2.

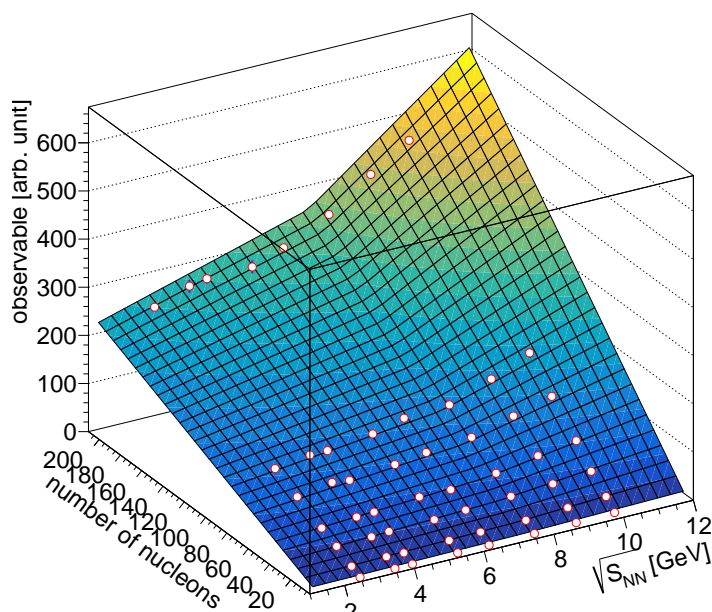


Рис. 2: Схематичный пример гипотетической зависимости условной наблюдаемой от энергии столкновения ($E = \sqrt{s_{NN}}$) и от числа нуклонов в одном из ядер и её аппроксимации функцией типа (1) при $E_{crit} = 7.5$ ГэВ.

1. Вначале набираются события ультрацентральных ядро-ядерных столкновений, в которых одно из ядер варьируется по массе, например, дейтон, ядра гелия, углерода, меди, аргона, криптона и золота, а другое — неизменно ядро золота, при, скажем, семи значениях энергии на нуклон во всём имеющемся диапазоне энергий NICA, причём при каждой энергии проходит весь выбранный ряд сочетаний сталкивающихся ядер, и в итоге, в нашем примере потребуется 49 различных сеансов облучений.

2. Далее строится двумерный график измеренной зависимости средних значений определённой наблюдаемой (могла бы быть, например, множественность π^-) от варьируемой массы и энергии (в нашем примере — 49 точек).
3. Затем эта зависимость параметризуется с помощью фитирования графика функцией двух переменных: энергии столкновения, $E = \sqrt{s_{NN}}$, и числа нуклонов в одном из ядер, N , которая в предельно идеализированном случае, имеет вид произведения двух линейных функций (одна — от E , другая — от N), и при этом, до некоторой критической энергии E_{crit} — с одним набором значений коэффициентов, а при более высокой энергии — с другим (1).

$$f(E, N) = \begin{cases} (C_{E,11} + C_{E,12}E)(C_{N,11} + C_{N,12}N) & \text{if } E < E_{\text{crit}} \\ (C_{E,21} + C_{E,22}E)(C_{N,21} + C_{N,22}N) & \text{if } E > E_{\text{crit}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $C_{E,11}$, $C_{E,12}$, $C_{N,11}$, $C_{N,12}$, $C_{E,21}$, $C_{E,22}$, $C_{N,21}$, $C_{N,22}$ и E_{crit} — варьируемые параметры. Такое ступенеобразное изменение параметров (иными словами — режима) изучаемой зависимости должно свидетельствовать о фазовом переходе, происходящем именно в окрестности этой критической энергии.

Это, конечно, достаточно упрощённое утверждение, и для более определённого вывода потребуется детальное сравнение моделей с экспериментальными результатами и анализ их физического содержания.

Очевидно также, что в реальности, технология математического анализа измерений будет существенно сложнее, и задача данного проекта — довести её до результативного уровня.

4. Ожидаемые результаты

В результате выполнения данного проекта ожидается:

- подтверждение более высокого эвристического потенциала нового подхода к поиску фазовых переходов ядерной материи, по сравнению с существующими;
- вероятное обнаружение точки и идентификация типа фазовых переходов ядерной материи, в частности, в экспериментах BM@N и MPD на ускорительном комплексе NICA;
- улучшение феноменологических моделей, претендующих на описание изучаемых процессов при энергиях NICA.

Автор выражает глубокую благодарность Э. Э. Боосу (НИИЯФ МГУ) за поддержку идеи и детальное обсуждение, А. С. Беляеву (Университет Саутгемптона, Великобритания) за ценные замечания, а также Л. М. Щегловой (НИИЯФ МГУ) за общие обсуждения по состоянию проблемы.

Литература

- [1] J. C. Collins и M. J. Perry. «Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks?» В: *Phys. Rev. Lett.* 34 (21 май 1975), с. 1353—1356. DOI: 10.1103/PhysRevLett.34.1353. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.34.1353>.
- [2] N. Cabibbo и G. Parisi. «Exponential Hadronic Spectrum and Quark Liberation». В: *Phys. Lett.* 59B (1975), с. 67—69. DOI: 10.1016/0370-2693(75)90158-6.
- [3] H. Fritzsche, Murray Gell-Mann и H. Leutwyler. «Advantages of the Color Octet Gluon Picture». В: *Phys. Lett.* 47B (1973), с. 365—368. DOI: 10.1016/0370-2693(73)90625-4.
- [4] David J. Gross и Frank Wilczek. «Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories». В: *Phys. Rev. Lett.* 30 (26 июнь 1973), с. 1343—1346. DOI: 10.1103/PhysRevLett.30.1343. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.30.1343>.
- [5] H. David Politzer. «Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?» В: *Phys. Rev. Lett.* 30 (1973). [274(1973)], с. 1346—1349. DOI: 10.1103/PhysRevLett.30.1346.
- [6] Andrei D. Linde. «Phase Transitions in Gauge Theories and Cosmology». В: *Rept. Prog. Phys.* 42 (1979), с. 389. DOI: 10.1088/0034-4885/42/3/001.
- [7] D. Boyanovsky, H.J. de Vega и D.J. Schwarz. «Phase Transitions in the Early and Present Universe». В: *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 56.1 (2006), с. 441—500. DOI: 10.1146/annurev.nucl.56.080805.140539. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.56.080805.140539>.
- [8] Senger, P. «Nuclear matter physics at NICA». В: *Eur. Phys. J. A* 52.8 (2016), с. 217. DOI: 10.1140/epja/i2016-16217-8. URL: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16217-8>.
- [9] Э. Э. Боос и М. М. Меркин. «Мега проект NICA». В: *Советский физик* 4 (октябрь 2016). URL: [https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2016/04\(120\)-2016/22853/](https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2016/04(120)-2016/22853/).
- [10] Francesco Becattini и др. «Hadron Formation in Relativistic Nuclear Collisions and the QCD Phase Diagram». В: *Phys. Rev. Lett.* 111 (8 авг. 2013), с. 082302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.082302. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.082302>.
- [11] Szabolcs Borsanyi и др. «Is there still any T_c mystery in lattice QCD? Results with physical masses in the continuum limit III». В: *JHEP* 09 (2010), с. 073. DOI: 10.1007/JHEP09(2010)073. arXiv: 1005.3508 [hep-lat].
- [12] A. Bazavov и др. «Chiral and deconfinement aspects of the QCD transition». В: *Phys. Rev. D* 85 (5 март 2012), с. 054503. DOI: 10.1103/PhysRevD.85.054503. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.85.054503>.
- [13] Y. Aoki и др. «The Order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics». В: *Nature* 443 (2006), с. 675—678. DOI: 10.1038/nature05120. arXiv: hep-lat/0611014 [hep-lat].

- [14] Jan Luecker и др. «Critical Point and Deconfinement from Dyson-Schwinger Equations». В: *PoS CPOD2013* (2013), с. 057. DOI: 10.22323/1.185.0057. arXiv: 1308.4509 [hep-ph].
- [15] David Blaschke и др. «Topical issue on Exploring Strongly Interacting Matter at High Densities - NICA White Paper». В: *The European Physical Journal A* 52.8 (авг. 2016), с. 267. ISSN: 1434-601X. DOI: 10.1140/epja/i2016-16267-x. URL: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16267-x>.
- [16] В. Friman и др. «Fluctuations as probe of the QCD phase transition and freeze-out in heavy ion collisions at LHC and RHIC». В: *Eur. Phys. J. C* 71 (2011), с. 1694. DOI: 10.1140/epjc/s10052-011-1694-2. arXiv: 1103.3511 [hep-ph].
- [17] J. Steinheimer и др. «Hypernuclei, dibaryon and antinuclei production in high energy heavy ion collisions: Thermal production versus Coalescence». В: *Phys. Lett. B* 714 (2012), с. 85—91. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.06.069. arXiv: 1203.2547 [nucl-th].

Анатолий Николаевич Соломин

**Новый метод поиска критической окрестности
параметров релятивистских столкновений тяжёлых ионов,
где плотная адронная материя переходит в кварк-глюонную материю,
и предложение его реализации в экспериментах BM@N и MPD
на ускорительном комплексе NICA**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2018-2/893

Работа поступила в ОНИ 05.12.2018