

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

© 2024 г. Н. С. Коновалова¹⁾, Н. М. Окатьева¹⁾, Н. Г. Полухина¹⁾, Ж. Т. Садыков¹⁾,
Н. И. Старков¹⁾, Е. Н. Старкова¹⁾, М. М. Чернявский¹⁾, Т. В. Щедрина^{1),*}

Поступила в редакцию 03.04.2024 г.; после доработки 11.04.2024 г.; принята к публикации 11.04.2024 г.

В эксперименте SND@LHC в ЦЕРН зарегистрированы первые нейтрино в диапазоне псевдобыстрот $7.2 < \eta < 8.4$, рожденные в протон-протонных соударениях при энергии 13.6 ТэВ. SND@LHC — это автономный эксперимент на основе компактного гибридного детектора для регистрации нейтрино высоких энергий на Большом адронном коллайдере. Детектор позволяет различать взаимодействия нейтрино всех трех ароматов и исследовать процесс рождения чармированных частиц в области псевдобыстрот, недоступных для других экспериментов на БАК. Целью эксперимента является также изучение рассеяния слабо взаимодействующих частиц на электронах и протонах мишени.

DOI: 10.31857/S0044002724050043, EDN: JFWSAH

1. ВВЕДЕНИЕ

В Европейском центре ядерных исследований (CERN) около двух лет работает новый эксперимент SND@LHC (The Scattering and Neutrino Detector at the LHC) [1], целью которого является изучение нейтрино всех трех ароматов, образующихся при столкновениях высокоэнергичных протонов на встречных пучках Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider, LHC) при энергии $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ. Высокая светимость протон-протонных столкновений на LHC обеспечивает большой поток нейтрино с малыми углами вылета, а высокие энергии образующихся нейтрино, от 100 ГэВ до нескольких ТэВ, предполагают достаточно большие сечения нейтрино-нуклонных взаимодействий и относятся к области энергий, в которой взаимодействия нейтрино наименее изучены [2].

Детектор SND@LHC был смонтирован в 2021 г. во время длительной профилактической остановки LHC, а его экспозиция началась во время третьего запуска ускорителя (LHC RUN3) в апреле 2022 г. Компактный детектор расположен в подземном тоннеле T118 на расстоянии 480 м от точки столкновения встречных пучков ATLAS IP (Interaction Point) [3] (рис. 1). Положение детектора SND@LHC было выбрано исходя из ожидаемых псевдобыстрот образующихся нейтрино, их энергетического спектра и минимизации возможного фона. Через детектор, расположенный достаточно близко к пучку LHC, проходит интенсивный, сильно коллимированный (в пределах полярных углов менее 2.5 мрад) пучок индуцированных нейтрино. Статистику нейтринных взаимодействий набирает также близкий по задачам эксперимент

FASER [4], но в SND@LHC регистрируются нейтрино в диапазоне псевдобыстрот $7.2 < \eta < 8.44$, а в FASER — в диапазоне $\eta > 8.5$.

Основным источником фона при регистрации нейтрино являются мюоны, возникающие от частиц, образующихся в протон-протонных столкновениях на ATLAS IP. Слой скальных пород и бетона толщиной около 100 м, отделяющий детектор SND@LHC от ATLAS IP, позволяет существенно ослабить влияние этого фоновое излучения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Детектор SND@LHC представляет собой гибридную систему, основным компонентом которой является мишень массой 830 кг, за которой расположены адронный калориметр и мюонная система. На рис. 2 показан схематический вид детектора SND@LHC спереди (со стороны входа пучка) и сбоку. Размеры детектора обусловлены компромиссом между минимальным необходимым размером адронного калориметра и мюонной системы, максимально возможной областью захвата приходящих нейтрино и размерами тоннеля. В результате детектор имеет общую длину 2.6 м. Ограничения, связанные с необходимыми размерами адронного калориметра и мюонной системы, позволили установить длину мишени не более 80 см; поперечный размер мишени 80×60 см² ограничен боковой стенкой тоннеля.

Для нейтринной мишени использована концепция эмульсионной камеры (Emulsion Cloud Chamber, ECC) из вольфрамовых пластин, чередующихся с пленками фотографической ядерной эмульсии. Мишень собрана из пяти “стенок” ECC, между которыми расположены электронные трекары из сцинтилляционных волокон SciFi (Scintillating Fibres) [5]. Каждая

¹⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
* E-mail: tvshchedrina@gmail.com

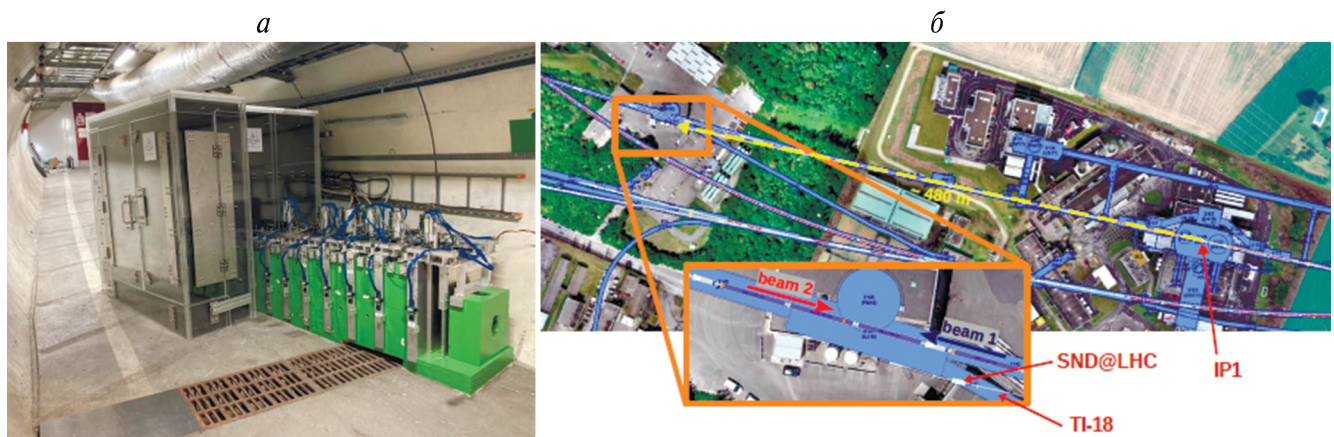


Рис. 1. *а* — Детектор SND@LHC в подземном тоннеле Т118; *б* — положение детектора (синий прямоугольник) относительно пучка LHC.

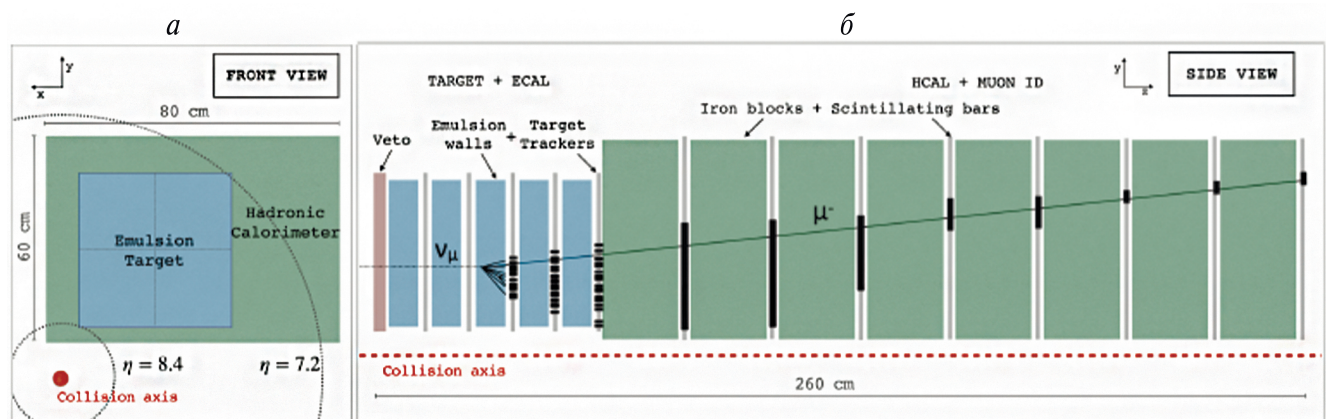


Рис. 2. Схематическое изображение детектора SND@LHC: *а* — спереди; *б* — сбоку.

стенка состоит из четырех ячеек (так называемых кирпичей), изготовленных из 60 эмульсионных пленок, чередующихся с 59 вольфрамовыми пластинами толщиной 1 мм. Нейтринная мишень SND@LHC в общей сложности содержит 1200 эмульсионных пленок общей площадью около 44 м².

Ядерная эмульсия используется как вершинный детектор с микронным разрешением [6], а система треков обеспечивает временную привязку событий; вместе с мишенью они также действуют как электромагнитный калориметр. Система SciFi дает целеуказание места взаимодействия нейтрино в эмульсионном кирпиче и позволяет проследить связь события в эмульсии с треком мюона в мюонном детекторе, таким образом идентифицируя взаимодействия мюонного нейтрино по каналу заряженного тока.

Высокое пространственное разрешение ядерных эмульсий позволяет эффективно отслеживать все частицы, образующиеся при взаимодействии нейтрино высокой энергии, несмотря на малые углы их вылета. Методика работы с эмульсионной камерой также дает возможность эффективно отслеживать тау-лептон и вершину его распада, что, в свою оче-

редь, является ключевым элементом при идентификации тау-лептонов и маркировке взаимодействий тау-нейтрино. Эффективность обнаружения взаимодействий тау-нейтрино на расстоянии более 10 мкм между первичной и вторичной вершинами, как ожидается, составит около 50% [1].

Адронный калориметр и мюонная система состоят из восьми слоев сцинтилляционных стержней, чередующихся с железными плитами толщиной 20 см. Три близлежащих к мишени электронных модуля мюонной системы представляют собой плотную сеть сцинтилляционных волокон с горизонтальной и вертикальной ориентацией и предназначены для регистрации вылетающих из мишени мюонов. Сочетание электронных трекеров мишени и сцинтилляторов мюонного детектора также действуют как неомогенный адронный калориметр для измерения энергии адронной струи, образующейся при взаимодействии нейтрино, и, следовательно, энергии нейтрино. Каждый сцинтилляционный стержень и волоконный модуль просматривается с помощью кремниевых фотумножителей SiPM (Silicon Photon Multipliers). Нейтрино в протон-протонных взаимодействиях на LHC

рождаются в результате лептонных W - и Z -распадов, b - и c -распадов, а также образуются при распаде пионов и каонов, вылетающих из точки взаимодействия ATLAS IP. Тип и энергетический спектр регистрируемых нейтрино связаны со значением псевдобыстроты η . В диапазоне псевдобыстрот, изучаемых в SND@LHC, электронные нейтрино образуются преимущественно в результате распадов очарованных адронов, в то время как мюонные нейтрино могут рождаться также при распадах пионов и каонов [7–9] (рис. 3). Согласно модельным расчетам, фон мюонных нейтрино от распадов пионов и каонов подавлен, поскольку концентрируется в области более низких энергий. Таким образом, эксперимент позволяет изучать рождение очарованных адронов посредством регистрации электронных нейтрино. Таонные нейтрино, которые составляют не более 5% от общего потока нейтрино, в области доступных псевдобыстрот образуются в основном в результате распадов $Ds \rightarrow \tau \nu_\tau$ с последующим распадом τ .

Данные о рождении чармированных частиц в области псевдобыстрот эксперимента SND@LHC дадут дополнительные обоснования для изучения вклада атмосферных нейтрино в экспериментах по поиску нейтрино космического происхождения [10].

В первой фазе эксперимента ожидается регистрация около двух тысяч взаимодействий высокоэнергичных нейтрино всех ароматов. Такое количество событий с достаточной достоверностью обеспечит определение сечений νN -взаимодействий, в том числе для тау-нейтрино. С учетом ожидаемой интегральной светимости 250 фбн^{-1} LHC в 2022–2025 гг., т.е. в течение RUN3, систематическая неопределенность при измерении характеристик чармированных частиц составит около 30%, а статистическая — около 5%.

Аромат нейтрино определяется во взаимодействиях по каналу заряженного тока путем идентификации соответствующего заряженного лептона, образующегося в точке взаимодействия нейтрино, или продуктов его распада (рис. 3а). Так, сигнатурой мюонных нейтрино является изолированный мюонный трек в мюонной системе, связанный с адронным ливнем в адронном калориметре. Тау-лептон идентифицируется путем регистрации его распада в эмульсии, а также отсутствием электрона или мюона в первичной вершине. Рисунок 3б иллюстрирует вклад мюонных ($\sim 73\%$), электронных ($\sim 25\%$) и таонных нейтрино в общее количество нейтрино, ожидаемых в эксперименте SND@LHC (получено на основе модельных расчетов [11]).

Эксперимент SND@LHC также обладает уникальной чувствительностью к поиску слабо взаимодействующих частиц (Feebly Interacting Particles, FIPs) через сигнатуры рассеяния в нейтринной мишени детектора [12]. В случае упругого рассеяния FIPs на электронах экспериментальная сигнатура состоит из изолированного электрона отдачи, который может

быть идентифицирован по развитию электромагнитного ливня в области мишени. Для FIPs, упруго взаимодействующих с протоном, изолированный протон создает адронный ливень в детекторе. По сравнению с ограничениями, существующими в других экспериментах [13], SND@LHC способен на порядок улучшить чувствительность к темной материи за счет рассеяния на нуклонах в диапазоне масс темной материи между $100 \text{ МэВ}/c^2$ и $2 \text{ ГэВ}/c^2$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

События нейтринного взаимодействия и FIP-рассеяния сначала обнаруживаются электронной системой детектора: электромагнитные ливни развиваются в области мишени и идентифицируются треком мишени, а мюоны в конечном состоянии восстанавливаются мюонной системой. Данные электронных детекторов SND@LHC анализируются непрерывно, в то время как эмульсионная мишень заменяется несколько раз в год так, чтобы плотность заполнения эмульсий не превышала 10^5 треков на см^2 . Фон пролетающих через мишень мюонов ограничивает максимальную интегральную светимость на уровне около 20 фбн^{-1} для реконструкции эмульсионных данных. При такой интегральной светимости мюоны создают в эмульсионной мишени параллельные треки на расстоянии порядка 10 мкм друг от друга. В 2022–2023 гг. было осуществлено пять замен эмульсионной мишени для сбора около 70 фбн^{-1} , причем за одну экспозицию мишени в течение примерно 2 месяцев накапливалось от 9 до 21 фбн^{-1} , в зависимости от интенсивности пучка на ускорителе.

Информация с проявленных ядерно-эмульсионных пленок считывается с помощью современных полностью автоматизированных оптических сканирующих систем [14, 15] и обрабатываются в соответствии с модернизированной технологией, использованной в эксперименте OPERA [16].

Большой объем эмульсионных данных требует одновременной работы нескольких сканирующих лабораторий, оснащенных автоматизированными оптическими микроскопами со скоростью сканирования $\sim 180 \text{ см}^2/\text{ч}$. В число этих лабораторий, владеющих технологией автоматизированного сканирования, входит Лаборатория элементарных частиц ФИАН, где на измерительном комплексе ПАВИКОМ [17] обрабатываются данные экспериментов, использующих различные трековые детекторы (ядерную эмульсию, фосфатные стекла, оливины из метеоритов и др.).

Эмульсионные данные эксперимента SND@LHC становятся доступны для анализа примерно через полгода после экспозиции.

Пластина ядерной эмульсии состоит из двух чувствительных слоев эмульсии, каждый из которых по-

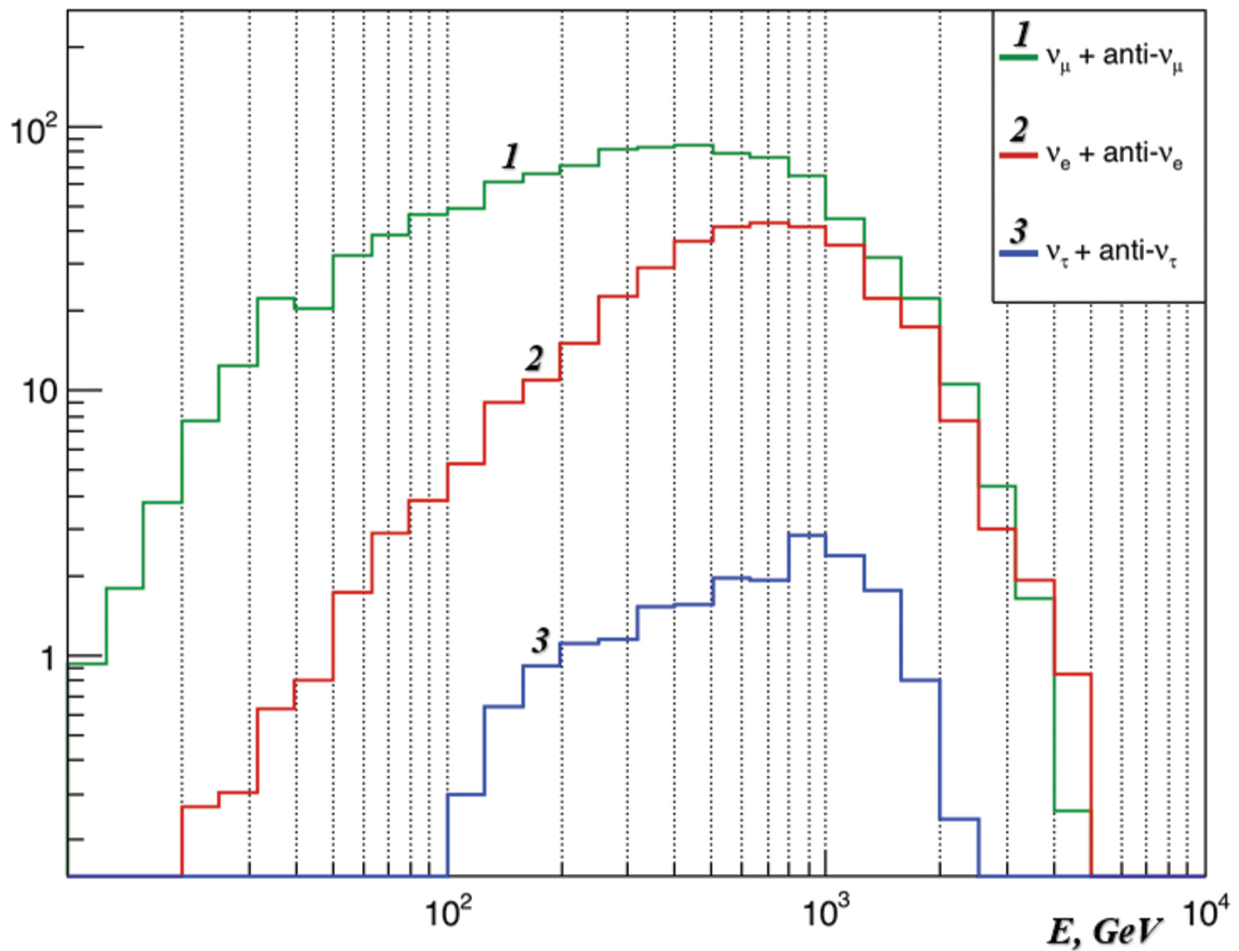
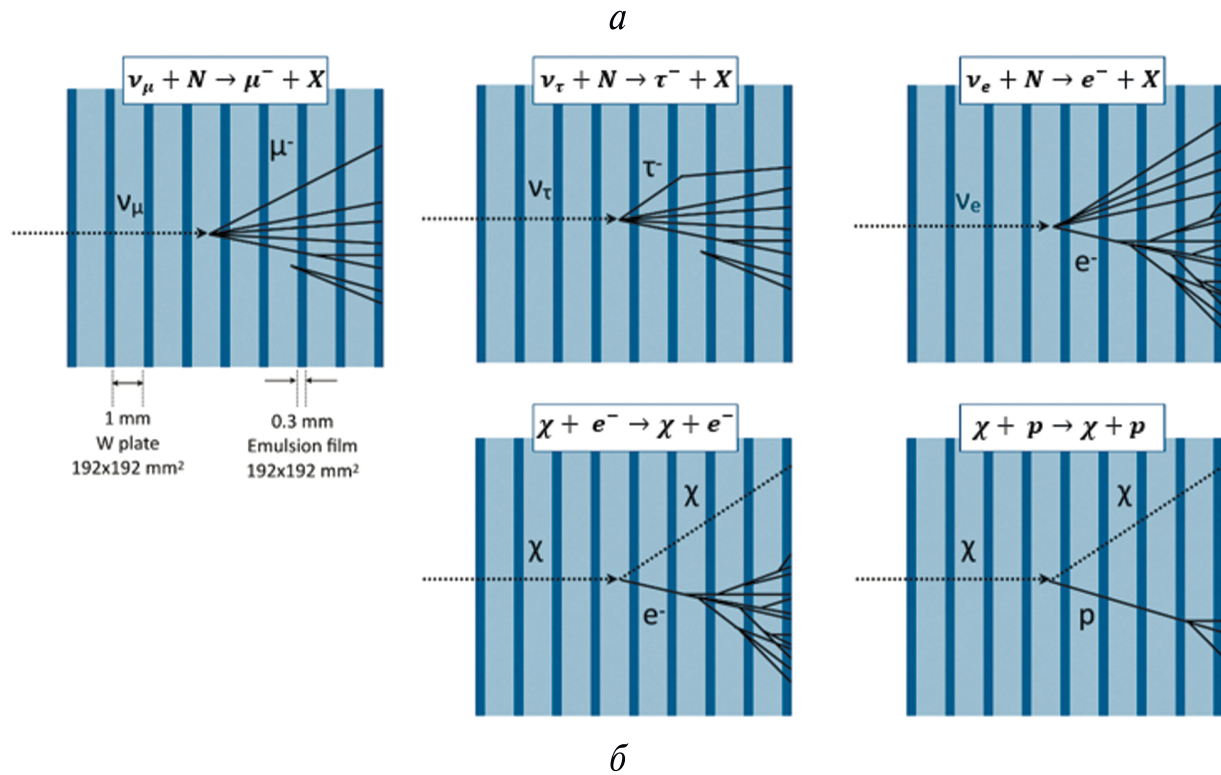


Рис. 3. *a* — События взаимодействий нейтрино разных ароматов и FIPs в эмульсионной мишени (схема); *b* — энергетический спектр нейтрино и антинейтрино, ожидаемый в эксперименте SND@LHC, нормированный на интегральную светимость 250 фбн⁻¹ [11].

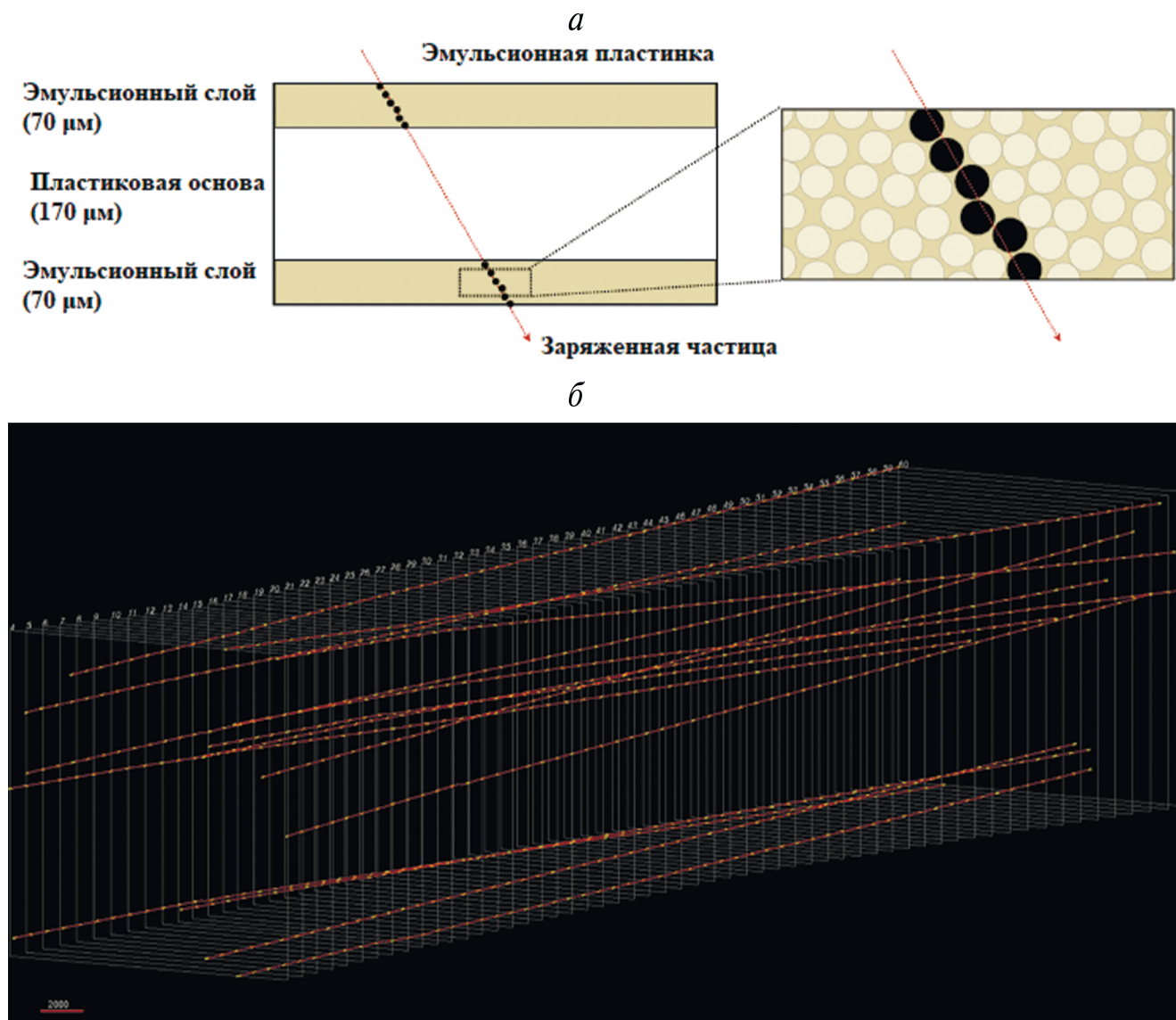


Рис. 4. *а* — Схема образования трека заряженной частицы в одной эмульсионной пластине; *б* — реконструированные треки в эмульсионной мишени, для примера выбраны 15 треков в 60 эмульсионных пластинах (данные эмульсионного сеанса RUN 0) [18].

лит на пластиковую подложку. В процессе онлайн-сканирования производится реконструкция так называемых микротреков, т.е. треков, проходящих через каждый чувствительный слой эмульсионной пластины. Координатная плоскость xy относится к поверхности эмульсионной пластины. Поскольку эмульсионная пластина образована двумя эмульсионными слоями, “сшивку” двух микротреков через пластиковую основу обеспечивает реконструкцию траектории движения частицы в эмульсионной пластине, называемую базовым треком. Реконструкция треков частиц в полном объеме требует продления базовых треков в последовательных пластинах (рис. 4а). Реконструкция треков в эмульсионной мишени выполняется с использованием фильтра Кальмана, опирающегося

на базовые треки, найденные в одиночных эмульсионных пластинах. Пример реконструкции треков представлен на рис. 4б. Сравнение положения и угла каждого базового трека с линейной аппроксимацией в плоскостях xz и yz позволяет оценить разрешение прослеживания треков. Ось z направлена вдоль пучка. В настоящее время отсканировано 60% эмульсий первой экспозиции, осуществляется реконструкция событий.

В результате обработки и анализа данных электронных детекторов, полученных в 2022 г., сотрудничество SND@LHC сообщило об обнаружении восьми событий с ν_μ , испытавших глубоко неупругое взаимодействие по каналу заряженного тока (Charge Current Deep Inelastic Scattering, CC DIS)

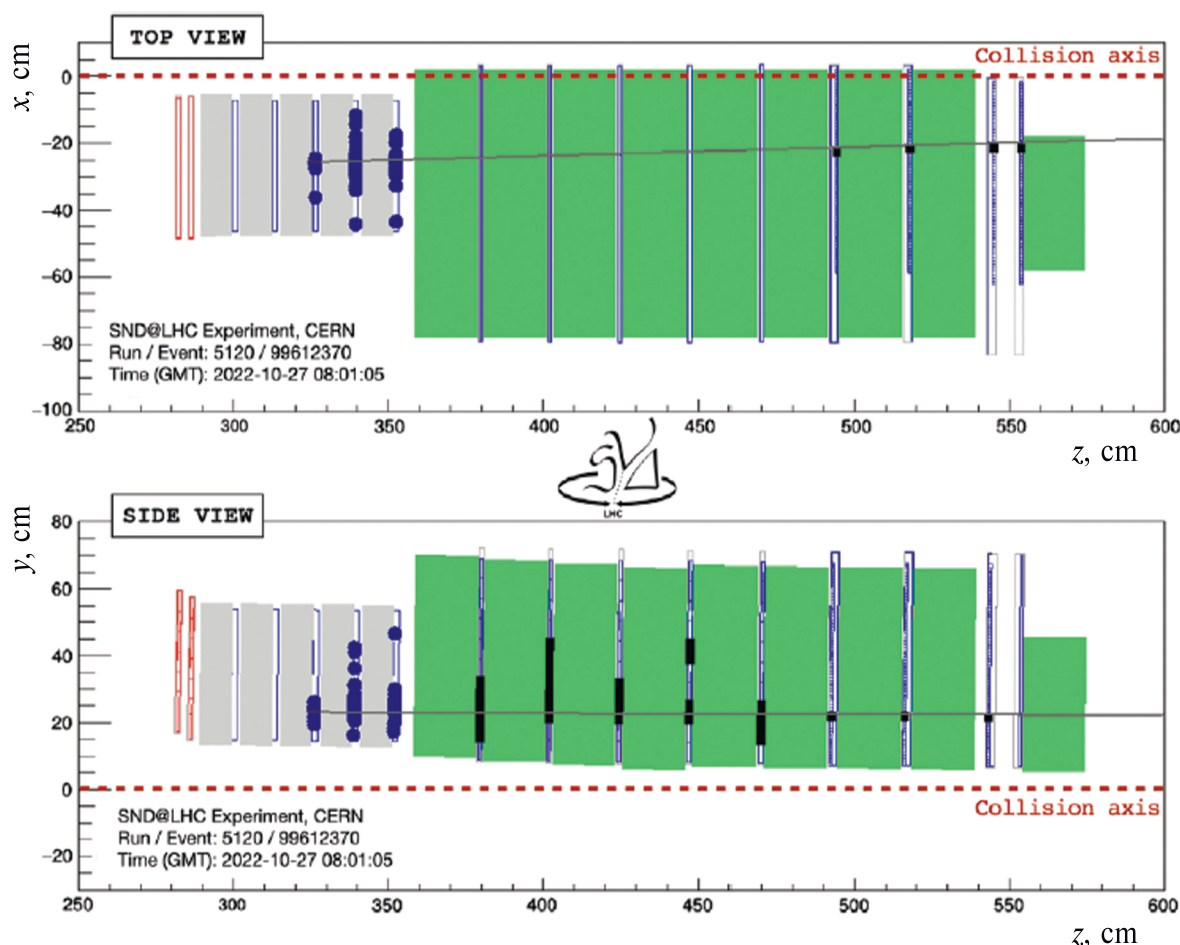


Рис. 5. Реконструкция одного из взаимодействий мюонного нейтрино, зарегистрированного в детекторе SND@LHC [19].

[19]. Превышение сигнала над фоном для зарегистрированных событий составляет семь стандартных отклонений. Этот результат, совместно с результатом эксперимента FASER, сообщившим о наблюдении мюонных нейтрино в диапазоне псевдобыстрот $\eta > 8.5$ [20], демонстрирует эффективность использования компактных детекторов для регистрации ускорительных нейтрино высоких энергий и открывает возможности для их изучения на высокой статистике.

На рис. 5 показана реконструкция одного из зарегистрированных в детекторе взаимодействий мюонного нейтрино.

4. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Недостатком существующей конфигурации детектора можно считать отсутствие магнитного поля, что ограничивает точность измерения энергии нейтрино и не позволяет разделить нейтрино от антинейтрино.

В настоящее время сотрудничество SND@LHC планирует расширить физический потенциал эксперимента путем модернизации детектора для работы на Большом адронном коллайдере в новом режиме более высокой светимости HL-LHC (High-Luminosity

LHC), запланированном после очередной технической реконструкции ускорителя [21]. Предполагается увеличение светимости в 5 раз по сравнению с существующей. Работа в таких условиях потребовала бы слишком частой замены эмульсионной мишени из-за быстрого заполнения пленок, что несовместимо с режимом функционирования ускорителя, поэтому предлагается заменить ядерные эмульсии в мишенном блоке детектора на электронную считывающую систему. В качестве высокоточного вершинного детектора будут использованы кремниевые трекары.

Базовым элементом модифицированного детектора, который будет называться AdvSND (см. рис. 6), станет магнитный спектрометр с железным сердечником, обеспечивающий магнитное поле 1.5 Т. Кроме того, предлагается намагнитить адронный калориметр, что позволит облегчить поиск вершины взаимодействия и улучшить разрешение по импульсу (точность измерения импульса мюона с энергией 1 ТэВ составит $\sim 20\%$).

Новая концепция детектора формирует требования к особенностям его конструкции. Для идентификации взаимодействий электронных нейтрино по каналу заряженного тока необходим электромагнитный

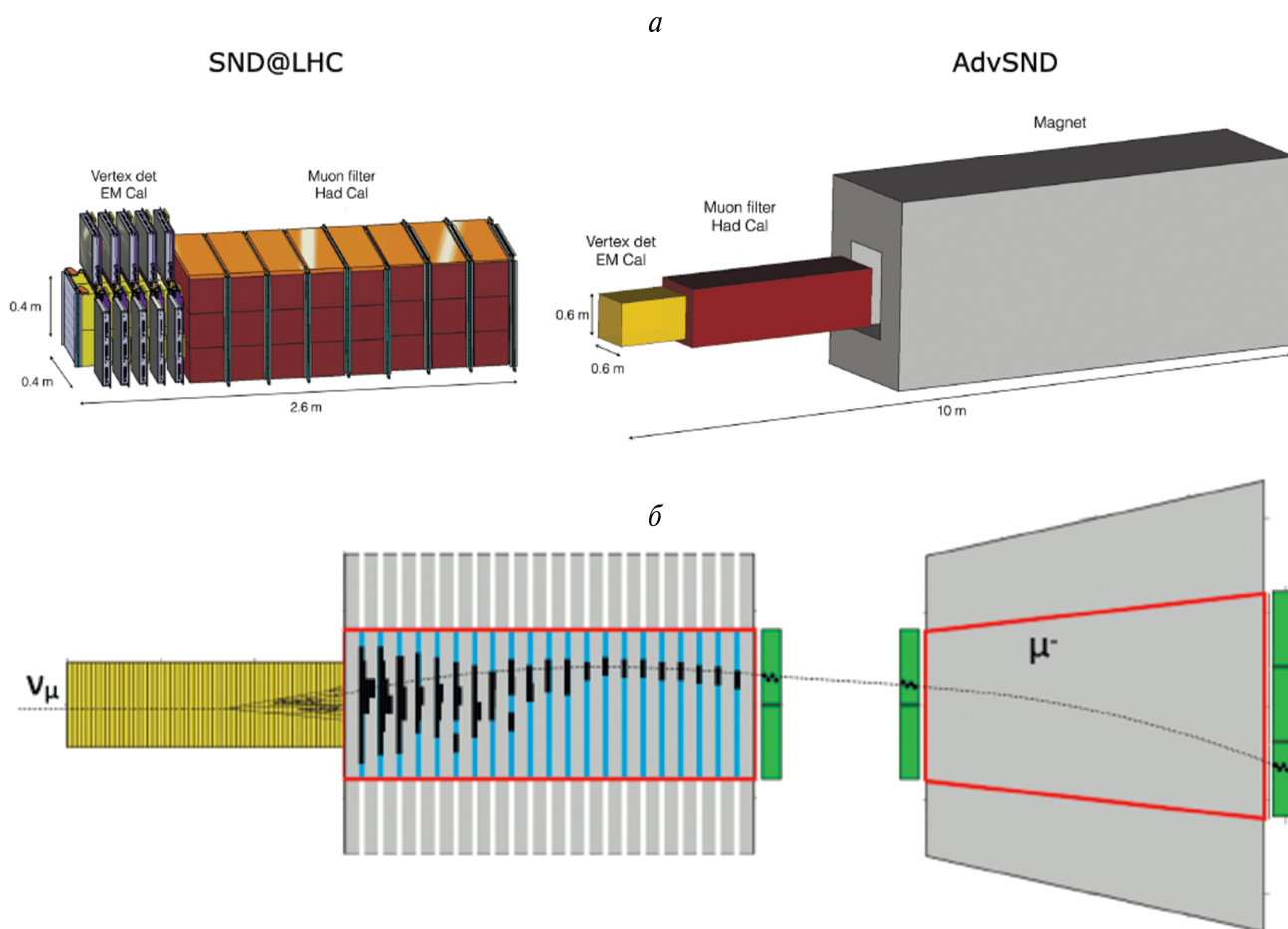


Рис. 6. *а* — Схематическое изображение детектора SND@LHC (слева) и концептуальный дизайн усовершенствованного детектора AdvSND (справа); *б* — предлагаемая базовая схема детектора AdvSND с имитацией ν_μ -взаимодействия. Красными линиями показаны контуры катушек, намагничивающих адронный калориметр и мюонный спектрометр. Зеленым обозначены камеры с дрейфовыми трубками (см. [22]).

калориметр, обеспечивающий достаточное пространственное разрешение для разделения электронов от распада π^0 . Реконструкция образовавшихся электромагнитных ливней позволит оценить энергию взаимодействующего нейтрино. Для идентификации взаимодействий мюонных нейтрино по каналу заряженного тока требуется не менее 10 длин взаимодействия (λ_{int}) материала перед мюонной системой, магнитный спектрометр для измерения импульса мюона и определения его заряда, а также детальная реконструкция адронного ливня для оценки энергии взаимодействующего нейтрино. Для регистрации взаимодействия тау-нейтрино по каналу заряженного тока требуется детектор, способный отделить вершину ν_τ от вершины распада тау-лептона.

Установка магнитного спектрометра потребует технологических изменений параметров туннеля TI18 в области расположения детектора. Рассматривается два варианта модернизации детектора: AdvSND (базовый), включающий магнитный адронный калориметр и магнитный мюонный спектрометр, и

AdvSNDReduced (минимальный) в случае, если не удастся увеличить размеры туннеля для установки магнита. Оба варианта будут иметь одинаковую структуру мишени, но будут различаться концепцией адронного калориметра и мюонной измерительной системы.

Вершинный детектор, он же мишень, будет состоять из кремниевых детекторных плоскостей, чередующихся с вольфрамовыми пластинами. Для кремниевых детекторов планируется использовать детали кремниевого трекера установки CMS, которая будет демонтирована после LHC RUN3. Масса мишени AdvSND будет увеличена настолько, насколько позволит увеличенное пространство туннеля. Согласно оценкам, удвоение ее массы вполне осуществимо.

Положение детектора относительно пучка предлагается изменить таким образом, чтобы добиться как можно большего числа взаимодействий нейтрино (см. рис. 7).

В таком положении относительно пучка детектор AdvSND будет охватывать область псевдобыстрот

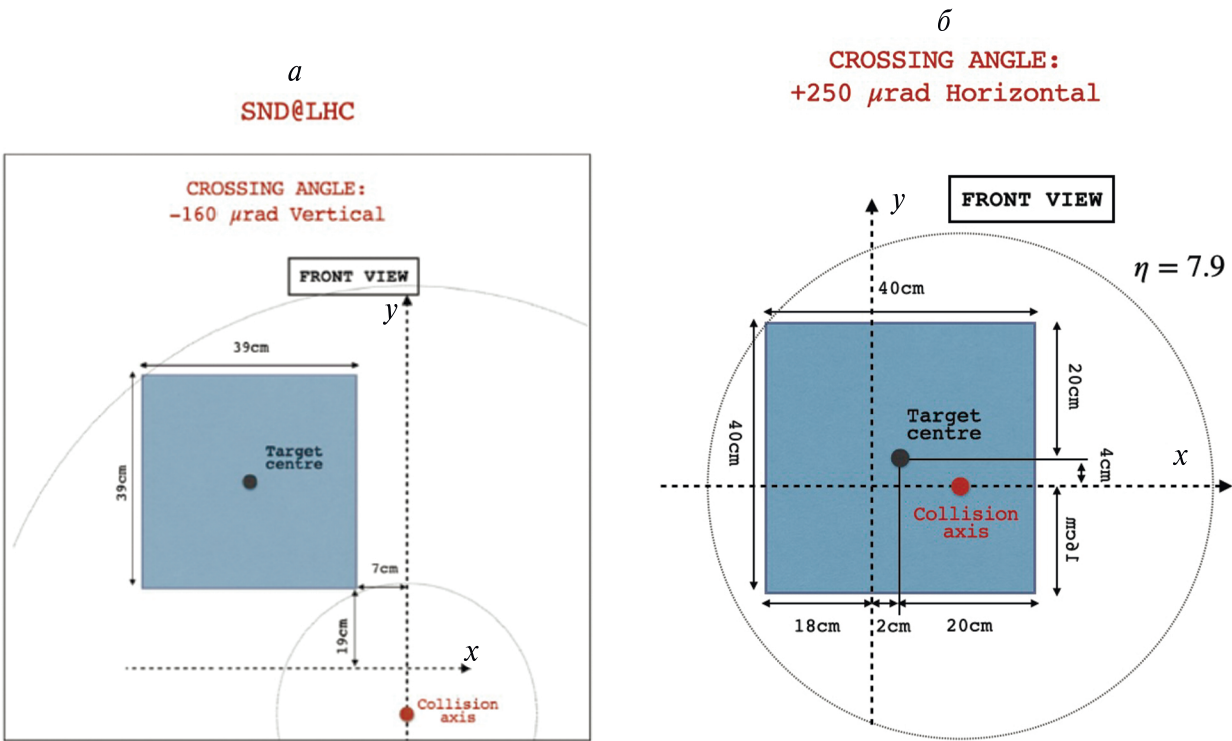


Рис. 7. Положение детектора относительно пучка, вид спереди: *a* — текущее положение SND@LHC; *б* — предлагаемое положение AdvSND.

Таблица 1. Число ожидаемых нейтрино (слева) и нейтринных взаимодействий по каналу заряженного тока (справа) в мишени AdvSND, рассчитанное для интегральной светимости 3000 фбн⁻¹

Аромат нейтрино	Число ожидаемых нейтрино		Число нейтринных взаимодействий по каналу заряженного тока	
	всего	не из π/k	всего	не из π/k
ν_μ	8.6×10^{13}	8.2×10^{12}	1.2×10^5	3.3×10^4
$\bar{\nu}_\mu$	7.0×10^{13}	9.6×10^{12}	4.4×10^4	1.8×10^4
ν_e	1.3×10^{13}	9.1×10^{13}	4.2×10^4	3.6×10^4
$\bar{\nu}_e$	1.3×10^{13}	9.2×10^{13}	1.9×10^4	1.7×10^4
ν_τ	7.3×10^{11}	7.3×10^{11}	2.1×10^5	2.1×10^3
$\bar{\nu}_\tau$	9.4×10^{11}	9.4×10^{11}	1.2×10^3	1.2×10^2
Всего	1.8×10^{14}	3.8×10^{13}	2.3×10^5	1.1×10^5

$\eta > 7.9$, а ожидаемое количество зарегистрированных нейтрино и антинейтрино во время LHC RUN4 (интегральная светимость 3000 фбн⁻¹), определенное с помощью моделирования на базе DPMJET + FLUKA и GENIE [23–25], показано в табл. 1.

На рис. 8 представлены смоделированные энергетические спектры различных типов нейтрино при взаимодействии по каналу заряженного тока в мишени AdvSND, нормированные на светимость 3000 фбн⁻¹.

Использование потенциала HL-LHC с ключевыми усовершенствованиями детектора AdvSND позволит значительно расширить физический потенциал эксперимента как в области физики нейтрино, так и в об-

ласти поиска Новой физики за пределами Стандартной модели. Добавление магнитного спектрометра позволит впервые экспериментально напрямую наблюдать и изучать тау-антинейтрино, а также расширит возможности для открытия новых экзотических явлений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен эксперимент SND@LHC на основе компактного гибридного детектора по поиску нейтрино высоких энергий, возникающих в протолкновениях при энергии $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ на Большом адронном коллайдере. На основе данных электронных детекторов обнаружены восемь

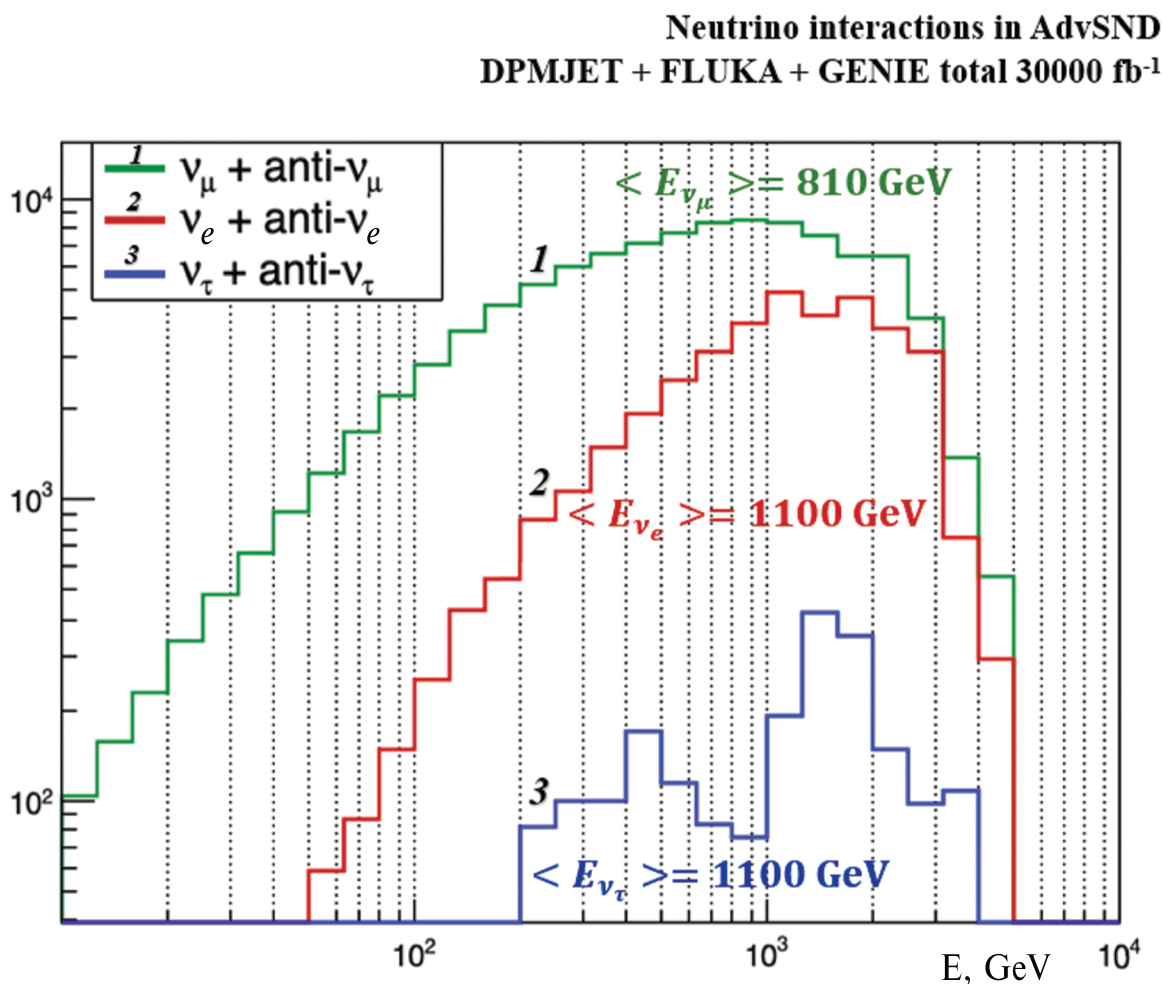


Рис. 8. Энергетические спектры различных типов нейтрино при взаимодействии по каналу заряженного тока в мишени AdvSND, нормированные на светимость 3000 фбн⁻¹, полученные с помощью программ DPMJET + FLUKA и GENIE [23–25]. Указаны средние значения энергий.

событий-кандидатов на взаимодействия мюонных нейтрино с превышением сигнала над фоном семь стандартных отклонений. Этот результат подтверждает эффективность использования компактных детекторов для регистрации ускорительных нейтрино высоких энергий и открывает возможности для их изучения на высокой статистике.

Авторы выражают глубокую благодарность члену 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.

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. C. Ahdida, R. Albanese, A. Alexandrov, M. Andreini, A. Anokhina, A. Bay, P. Bestmann, C. Betancourt, I. Bezshyiko, A. Blanco, M. Bogomilov, K. Bondarenko, W. M. Bonivento, P. Boisseaux-Bourgeois, A. Boyarsky, L. Buonocore, et al., Tech. Rep. No. CERN-LHCC-2021-003, No. LHCC-P-016, CERN, Geneva (2021).
2. M. Bustamante and A. Connolly, Phys. Rev. Lett. **122**, 041101 (2019).
3. M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, O. Abdinov, B. Abeloos, R. Aben, O. S. AbouZeid, N. L. Abraham, H. Abramowicz, H. Abreu, R. Abreu, Y. Abulaiti, B. S. Acharya, L. Adamczyk, D. L. Adams, et al. (ATLAS Collab.), Eur. Phys. J. C **76**, 653 (2016).
4. H. Abreu, C. Antel, A. Ariga, T. Ariga, J. Boyd, F. Cadoux, D. W. Casper, X. Chen, A. Coccaro,

- C. Dozen, P. B. Denton, Y. Favre, J. L. Feng, D. Ferrere, I. Galon, S. Gibson, et al., *Eur. Phys. J. C* **80**, 61 (2020).
5. LHCb Collab., LHCb Tracker Upgrade Technical Design Report, Tech. Rep. No. CERN-LHCC-2014-001, No. LHCb-TDR-015, CERN, Geneva (2014).
6. A. Ariga, T. Ariga, G. De Lellis, A. Ereditato, and K. Niwa, in: *Particle Physics Reference Library*, Vol. 2, Detectors for Particles and Radiation, Ed. by C. W. Fabjan and H. Schopper (Elsevier, New York, 2020), p. 383–438.
7. W. Bai, M. Diwan, M. V. Garzelli, Y. S. Jeong, and M. H. Reno, *J. High Energy Phys.* **2006**, 032 (2020).
8. 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, and Z. Szillasi, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **46**, 115008 (2019).
9. N. Beni, M. Brucoli, V. Cafaro, T. Camporesi, F. Cerutti, G. M. Dallavalle, S. Danzeca, A. De Roeck, A. De Rujula, D. Fasanella, V. Giordano, C. Guandalini, A. Ioannisyian, D. Lazic, A. Margotti, S. Lo Meo, et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **47**, 125004 (2020).
10. L. A. Anchordoqui, A. Ariga, T. Ariga, W. Bai, K. Balazs, B. Batell, J. Boyd, J. Bramante, M. Campanelli, A. Carmona, F. G. Celiberto, G. Chachamis, M. Citron, G. De Lellis, A. De Roeck, H. Dembinski, et al., *Phys. Rept.* **968**, 1 (2022).
11. A. Di Crescenzo and G. Galati, *Symmetry* **15**, 1256 (2023).
12. A. Boyarsky, O. Mikulenko, M. Ovchinnikov, and L. Shchutska, *J. High Energy Phys.* **2022**, 6 (2022).
13. A. Boveia and C. Doglioni, *Rev. Nucl. Part. Sci.* **68**, 1 (2018).
14. A. Alexandrov, A. Buonauro, L. Consiglio, N. D'Ambrosio, G. De Lellis, A. Di Crescenzo, G. Galati, V. Gentile, A. Lauria, M. C. Montesi, V. Tioukov, M. Vladymyrov, and E. Voevodina, *Sci. Rep.* **7**(1), 7310 (2017).
15. A. Alexandrov, G. De Lellis, and V. Tioukov, *Sci. Rep.* **9**(1), 2870 (2019).
16. N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **120**, 211801 (2018).
17. A. Alexandrov, N. Konovalova, N. Okateva, N. Polukhina, N. Starkov, and T. Shchedrina, *Measurement* **187**, 110244 (2022).
18. N. Polukhina, N. Konovalova, and T. Shchedrina, *Physics* **2023**, 499 (2023).
19. R. Albanese et al. (SND@LHC Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **131**, 031802 (2023).
20. H. Abreu et al. (FASER Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **131**, 031801 (2023).
21. SND@LHC Collab., AdvSND@LHC The Advanced Scattering and Neutrino Detector at High Lumi LHC, Letter of Intent, March 3 (2024).
22. CMS Collab., *JINST* **5**, T03015 (2010).
23. S. Roesler et al., in: *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications*, Ed. by A. Kling et al. (Springer, Berlin, Heidelberg, 2001).
24. A. Ferrari et al., FLUKA: A multi-particle transport code (Program version 2005), Tech. Rep. No. CERN-2005-010, SLAC-R-773, INFN-TC-05-11, CERN, INFN (2005).
25. T. T. Bohlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin, A. Fassò, A. Ferrari, P. G. Ortega, A. Mairani, P. R. Sala, G. Smirnov, and V. Vlachoudis, *Nucl. Data Sheets* **120**, 211 (2014).

INVESTIGATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINOS AT THE LARGE HADRON COLLIDER

N. S. Konovalova¹⁾, N. M. Okateva¹⁾, N. G. Polukhina¹⁾, Zh. T. Sadykov¹⁾, N. I. Starkov¹⁾,
E. N. Starkova¹⁾, M. M. Chernyavsky¹⁾, T. V. Shchedrina¹⁾

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

The first neutrinos from the proton-proton collisions at an energy of 13.6 TeV were registered in the pseudorapidity range of $7.2 < \eta < 8.4$ in the SND@LHC experiment at CERN. SND@LHC is an autonomous experiment based on a compact hybrid detector for detecting high-energy neutrinos at the Large Hadron Collider. The detector allows to distinguish the interactions of the neutrinos of all three flavors and to investigate the process of the charmed particles' generation in the pseudorapidity region inaccessible to other experiments at the LHC. The aim of the experiment is also to study the scattering of weakly interacting particles on the electrons and protons of the target.