

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника отделения
экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт»

Харлова Юрия Витальевича

на диссертацию Мамаева Михаила Валерьевича

«Исследование направленного потока протонов в ядро-ядерных столкновениях

при энергиях $E_{\text{kin}} = 1.2 - 4 \text{ А ГэВ}$ »,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.15 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких
энергий»

Диссертационная работа Мамаева М.В. посвящена экспериментальным исследованиям коллективной анизотропии выходов протонов в ядро-ядерных столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23-1,58 \text{ А ГэВ}$ ($\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2,4 - 2,5 \text{ ГэВ}$) в эксперименте HADES и изучению возможности проведения измерений коллективной анизотропии в эксперименте BM@N.

Актуальность работы подтверждается неослабевающим научным интересом к изучению механизмов образования, эволюции и свойств сильновзаимодействующей кварк-глюонной материи (КГМ), которая образуется в столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях, а также может существовать в нейтронных звездах. Для изучения уравнения состояния КГМ в лабораторных условиях проводятся эксперименты по столкновению тяжелых ионов в энергиями в системе центра масс от нескольких ГэВ до нескольких ТэВ на нуклонную пару, причем эксперименты при различных энергиях взаимодополняют друг друга. В частности, в области малых энергий столкновений изучается КГМ в области высокой барионной плотности и умеренных температур, и именно в этой области ожидается проявление фазового перехода от обычной ядерной материи к среде, состоящей из квазисвободных кварков и глюонов в состоянии деконфайнмента. Одним из ключевых наблюдаемых эффектов в изучении КГМ являются анизотропные коллективные потоки адронов конечного состояния, чему и посвящена данная диссертация. Научная программа действующего ионного ускорителя SIS-18, а также нового ускорительного комплекса NICA, на основе которых написана диссертация, являются ключевыми экспериментальными установками для изучения КГМ в области высокой барионной плотности.

Научная новизна работы заключается в новых методических и научных результатах:

Впервые измерены значения направленного потока v_1 протонов с учетом вклада непотоковых корреляций для ядро-ядерных столкновений (Au+Au, Ag+Ag) при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23\text{--}1,58\text{A}$ ГэВ ($\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2,4 - 2,5$ ГэВ), позволяющие оценить вклад нуклонов-спектаторов в коллективную анизотропию частиц.

Впервые для экспериментов на фиксированной мишени разработаны и апробированы методы коррекции результатов измерения направленного потока на азимутальную неоднородность акцептанса установки и учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов, представленных в диссертации, подтверждается их согласованностью с опубликованными данными для измерения v_1 протонов в столкновениях Au+Au при энергии 1,23A ГэВ. Результаты измерения наклона направленного потока dv_1/du в области средних быстрот $u=0$ находятся в хорошем согласии (10%) со значениями, измеренными в экспериментах STAR, FOPI. Зависимость направленного потока v_1 протонов от быстроты согласуется с расчетами Монте-Карло моделей JAM и UrQMD. Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в 9 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах.

Практическая значимость работы заключается в получении новых результатов измерения направленного потока v_1 протонов, которые являются принципиально важными для проверки и дальнейшего развития теоретических моделей ядро-ядерных столкновений, получения новых ограничений на значения уравнение состояния симметричной сильновзаимодействующей материи в области максимальной барионной плотности. Методика измерения коллективных анизотропных потоков с оценкой вклада непотоковых корреляций, опробованная впервые в эксперименте HADES, была адаптирована к условиям установки BM@N и является существенно важной для экспериментов по столкновению тяжелых ионов с фиксированными мишенями.

Личный вклад автора диссертацию в материалы, представленные к защите, подтверждается работами, выполненными автором в рамках международных коллабораций: HADES и BM@N. Определяющим вкладом автора было его участие в постановке задач, разработке методов их решения, анализе данных, а также в подготовке результатов измерений для публикации от имени коллабораций HADES и BM@N. Автор также принимал участие в наборе экспериментальных данных и контроле их качества.

Оценивая диссертационную работу и её завершённость, необходимо сделать ряд замечаний:

1) В разделе Введения «Методология и методика исследования» о методологии, т. е. о стратегии и принципах исследования ничего не сказано. Перечислено лишь программное обеспечение, используемое для работы, что явно не исчерпывает все применяемые методы. Считаю, что этот раздел Введения лишний в диссертации. Методология же измерения потоков достаточно подробно описана в Главе 1 диссертации.

2) В разделе 1.2 приведена компиляция эллиптических потоков протонов, измеренных в экспериментах FOPI, E895, STAR. Но поскольку представлены данные как коллайдерного эксперимента, так и экспериментов на фиксированной мишени, нужно приводить данные в одном диапазоне быстрот в системе центра масс, что не указано в тексте. Получена ли данная компиляция диссертантом самостоятельно, или она взята из опубликованных источников? В любом случае в обсуждении подобных компиляций необходима ссылка на экспериментальные публикации. В подписи к рис.1.6 дается ссылка на рисунок из работы [47], который назван фигурой, т. е. перевод выполнен некорректно.

3) В Главе 1 диссертации не уделено внимания особенности измерения нечетных потоков, в частности, v_1 . Поскольку в столкновениях тяжелых ионов есть неоднозначность выбора нормали к плоскости реакции, то нечетные потоки должны были бы усредняться по азимутальному углу в диапазоне $[0, 2\pi]$ и становиться равными нулю. Ненулевое значение направленного потока свидетельствует о выделенном направлении в столкновении ионов.

4) В Главе 2 подробно описаны детекторы экспериментов HADES и BM@N, но для удобства читателей понимания возможностей обеих экспериментальных установок помогли бы основные характеристики экспериментов и детекторов. В частности, скорость взаимодействия пучка с мишенью и мертвое время системы сбора данных, не указанные в работе, необходимы для сравнения интегральной светимости экспериментов. При описании детекторов необходимо указать импульсное разрешение магнитного спектрометра, временное разрешение детектора времени пролета, энергетическое разрешение калориметров.

5) В Главе 4 представлены результаты измерения направленного потока v_1 . На рис.4.1 приведены две зависимости v_1 : от быстроты u и от поперечного импульса p_T . На рисунке с зависимостью $v_1(u)$ приведен диапазон p_T от 0.6 до 0.8 ГэВ/с, но при каких u показана зависимость $v_1(p_T)$?

Несмотря на указанные выше незначительные замечания, необходимо отметить высокое качество выполненной работы и результатов, выносимых на защиту, а также

подробное описание методики измерения азимутальной анизотропии образования частиц в столкновениях тяжелых ионов. Такое качественное представление, несомненно, представляет энциклопедическую ценность для физиков и студентов, работающих в области релятивистской ядерной физики. Важным положительным моментом является и подробное описание фундаментальной задачи, на решение которой направлена данная работа. Указанные выше замечания не влияют на общее впечатление от диссертации и не умаляют ее достоинств.

Автореферат полностью соответствует положениям диссертации.

Диссертационная работа «Исследование направленного потока протонов в ядро-ядерных столкновениях при энергиях $E_{KIN} = 1.2\text{--}4A$ ГэВ» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью соответствует всем критериям, установленным действующим Положением о присуждении ученых степеней, а также паспорту специальности 1.3.15 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Считаю, что Мамаев Михаил Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 - «Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Отзыв составил:

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики,

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, д. 1

Тел.: +7(4967)71-33-29

E-mail: yuri.kharlov@ihep.ru

_____ Харлов Юрий Витальевич

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Харлова Юрия Витальевича удостоверяю:

Ученый сектерарь

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ _____

Н.Н. Прокопенко

21.10.2025

Доктор физико-математических наук **Харлов Юрий Витальевич**

Специальность - 01.04.23 «Физика высоких энергий»

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. А. М. Горин, С. В. Евдокимов, А. А. Зайцев, В. И. Изучеев, Б. В. Полищук, К. А. Романишин, В. И. Рыкалин, С. А. Садовский, Ю. В. Харлов, А. А. Шангараев. Поиск резонансов в спектре масс двухфотонных событий, образующихся в $p+A$ взаимодействиях, в эксперименте Гиперон-М на ускорительном комплексе У-70. Письма В ЖЭТФ, том 118, вып. 9, с. 629 - 636. DOI: 10.31857/S1234567823210012
2. A. M. Varlamov, Yu. V. Kharlov. "Production and Reconstruction Model of the χ C States at the ALICE Experiment at the Large Hadron Collider". ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2022, Vol. 85, Suppl. 2, pp. S109-S116. DOI: 10.1134/S1063778822140149
3. Kharlov, Y. Hambardzumyan, A. Varlamov. "Probing the Hot QCD Matter via Quarkonia at the Next-Generation Heavy-Ion Experiment at LHC". Particles 2023, 6, 546-555. DOI: 10.3390/particles6020030
4. ALICE Collaboration, ... Y.Kharlov et al. "Inclusive photon production at forward rapidities in pp and p-Pb collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV". ALICE Collaboration. Eur.Phys.J.C 83 (2023) 7, 661 DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11729-y
5. ALICE Collaboration, ... Y.Kharlov et al. Performance of the ALICE Electromagnetic Calorimeter. JINST 18 (2023) 08, P08007. DOI: 10.1088/1748-0221/18/08/P08007
6. ALICE Collaboration, ... Y.Kharlov et al. Measurements of the groomed jet radius and momentum splitting fraction with the soft drop and dynamical grooming algorithms in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV. JHEP 05 (2023), 244. DOI: 10.1007/JHEP05(2023)244
7. ALICE Collaboration, ... Y.Kharlov et al. Nuclear modification factor of light neutral-meson spectra up to high transverse momentum in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV. Phys.Lett.B 827 (2022), 136943. DOI: 10.1016/j.physletb.2022.136943
8. S.V. Evdokimov, V.I. Izucheev, E.S. Kondratyuk, B.V. Polishchuk, S.A. Sadovsky, Y.Kharlov et al. Measurement of Parameters of Neutral Mesons Produced in Meson-Nucleus Interactions in Hyperon-M Experiment. Phys.At.Nucl. 84 (2021) 9, 1647-1652. DOI: 10.1134/S1063778821090155