

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию Прохоровой Дарьи Сергеевны на тему: **«Начальные конфигурации и слияние цветковых струн как источники коллективных явлений в протон-протонных взаимодействиях при высоких энергиях»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Актуальность данных теоретических исследований обусловлена недавно полученными на Большом адронном коллайдере (БАК) экспериментальными результатами, которые обнаруживают эффекты коллективности в столкновениях малонуклонных систем при высоких энергиях. В экспериментах по протон-протонным столкновениям на БАК, в событиях с большой множественностью частиц было обнаружено существенное сходство с результатами, полученными в столкновениях релятивистских тяжелых ионов. Среди этих новых неожиданных явлений надо отметить эллиптические потоки и так называемые дальние корреляции, измеренные в $p+p$ столкновениях на БАК для заряженных частиц в разнесенных по быстроте и азимуту достаточно узких интервалах регистрации, скоррелированные флуктуации множественности и среднего поперечного импульса частиц, а также увеличенный выход странных и мультистранных частиц в $p+p$ и $p+Pb$ столкновениях в событиях с большой множественностью (статья ALICE в Nature Physics 13, pages 535–539, 2017, с участием соавторов от СПбГУ). Эти коллективные эффекты в редких $p+p$ взаимодействиях были обнаружены в событиях, где достигаются высокие плотности энергии, сопоставимые со случаем периферических столкновений тяжелых ионов. Так, например, в 2010 году коллаборация CMS сообщила о новом эффекте, связанном с дальними корреляциями, наблюдавшемся в протон-протонных столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ и 7 ТэВ – о явлении, которое получило название ridge (риф, ридж). Также CMS были обнаружены потоки v_2 и v_3 в дополнительных измерениях двух- и многочастичных азимутальных корреляций в $p+p$ столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 5, 7$ и 13 ТэВ.

Необходимо отдельно отметить, что тематика поиска и исследования дальних корреляций в адронных столкновениях на Большом адронном коллайдере (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН)

была предложена группой СПбГУ еще в 2005 году и вошла в физическую программу эксперимента ALICE. Эти предложения базировались на оригинальных теоретических разработках слияния кварк-глюонных струн М.А. Брауна (СПбГУ, РФ) и К. Пахареса (Сантьяго-де-Компостела, Испания). Этот подход получил дальнейшее развитие в последние годы, в том числе, и в связи с появлением новых данных для анализа. Так в СПбГУ были получены первые экспериментальные данные по дальним корреляциям множественности заряженных частиц в $p+p$ столкновениях при трех энергиях (0.9, 2.76 и 7 ТэВ) и сделаны выводы о вкладе и особенностях ближних и дальних корреляций и о возможных механизмах их появления, связанных с процессами взаимодействия струн на начальных этапах столкновений. Исследования, ведущиеся в СПбГУ, опираются как на ранние пионерские теоретические разработки (В.Н. Грибов, А.Б. Кайдалов, В.А. Абрамовский, М.А. Браун, К. Пахарес), так и на активно развиваемые сегодня в работах В.В. Вечернина, В.Н. Коваленко, Е.В. Андропова, С.Н. Белокуровой.

Использование в анализе так-называемых сильно-интенсивных переменных, предложенных ранее (М. Gazdzicki, М. Gorenstein), минимизирует влияние тривиальных объемных флуктуаций и несет информацию о свойствах источников одного – определенного типа, образующихся в столкновениях. Однако, в последних теоретических исследованиях В.В. Вечернина, Е.В. Андропова был сделан очень важный вывод о чувствительности сильноинтенсивной наблюдаемой величины Σ к появлению источников нового типа. Последнее имеет высокую научную значимость, а использование и развитие подхода на основе сильно-интенсивных переменных является также одной из теоретических мотивацией данного диссертационного исследования.

Ранее, флуктуации множественности и поперечного импульса и дальние корреляции с их участием уже интенсивно изучались в различных теоретических подходах к описанию неупругого протон-протонного взаимодействия при высоких энергиях на основе изначальной концепции мультипомеронного обмена (В.Н. Грибов и А.А. Мигдал, 1968). Учет возможных процессов взаимодействия (в виде слияния либо расталкивания) для образующейся в итоге конфигурации кварк-глюонных струн, а также их адронизация в центральной области быстрот, обычно рассматривались для струн бесконечной длины. Такой подход, развитый в работах В.В. Вечернина и С.Н. Белокуровой, позволил на хорошем уровне качественно

описать процессы слияния струн и образования струнных кластеров в $p+p$ столкновениях при энергиях БАК, а также корреляции между величинами в разнесенных быструх интервалах. Однако в этих работах не учитывались возможные изменения в начальном состоянии за счет движения струн как в поперечной плоскости, так и в продольном направлении.

Основной целью диссертационной работы Д.С. Прохоровой является развитие идеи мульти-померонного обмена с учетом трехмерной динамики образования и адронизации кварк-глюонных струн.

Научная новизна данной работы состоит в разработке нового подхода, учитывающего как продольную, так и поперечную динамику струн и трехмерную эволюцию струнной плотности, что дает возможность описывать неупругие $p+p$ взаимодействия в широком диапазоне энергий столкновения от SPS до LHC и позволяет исследовать коллективные эффекты для взаимодействия малых систем. Последнее возможно в $p+p$ столкновениях при высоких энергиях в событиях с большой множественностью, где преобладает мультипомеронный обмен и образуется достаточно большое количество кварк-глюонных струн.

В работе выполнены интересные и оригинальные исследования, представляющие новую картину эволюции начальных состояний в адронных столкновениях при высоких энергиях. В частности, рассматривается возможная природа образования различных гармоник поперечных потоков в неупругих столкновениях протонов при высоких энергиях. Образующиеся в результате мультипомеронного обмена на начальной стадии адронных столкновений конфигурации струн обладают сильной неоднородностью как в распределении по поперечной плоскости, так и по быстрой. Коллективное движение образовавшихся струн рассматривается в диссертации вследствие притягивающего Юкавского потенциала, создаваемого цветовой струной, и предполагаемого механизма изменения кинетической энергии струн в случае их частичного перекрытия. Процесс кластеризации струн при большой плотности, приводит к их слиянию и к изменениям коэффициента натяжения (или плотности энергии) в образующихся так называемых "коротких" по быстрой кластерах струн - новых источниках частиц.

Новый, разработанный в диссертации, подход с учетом эффектов взаимодействия конечных по быстрой струн, а также учет потерь импульсов заряженными частицами – продуктами адронизации струн на

периферии – за счет испускания глюонов при взаимодействии типа "частица-струна" с плотной струнной средой дают возможность описать основные особенности азимутальных корреляций, наблюдаемых в $p+p$ столкновениях.

Научная значимость данного исследования заключается в важном выводе о том, что появление коротких струн по быстроте и учет струнной динамики дают эффекты, наблюдаемые в $p+p$ столкновениях для коэффициента корреляций $b_{\text{corr}}[\text{NF},\text{NB}]$ и сильноинтенсивной переменной $\Sigma[\text{NF},\text{NB}]$, которые оказываются сходными с включением ближних корреляций, возникающих вследствие образования и распада резонансов, а также струй. Также, при появлении струнных кластеров и введении коллективных эффектов в виде слияние струн, в работе обнаружена потеря свойства сильноинтенсивности для таких сильноинтенсивных переменных как $\Sigma[\text{NF},\text{NB}]$, $\Sigma[\text{PT},\text{N}]$ и $\Delta[\text{PT},\text{N}]$. С одной стороны, это накладывает ограничение на безусловное применение сильноинтенсивных переменных в анализе экспериментальных данных. Дело в том, что изначально по построению эти переменные $\Sigma[\text{NF},\text{NB}]$, $\Sigma[\text{PT},\text{N}]$ и $\Delta[\text{PT},\text{N}]$ сконструированы таким образом, что в них должны подавляться тривиальные флуктуации, связанные со флуктуациями числа источников частиц (струн) одного типа. Однако они оказываются чувствительными к флуктуациям струнной плотности из-за появления слившихся источников частиц (струн с большим коэффициентом натяжения). Поэтому, с другой стороны, это наблюдение – потери в определенном классе событий сильноинтенсивности переменных $\Sigma[\text{NF},\text{NB}]$, $\Sigma[\text{PT},\text{N}]$ и $\Delta[\text{PT},\text{N}]$, можно использовать как индикатор появления новых типов источников частиц при достижении определенных критических плотностей энергии в области взаимодействия адронов.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы Д.С. Прохоровой определяется комплексным подходом к задаче развития мультипомеронного приближения в адронных столкновениях с учетом образования высокой плотности кварк-глюонных струн конечной длины и взаимодействия между ними. Все расчеты выполнены с использованием оригинальных программных пакетов, которые были протестированы в ряде случаев на доступных данных аналитических расчетов, а также проверены на согласие с результатами в эквивалентных имеющихся других подходах.

Результаты данной работы обсуждались в Лаборатории физики сверхвысоких энергий СПбГУ и на Кафедре физики высоких энергий и

элементарных частиц Физического факультета СПбГУ. Также результаты были представлены и апробированы автором на международных конференциях:

1. **D. Prokhorova**, V. Kovalenko, устный пленарный доклад “Study of forward-backward multiplicity fluctuations and correlations with pseudorapidity”, XIV Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Dubna, Russia, 3 June - 7 June 2019.
2. **D. Prokhorova**, устный пленарный доклад “Pseudorapidity dependence of multiplicity fluctuations and correlations”, New Talents, International School of Subnuclear Physics 57th Course: In Search for the Unexpected, Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, Erice, Sicily, Italy, 21 June - 30 June 2019.
3. **D. Prokhorova**, V. Kovalenko, устный доклад “Pseudorapidity dependence of multiplicity fluctuations and correlations”, LXIX International Conference “Nucleus-2019”: Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies, Dubna, Russia. 1 July – 5 July 2019.
4. **D. Prokhorova**, устный пленарный доклад “Fluctuations study in MC model of interacting quark-gluon strings”, 19 Zimányi school “Winter workshop on heavy ion physics”, Budapest, Hungary, 2 Dec – 6 Dec 2019.
5. **D. Prokhorova**, E. Andronov, устный доклад “Study of multiplicity and transverse momentum fluctuations in the Monte-Carlo model of interacting quark-gluon strings”, LXXI International conference “NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies”, Online, 20 Sep – 25 Sep 2021.
6. **D. Prokhorova**, E. Andronov, устный доклад “Role of string fusion mechanism in fluctuation studies”, LXXII International conference “NUCLEUS – 2022: Fundamental problems and applications”, Moscow, Russia, 11-16 July 2022.
7. E. Andronov, **D. Prokhorova**, A. Belousov, постерный доклад "Influence of quark-gluon string interactions on particle correlations in p+p collisions", VII International Conference “Models in Quantum Field Theory”, St. Petersburg, Russia, 10-14 October 2022.
8. **D. Prokhorova**, E. Andronov, устный доклад “String fusion mechanism and studies of correlations”, The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022), Dubna, Russia, 24 – 28 October 2022.

9. **D. Prokhorova**, E. Andronov, устный доклад «Interacting color strings approach in modeling of rapidity correlations», The 6th International Conference on Particle Physics and Astro-physics (ICPPA-2022), Moscow, Russia 29 Nov – 2 Dec 2022.
10. **D. Prokhorova**, постерный доклад, «Particle correlations in the model of interacting color strings for p+p collisions», 55th PNPI Winter School, Luga, Russia, 13 - 18 March, 2023.
11. **D. Prokhorova**, "Particle correlations in the model of interacting colour strings for p+p collisions", The 21st Lomonosov Conference on Particle Physics, Moscow, Russia, 24 - 30 August, 2023.
12. E. Andronov, **D. Prokhorova**, "Azimuthal flow as a probe of color string fusion in p+p collisions", The XXVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", Dubna, Russia, 18 - 23 September, 2023.

Все результаты, полученные в данной диссертационной работе, опубликованы в 8 статьях, входящих в базы данных RSCI, Web of Science and Scopus:

1. D. Prokhorova, V. Kovalenko, "Study of forward-backward multiplicity fluctuations and correlations with pseudorapidity", Phys. Part. Nucl. 51 3, 323 (2020).
2. D. Prokhorova, V. Kovalenko, "Pseudorapidity dependence of multiplicity fluctuations in the model of interacting quark-gluon strings of finite rapidity length", Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 84 10, 1261 (2020).
3. D. Prokhorova, E. Andronov, "Role of String Fusion Mechanism in Fluctuation Studies", Phys. Atom. Nucl. 85 6, 1063 (2022).
4. D. Prokhorova, E. Andronov, G. Feofilov, "Interacting Colour Strings Approach in Modelling of Rapidity Correlations", MDPI Physics 5, 636 (2023).
5. D. Prokhorova, E. Andronov, "Study of Multiplicity and Transverse Momentum Fluctuations in the Monte-Carlo Model of Interacting Quark-Gluon Strings", Phys. Part. Nucl. 54, 3, 412 (2023).
6. E. Andronov, D. Prokhorova, A. Belousov, "Influence of quark–gluon string interactions on particle correlations in p+p collisions", Theor. Math. Phys. 216, 3, 1265 (2023).
7. D. Prokhorova, E. Andronov, "String Fusion Mechanism and Studies of Correlations", Phys. Part. Nucl. Lett. 20, 6, 1496 (2023).
8. D. Prokhorova, E. Andronov, Emergent flow signal and the colour string

Необходимо отметить, что Прохорова Дарья Сергеевна проявила большую самостоятельность и высокий профессионализм в проведении данного трудоемкого исследования. Ею проделан значительный объем работ по сравнительному анализу существующих теоретических методов, по разработке нового теоретического подхода и аналитических оценок, по составлению и отладке оригинальных программ для численных вычислений, а также по сравнению результатов с доступными экспериментальными данными.

Считаю, что диссертация Прохоровой Дарьи Сергеевны на тему: **«Начальные конфигурации и слияние цветковых струн как источники коллективных явлений в протон-протонных взаимодействиях при высоких энергиях»**, представляет собой законченный научный труд, содержащий новые результаты, а ее автор несомненно заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Диссертация соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 №11181/1 "О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете".

Рекомендую диссертационную работу Прохоровой Дарьи Сергеевны к защите в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель,
кандидат физико-математических наук,
доцент Кафедры физики высоких энергий
и элементарных частиц Санкт-Петербургского
государственного университета,
заведующий Лабораторией физики
сверхвысоких энергий



Г.А. Феофилов

«27» февраля 2024 года



27.02.2024

