

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

УДК 539.123

SND@LHC В 2025 г. И ДАЛЕЕ

© 2025 г. А. Б. Александров¹⁾, С. А. Горбунов¹⁾, Н. С. Коновалова¹⁾,
Д. Н. Морозова^{2)*}, Н. М. Окатьева¹⁾, Н. Г. Полухина^{1),2)}, Н. И. Старков¹⁾,
Е. Н. Старкова¹⁾, М. М. Чернявский¹⁾, Т. В. Щедрина¹⁾

Поступила в редакцию 04.04.2025 г.; после доработки 04.04.2025 г.; принята к публикации 04.04.2025 г.

Эксперимент SND@LHC исследует процессы с участием нейтрино, генерируемых на Большом адронном коллайдере в области псевдобыстрот $7.2 < \eta < 8.6$. Детектор включает мишень массой 830 кг, состоящую из вольфрамовых пластин, чередующихся с эмульсионными и электронными детекторами, за которой расположены адронный калориметр и система регистрации мюонов. Конструкция детектора дает уникальную возможность изучать рождение чармированных частиц в области псевдобыстрот, недоступной для других экспериментов. В настоящей работе описано современное состояние эксперимента и перспективы на ближайшие годы.

Ключевые слова: эксперимент SND@LHC, нейтрино, Большой адронный коллайдер, ядерная фотоэмульсия, регистрация мюонов, очарованные частицы

DOI: 10.31857/S0044002725030033, **EDN:** QGACSJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) является самым мощным ускорителем частиц из когда-либо созданных, способным обеспечивать столкновения протонов с энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ. В круг его задач входит исследование таких редких явлений, как распады бозона Хиггса и рождение тяжелых частиц в ТэВном диапазоне масс. Взаимодействие протонов на встречных пучках LHC сопровождается возникновением интенсивных потоков нейтрино и антинейтрино всех трех ароматов с энергиями от 100 ГэВ до нескольких ТэВ, распространяющихся вдоль оси столкновения пучков. При таких высоких энергиях нейтрино даже компактные детекторы способны регистрировать значительное число нейтринных взаимодействий, что открывает новые горизонты для исследований в области нейтринной физики.

Научная программа экспериментов по изучению нейтрино на LHC охватывает широкий спектр задач, включая анализ взаимодействий нейтрино высоких энергий, изучение свойств тау-нейтрино, исследование сильных взаимодействий в ранее недоступных кинематических режимах, вклад

в астрофизику частиц и поиск явлений за пределами Стандартной модели. Идея изучения нейтрино на LHC впервые была предложена в 1984 г. [1] и неоднократно обсуждалась в последующие десятилетия [2–6]. В 2018 г. был предложен эксперимент FASER (ForwArD SEArch expeRiment) [7], который позже был дополнен нейтринным детектором FASERv [8]. Одновременно другая группа исследователей приступила к разработке детектора XSEN (Cross Section of Energetic Neutrinos) [9, 10], впоследствии объединившись с коллаборацией SHiP (Search for Hidden Particles), что привело к созданию проекта SND@LHC (Scattering and Neutrino Detector at the LHC) [11, 12]. В марте 2021 г. эксперимент SND@LHC получил официальное одобрение в ЦЕРН, и к ноябрю того же года началась установка детектора в туннеле T118 (рис. 1).

Сбор данных детектора начался в 2022 г., а в марте 2023 г. коллаборация сообщила о первом наблюдении нейтрино, рожденных в коллайдере [13]. Сбор данных будет продолжаться до завершения сеанса LHC Run 3 в 2026 г., после чего планируется модернизация детектора и продолжение работы в рамках последующих сеансов Run 4 и Run 5.

На рис. 2 представлен обзор измеренных в разных экспериментах сечений взаимодействий нейтрино, демонстрирующий, что эксперимент SND@LHC заполняет пробел в данных для высокоэнергетических нейтрино.

¹⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

²⁾ Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Россия.

* E-mail: dashia110999@mail.ru

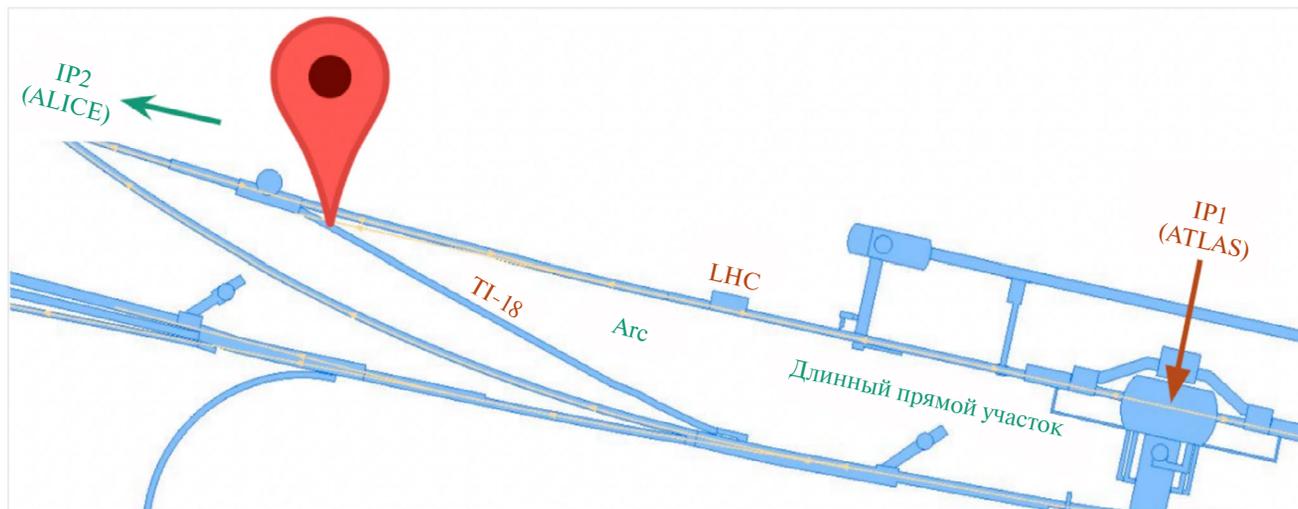


Рис. 1. Расположение детектора SND@LHC в тоннеле TI18.

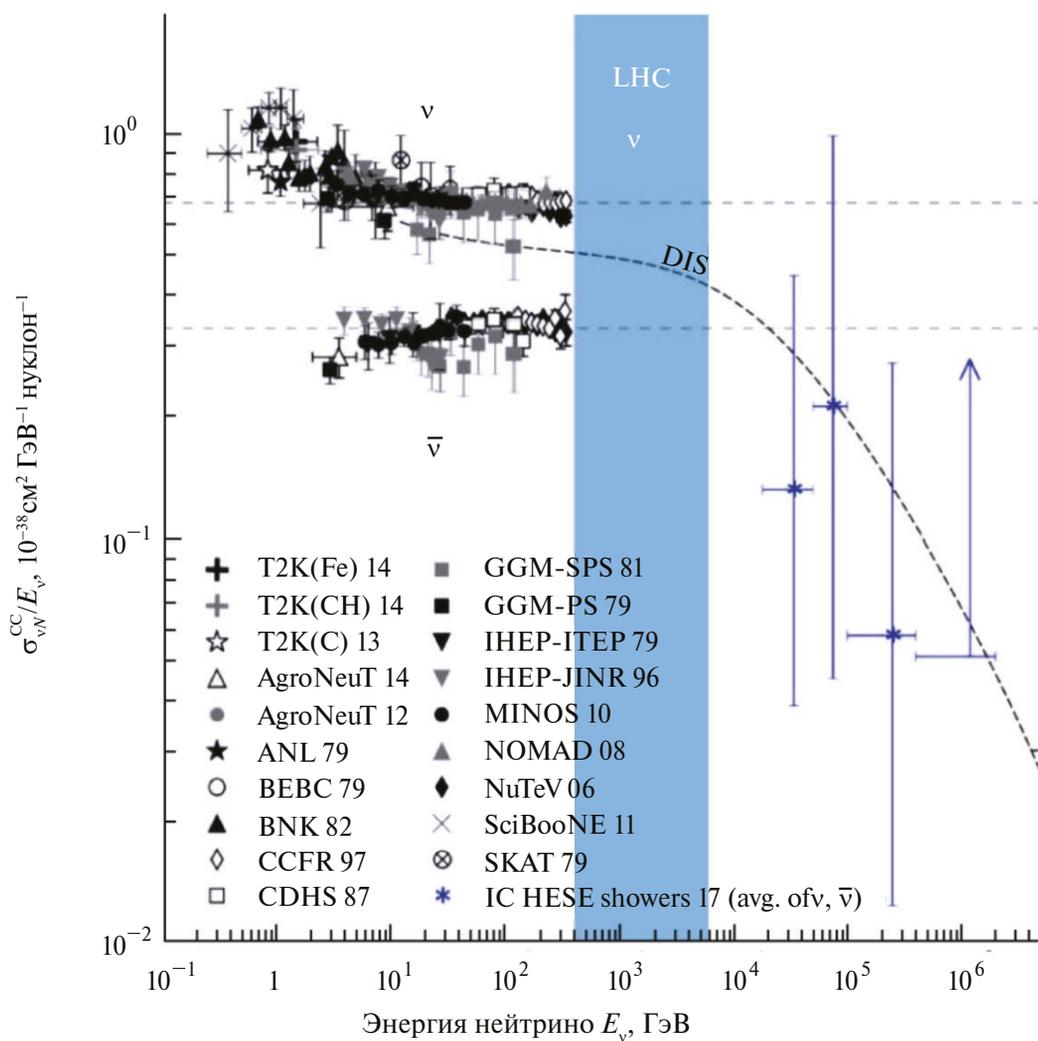


Рис. 2. Обзор измеренных сечений взаимодействий нейтрино при различных энергиях.

В первую очередь эксперимент SND@LHC был разработан для регистрации и изучения взаимодействий нейтрино, образующихся в протонных столкновениях в точке взаимодействия IP1 эксперимента ATLAS [14]. Эксперимент также рассчитан на поиск новых частиц, предсказываемых за пределами Стандартной модели.

Основной частью детектора является нейтринная мишень весом 830 кг из пяти “стенок” эмульсионных камер ECC (Emulsion Cloud Chambers) (см., например, [15]). Камеры собраны из вольфрамовых пластин толщиной 1 мм, прослоенных двухсторонними пленками фотографической ядерной эмульсии. Блоки ECC чередуются с электронными трекерами — плоскостями из сцинтилляционных волокон SciFi (Scintillating Fibres). Анализ данных в ядерной эмульсии проводится с использованием полностью автоматизированных оптических микроскопов [16]. Электронные компоненты детектора обеспечивают временную и пространственную привязку событий, а ECC позволяют с высокой точностью восстанавливать вершины событий на основе треков, зарегистрированных в ядерной эмульсии. Данные электронных детекторов анализируются непрерывно, в то время как эмульсионная мишень заменяется несколько раз в год по мере заполнения эмульсий. Эмульсионные данные становятся доступными для анализа после обработки на сканирующем оборудовании примерно через полгода после экспозиции.

Схема детектора SND@LHC показана на рис. 3, подробное описание действующего детектора дано в работе [17].

Настоящая статья представляет текущее состояние и перспективы эксперимента SND@LHC, что позволяет оценить его потенциал для решения ключевых вопросов в физике частиц и за ее пределами.

2. РАБОТА В ПЕРИОД LHC RUN 3

Полученные на сегодняшний день результаты эксперимента SND@LHC основаны на анализе данных 2022–2024 гг. (рис. 4). Интегральная светимость LHC за этот период составила 195.0 фбн^{-1} , тогда как детектор SND@LHC за то же время зарегистрировал несколько меньший объем данных (187.1 фбн^{-1}). Это соответствует эффективности регистрации данных на уровне 96% и свидетельствует о минимальных потерях, связанных с техническими простоями и “мертвым” временем детектора. В наборе обработанных данных было идентифицировано 32 нейтринных события [18]. Динамика накопления интегральной светимости показана на рис. 4. С учетом оставшегося времени сеанса LHC Run 3 накопленный объем данных составит 290 фбн^{-1} .

На начальном этапе изучения взаимодействий мюонных нейтрино по каналу заряженного тока (CC) был использован набор данных, полученных в 2022 г. Эти данные, соответствующие инте-

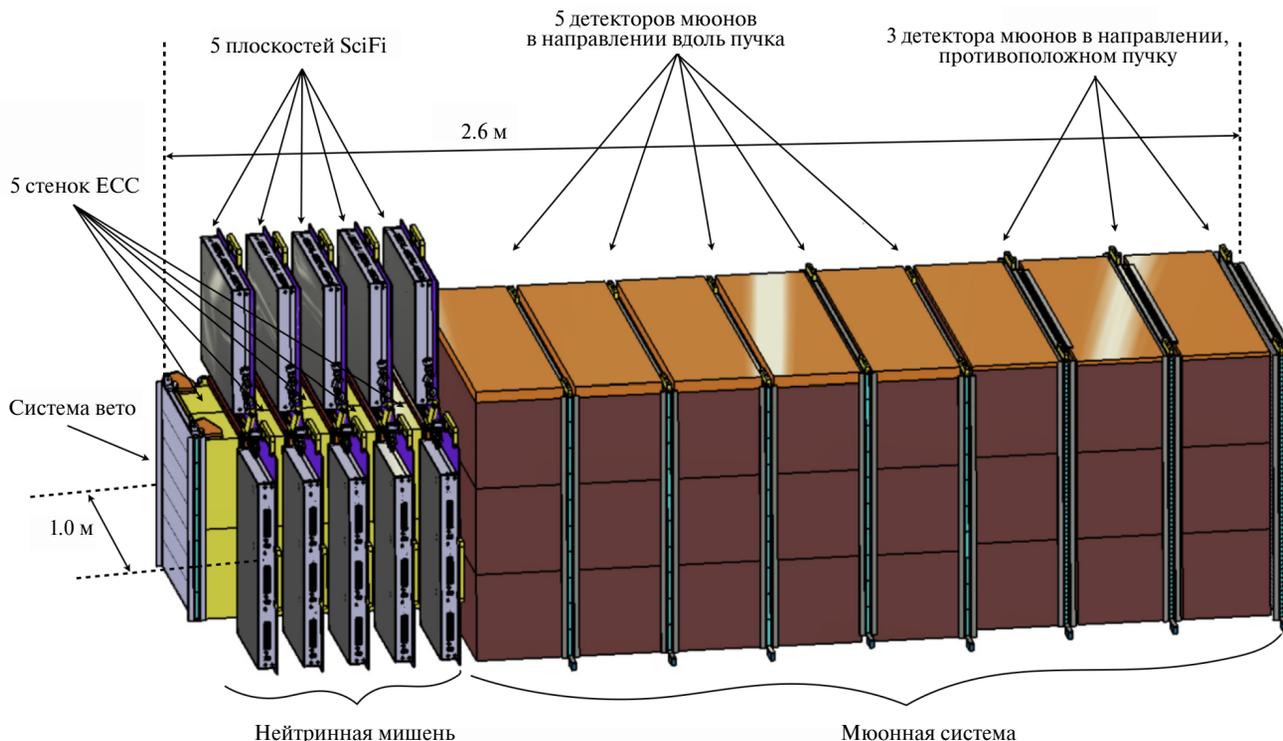


Рис. 3. Схематическое изображение детектора SND@LHC.

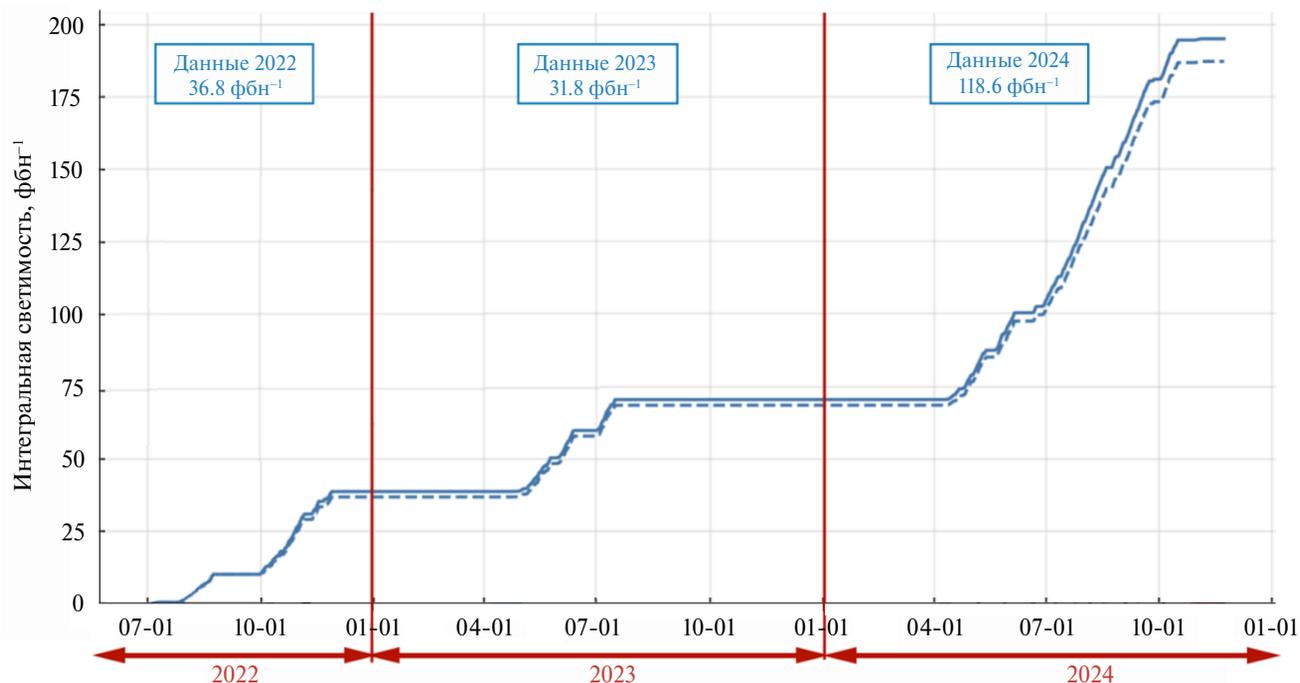


Рис. 4. Интегральная светимость SND@LHC, накопленная на разных этапах эксперимента.

гральной светимости 36.8 фбн^{-1} , были собраны с помощью электронных детекторов установки [13]. Признаками этих взаимодействий являются наличие изолированного мюонного трека в мюонной системе и связанного с ним адронного ливня, зарегистрированного в системе сцинтиллирующих волокон SciFi в адронном калориметре. После применения критериев отбора было обнаружено восемь кандидатов на взаимодействия нейтрино по каналу заряженного тока; значимость результата составила 6.8σ .

Дополнительно был проведен расширенный анализ, объединивший данные 2022 г. и 2023 г. (общая интегральная светимость 68.6 фбн^{-1}). Было фиксировано 32 СС-взаимодействия ν_μ со значимостью 12σ , одно из которых проиллюстрировано на рис. 5 [18].

2.1. События без мюона в конечном состоянии

В SND@LHC разработан подход к анализу данных, чувствительный к взаимодействиям нейтрино разных ароматов на основе данных электронной компоненты детектора [19]. Анализ основан на:

- идентификации вершины взаимодействия в нейтринной мишени, не связанной с падающей заряженной частицей;
- отсутствию в выбранной вершине мюонных треков, зарегистрированных мюонной системой;
- регистрации электромагнитного или адронного ливня электронными детекторами SciFi-мишени.

Эти события обозначаются как $\nu_{0\mu}$. Такие сигналы интерпретируются как результат смешивания взаимодействий с заряженными (СС) и нейтральными (NC) токами.

Фоновыми событиями являются:

- СС-взаимодействия мюонных нейтрино, в которых мюон не был зарегистрирован или идентифицирован;
- взаимодействия фоновых нейтральных адронов в нейтринной мишени.

Ожидаемая значимость наблюдения $\nu_{0\mu}$ составляет 5.5σ с 7.2 ожидаемыми сигналами при фоне из 0.30 СС-событий ν_μ , 1.5×10^{-2} событий нейтральных адронов, возникающих от взаимодействий мюонов в стенках туннеля и 1.7×10^{-3} СС-событий ν_τ с мюоном в конечном состоянии. Ожидаемый сигнал состоит из 4.9 СС-событий ν_e , 2.2 NC-событий и 0.1 СС-события ν_τ без мюона в конечном состоянии. Пример события, соответствующего такому сигналу, показан на рис. 6. Распределение суммы весов плотности попаданий в SciFi для зарегистрированных событий показано на рис. 7 вместе с ожиданием сигнала и фона. Сигнал считается зарегистрированным, если сумма весов плотности попаданий в SciFi выше 11×10^3 .

Аналогично оценивается значимость наблюдения СС-взаимодействий ν_e . Источником NC-компонента сигнала $\nu_{0\mu}$ в основном является поток ν_μ , поэтому этот компонент можно ограничить, ис-

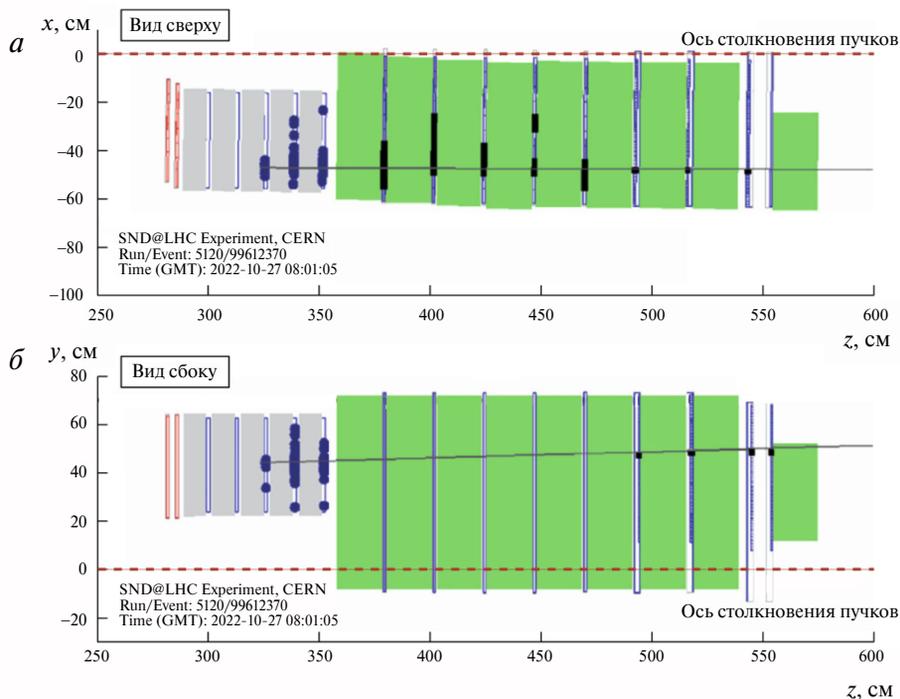


Рис. 5. Схема события-кандидата ν_μ CC из выборки данных 2023 г.: *a* — вид детектора сверху, *b* — вид сбоку.

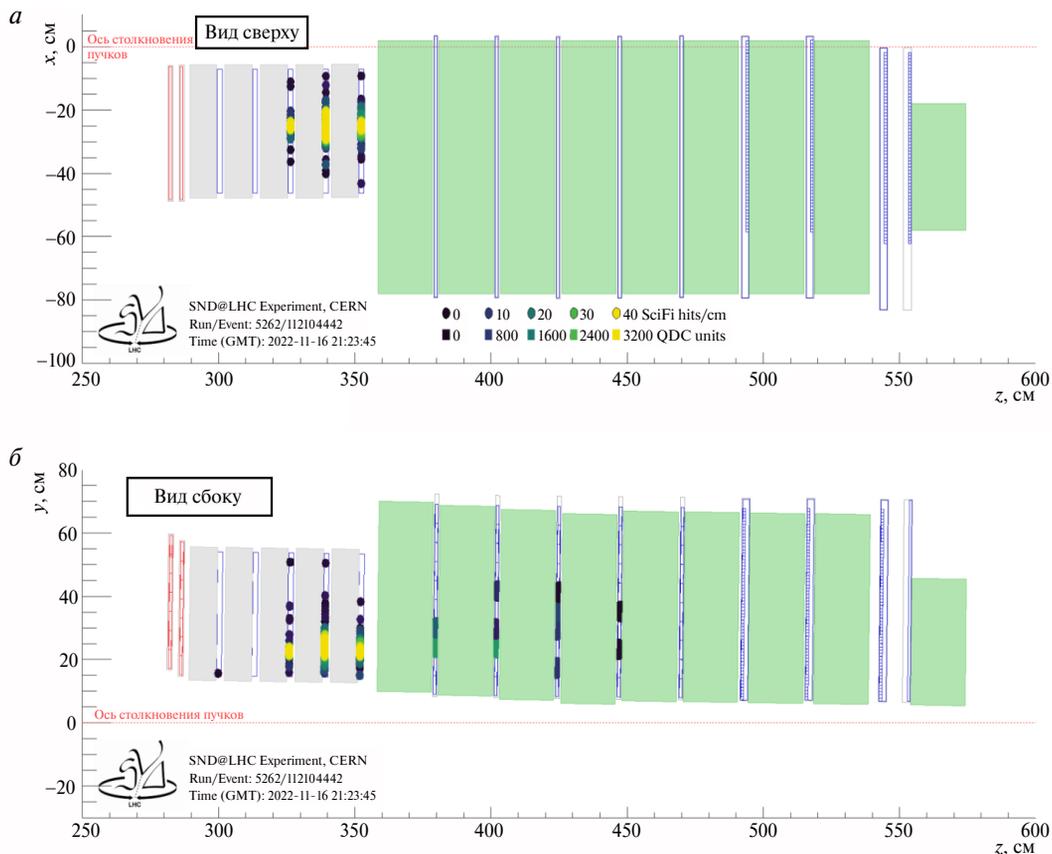


Рис. 6. Пример события, соответствующего сигналу ν_{0L} : *a* — вид детектора сверху, *b* — вид сбоку. Цветные пятна показывают локальную плотность попаданий в детектор SciFi в пределах 1 см от каждой точки попадания. Более светлые оттенки соответствуют более высоким значениям плотности.

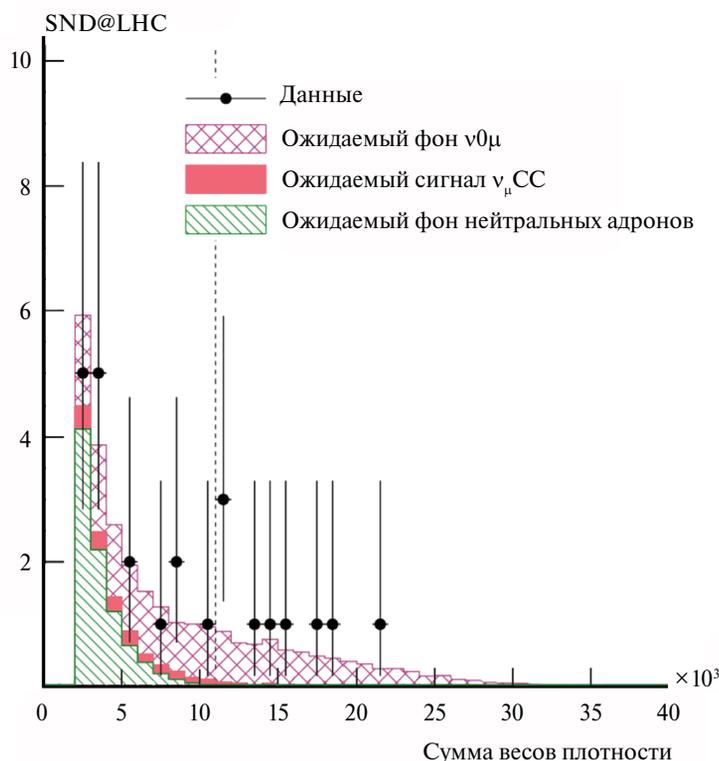


Рис. 7. Распределение суммы весов плотности попаданий в SciFi в отобранных для анализа событиях. Экспериментальные события показаны в сравнении с ожидаемым сигналом и фоном.

пользуя измерения CC -взаимодействий ν_μ [13]. С этим ограничением достоверность наблюдения CC -событий с ν_e находится на уровне 3.7σ с ожидаемой значимостью 2.2σ . Неопределенности по CC - и NC -компонентам ν_μ коррелируют. Следовательно, данные подтверждают наличие CC -взаимодействий ν_e в детекторе SND@LHC.

3. ПЛАНЫ РАБОТ НА ПЕРИОД HL-LHC

Эксперимент SND@LHC планирует продолжить работу в рамках проекта High-Luminosity LHC (HL-LHC) [20] с целью проведения исследований нейтринных взаимодействий в диапазоне энергий порядка нескольких ТэВ с беспрецедентной статистикой. Для работы в период LHC Run 4 запланировано значительное обновление детектора с целью более эффективного использования потенциала будущего модернизированного коллайдера HL-LHC. Коллаборация SND@LHC представила Письмо о намерениях для LHC Run 4, предложив модернизацию детектора, при которой его возможности будут значительно расширены [21, 22]. В новой версии эксперимент будет называться Advanced Scattering and Neutrino Detector (AdvSND). Использование ядерных эмульсий в новых условиях эксперимента не представляется возможным из-за ожидаемого пятикратного увеличения мгновенной светимости до 680 фбн^{-1} .

Еще одним существенным ограничением эксперимента SND@LHC в настоящее время является отсутствие магнитного поля. Это снижает точность измерения энергии нейтрино и не позволяет разделять нейтрино и антинейтрино. Для решения этой проблемы в рамках модернизации AdvSND предлагается установка магнитного спектрометра, состоящего из намагниченных железных плит, что позволит достичь магнитного поля с индукцией 1.7 Тл. Ожидается, что спектрометр обеспечит измерение импульса мюонов с точностью 20% для мюонов с энергией 1 ТэВ, а заряд мюона будет определяться с точностью лучше 3σ во всем диапазоне импульсов. Магнитизация адронного калориметра улучшит разрешение по импульсу и позволит более точно локализовать вершину взаимодействия. Однако установка магнитного спектрометра требует расширения туннеля T118.

Важным аспектом работы детектора является влияние угла пересечения протонных пучков в точке взаимодействия LHC. В текущей конфигурации LHC работает с вертикальным углом пересечения пучков в точке взаимодействия эксперимента ATLAS IP1, равным -160 мкрад , что определяет азимутальный аксептанс детектора SND@LHC. В LHC Run 4 угол пересечения изменится на $+250 \text{ мкрад}$ в горизонтальной плоскости, что еще больше снизит азимутальный аксептанс детектора и усугубит проблемы, связанные с наклонным полом в туннеле.

В ходе модернизации планируется внести изменения в расположение детектора, которые были невозможны для LHC Run 3 из-за ограниченного времени на установку оборудования. Как отмечалось, существующая конфигурация эксперимента (наклонный пол тоннеля T18 и ограниченное пространство) накладывает серьезные ограничения на акцептанс и эффективность детектора. В частности, имеющаяся система вето (см. рис. 3) из-за наклонного пола тоннеля не покрывает всю область мишени, что снижает ее эффективность относительно заряженных частиц, попадающих в нижнюю часть мишени, где поток нейтрино наиболее интенсивен.

Для решения этих проблем было решено добавить третью станцию вето и сделать выемку в полу (рис. 8а), что позволит минимизировать влияние нового угла пересечения и подготовить детектор к возможному переходу на вертикальный угол пересечения в LHC Run 5, а также увеличить фидуциальный объем мишени и улучшить подавление фоновых событий. Предложенная модернизация, включающая расширение системы вето, установку магнитного спектрометра и оптимизацию геометрии, позволит эффективно работать в условиях высокой светимости HL-LHC. Схематическое изображение нового детектора AdvSND показано на рис. 8б.

В AdvSND предлагается повторно использовать кремниевые микростриповые детекторы из двух самых внешних слоев TOB (Tracker Outer Barrel) детектора CMS [23], которые будут выведены из эксплуатации после LHC Run 3. Эти детекторы будут использованы для создания новой мишени и электромагнитного калориметра AdvSND. Восемь модулей размером $10 \times 20 \text{ см}^2$ будут объединены в мишень размером $40 \times 40 \text{ см}^2$, которая будет состоять из 100 чередующихся слоев вольфрамовых поглотителей и кремниевых трекеров (рис. 9).

Ожидается, что модернизированный детектор сможет зарегистрировать порядка 2.3×10^5 глубоко неупругих взаимодействий нейтрино по каналу заряженного тока (Charge Current Deep Inelastic Scattering, CC DIS), из которых несколько десятков тысяч будут происходить в результате распадов очарованных кварков. Также предполагается собрать около 7.3×10^4 NC DIS взаимодействий при светимости 3000 фбн^{-1} .

Для LHC Run 5 рассматривается возможность создания системы из двух детекторов, ближнего и дальнего, причем AdvSND будет выполнять роль дальнего детектора. Ближний детектор может быть размещен в зале UJ57/56, недалеко от детектора CMS. Диапазон ближнего детектора будет перекрываться с областью регистрации эксперимента LHCb ($4.0 < \eta < 4.5$), где наиболее эффективно проводятся измерения чармированных и бьюти-частиц. В круг задач ближнего детектора будут

входить снижение систематических неопределенностей при измерении распределения глюонов примерно до 1% и независимые измерения сечений взаимодействий нейтрино.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент SND@LHC представляет собой значительный этап в исследованиях нейтринных взаимодействий при высоких энергиях и направлен на исследование процессов рождения чармированных частиц в области псевдобыстрот, недоступных для других экспериментов на LHC. Целью эксперимента является также изучение рассеяния слабозаимодействующих частиц на электронах и протонах мишени. С 2023 г. эксперимент осуществляет сбор данных, полученных с помощью электронного оборудования и эмульсионного мишенного детектора. В оставшийся период сеанса LHC Run 3 (до середины 2026 г.) ожидается дополнительный набор данных, что позволит достичь интегральной светимости 290 фбн^{-1} . Запланированная модернизация детектора для работы в режиме High-Luminosity LHC (HL-LHC) направлена на значительное улучшение характеристик эксперимента. Замена эмульсионной мишени на кремниевые микростриповые детекторы, увеличение массы вольфрамовой мишени, установка магнитного спектрометра и улучшение систем идентификации частиц позволят снизить систематические и статистические неопределенности измерений. Дальнейшее расширение экспериментальной установки, включая создание системы ближнего и дальнего детекторов для LHC Run 5, позволит еще больше повысить точность измерений. Ближний детектор будет перекрываться с областью регистрации нейтрино в эксперименте LHCb, что обеспечит снижение систематических неопределенностей и возможность независимого измерения сечений взаимодействия нейтрино.

Эксперимент SND@LHC и его модернизация AdvSND способны внести значительный вклад в развитие физики элементарных частиц. Они не только позволяют изучать фундаментальные свойства нейтрино и очарованных частиц, но и открывают новые возможности для проверки Стандартной модели и поиска явлений, выходящих за ее рамки. Успешная реализация этих проектов станет важным шагом на пути к пониманию природы материи и фундаментальных взаимодействий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность председателю редакционной коллегии коллаборации SND@LHC профессору Эрику Ван Харвинену (Professor Eric Van Herwijnen, Chairperson of Editorial Board & Speakers Bureau SND@LHC) за поддержку и ценные консультации.

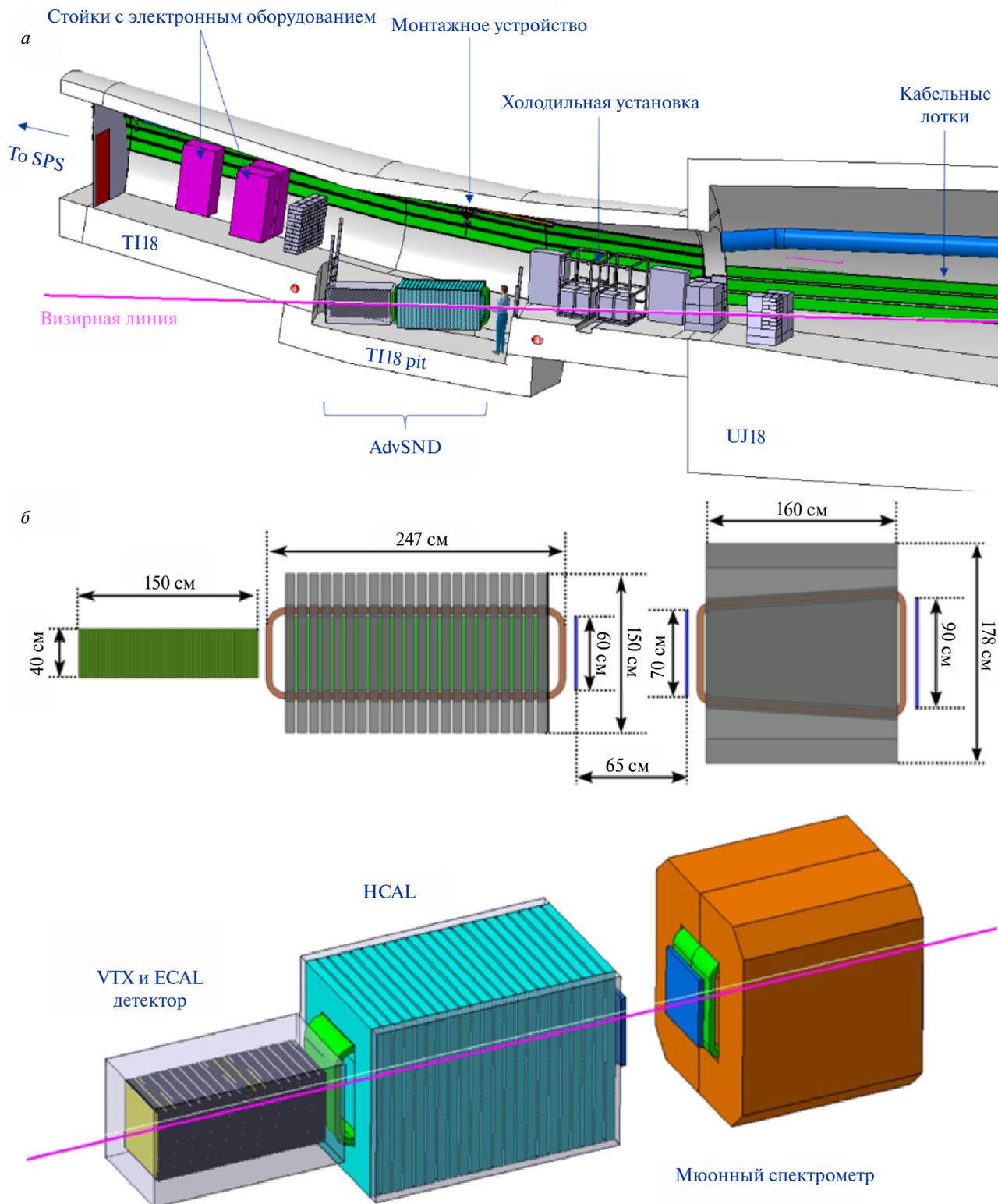


Рис. 8. *a* — Планируемое расположение детектора AdvSND в тоннеле T118, *б* — концептуальная конструкция детектора AdvSND.

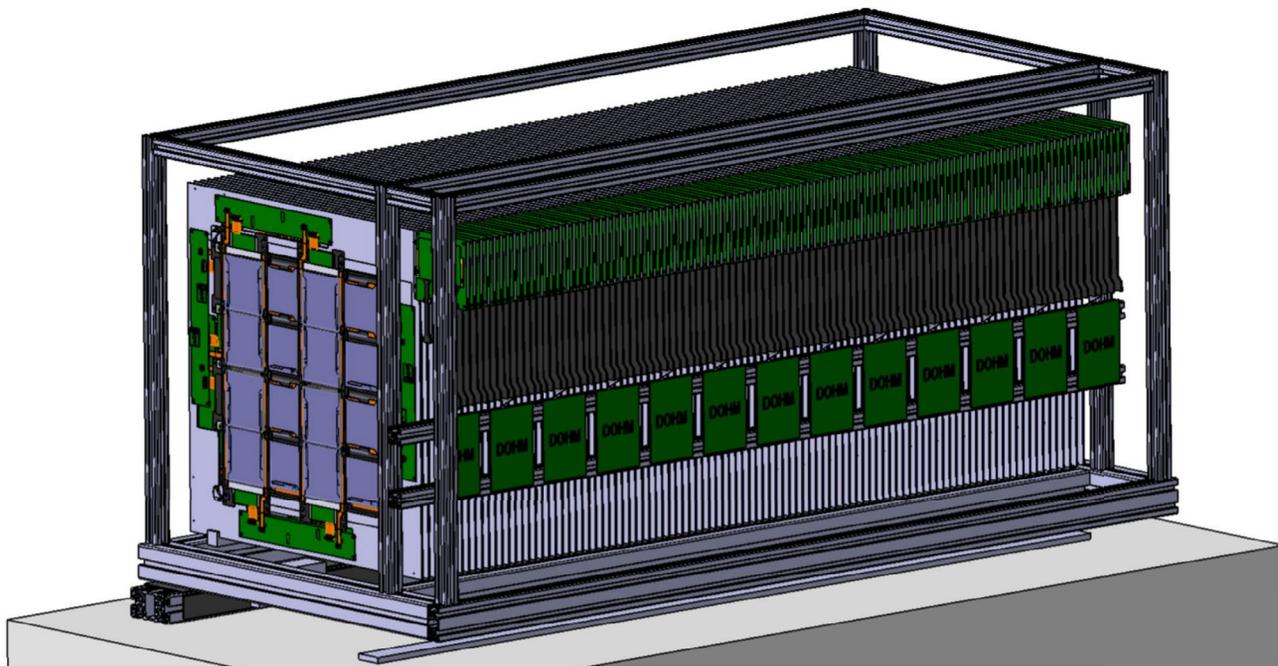


Рис. 9. Проект мишени из 100 кремниевых микростриповых детекторов для AdvSND.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Участие в эксперименте научной группы ФИАН поддержано Российским научным фондом по программе “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами” (проект № 23-12-00054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. De Rújula, R. Rückl, in *Proceedings of the ECFA-CERN Workshop: Large Hadron Collider in the LEP tunnel, Lausanne, 1984*, CERN TH 3892, p. 571.
2. K. Winter, in *Proceedings of the ECFA Large Hadron Collider (LHC) Workshop: Physics and Instrumentation, Aachen, 1990*, p. 37.
3. A. De Rújula, E. Fernandez, J. J. Gomez-Cadenas, *Nucl. Phys. B* **405**, 80 (1993).
4. F. Vannucci, in *Proceedings of the 5th International Workshop on Neutrino Telescopes, Venice, 1993*, CERN Tech. Rep. LPNHE-93-03.
5. H. R. Park, *JHEP* **1110**, 092 (2011).
6. P. Foldenauer, F. Kling, P. Reimitz, *Phys. Rev. D* **104**, 113005 (2021).
7. H. Abreu *et al.* (FASER Collab.), *Eur. Phys. J. C* **80**, 61 (2020).
8. FASER Collab., Technical Proposal: FASERnu, CERN-LHCC-2019-017, LHCC-P-015, UCI-TR-2019-25 (2020).
9. N. Beni, M. Brucoli, S. Buontempo, V. Cafaro, G. M. Dallavalle, S. Danzeca, G. De Lellis, A. Di Crescenzo, V. Giordano, C. Guandalini, D. Lazic, S. Lo Meo, F. L. Navarria, Z. Szillasi, *J. Phys. G* **46**, 115008 (2019).
10. N. Beni, M. Brucoli, V. Cafaro, T. Camporesi, F. Cerutti, G. M. Dallavalle, S. Danzeca, A. De Roeck, A. De Rújula, D. Fasanella, V. Giordano, C. Guandalini, A. Ioannisyian, D. Lazic, A. Margotti, S. Lo Meo, *et al.*, *J. Phys. G* **47**, 125004 (2020).
11. C. Ahdida *et al.* (SHiP Collab.), SND@LHC, CERN-LHCC-2020-002, LHCC-I-035 (2020).
12. C. Ahdida *et al.* (The SND@LHC Collab.), Technical Proposal: SND@LHC-Scattering and Neutrino Detector at the LHC, CERN-LHCC-2021-003; LHCC-P-016 (2021).
13. R. Albanese *et al.* (SND@LHC Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **131**, 031802 (2023).
14. M. Aaboud *et al.* (ATLAS Collab.), *Eur. Phys. J. C* **76**, 653 (2016).
15. R. Acquafredda, T. Adam, N. Agafonova, P. Alvarez Sanchez, M. Ambrosio, A. Anokhina, S. Aoki, A. Ariga, T. Ariga, L. Arrabito, C. Aufranc, D. Autiero, A. Badertscher, A. Bagulya, E. Baussan, A. Bergnoli, *et al.*, *JINST* **4**, P04018 (2009).
16. A. Alexandrov, N. Konovalova, N. Okateva, N. Polukhina, N. Starkov, T. Shchedrina, *Measurement* **187**, 110244 (2022).
17. Н. С. Коновалова, Н. М. Окальева, Н. Г. Полухина, Ж. Т. Садыков, Н. И. Старков, Е. Н. Старкова, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина, *ЯФ* **87**, 28 (2024) [*Phys. At. Nucl.* **87**, 594 (2024)].

18. C. Vilela (on behalf of the SND@LHC Collab.), in *Proceedings of the 58th Rencontres de Moriond QCD & High energy interactions, La Thuile, 2024*.
19. SND@LHC Collab., CERN-EP-2024-316 (2024).
20. G. Arduini, J. Barranco, A. Bertarelli, N. Biancacci, R. Bruce, O. Brüning, X. Buffat, Y. Cai, L. R. Carver, S. Fartoukh, M. Giovannozzi, G. Iadarola, K. Li, A. Lechner, L. Medina Medrano, E. Métral, *et al.*, JINST **11**, C12081 (2016).
21. D. Abbaneo *et al.* (The SND@LHC Collab.), Addendum to the AdvancedSND LoI, CERN-LHCC-2024-014; LHCC-I-040-ADD-1 (2024).
22. D. Abbaneo *et al.* (The SND@LHC Collab.), AdvSND, The Advanced Scattering and Neutrino Detector at High Lumi LHC Letter of Intent, CERN-LHCC-2024-007; LHCC-I-040 (2024).
23. A. Hayrapetyan *et al.* (CMS Collab.), JINST **5**, T03007 (2010).

SND@LHC IN 2025 AND BEYOND

© 2025 A. B. Alexandrov¹⁾, S. A. Gorbunov¹⁾, N. S. Konovalova¹⁾, D. N. Morozova²⁾,
N. M. Okateva¹⁾, N. G. Polukhina^{1),2)}, N. I. Starkov¹⁾, E. N. Starkova¹⁾, M. M. Chernyavskiy¹⁾,
T. V. Shchedrina¹⁾

¹⁾*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²⁾*National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

SND@LHC experiment investigates processes involving neutrinos generated at the Large Hadron Collider in the region of pseudorapidities $7.2 < \eta < 8.6$. The detector includes a target of 830 kg consisting of tungsten plates alternating with emulsion and electronic detectors, behind which a hadron calorimeter and a muon detection system are located. The detector's design provides a unique opportunity to study the generation of the charmed particles in the pseudorapidity region inaccessible to other LHC experiments. The paper presents the current state of the experiment and the prospects for the coming years.