

К 90-ЛЕТИЮ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН (ФИАН)

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Трековая методика в современной физике атомного ядра и элементарных частиц, астрофизике и нанотехнологиях

С.А. Горбунов, А.Е. Волков, К.И. Жуков, Н.С. Коновалова,
Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, Т.В. Щедрина

Трековые детекторы широко применяются в фундаментальных и прикладных исследованиях на современных ускорителях, при изучении природы частиц космического происхождения, для мюнографии, способствуя пониманию структуры и свойств материи. Преимуществом методики является наглядность результатов, возможность восстановления траекторий, вершин взаимодействия и точек распада частиц с точностью до нескольких микрометров. Специфические особенности различных экспериментов, требующие оригинальных решений при их постановке, обработке и интерпретации данных, обеспечивают мультидисциплинарное развитие тематики. Эволюцию трековой методики, помимо задач экспериментальной физики, определяют проблемы инновационных технологий и создания новых материалов. Эти тенденции можно проследить на примере работы Лаборатории элементарных частиц ФИАН, использующей в течение многих десятков лет в своих экспериментах трековые детекторы различных типов. В обзоре представлены идеи и результаты экспериментальных и модельных исследований мирового уровня, проведённых ранее и проводимых в настоящее время с участием сотрудников лаборатории, а также запланированных на ближайшее будущее.

Ключевые слова: эксперименты на основе трековой методики, моделирование процессов формирования треков, методы обработки и анализа данных трековых детекторов

PACS numbers: 29.40.Gx, 61.85.+p, 95.55.Vj

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.10.039585>

Содержание

1. Введение (826).
 2. Эксперименты на основе трековой методики в лаборатории элементарных частиц (827).
2.1. Эксперименты на ускорителях. 2.2. Трековая методика в астрофизических исследованиях.
 3. Моделирование процессов формирования треков быстрых тяжёлых ионов в твердотельных трековых детекторах (842).
 4. Новейшие методы обработки и анализа данных трековых детекторов (845).
 5. Заключение. Перспективы развития трековой методики в Лаборатории элементарных частиц (849).
- Список литературы (850).

С.А. Горбунов^(a), А.Е. Волков^(b), К.И. Жуков^(c), Н.С. Коновалова^(d),
Н.Г. Полухина^(e), Н.И. Старков^(f), Т.В. Щедрина^(g)
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: ^(a) s.a.gorbunov@mail.ru, ^(b) a.e.volkov@list.ru,
^(c) Konstantin.Zhukov@cern.ch,
^(d) ninakonovalova@yandex.ru, ^(e) polukhinang@lebedev.ru,
^(f) starkovni@lebedev.ru, ^(g) tvshchedrina@gmail.com

Статья поступила 30 сентября 2023 г.,
после доработки 27 октября 2023 г.

1. Введение

Лаборатория элементарных частиц ФИАН (ЛЭЧ) была создана А.И. Алиханяном в 1943 г. для изучения высокоэнергичных частиц космического излучения и их взаимодействий [1]. С момента её создания и по настоящее время сотрудники лаборатории ставят целью своей работы изучение наиболее актуальных проблем современной физики, сочетая при этом исследовательскую деятельность с преподавательской работой и подготовкой новых кадров из выпускников лучших физических вузов страны. Осуществляется тесное взаимодействие экспериментаторов лаборатории с теоретиками, начало которому было положено А.И. Алиханяном, чья дружба с такими выдающимися теоретиками, как Л.Д. Ландау и И.Я. Померанчук, воплотилась в плодотворное научное сотрудничество [2]. Результатом этого сотрудничества стало, в частности, построение Л.Д. Ландау функции распределения по энергии быстрых частиц, прошедших через слой вещества заданной толщины и потерявших энергию в результате ионизационных столкновений [3].

Исследовательская деятельность ЛЭЧ во многом основана на трековой методике, базирующейся на реконструкции треков частиц и вершин их взаимодействий в объёме детектора. В лаборатории были созданы первые крупные камеры Вильсона объёмом до 40 л, а также

первая в стране пропановая пузырьковая камера объёмом 0,75 л. Под руководством А.И. Алиханяна была создана искровая камера нового типа (трековая искровая камера), позволившая определять импульсы заряженных частиц в магнитном поле; эта работа была удостоена Ленинской премии 1970 г. Также сотрудниками А.И. Алиханяна был разработан метод детектирования частиц сверхвысоких энергий на основе переходного излучения в рентгеновской и оптической областях частот [4].

Появление современных ускорителей открыло новый этап в исследованиях элементарных частиц с использованием трековых детекторов. Экспериментаторы ЛЭЧ традиционно сотрудничают с крупнейшими международными исследовательскими центрами, такими как Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН), Немецкий электронный синхротрон ДЭЗИ (Германия), Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми (США), Национальная лаборатория Гран Сассо (Италия), осваивая и создавая высокотехнологичную регистрирующую и измерительную аппаратуру. Эта работа, опыт и знания позволили, в частности, сотрудникам ЛЭЧ стать ключевыми исполнителями эксперимента АТЛАС — одного из четырёх основных экспериментов на Большом адронном коллайдере.

Трековая методика находит своё применение в самом широком диапазоне исследований: от регистрации элементарных частиц до исследования сверхтяжёлых ядер, что предполагает индивидуальный подход к постановке экспериментов, обработке и анализу данных. Одним из основных преимуществ трековой методики является высокое пространственное разрешение и, как следствие, возможность разделять и идентифицировать треки, выходящие из различных вершин. Реконструкция треков и вершин является важнейшей составляющей анализа данных в экспериментах на ускорителях, включающих эксперименты с фиксированной мишенью, эксперименты на лептонных и адронных коллайдерах, а также нейтринные эксперименты, в которых детектор одновременно является мишенью. Интегральные трековые детекторы (ядерная эмульсия, стёкла, слюды, пластики, оливины из метеоритов и др.) накапливают информацию о треках частиц за всё время экспозиции. Эта особенность является существенным преимуществом при малых потоках регистрируемых частиц, однако она приводит к значительным трудностям при обработке и анализе экспериментов с большой плотностью частиц, например, на ускорителях.

Среди всех трековых детекторов, используемых в физике частиц, самым высоким пространственным разрешением обладают ядерно-эмульсионные детекторы [5]. После продолжительного перерыва интерес к ядерным эмульсиям возродился в 1990-х гг. благодаря достижениям в области цифровой обработки данных на высокоскоростном сканирующем оборудовании и развитию производства новых типов эмульсий с разным размером зерна. Разнообразие размеров и конфигураций эмульсионных детекторов дополняется возможностью создания на их основе гибридных систем в сочетании с электронными детекторами для привязки к времени и/или идентификации мюонов [6–8].

Крупным прорывом в эмульсионной методике стало создание так называемой "камеры эмульсионного облака" (Emulsion Cloud Chamber, ECC). Эта конструкция,

представляющая собой многослойное соединение эмульсионных плёнок со слоями пассивного материала (обычно пластика или металла) и расположенная перпендикулярно падающим частицам, представляет собой трековый детектор высокого разрешения (до 1 мкм) с возможностью трёхмерной реконструкции событий. Данный тип детектора был разработан в 1950-х гг. для исследований космического излучения [9]. В частности, с его помощью в эксперименте по изучению космических лучей впервые наблюдался распад очарованных частиц [10], а в эксперименте DONuT было впервые зарегистрировано тау-нейтрино ν_τ [11]. Принцип ECC сочетает в себе два ключевых параметра, необходимых для регистрации частиц с чрезвычайно малым сечением взаимодействия: большую массу и очень высокое пространственное разрешение [12]. На основе методики ECC были разработаны гибридные эксперименты на ускорителях, сочетающие эмульсионные и электронные детекторы, в которых последние используются для двух целей — как триггерный сигнал от события, произошедшего в мишени, и для предварительного определения области возможного события в ECC (см. разделы 2.1.3 и 2.1.4).

Обработка данных интегральных трековых детекторов основана на анализе изображений, получаемых с помощью автоматизированных оптических микроскопов, программное обеспечение которых может быть адаптировано для работы со всеми известными детекторами интегрального типа. Первым автоматизированным сканирующим микроскопом в России стал созданный в ЛЭЧ измерительный комплекс ПАВИКОМ (Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс, раздел 4), на котором с момента его создания в конце 1990-х гг. успешно осуществляется обработка экспериментального материала крупных международных и российских проектов.

Данный обзор посвящён описанию важнейших экспериментальных и модельных исследований с участием сотрудников лаборатории.

В разделе 2 обзора дано краткое описание наиболее значимых международных и отечественных экспериментов с участием сотрудников ЛЭЧ, основанных на трековой методике. Раздел 3 посвящён моделям формирования травимых треков быстрых тяжёлых ионов в твердотельных трековых детекторах. В разделе 4 дано описание автоматизированного сканирующего комплекса ПАВИКОМ, на котором на основе современных технологий осуществляется обработка данных экспериментов ЛЭЧ с использованием трековых детекторов.

2. Эксперименты на основе трековой методики в лаборатории элементарных частиц

2.1. Эксперименты на ускорителях

2.1.1. Детектор переходного излучения для эксперимента АТЛАС на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. 5 июня 2022 г., спустя три года технического обслуживания и модернизации, был перезапущен Большой адронный коллайдер (БАК) с обновлённой энергией 13,6 ТэВ в системе центра масс протонов, сталкивающихся на встречных пучках с частотой 40 МГц. Это событие, так называемый "Сеанс 3" (RUN3), стало началом сбора экспериментальных данных для Новой физики.

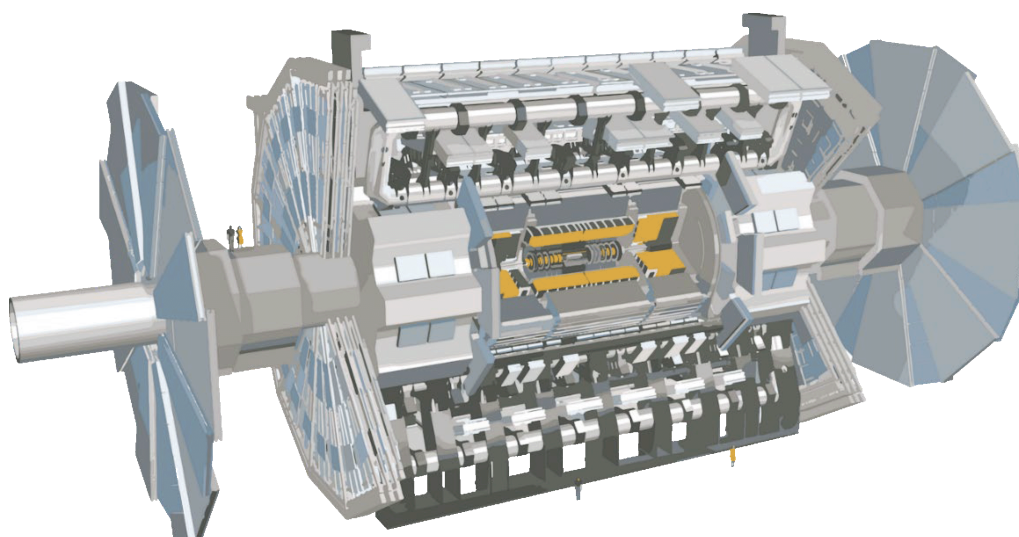


Рис. 1. 3D модель установки АТЛАС на Большом адронном коллайдере.

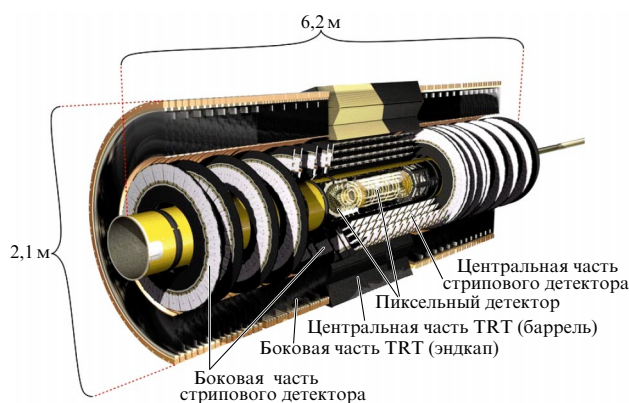


Рис. 2. Схема внутреннего детектора эксперимента АТЛАС.

Эксперимент АТЛАС (ATLAS, от англ. A Toroidal LHC ApparatuS) [13] является одним из четырёх основных экспериментов на БАК и предназначен для поиска сверхтяжёлых элементарных частиц, в том числе за рамками Стандартной модели (СМ). Одноимённый детектор размером 2×40 м, расположенный под землей на глубине около 100 м, представляет собой цилиндрическую конструкцию из различных регистрирующих подсистем, внутренний радиус которой находится в нескольких сантиметрах от точки взаимодействия сталкивающихся протонов. Внешний вид установки АТЛАС показан на рис. 1.

В центре установки расположен внутренний детектор диаметром 2,1 м и длиной более 6 м, находящийся в магнитном поле величиной 2 Тл. Детектор состоит из трёх систем датчиков (рис. 2) — пиксельного детектора (Pixel Detector), полупроводникового микрострипового детектора SCT (SemiConductor Tracker) и трекового детектора переходного излучения TRT (Transition Radiation Tracker) — и предназначен для идентификации заряженных частиц и восстановления их траекторий от вершины взаимодействия до калориметра. Под действием магнитного поля траектории заряженных частиц искривляются, что позволяет с высокой точностью определять их заряд и импульс.

Образующие системы включают детекторы двух типов: кремниевые, на основе кремниевых чипов (пиксельный и стриповый детекторы), и газовые, на основе дрейфовых трубок (детектор переходного излучения). Детекторы расположены таким образом, чтобы частицы пересекали их преимущественно перпендикулярно плоскости чипа или оси трубки. Кремниевая часть детектора помещена в криостат для снижения собственных шумов, который отделён от детектора переходного излучения TRT, работающего при нормальной температуре. Система кремниевых детекторов SCT даёт возможность получить шесть координат трека, ещё 30 координат определяются с помощью системы детекторов переходного излучения TRT. Точность восстановления трека во внутреннем детекторе составляет 150 мкм.

TRT является наиболее удалённым от оси пучка компонентом внутреннего детектора и представляет собой комбинацию трекового детектора и детектора переходного излучения, сочетая в себе возможность восстановления треков с возможностью идентификации электронов в потоке образовавшихся частиц [14]. Детектор TRT состоит из трёх частей: центральной (баррель) и двух торцевых (эндкап). В центральной части расположены заполненные газовой смесью дрейфовые трубки (строу, от англ. straw — соломинка) диаметром 4 мм и длиной 144 см, направленные вдоль оси пучка. Анодная нить каждой трубки разделена посередине стеклянным изолятором, что позволяет снимать сигнал с каждой половины строу независимо с двух концов, удваивая тем самым количество каналов информации; в результате баррельная часть содержит 105088 каналов информации. Напряжение подаётся на катод (трубку), что позволяет уменьшить количество каналов высоковольтного питания в два раза, а также упрощает электрическую схему питания при съёме информации с анода. Торцевые части детектора имеют форму колёс с радиально расположенными трубками длиной 37 см. При прохождении заряженной частицы газ в строу ионизируется, образуя электрический импульс, что позволяет определить те строу, через которые прошла траектория частицы.

Кроме восстановления трека заряженной частицы, детектор TRT способен идентифицировать электроны

на адронном фоне благодаря эффекту переходного излучения. Для этой цели в TRT установлен радиатор, который представляет собой заполняющую пространство между трубками стопку полипропиленовых плёнок (в торцевой части детектора) или волокон (в его центральной части) с диэлектрической проницаемостью, отличной от таковой для окружающей среды. Конструкция радиатора обеспечивает множественные пересечения частицей границ раздела сред с разными значениями диэлектрической проницаемости. При прохождении заряженной частицы на границе материалов возникает переходное излучение, создающее дополнительное энерговыделение, которое для электронов формирует сигналы большей амплитуды, что позволяет проводить их идентификацию. Таким образом, считывающая электроника имеет два порога срабатывания: низкий, для регистрации координаты частицы, и высокий, для её идентификации. Сигнал в строу от кванта переходного излучения, возникающего при прохождении радиатора электроном, превышает верхний порог дискриминации.

Переходное излучение было предсказано сотрудниками ФИАН академиками В.Л. Гинзбургом и И.М. Франком [15] и экспериментально обнаружено А.И. Алиханьяном [4]. С конца 1970-х гг. группа ЛЭЧ ФИАН (рук. А.П. Шмелева) совместно с коллегами из МИФИ (рук. Б.А. Долгошеин) начали заниматься детекторами переходного излучения. Группа работала с прототипами детекторов на тестовых пучках и принимала участие в международном эксперименте NA34 Helios (ЦЕРН 1984–1989 гг.) с детектором переходного излучения для идентификации электронов на уровне быстрого триггера [16]. Опыт группы позволил присоединиться к разработке детекторов для нового эксперимента на Большом адронном коллайдере, где было предложено использовать часть трека для идентификации электронов. В результате сотрудники ЛЭЧ начали работу по созданию и обслуживанию детектора TRT в составе коллаборации ATLAS, участвуя в сборке прототипов трека и работе в сеансах на тестовых пучках ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron). В частности, в рамках сборки торцевых колёс детектора TRT проводилась установка анодных нитей во все 150 тыс. строу. Перед сборкой детектора каждое из 28 колёс проходило процедуру валидации, включающую электрические тесты (выявление высоковольтных утечек и пробоев), тесты электроники и работу с газом (поиск возможных утечек и продув). После валидации колёса детектора собирались в стопки по 14 штук, формируя так называемые эндкапы А и С (по названиям сторон шахты эксперимента ATLAS), располагающиеся с торцов центральной части детектора.

При изготовлении детектора были разработаны сложнейшие устройства, обеспечивающие его работоспособность, в частности, большое количество дрейфовых трубок, создание которых потребовало разработки уникальной системы высоковольтного питания. В ходе тестирования прототипов детектора были сформулированы технические требования к высоковольтным источникам. Поскольку найти подходящий серийный образец промышленного производства не удалось, необходимая система была создана в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) под контролем и при непосредственном участии сотрудников ЛЭЧ [17]. Система состоит из 2000 каналов, каждый из которых обеспечивает питание 192 строу (напряжение 1,5 кВ с точностью

0,1 %) и имеет защиту от пробоев. При электрическом пробое внутри строу поверхность трубки может быть повреждена, в результате чего возникает опасность утечки заполняющего её газа через образовавшееся отверстие. В этом случае необходимо своевременно отключить электропитание. Система защиты от пробоев оценивает интегральный ток пробоя в течение 40 мс, и, если пробой не прекращается, то высоковольтное питание отключается. За 10 лет работы система защиты от пробоев продемонстрировала свою высокую надёжность, не требуя серьёзного вмешательства, кроме мелкого ремонта отдельных каналов.

Рабочим газом детектора TRT является смесь $\text{Xe} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ в пропорции 70 %–27 %–3 %. Основным компонентом Xe обеспечивает эффективное поглощение γ -квантов переходного излучения. Первоначально вместо кислорода в качестве стабилизирующей добавки использовался газ тетрафторметан CF_4 , однако выяснилось, что он разрушает стеклянные изоляторы на проводочках баррельной части, вследствие чего от него пришлось отказаться. Поскольку форма сигнала, скорость дрейфа и газовое усиление напрямую зависят от чистоты газовой смеси, газовая система TRT включает активную регулировку состава газа, обеспечивая стабильность работы детектора. Ввиду высокой стоимости Xe система действует в режиме циркуляции. Большой опыт работы с газовыми системами позволил сотрудникам ЛЭЧ внести существенный вклад в её разработку, настройку и последующее обслуживание.

Важнейшим элементом любого работающего эксперимента, кроме надёжного оборудования, является эффективное программное обеспечение, при необходимости максимально быстро модернизируемое разработчиками (например, при изменении параметров детектирующей аппаратуры). Основной задачей программного обеспечения для внутреннего детектора является реконструкция треков заряженных частиц, которые создают сигналы в образующих его основных компонентах, пиксельных и стриповых кремниевых счётчиках и детекторе переходного излучения.

Сотрудники ЛЭЧ внесли ключевой вклад в разработку и поддержание программы реконструкции треков, которая используется в течение уже почти 10 лет и обеспечивает стабильную, качественную и быструю реконструкцию событий. В настоящее время ведётся работа по оптимизации программы реконструкции треков для новой версии геометрии внутреннего детектора, которую планируется использовать во время следующей фазы работы ускорителя БАК, которая начнётся в 2026 г. На этом этапе работы БАК планируется увеличить светимость до $7,5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что приблизительно соответствует 200 протон-протонным столкновениям в каждом взаимодействии сталкивающихся пучков. Кроме того, увеличится область быстрот исследуемых частиц с 2,6 до 4. В этой модификации эксперимента множественность рождаемых частиц приблизительно в шесть раз превысит ту, которая наблюдается в RUN3. Эффективная работа в новых условиях потребует создания обновлённого внутреннего детектора и соответствующего ему программного обеспечения. Новая версия программы поиска и реконструкции треков уже прошла апробацию при оптимизации новых кремниевых стриповых и пиксельных детекторов (проект ATLAS ITk [18]), которые должны прийти на смену действующим в ATLAS.

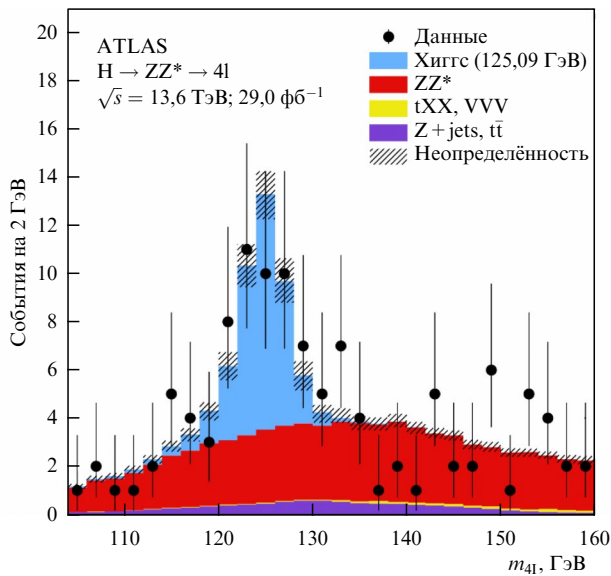


Рис. 3. Пик массы бозона Хиггса от распада на четыре лептона (голубой) на фоне других подавленных событий [19].

Одной из приоритетных задач физической программы Большого адронного коллайдера является изучение бозона Хиггса, хронологически последней частицы СМ. В процессе поиска рассматривались следующие вероятные каналы распада бозона Хиггса:

- $pp \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$,
- $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ ($l = e, \mu$),
- $pp \rightarrow qqH \rightarrow qq\tau^+\tau^-$,
- $pp \rightarrow H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu l\nu, l\nu qq$
- $pp \rightarrow t\bar{t}H \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}$,
- $pp \rightarrow t\bar{t}H \rightarrow t\bar{t}W^+W^-$,
- $pp \rightarrow ZH \rightarrow l+l-W^+W^-$.

В каждом из этих каналов анализировалась информация о треках заряженных частиц, полученная с помощью данных внутреннего детектора, причём в канале распада с образованием четырёх лептонов использовались результаты идентификации электронов в детекторе TRT. Этот канал распада использовался в АТЛАС для определения массы бозона Хиггса в 2012 г. [19]. На рисунке 3 показана гистограмма с пиком массы от бозона Хиггса в области 125,09 ГэВ.

Сотрудники лаборатории принимают участие в анализе экспериментальных данных, полученных на установке АТЛАС. В частности, осуществляется исследование распада $W \rightarrow J/\psi + D_s$, которое позволит уточнить массу W -бозона или получить новое ограничение по его массе. Решаются актуальные задачи поиска Новой физики за пределами СМ. Известно, что в СМ рассматривается так называемая лептонная универсальность, когда взаимодействие лептонов посредством калибровочных бозонов является инвариантным относительно аромата первых. Процессы изменения аромата с нейтральным током (Flavor-Changing Neutral Current, FCNC) обеспечивают идеальные условия для проверки лептонной универсальности. СМ запрещает FCNC на уровне древесных фейнмановских диаграмм и допускает только амплитуды, включающие электрослабые петлевые ("пингвинные" и прямоугольные) диаграммы Фейнмана. Такие переходы редки и чувствительны к существованию новых частиц. Присутствие таких частиц может привести к зна-

чительному расхождению скорости конкретных распадов с предсказаниями СМ или изменению углового распределения частиц распада в конечном состоянии. Таким образом, обнаружение такого рода эффектов может стать косвенным доказательством существования новых частиц в том случае, если массы новых частиц являются недостижимыми для БАК.

Группа сотрудников ЛЭЧ продолжает активно участвовать в эксперименте АТЛАС, обеспечивая стабильную работу детектора TRT. После окончания сеанса RUN3 Большого адронного коллайдера в 2026 г. начнётся разборка существующего внутреннего детектора, на место которого будет установлен новый трекер, полностью основанный на кремниевых детекторах, способных работать в условиях больших нагрузок. Этот этап работы коллайдера будет носить название High-Lumi (в переводе с англ. — высокая светимость). ФИАН планирует принять участие в этой новой фазе эксперимента на основе накопленного большого опыта в области создания детекторов заряженных частиц и обработки полученных данных.

2.1.2. Эксперимент EMU-15. Эксперименты по физике элементарных частиц занимают значительное место в исследованиях ЛЭЧ. Один из таких экспериментов, EMU-15, был проведён в ЦЕРН в 1996 г. на пучке ионов свинца с энергией 32 ТэВ на ядро (158 ГэВ/нуклон), полученном на ускорителе SPS [20, 21]. Коллаборация EMU-15 состояла только из российских участников и в этом отношении была уникальной для ЦЕРН. Целью исследований было изучение коллективных эффектов и особенностей разлёта вторичных частиц в центральных столкновениях ускоренных ядер свинца с ядрами свинцовой мишени. Критерием отбора центральных событий служила большая множественность вторичных заряженных частиц и отсутствие фрагментов с $Z \geq 2$. На основе полученных данных проводились исследования свойств ядерной материи при сверхвысоких плотностях и температурах, в частности, анализ возможных проявлений такого состояния вещества, как кварк-глюонная плазма [22].

За время эксперимента было поочередно облучено 16 эмульсионных камер. Каждая камера представляла собой цилиндр длиной 26 мм и 95 мм в диаметре и содержала тонкую (400 мкм) свинцовую мишень и 38 слоёв двусторонней ядерной эмульсии, первый из которых располагался непосредственно перед мишенью, а остальные — за ней (рис. 4).

Ось цилиндрической камеры была направлена вдоль пучка; во время облучения камера была помещена в поперечное магнитное поле напряжённостью 2 Тл. Такая постановка эксперимента позволила определять три компонента импульсов и знаки зарядов вторичных частиц.

Общее количество ионов, прошедших через камеру за один сеанс облучения, составляло $\sim 10^4$ частиц. В каждой камере было найдено около 10 центральных Pb–Pb взаимодействий с множественностью более 10^3 вторичных заряженных частиц. Обработка событий столь высокой множественности, предполагавшая проведение миллионов измерений координат треков в ядерной эмульсии, потребовала создания автоматизированной аппаратуры для многократного ускорения процесса обработки. Специально для обработки дан-

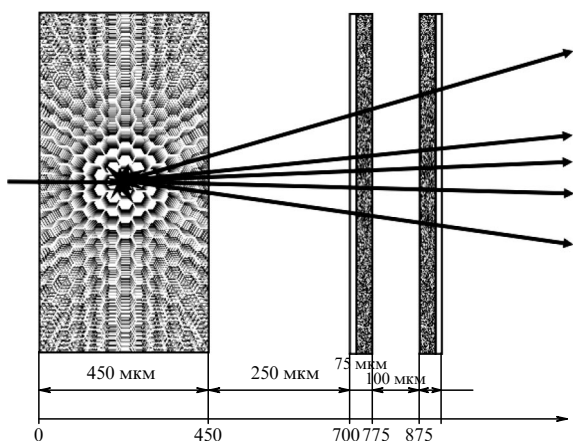


Рис. 4. Схема регистрации продуктов взаимодействия в эмульсионной камере. На схеме показана свинцовая мишень и два из 37 расположенных за ней эмульсионных слоёв.

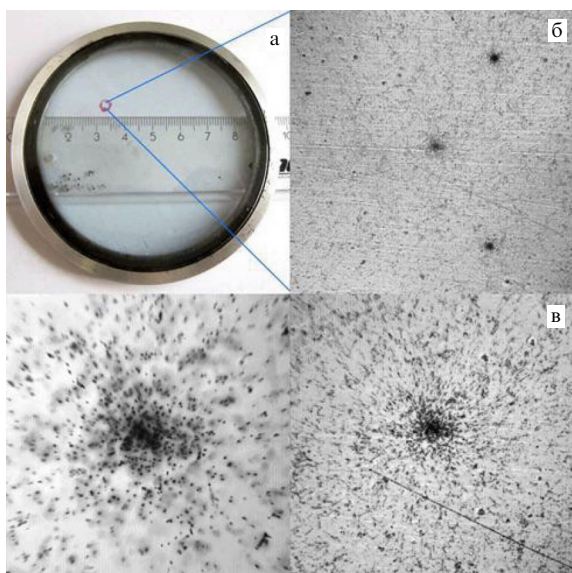


Рис. 5. (а) Эмульсионная пластина эксперимента EMU-15. (б) Центральное поле зрения при увеличении объектива $8\times$ (поле зрения 820×820 мкм). В центре следы ещё не успели разойтись и сконцентрированы очень плотно, что делает центральную область наиболее тёмной. На изображении видны следы от не взаимодействовавших ядер свинца. (в) То же поле зрения при увеличении $20\times$ (справа, поле зрения 330×330 мкм) и $60\times$ (слева, поле зрения 115×115 мкм).

ных эксперимента EMU-15 в ЛЭЧ был создан полностью автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ (раздел 4), сочетавший оптическую установку на основе микроскопа МПЭ-11 (ЛОМО) с быстрой CMOS-камерой и автоматизированным просмотрным столом, управляемым с помощью компьютера через контроллер [23]. Работа на ПАВИКОМ потребовала создания программного обеспечения для управления передвижением стола микроскопа, получения и анализа изображений и восстановления геометрической картины разлёта вторичных заряженных частиц.

Изображения следов частиц на выходе видеокамеры образованы группами пиксельных кластеров разной степени потемнения и выглядят как скопления зёрен на

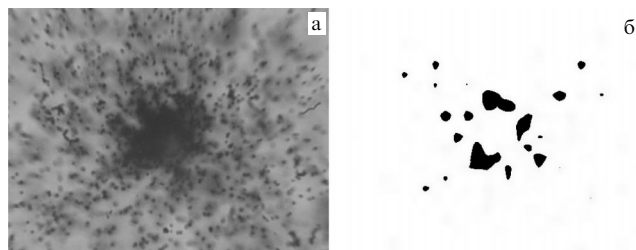


Рис. 6. (а) Событие 5c15e, возникшее при центральном Pb-Pb взаимодействии в ядерной эмульсии, увеличение $90\times$; (б) мишенная диаграмма события 5c15e после четырёх итераций вейвлет-преобразования [26]. Центральная часть взаимодействия исключена из анализа из-за неразличимости частиц.

сером фоне (рис. 5). Задача восстановления трека по заданному набору кластеров решалась методом наименьших квадратов.

Для построения псевдобыстротного распределения вторичных заряженных частиц "сшивались" треки в соседних слоях эмульсии, и восстанавливалась траектория каждой частицы, проходящей через слои ядерной эмульсии после взаимодействия. Для определения псевдобыстрот образовавшихся частиц была проведена итерационная процедура определения оси события; восстановленная ось события принималась за направление движения ядра свинца, вызвавшего взаимодействие.

Анализ характеристик образовавшихся частиц в фазовом пространстве, позволяющий сделать заключение о динамике процесса, включал построение псевдобыстротного распределения вторичных частиц и последующий вейвлет-анализ их распределения [24]. Вейвлет-анализ позволяет выявить явления кластеризации в процессах множественного рождения, выбирая наиболее значительные флуктуации, превышающие статистическую составляющую [25]. Для анализа характеристик взаимодействия релятивистских ядер в эксперименте EMU-15 вейвлет-анализ был применён впервые в физике элементарных частиц и физике высоких энергий.

На рисунке 6а показана центральная часть события 5c15e в ядерной эмульсии (множественность заряженных частиц около 1500 частиц) и его мишенная диаграмма после четырёх итераций вейвлет-преобразования (рис. 6б), на которой чётко видна анизотропия корреляций по азимутальному углу в виде характерного кольцевого расположения некоторой подсистемы частиц в мишенной плоскости. Механизм возникновения наблюдаемых кольцевых структур может быть объяснён аналогом черенковского излучения, возникающего при движении объекта в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения возмущения в этой среде (глюоны как аналог фотонов).

Наиболее значимым признаком существования кольцевых структур является присутствие двух пиков в псевдобыстротном распределении вторичных частиц. Псевдобыстротное распределение частиц в событии 5c15e имеет два пика (рис. 7), которые соответствуют двум конусам разлёта частиц (вперёд и назад в системе центра масс). Обнаружение подобных структур представляет значительный интерес, поскольку они могут свидетельствовать о проявлении в сильных взаимодействиях механизма, связанного с глюонным аналогом черенковского излучения фотонов [27].

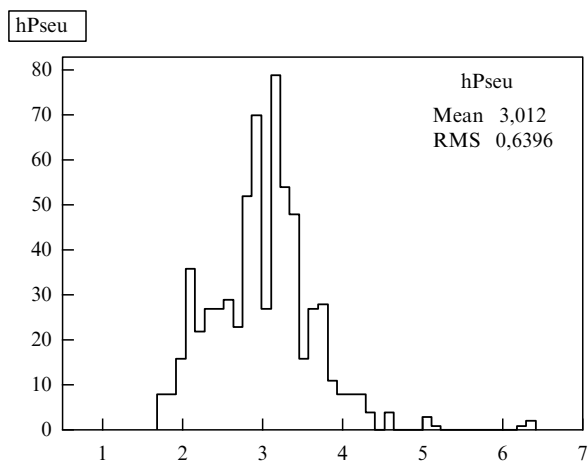


Рис. 7. Псевдобыстротное распределение вторичных заряженных частиц события $5e15e$ [26].

2.1.3. Эксперимент OPERA. Крупнейшим ускорительным экспериментом по количеству использованной ядерной эмульсии, в котором сотрудники ЛЭЧ принимали активное и полноправное участие, стал эксперимент OPERA по поиску нейтринных осцилляций, который проводился с 2008 по 2012 гг. [12]. OPERA — первый эксперимент по прямой регистрации появления тау-нейтрино ν_τ в пучке мюонных нейтрино ν_μ (первый эксперимент "на появление"). Название эксперимента является аббревиатурой от Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus (поиск осцилляций нейтрино с помощью эмульсионного детектора).

Детектор эксперимента OPERA располагался в подземной лаборатории LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Италия) на глубине около 1400 м на расстоянии 730 км от источника пучка мюонных нейтрино со средней энергией 17 ГэВ в ЦЕРН (рис. 8).

Тау-нейтрино регистрировались путём обнаружения τ -лептона, образующегося при взаимодействии ν_τ в детекторе OPERA. Критерием отбора событий служило отсутствие мюона в конечном состоянии. Эксперимент проводился в условиях низкого фона с отношением сигнал/шум порядка 10.

В эксперименте OPERA нейтрино взаимодействовали в мишени большой массы, изготовленной из свинцовых пластин, прослоенных плёнками ядерной эмульсии, т.е. в высокоточном трекинг-устройстве, собранном по принципу ЕСС. В эксперименте OPERA детектор (рис. 9а) массой около $1,25 \times 10^3$ т (из которой примерно 100 т приходилось на ядерную эмульсию) и размером $20 \times 10 \times 10$ м обеспечивал большую статистику, необходимую для регистрации ν_τ , с сечением взаимодействия 10^{-37} см²/нуклон при энергиях около 20 ГэВ. Детектор представлял собой гибридное устройство из двух идентичных супермодулей, включавших мишень и мюонный спектрометр. Каждая мишень состояла из 31 стенки, содержащей 2920 блоков (кирпичей), собранных по принципу ЕСС-камеры, чередующихся с горизонтальными и вертикальными плоскостями сцинтилляторов ТТ (Target Tracker). ТТ использовались для целеуказания по отбору кирпичей, в которых могло произойти взаимодействие нейтрино. Каждый кирпич массой 8,3 кг состоял из 57 эмульсионных плёнок, чередующихся с 56 свинцовыми пластинами толщиной 1 мм и площадью $12,7 \times 10,2$ см. Толщина одного кирпича соответствовала примерно десяти каскадным единицам (к.е.), что обеспечивало развитие электромагнитного ливня в пределах кирпича. Структура мишени позволяла в случае необходимости извлечь любой кирпич из мишени. К задней стенке кирпича был прикреплён светонепроницаемый пакет с двумя эмульсионными плёнками CS (Changeable Sheets). Использование дублетов CS позволяло выполнить проверку факта взаимодействия нейтрино в конкретном кирпиче. Правильность выбора кирпича подтверждалась, если по меньшей мере один трек, совместимый с реконструированными в электронных детекторах, обнаруживался в плёнках CS. Эффективность регистрации при такой процедуре выбора наиболее вероятного или, в случае необходимости, двух наиболее вероятных кирпичей составила 77%. В случае, когда обрабатывалось от трёх до четырёх кирпичей на событие, эффективность анализа достигала 83%.

Общая площадь смонтированных в мишенных модулях эмульсионных плёнок составила 110000 м², а свинцовых пластин — 105000 м². За всё время эксперимента в подземной лаборатории LNGS методом роботизированной сборки было изготовлено около 150000 кирпичей с



Рис. 8. Схема прохождения пучка нейтрино от ЦЕРН до LNGS.

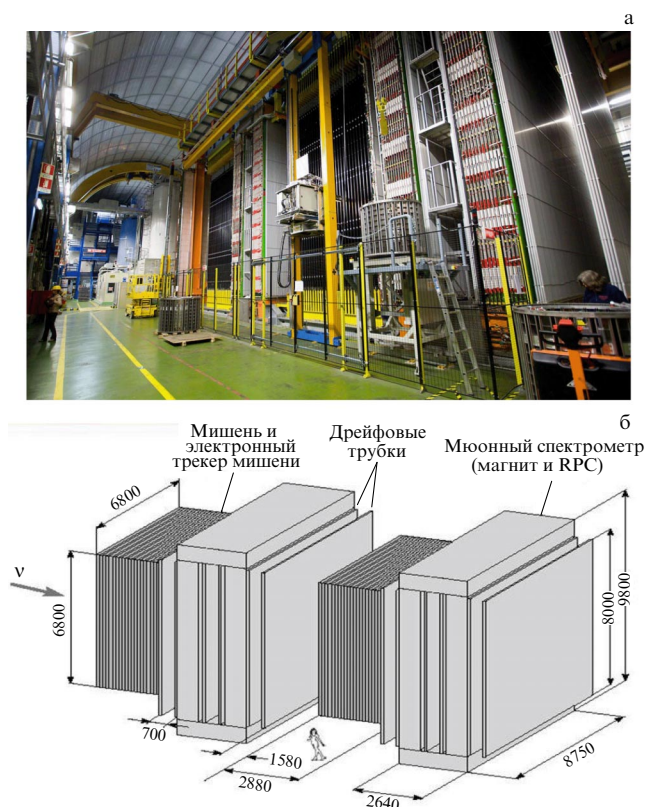


Рис. 9. Детектор OPERA в подземной лаборатории LNGS: (а) общий вид детектора; (б) схема детектора. Размеры указаны в см.

использованием более девяти миллионов эмульсионных плёнок.

За каждым из двух мишенных супермодулей был расположен магнитный мюонный спектрометр. Сердечник каждого магнита состоял из 12 пластин железа толщиной 50 мм, перемежавшихся с газовыми детекторами RPC (Resistive Plate Chambers) и дрейфовыми трубками высокого разрешения (рис. 9б).

Взаимодействия нейтрино регистрировались в ядерных эмульсиях с субмикронным пространственным разрешением. Принцип эксперимента можно сформулировать следующим образом. Первоначально продукты взаимодействия нейтрино регистрировались сцинтилляторами ТТ, расположенными за каждой стеной мишени (рис. 10). Реконструкция "оси ливня" или регистрация трека проникающей частицы (например, мюона) позволяла идентифицировать кирпич, в котором могло произойти взаимодействие. Этот кирпич извлекался из стены, прикрепленный дублет эмульсионных плёнок CS снимался и проявлялся, в то время как кирпич, всё ещё упакованный, помещался в подземное хранилище в ожидании ответа по результатам сканирования сменных слоёв. Кирпичи, ошибочно идентифицированные сцинтилляционными трекерами как содержащие взаимодействие, не разбирались, а возвращались в мишень с новым пакетом CS, что позволяло избежать ненужной обработки и сканирования неправильно идентифицированных кирпичей. Таким образом, дублиеты CS выполняли в эксперименте две важнейшие функции — подтверждение того, что кирпич содержит нейтринное взаимодействие и регистрацию треков заряженных частиц из этого взаимодействия для обратного сканирования ECC (см. ниже).

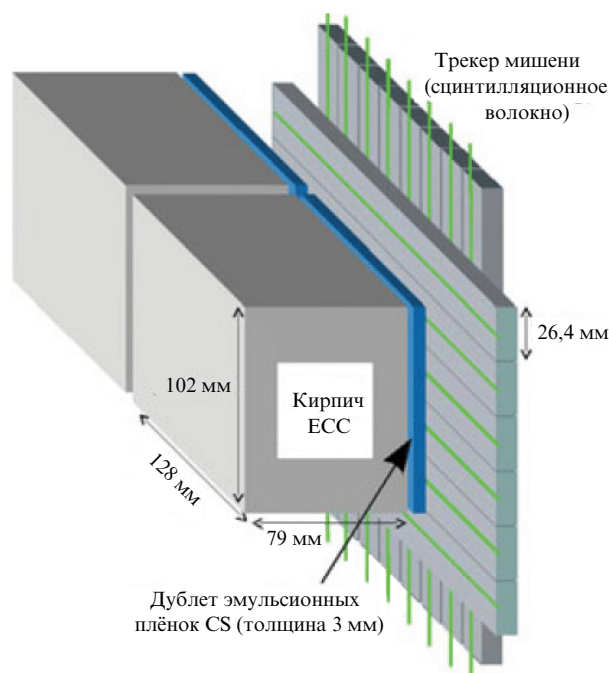


Рис. 10. Схема монтажа кирпичей в мишени [5].

При обнаружении в CS одного или нескольких треков, связанных с событием, выбранный кирпич ставили на 12-часовую экспозицию в космических лучах, чтобы получить набор опорных треков для точных топологических и кинематических измерений. Затем кирпич разбирался, его плёнки проявлялись. Треки, обнаруженные в CS, служили основой для так называемой процедуры обратного сканирования, которая заключалась в прослеживании трека в эмульсионных плёнках кирпича, начиная от задней стенки до его исчезновения. Исчезновение трека указывало на возможную вершину взаимодействия нейтрино.

В области объёмом около 1 см^3 вокруг точки исчезновения трека с помощью специальной методики [28] проводилось сканирование эмульсий в целях обнаружения треков-партнеров и/или вторичных взаимодействий. Эта процедура применялась для поиска очарованных адронов, образовавшихся во взаимодействиях тау-нейтрино.

Таким образом, для поиска событий-кандидатов на нейтринные взаимодействия в эксперименте OPERA выполнялся подробный кинематический анализ с помощью измерения энергии развившегося в ECC-блоке электромагнитного каскада, определения импульсов заряженных частиц путём измерения многократного кулоновского рассеяния в кирпиче и прослеживание треков в последующих стенах мишени. За время эксперимента было зарегистрировано более 25 тыс. взаимодействий нейтрино всех типов.

Сканирование событий проводилось в 12 лабораториях нескольких стран с помощью 40 автоматизированных микроскопов. В университетах Салерно и Неаполя (Италия) было разработано специальное программное обеспечение для первичной обработки данных, в создании которого участвовали сотрудники ЛЭЧ ФИАН.

В процессе онлайн-сканирования на автоматизированных микроскопах осуществлялась регистрация так называемых микротреков частиц, проходящих через каждый чувствительный слой эмульсионной пластины.

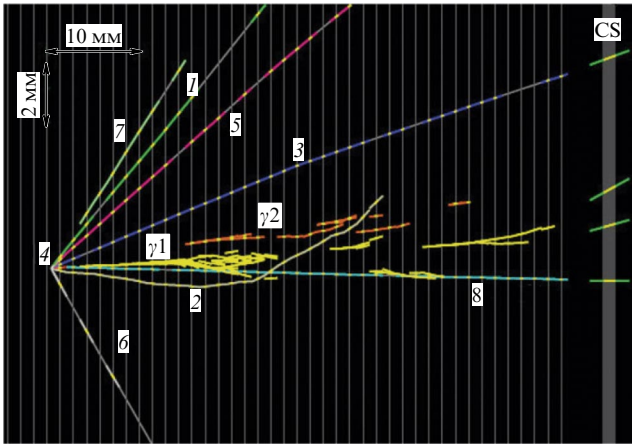


Рис. 11. Реконструкция первого взаимодействия тау-нейтрино в эксперименте OPERA [29].

"Сшивку" двух микротреков в одной плёнке через пластиковую подложку, осуществляемая с помощью специально разработанного программного обеспечения, позволяла реконструировать в этой плёнке часть траектории частицы, называемую базовым треком. Для реконструкции треков частиц во всём объёме мишени базовые треки в последовательных плёнках объединялись с использованием фильтра Калмана.

Первый кандидат на тау-нейтрино был зарегистрирован в 2010 г. [29]; реконструкция события представлена на рис. 11. Видно, что взаимодействие не вызвано ни мюоном, ни электроном. Первичная вершина содержит семь треков, один из которых имеет топологию кинк-распада. Из проведённого кинематического анализа следует, что наблюдаемый распад соответствует каналу $\tau \rightarrow \nu_\tau$, за которым следует распад $\rho \rightarrow \pi^0 \pi$. В период с 2012 по 2015 гг. были зарегистрированы ещё четыре события с ν_τ [30]. Сканирование эмульсионных плёнок было полностью завершено в 2016 г.

За время эксперимента с 2008 по 2012 гг. была набрана статистика $1,8 \times 10^{20}$ протонов на мишень детектора. Результатом стало открытие осцилляций мюонных нейтрино в таонные со статистической значимостью $6,1\sigma$ на основе наблюдения десяти ν_τ при взаимодействии по каналу заряженного тока. Регистрация осцилляций мюонных нейтрино в таонные в эксперименте OPERA вошла в научное обоснование Нобелевской премии по физике 2015 г. Данные эксперимента опубликованы на портале открытых данных ЦЕРН.

2.1.4. Эксперимент SND@LHC. В настоящее время сотрудники ЛЭЧ работают в составе международной коллаборации нового эксперимента SND@LHC (Scattering Neutrino Detector at LHC) в ЦЕРН [31]. Это компактный автономный эксперимент для регистрации всех трёх ароматов нейтрино и поиска слабо взаимодействующих частиц на LHC, который в настоящее время проводит измерения в ранее не исследованном диапазоне псевдобыстрот $7,2 < \eta < 8,6$. Детектор способен зарегистрировать также частицы лёгкой тёмной материи, рассеивающиеся на атомах мишени в области параметров, дополнительных по отношению к уже выполняемым экспериментам. Эксперимент SND@LHC был предложен в 2020 г. и подготовлен к запуску в декабре 2021 г. Уже в 2022 г. были получены первые данные. Установка

расположена в туннеле T118 БАК, в 480 м от точки IP1 столкновения встречных пучков протонов в детекторе АТЛАС. Детектор представляет собой гибридную систему на основе мишени из вольфрамовых пластин, чередующихся с эмульсионными и электронными трекерами, за которой расположена мюонная система. Такая конфигурация позволяет различать нейтрино всех трёх ароматов в области энергий, недоступной для других экспериментов на БАК. Использование ядерной эмульсии позволяет осуществлять поиск слабо взаимодействующих частиц в мишени детектора.

Через детектор, расположенный достаточно близко к оси пучка ускорителя, проходит интенсивный узко коллимированный (в пределах полярных углов $< 2,5$ мрад) пучок нейтрино с энергиями от 100 ГэВ до нескольких ТэВ, рождённых во взаимодействиях протонов с энергией в системе центра масс 13,6 ТэВ. Высокоэнергичные нейтрино возникают как результат лептонных W- и Z-распадов и распадов адронов, имеющих в составе b и c-кварки. Таким образом, нейтрино в исследуемой области псевдобыстрот от 7,2 до 8,6 можно рассматривать как индикатор рождения тяжёлых ароматов. Аромат нейтрино определяется по типу соответствующего заряженного лептона и кинематике распада. В частности, тау-лептоны идентифицируются по наблюдению характерной вершины тау-распада в эмульсии и по отсутствию электрона или мюона в первичной вершине.

Детектор SND@LHC (рис. 12) был спроектирован таким образом, чтобы при ограниченных размерах обеспечить: а) достаточное количество вещества для измерения энергии частиц в калориметре и высокую эффективность идентификации мюонов и б) поперечный размер мишени, позволяющий регистрировать частицы в необходимом интервале псевдобыстрот.

В качестве вершинного детектора используется нейтринная мишень, выполненная по технологии ECC, которая, благодаря высокому разрешению в ядерных эмульсиях, позволяет идентифицировать τ -лептоны и очарованные адроны, "распутывая" вершины их рождения и распада. Электроны идентифицируются по электромагнитным ливням, образующимся в мишени. Нейтринная мишень состоит из пяти параллельно установленных эмульсионных блоков (стенок) с поперечным размером 384×384 мм и общим весом 830 кг. Каждая стенка собрана из четырёх ячеек (кирпичей) из 60 эмульсионных плёнок, чередующихся с 59 вольфрамовыми пластинами толщиной 1 мм. Параметры одной стенки показаны на рис. 13а. Вся нейтринная мишень SND@LHC содержит 1200 эмульсионных плёнок общей площадью около 44 м^2 .

За каждой из пяти стенок мишени расположен детектор из сцинтилляционных волокон SciFi. Использование SciFi позволяет локализовать положение нейтринного взаимодействия в эмульсионном блоке и связать реконструированный в эмульсии мюонный трек с треком, зарегистрированным мюонным детектором, расположенным за нейтринной мишенью. Система идентификации мюонов состоит из железных плит, чередующихся с детекторами из сцинтилляционных стержней. Сочетание SciFi и сцинтилляторов мюонного детектора (адронный калориметр) служит также для измерения энергии адронной струи, образующейся в нейтринных взаимодействиях, и, следовательно, энергии нейтрино. Суммарная длина детектора составляет около $11 \lambda_{\text{int}}$, что обеспечивает хорошее развитие адронных ливней.

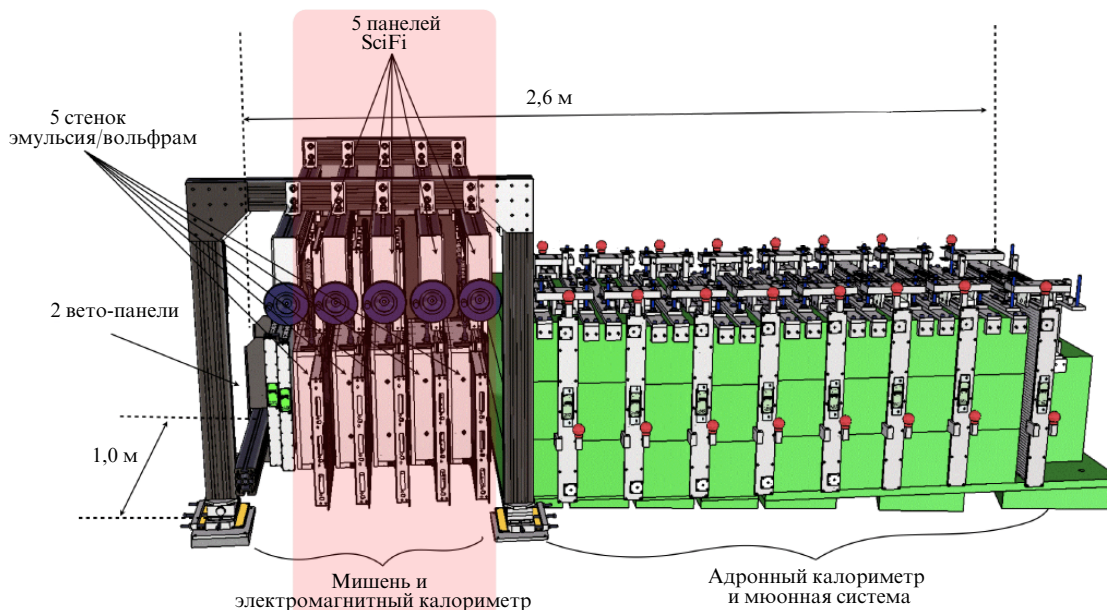


Рис. 12. Схематическое изображение детектора SND@LHC. Цветом выделена нейтринная мишень.

Проявка облучённых эмульсий нейтринной мишени проводится в химической лаборатории ЦЕРН, оснащённой необходимым оборудованием для обработки 1200 эмульсионных плёнок в неделю. Просмотр проявленных эмульсий осуществляется на оптических микроскопах пяти специализированных сканирующих лабораторий, в результате чего время обработки экспериментальных данных сопоставимо с временем экспозиции. Сканирование проводится в лабораториях университетов Болоньи и Неаполя, университета Цюриха, Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ЛЭЧ), а также в недавно созданной лаборатории в ЦЕРН. Скорость обработки эмульсий на автоматизированных оптических микроскопах достигает $\sim 180 \text{ см}^2 \text{ ч}^{-1}$.

Реконструкция события осуществляется в два этапа. На первом этапе обрабатываются данные целеуказаний электронных детекторов; затем анализируются эмульсионные данные, которые становятся доступными после сканирования ядерно-эмульсионных плёнок примерно через полгода после их облучения на пучке. Алгоритм реконструкции событий в ядерных эмульсиях аналогичен алгоритму, разработанному для эксперимента OPERA (рис. 13б).

Согласно оценкам, эмульсии позволяют анализировать изображения и восстанавливать события при максимальной плотности треков до 10^7 см^{-2} , однако при столь высокой плотности прослеживание треков в мишени сопровождается серьёзными техническими трудностями. В результате оптимальным считается уровень облучения порядка $10^5 \text{ треков см}^{-2}$. Поэтому, учитывая оценки фона в T118, экспозиция эмульсии в одном сеансе облучения не должна превышать 30 фб^{-1} , что означает замену эмульсионных кирпичей примерно три раза в год при непрерывной работе ускорителя (1 фб^{-1} соответствует примерно 7×10^{13} pp-взаимодействий).

В настоящее время осуществлено шесть экспозиций эмульсионной мишени (Emulsion RUN0–RUN5). Первая экспозиция проводилась с целью тестирования конструкции и качества сборки нейтринного детектора, поэтому она имела самую маленькую загрузку $0,5 \text{ фб}^{-1}$. Во время

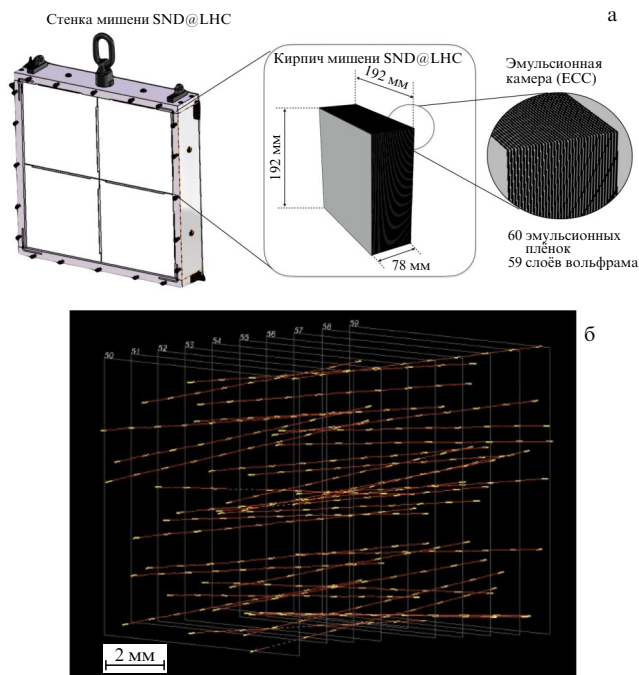


Рис. 13. Нейтринная мишень эксперимента SND@LHC: (а) схема одной стенки мишени; (б) результат реконструкции треков в десяти последовательных плёнках одного кирпича. Жёлтые сегменты обозначают базовые треки (данные эксперимента SND@LHC [32]).

второй и последующих экспозиций облучалась мишень в полной сборке: 5 стенок по 4 кирпича, содержащих по 60 эмульсионных слоёв, что составляет 1200 эмульсий за один сеанс. Начиная с третьей экспозиции нейтринный детектор регистрировал данные синхронно с электронными детекторами (режим Recorded рис. 14).

Диаграммы на рис. 14 показывают набор интенсивности в сеансах RUN0–RUN5, где Delivered 2022/2023 означает, что эмульсионная мишень подвергалась воздействию пучка.

Наполнение нейтринного детектора эмульсионными слоями в каждой экспозиции и набранная интегральная

Таблица 1. Технические характеристики сборки нейтринного детектора и экспозиции RUN0–RUN5

RUN ID	Число кирпичей и слоёв нейтринного детектора	Интегральная светимость, fb^{-1}
RUN0	1 кирпич = 57 N	1,5
RUN1	20 кирпичей = 513 N + 660 S	9,5
RUN2	20 кирпичей = 1140 N	20,0
RUN3	20 кирпичей = 886 N + 266 S	8,6
RUN4	20 кирпичей = 1140 N	21,2
RUN5	20 кирпичей = 1140 N	10,7

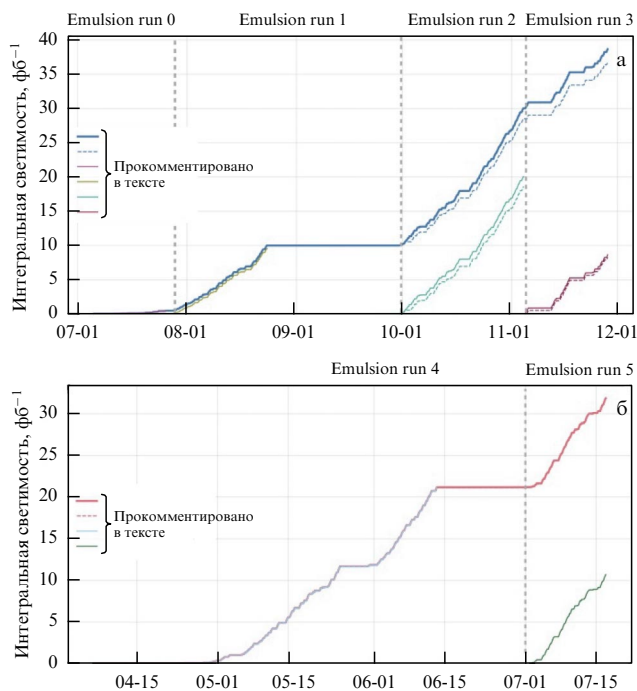


Рис. 14. Интегральная светимость, отражающая число взаимодействий, набранных за сеанс облучения, за периоды (а) 2022 г. и (б) 2023 г. По оси x показаны даты проведения сеансов по годам.

светимость представлены в табл. 1, где символы N и S обозначают производителя эмульсии (N — университет

г. Нагойя, Япония; S — ООО "Торговый дом Славич", Россия). Мониторинг качества российской эмульсии перед отправкой в ЦЕРН проводили сотрудники ЛЭЧ.

Из данных, приведённых в табл. 1, видно, что часть сеансов (RUN1, RUN3, RUN5) имеет набранную интегральную светимость $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$, что соответствует интегральной интенсивности порядка 10^4 – 10^5 треков см^{-2} . При увеличении интегральной светимости до значений 20–30 fb^{-1} заполнение достигает $\sim 10^5$ – 10^6 треков см^{-2} , что требует модернизации алгоритма реконструкции треков. В настоящее время идёт интенсивная работа по модернизации алгоритма реконструкции треков, которая позволит, помимо прочего, увеличить скорость обработки эмульсионных данных без изменения комплектов сканирующих станций.

На сегодняшний день положение детектора относительно линии пучка соответствует схеме на рис. 15а. Однако в 2024 г. планируется изменить положение детектора, разместив его симметрично относительно оси пучка, как показано на рис. 15б.

Такой сдвиг приведёт к большим энергиям нейтрино (200–400 ГэВ), что, в свою очередь, увеличит более чем в четыре раза статистику выхода электронных и мюонных нейтрино (рис. 16). При этом исследования переместятся в область псевдобыстрот $\eta > 7,4$.

На данный момент эксперимент SND@LHC находится в стадии активного набора данных. Обработка эмульсионных данных ведётся одновременно в лабораториях нескольких стран, входящих в состав коллаборации. Наряду с обработкой результатов эксперимента проводится моделирование отклика каждой из компонент детектора с помощью программных пакетов DPMJET-III [34] и Pythia8 + FLUKA [35] и осуществляется разработка и тестирование системы сбора и хранения информации на одном из серверов ЦЕРН. Последующие экспозиции нейтринного детектора в области псевдобыстрот $\eta > 7,4$ и диапазоне энергий 200–400 ГэВ позволят увеличить выход ν_e - и ν_μ -взаимодействий более чем в четыре раза.

В 2022 г. было зарегистрировано первое событие осцилляции нейтрино при столкновении протонов на БАК. Схема развития сигнала, отображающего данное событие электронной частью нейтринного детектора SND@LHC, представлена на рис. 17. В эксперименте

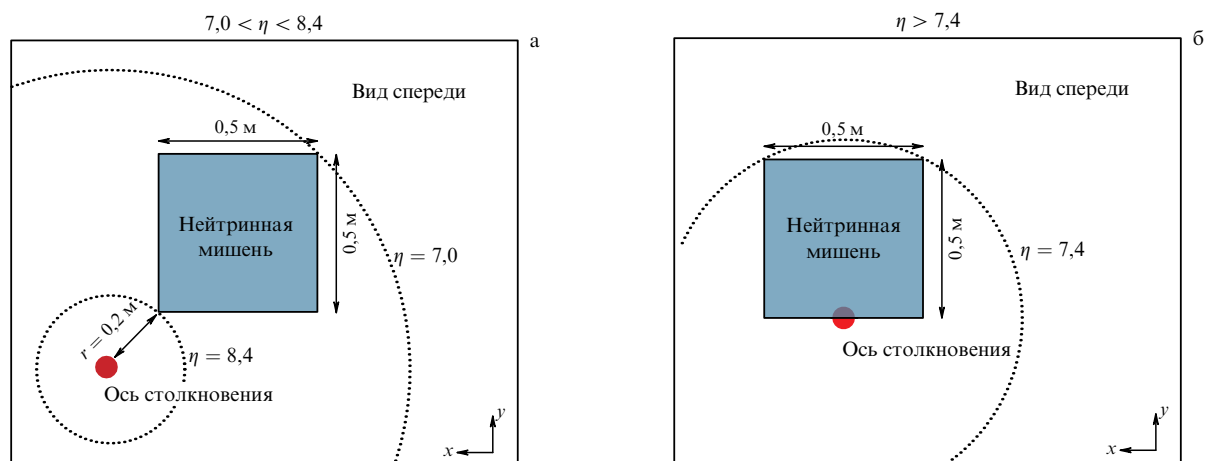


Рис. 15. Схематическое изображение нейтринного детектора SND@LHC относительно оси пучка, вид спереди: (а) во время экспозиций RUN1–RUN5, (б) предполагаемое положение при последующих экспозициях [33].

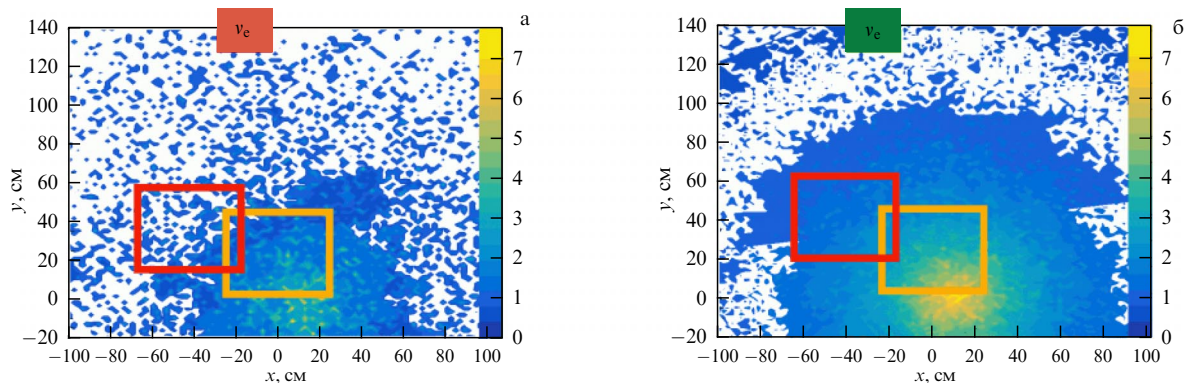


Рис. 16. Схематическое изображение нейтринного детектора SND@LHC относительно оси пучка, вид спереди. Цветовая шкала отображает ожидаемое число взаимодействий ν_e и ν_μ для (а) экспозиций RUN1–RUN5, (б) последующих экспозиций [33]. Красный квадрат выделяет исследуемую область псевдобыстрот $7,0 < \eta < 8,4$, жёлтый квадрат — область $\eta > 7,4$, соответствующую запланированному смещению детектора в новое положение относительно оси пучка.

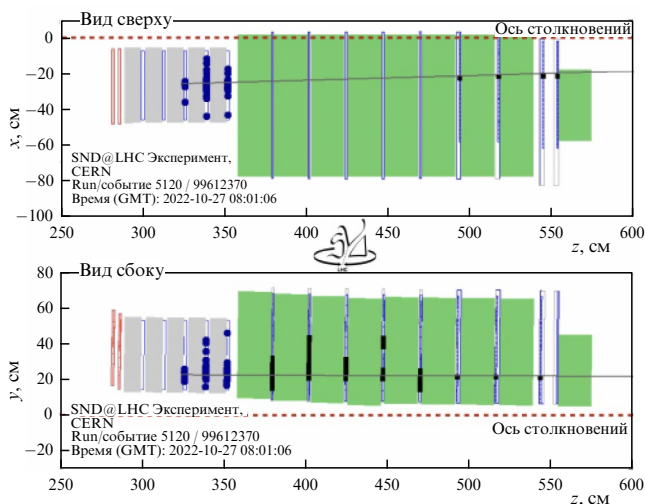


Рис. 17. Взаимодействие нейтрино по заряженному току ν_μ CC в нейтринном детекторе SND@LHC. Сигналы от SciFi и адронного калориметра показаны синими и чёрными точками соответственно. Чёрная линия представляет восстановленный трек образовавшегося мюона в мюонном детекторе [36].

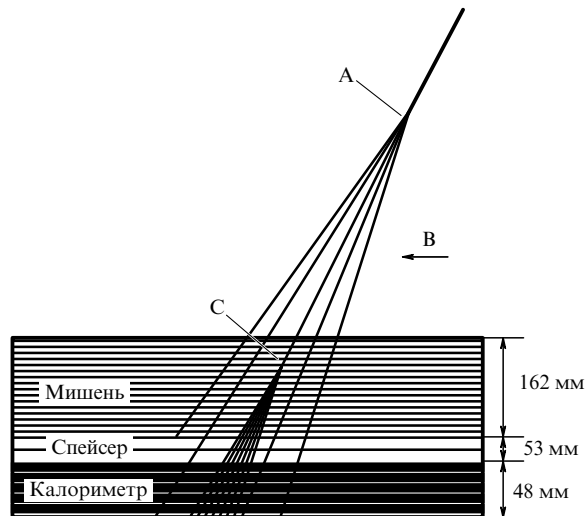


Рис. 18. Схематическое изображение гамма-адронного семейства СТРАНА в рентген-эмульсионной камере: А — взаимодействие частицы первичного космического излучения в атмосфере над камерой; В — развитие ливня до попадания в камеру; С — вторичное взаимодействие лидирующей частицы в мишенном блоке камеры.

SND@LHC было отобрано восемь кандидатов на события с образованием мюонных нейтрино ν_μ по каналу заряженного тока CC (Charged Current), зарегистрированных электронными приборами детектора. Статистическая значимость для отобранных событий составила приблизительно семь стандартных отклонений. В настоящее время осуществляется анализ эмульсионных данных (сканирование эмульсионных пластин, реконструкция треков, физический анализ) экспозиций RUN1–RUN5.

Опубликованы первые результаты эксперимента SND@LHC, полученные в 2022 г. [36], указывающие на перспективность дальнейших исследований в малоизученной области энергий нейтрино от 350 ГэВ до 10 ТэВ и представляющие большой интерес для изучения нейтринных аномалий на материале с высоким статистическим обеспечением.

2.2. Трековая методика в астрофизических исследованиях

2.2.1. Рентген-эмульсионные камеры на аэростатах, событие СТРАНА. Одними из первых экспериментов ЛЭЧ с использованием эмульсионной технологии стали аэростатные эксперименты на основе рентген-эмульсионных

камер (РЭК) по изучению космического излучения в верхних слоях атмосферы.

До появления мощных ускорителей установки типа РЭК широко использовались в экспериментах с космическими лучами для изучения энергетических и зарядовых спектров и особенностей взаимодействия частиц высоких энергий (см. [37–39]). РЭК, которые использовались в ЛЭЧ, представляли собой конструкцию из мишенной части, собранной по технологии ECC (Emulsion Cloud Chamber [37]) из слоёв ядерной эмульсии, чередующихся со слоями поглотителя, и нижней части (калориметра), где помимо слоёв ядерной эмульсии располагались рентгеновские плёнки, прослоённые пластинами свинца толщиной 0,5 см, что практически соответствует радиационной длине этого материала. Потемнения в рентгеновской плёнке служили для целеуказания событий и оценки энергии частицы, вызвавшей ливень. Для пространственного разделения частиц ливня мишенная часть и калориметр были разделены "пространственным блоком" (рис. 18). Анализ событий, зарегистрированных в РЭК, был основан на реконструкции треков всех заряженных частиц, образовавшихся в результате взаимодействий в

пассивном материале установки. В ядерных эмульсиях измерялись угловые характеристики сегментов каждого выходящего из вершины трека и осуществлялась реконструкция адронного ливня в объёме мишенной части РЭК.

В экспериментах ЛЭЧ 1970–1980 гг. рентген-эмульсионные камеры экспонировались в верхних слоях атмосферы на высоте более 30 км (остаточный слой атмосферы около $10,2 \text{ г см}^{-2}$). Камеры площадью $40 \times 50 \text{ см}$ устанавливались на аэростатах, совершавших полёты по маршруту Камчатка–Поволжье, общий вес полезной нагрузки каждого аэростата был около 2 т.

Наиболее интересным результатом этих экспериментов стала регистрация уникального гамма-адронного семейства СТРАНА, вызванного ядерным взаимодействием в атмосфере непосредственно над камерой. Из-за ограниченной глубины камеры эффективность регистрации адронов в установке составила около 40 %. Порядка 30 % образовавшихся частиц было утеряно в результате того, что событие развивалось ближе к краю камеры. С учётом этих поправок полная энергия семейства была оценена приблизительно равной $(1-2) \times 10^{16} \text{ эВ}$. Необходимо отметить, что такие энергии на ускорителях до сих пор недоступны.

В результате взаимодействия частицы первичного космического излучения, наклон траектории которой составил примерно 30° к нормали, образовалось 107 частиц, из которых 76 были идентифицированы как γ -кванты с суммарной энергией более 1400 ТэВ; суммарная энергия 30 частиц, определённых как адроны, составила около 2500 ТэВ (без лидирующей частицы) [40]. Лидирующая частица адронного каскада с энергией $(1-2) \times 10^{15} \text{ эВ}$ испытала повторное взаимодействие в углеродном поглотителе мишенного блока камеры, и треки заряженных частиц образовавшейся в результате струи наблюдались в нижележащих слоях ядерной эмульсии (рис. 19а), а её электромагнитная составляющая сформировала в рентгеновской плёнке калориметра большую область потемнения (гало) (рис. 19б) (толщина калориметра камеры составляла девять каскадных единиц). То, что в верхних 12 слоях РЭК до взаимодействия в мишенном блоке треки частицы не был обнаружен, свидетельствует о том, что лидирующая частица была не тяжелее ядра He. Данные, полученные в ядерных эмульсиях мишенного блока путём подсчёта количества треков на единицу площади, позволили найти пространственное распределение треков в струе.

Оценка высоты взаимодействия была проведена тремя различными методами: сведением пар гамма-квантов к предполагаемой точке образования, путём анализа псевдобыстротного распределения частиц в семействе и методом триангуляции с использованием небольшой разницы в координатах пятен и треков, образуемых частицами при прохождении камеры в разных слоях регистрации. В последнем случае измерения координат пятен от электромагнитных ливней производилось с помощью компьютерной программы по изображениям в рентгеновских плёнках, отсканированным на оптическом устройстве. Измерения координат треков в ядерных эмульсиях проводились на полуавтоматических микроскопах ЛЭЧ. Всего было измерено около 800 треков и пятен (рис. 20), причём в расчётах использовались только каскады, обнаруженные более чем в двух слоях калориметра.

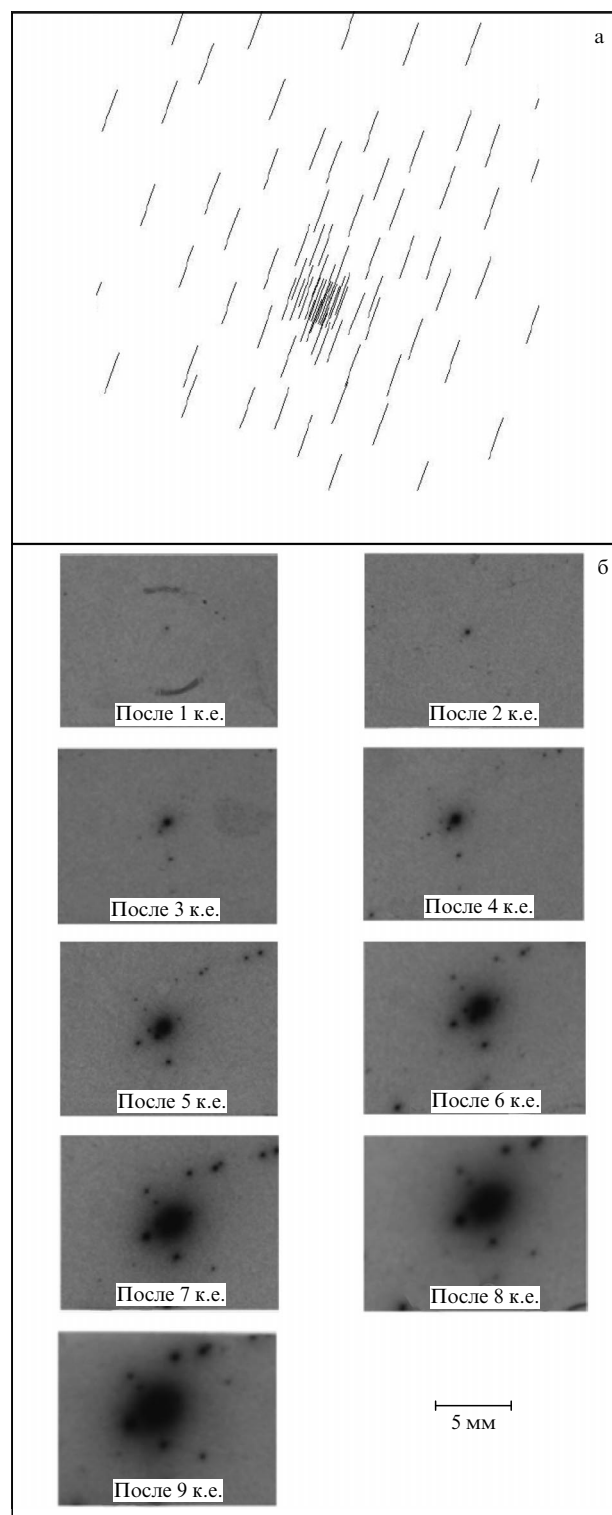


Рис. 19. (а) Струя в одном из слоёв ядерной эмульсии мишенного блока РЭК; (б) развитие гало струи в калориметре РЭК [41].

Различные методы оценки высоты взаимодействия дали расхождение в интервале от 50 до 1200 м. Такой заметный разброс объясняется большой величиной ошибок измерений, вызванной, в частности, погрешностями координатной привязки ядерно-эмульсионных и рентгеновских слоёв в калориметре, толщин свинцовых пластин и отклонениями характеристик суперсемейства от средних оценочных значений. Так, было показано [43],

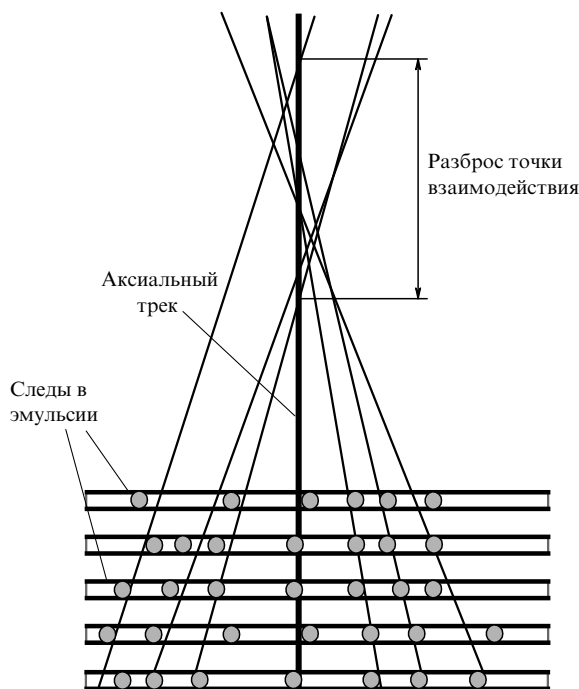


Рис. 20. Схема, иллюстрирующая метод каскадной триангуляции в калориметре РЭК [42].

что локальные флуктуации в дисторсии ядерной эмульсии могут существенно увеличить ошибки в столь тонкой процедуре, как триангуляция.

Определение высоты взаимодействия позволило оценить поперечные импульсы частиц, родившихся в первичном взаимодействии. По выполненным оценкам значение среднего поперечного импульса [43] в суперсемействе превышало $2,5 \text{ ГэВ с}^{-1}$, а при наиболее вероятной высоте взаимодействия $\sim 300 \text{ м}$ могло составить около 10 ГэВ с^{-1} . Тип первичного ядра был определен как CNO.

В суперсемействе СТРАНА наблюдалось такое явление, как выстроенность, которое выражается в том, что в калориметре пятна почернения с наибольшей энергией "выстроены" с небольшими отклонениями вдоль прямой линии в плоскости, перпендикулярной траектории первичной частицы. Этот эффект является следствием компланарного рассеяния вторичных частиц при ядерном взаимодействии с энергией выше 10^{15} эВ , когда наиболее высокоэнергичные объекты в гамма-адронных семействах выстраиваются вдоль прямой линии [44]. В суперсемействе СТРАНА 15 из 107 частиц были расположены вблизи линии выстроенности (рис. 21); эти 15 частиц унесли более половины энергии частицы, вызвавшей первичное взаимодействие. Кроме того, выраженная анизотропия наблюдалась в расположении всех частиц в центральной зоне семейства. Направление вытянутости анизотропно расположенных частиц совпало с направлением выстроенности пяти наиболее энергичных адронов, т.е. при разлёте эти вторичные частицы были распределены вблизи плоскости компланарного разлёта. Были получены оценки, согласно которым вероятность случайного события с такой степенью выстроенности составляет для разных ядер от 0,01 до 0,03 % [40].

Суперсемейство СТРАНА занимает особое место среди результатов, полученных во всех проводившихся когда-либо аэростатных экспериментах, по целому ряду

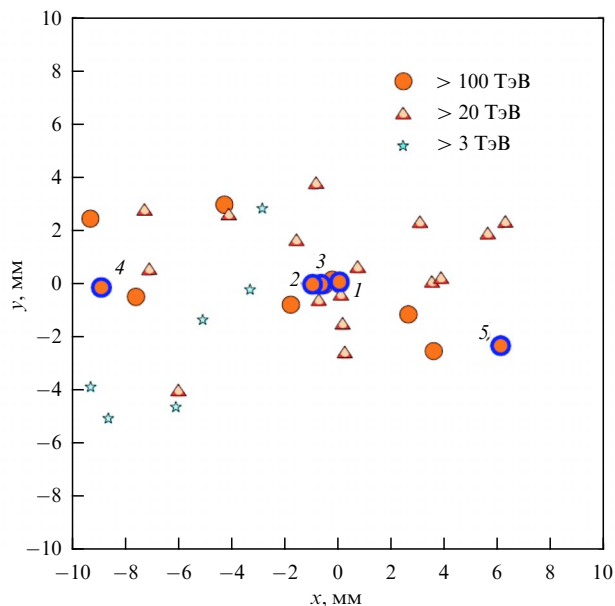


Рис. 21. Мишенная диаграмма центральной части суперсемейства СТРАНА. Цифрами обозначены пять наиболее высокоэнергичных адронов [43].

причин. Прежде всего, необходимо отметить, что на границу земной атмосферы падает приблизительно одна космическая частица на м^2 в год с энергией 10^{15} эВ и выше. Если учесть, что примерно 85 % этих частиц составляют протоны, то вероятность зарегистрировать более тяжёлую частицу с такой энергией установкой небольшой площади стремится к нулю. Также зарегистрированное суперсемейство уникально тем, что лидирующая частица вызвала вторичное взаимодействие в 12-м слое мишенного блока РЭК. Явление гало, наблюдавшееся ранее только в экспериментах с широкими атмосферными ливнями на горах, впервые наблюдалось в адронном взаимодействии, зарегистрированном на стратосферной высоте. И наконец, при невозможности получения столь высоких энергий взаимодействия ядер группы CNO на ускорителях, семейство СТРАНА стало первым случаем наблюдения эффекта выстроенности, до этого наблюдавшегося только в экспериментах с широкими атмосферными ливнями (см., например, [45]).

2.2.2. Поиск сверхтяжёлых ядер в кристаллах оливинов из метеоритов. Одним из наиболее значимых экспериментов, проведённых в ЛЭЧ в течение последних 20 лет, стал эксперимент ОЛИМПИЯ (ОЛИвины из Метеоритов — Поиск тяжёлых И сверхтяжёлых Ядер) по поиску треков ядер космического происхождения в кристаллах оливина из палласитов, начатый по инициативе академика В.Л. Гинзбурга и поддержанный академиком Ю.Ц. Оганесяном [46]. Предметом изучения были оливины — фрагменты железо-каменных метеоритов (палласитов) Марьялахти и Игл Стейшн, используемые как трековые детекторы.

Поиск тяжёлых элементов в составе галактических космических лучей (ГКЛ) чрезвычайно затруднён вследствие малости потоков этих ядер в околоземном пространстве ($\sim 1-2$ частицы на м^2 в год, т.е. более чем на 10 порядков слабее потока ядер водорода). Поэтому в многочисленных экспериментах по регистрации ядер

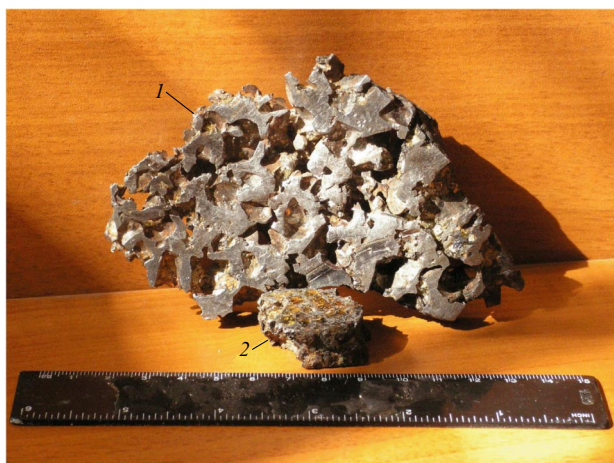


Рис. 22. Фрагменты палласита Marjalahti (1) и Eagle Station (2), использованные в эксперименте ОЛИМПИА.

космического излучения с помощью аэростатов [47] и искусственных спутников Земли [48–51] в общей сложности было найдено всего несколько десятков треков ядер с зарядами $Z > 86$ и несколько единичных событий, идентифицированных авторами исследований как треки ядер с $Z > 92$. По этой причине палласиты в качестве детекторов сверхтяжёлых ядер обладают неоспоримым преимуществом, а именно беспрецедентной продолжительностью пребывания в космическом пространстве. В частности, радиационный возраст метеоритов Марьялахти и Игл Стейшн мог составить от 30 до более чем 200 миллионов лет [52] (радиационный, или космический возраст метеорита совпадает с продолжительностью его экспозиции космическими лучами и отсчитывается от момента выделения метеорита как отдельного космического тела). Как показывают оценки [53], за 10^8 лет экспозиции в космическом пространстве в 1 см^3 вещества метеорита на глубине до 5 см от его доатмосферной поверхности может содержаться 10^2 – 10^3 треков ядер с $Z > 90$, а на глубине меньше 1 см — до 10^4 таких треков.

Палласиты представляют собой пористую матрицу из никелистого железа с включениями кристаллов оливина (рис. 22). Оливин (химическая формула $(\text{Mg}_{0,8}\text{Fe}_{0,2})_2\text{SiO}_4$) — это полупрозрачный минерал, кристаллы которого, размерами от нескольких миллиметров до 1–2 см, могут занимать до 65 % объёма метеорита. Кристаллы оливина обладают рядом особенностей, позволяющих использовать их в качестве трековых детекторов. Во-первых, они способны сохранять в течение сотен миллионов лет структурно-фазовые изменения кристаллической структуры, вызванные прохождением быстрого тяжёлого иона. Во-вторых, под действием лабораторных химических препаратов, вследствие значительного превышения скорости растворения материала в области трека над скоростью растворения неповреждённого материала, образовавшиеся дефекты кристаллической решётки увеличиваются в размерах настолько, что становятся видимыми под оптическим микроскопом. Прозрачность кристаллов позволяет наблюдать "проявленные" в результате химического травления треки в видимом свете. И, наконец, в связи с достаточно высоким порогом удельных энергетических потерь заряженной частицы, необходимым для формирования в оливине химически травимого трека (выше $18 \text{ МэВ мг}^{-1} \text{ см}^2$

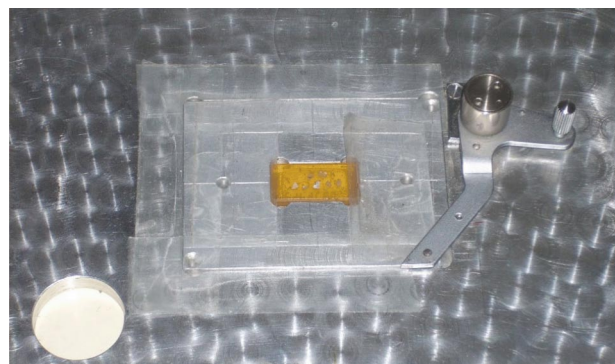


Рис. 23. Эпоксидная таблетка с кристаллами оливина, закреплённая на предметном столе микроскопа ПАВИКОМ-2.

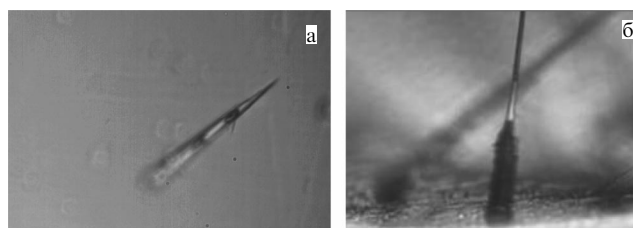


Рис. 24. Микрофотографии треков сверхтяжёлых ядер космического излучения, протравленных в кристаллах оливина из палласитов: (а) "морковка"; (б) "шприц". Размер поля зрения на микрофотографиях $(60\text{--}100) \times 140 \text{ мкм}$.

[54]), в оливине полностью отсутствуют треки ядер с зарядами $Z \leq 24$, что позволяет изучать зарядовый состав космических лучей в области тяжёлых ядер начиная с железа, без влияния фона.

Российские исследования оливинов из палласитов с целью поиска в них следов тяжёлых космических ядер были инициированы в Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) [55], а в начале 2000-х гг. фрагменты палласитов Марьялахти и Игл Стейшн были переданы в ЛЭЧ ФИАН для изучения их на установке ПАВИКОМ-2 (см. раздел 4). Кристаллы оливина, использованные в эксперименте ОЛИМПИА, находились на глубине не более 5–6 см от доатмосферной поверхности метеоритов, т.е. на глубине, где возможно обнаружение ядер с энергиями в интервале $\sim 1,5\text{--}5 \text{ ГэВ}$ на нуклон [56].

Для удобства обработки кристаллы оливина, извлечённые из железо-никелевой матрицы, помещались в эпоксидные таблетки размером $10 \times 20 \text{ мм}$. В таком виде кристаллы подвергались шлифовке, полировке, травлению и измерениям с помощью микроскопа (рис. 23).

Микрофотографии треков тяжёлых ядер в оливине при увеличении до $60\times$ показаны на рис. 24. В зависимости от величины ионизационных потерь протравленные треки-каналы высокоэнергичных тяжёлых ядер могут выглядеть как "морковка" (а) или, в 2 % случаев, как "шприц" (б) (состоять из двух частей — цилиндрической, перед остановкой, и иглообразной — на участке траектории, соответствующем большей энергии частицы, образуя форму наподобие "шприца", при этом диаметры каналов одного трека различаются в несколько раз).

Разработанная в ЛЭЧ методика измерений и анализа данных, существенно отличающаяся от методов ЛЯР ОИЯИ, была основана на определении параметров про-

травленных треков торможения ядер перед их остановкой в оливине [57]. Основной методической проблемой эксперимента было определение величины заряда ядра, сформировавшего трек. Оценка заряда проводилась по результатам измерений параметров протравленного трека. Помимо геометрической характеристики — измеренной длины L участка протравленного трека, использовалась вторая, динамическая характеристика — скорость травления трека в длину V_{etch} . Необходимость введения дополнительного параметра была вызвана тем, что травимая длина трека могла превышать размер кристалла.

Для наиболее точного определения параметров треков ядер и эффективного использования объёма кристалла в эксперименте ОЛИМПИА применялась методика последовательного ступенчатого среза-травления слоёв поверхности кристалла. При измерениях в очередном слое производилась процедура его "сшивки" с предыдущим срезанным слоем, во время которой осуществлялся поиск продолжения треков. По завершении обработки кристалла полная длина трека суммировалась с учётом угла наклона трека к поверхности. Величина скорости травления определялась на каждом этапе обработки. Сопоставление величин скорости травления треков, измеренных на последовательных этапах обработки, обеспечило высокую точность измерений параметров треков, используемых при идентификации зарядов ядер.

Для получения количественного соотношения между скоростью травления V_{etch} и измеренной длиной пробега ядра до остановки L были проведены калибровочные эксперименты на ускорителях с ядрами разных элементов [58]. На основании результатов калибровочных экспериментов была построена трёхмерная функция $Z(L, V_{\text{etch}})$ для определения зарядов ядер, зарегистрированных в метеоритном оливине (рис. 25). Методика оценки величины заряда заключалась в двумерной интерполяции поверхности по измеренным значениям величин V_{etch} и L для протравленного трека. Точность определения заряда по этой методике зависит от положения точек на плоскости и составляет от ± 1 до ± 2 единиц заряда. Для определения больших зарядов в диапазоне $67 < Z < 93$ калибровочные кривые, связывающие протравленную длину, скорость травления и заряд, были аппроксимированы пятипараметрической функцией, что позволило экстраполировать зависимость заряда тяжёлых ядер на несколько единиц за пределы калибровочных экспериментов в область $Z > 92$.

Авторский метод послойного шлифования и травления кристаллов в сочетании с процедурой их обработки на ПАВИКОМ позволил собрать обширный материал для анализа. За время эксперимента было исследовано 853 кристалла метеоритного оливина, в которых удалось идентифицировать 25851 трек ядер космического происхождения с зарядами $Z > 40$, в том числе 2771 ядро с $40 < Z < 50$; 22617 ядер с $50 < Z < 80$; 457 ядер с $80 < Z < 92$ и 6 ядер с $92 < Z < 100$. Данные в области зарядов $Z < 56$ статистически менее значимы, поскольку из-за небольших длин таких треков их измерение было затруднено.

Зарядовый спектр для ядер с $Z \geq 48$ представлен на рис. 26 в сравнении с результатами наиболее значимых спутниковых экспериментов по регистрации тяжёлых ядер в околоземном пространстве [59]. Данные нормированы по содержанию ядер железа ^{26}Fe (10^6).

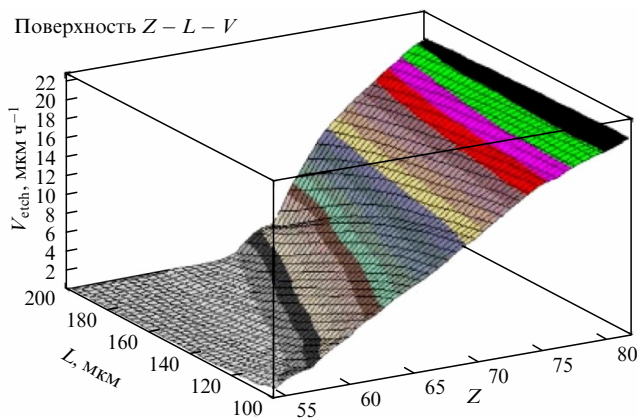


Рис. 25. Калибровочная поверхность для определения заряда ядра Z по измеренной длине пробега L и скорости травления трека V_{etch} .

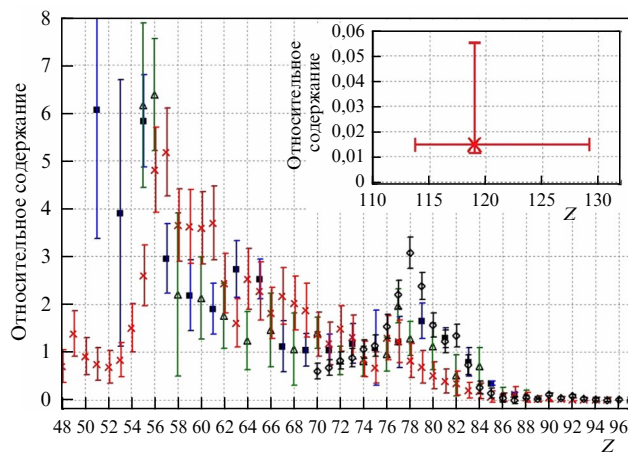


Рис. 26. Относительное содержание тяжёлых ядер ГКЛ, зарегистрированных в эксперименте ОЛИМПИА (кресты, со статистическими ошибками), в сравнении с результатами других экспериментов: ARIEL-6 (треугольники) [48], HEAO-3 (квадраты) [49] и UHCRE (ромбы) [51]. На вставке показаны три трансформированных ядра, зарегистрированных в данной работе.

На рисунке 26 заметны расхождения результатов эксперимента ОЛИМПИА с результатами спутниковых экспериментов. В связи с этим необходимо отметить, что в экспериментах на искусственных спутниках Земли регистрируются потоки ядер в околоземном космическом пространстве, в то время как в веществе метеоритов могут быть зафиксированы флуктуации потоков ядер, рождённых в таких глобальных событиях, как взрыв сверхновой, слияние нейтронных звёзд или слияние нейтронной звезды с чёрной дырой, произошедших в относительной близости от метеорита во время его нахождения в глубоком космическом пространстве. Было показано [60], что заметное превышение относительного потока сверхтяжёлых ядер, зарегистрированное в метеоритах, по сравнению с экспериментами на спутниках, может означать дополнительный вклад таких ядер. Поскольку эти события происходят в разное время и на разных расстояниях от Солнца, вклады различных классов событий в локальный поток космических ядер непрерывно меняются, формируя временную историю зарядовых спектров тяжёлых компонент локального потока. Понимание этой истории позволит сформулировать обоснованные выводы об истории различных

событий нуклеосинтеза в окрестностях Солнечной системы и, следовательно, о механизмах ядерного синтеза в Галактике.

Иллюстрацией этого эффекта может служить различие в количестве ядер одной группы, зарегистрированных с помощью метеоритов с разным радиационным возрастом, что является прямым указанием на влияние частиц, образовавшихся в локальных космических процессах, сопровождающихся выбросом таких ядер. Учитывая редкость таких космических событий, как взрыв сверхновой или слияние нейтронных звезд, для реализации описанного сценария экспериментальные данные по истории потоков ГКЛ должны содержать информацию о ядрах, накопленную за сотни миллионов лет. Поэтому весьма существенно, что предметом исследования эксперимента ОЛИМПИА являются два метеорита с различным радиационным возрастом: Mañjaláhti (по разным оценкам, от 178 до 205 млн лет) и Eagle Station (от 35 до 71 млн лет). Разница между спектрами ядер, обнаруженных в двух метеоритах, может быть объяснена тем, что время между космическими событиями (от 140 до 170 млн лет), сопровождающимися выбросом тяжёлых ядер, превышает возраст экспозиции "младшего" метеорита и меньше возраста экспозиции "старшего". Сравнение спектров сверхтяжёлых ядер, зарегистрированных в различных метеоритах, а также в детекторах на спутниках, может помочь понять временную историю потоков тяжёлых и сверхтяжёлых ядер, воздействующих на Солнечную систему. Результаты эксперимента ОЛИМПИА свидетельствуют о том, что за последние 200 млн лет Солнечная система по крайней мере дважды могла быть облучена потоками ядер от событий космического нуклеосинтеза, в результате которых образовались очень большие выходы самых тяжёлых элементов [61].

В 2013 г. участники эксперимента ОЛИМПИА сообщили об обнаружении в метеоритном веществе треков частиц, заряды которых были оценены в интервале от 103 до 129 [58], что можно считать первым прямым свидетельством существования стабильных сверхтяжёлых ядер природного происхождения. Длина соответствующих треков составила более 500 мкм, а скорость травления V_{etch} превысила 35 мкм ч^{-1} . Поскольку измеренная в эксперименте максимальная величина скорости травления треков ядер урана в оливине перед их остановкой составляет $26 \pm 1 \text{ мкм ч}^{-1}$, это означает, что заряды обнаруженных ядер существенно превышают заряд урана. Оценка заряда этих ядер, выполненная с помощью регрессионного анализа, позволила получить значение 119_{-6}^{+10} с вероятностью 95 %.

Обнаруженные сверхтяжёлые ядра, очевидно, должны были прожить достаточно долго, чтобы долететь от места образования до поверхности метеорита, т.е. время их жизни должно быть, как минимум, сравнимо с временем их распространения от источника до пояса астероидов Солнечной системы, из которого на Землю прилетает подавляющее большинство метеоритов. Оценки показывают, что минимальное время жизни должно находиться в пределах от 50 до 100 лет, что на много порядков превосходит время жизни трансфермиевых ядер, синтезированных на ускорителях. Следовательно, обнаружение этих ядер может являться свидетельством существования "острова стабильности" сверхтяжёлых ядер.

3. Моделирование процессов формирования треков быстрых тяжёлых ионов в твердотельных трековых детекторах

Описание механизмов образования структурно изменённых областей в результате облучения твердотельных детекторов быстрыми тяжёлыми ионами (БТИ, $M > 20 \text{ а.е.м.}$, $E > 0,1 \text{ МэВ}$ на нуклон) требует учёта принципиальных особенностей кинетики трека. Реализация различных каналов релаксации возбуждённой трековой области, приводящих к структурным изменениям, существенно зависит от величин параметров, характеризующих начальное возбуждённое состояние материала в этой области. Количественное определение этих параметров в зависимости от характеристик налетающего иона и облучаемого материала является принципиальной задачей для интерпретации результатов эксперимента.

Тяжёлое ядро в материале детектора становится ионом, поскольку приобретает равновесный заряд [62]. Характерные повреждения атомной структуры мишени, стимулируемые БТИ, имеют поперечные размеры (диаметр) от 1 до 10 нм [62, 63] и могут наблюдаться только либо в просвечивающий электронный микроскоп, либо при помощи рентгеновской дифракции на мишени. Такие исследования требуют высокой дозы облучения (от 10^{10} ионов на см^2) и требуют разрушения образца для исследования треков вдоль траектории. Поэтому подавляющая часть трековых методик основана на химическом травлении треков БТИ. В химически активной среде (как правило, в жидком травителе) скорость растворения повреждённой атомной структуры вокруг траектории иона выше, чем скорость растворения неповреждённого материала за её пределами. В результате травления треков БТИ формируются полые каналы микрометрового размера, которые можно наблюдать и измерять при помощи оптического микроскопа.

Уже в 1967 г. было замечено, что длина трека в мишени и скорость травления трека в длину зависят от типа иона и его энергии [64]. Этот эффект был использован в последующих экспериментах по идентификации ядер космического излучения в пластиковых детекторах, размещённых на искусственных спутниках на орбите Земли [51], и ядер космического излучения в метеоритном веществе [60, 65, 66]; травление треков осколков деления применялось для геохронологического анализа [67, 68]. Контролируемое облучение на ускорителях и последующее травление применяются для синтеза наноструктур, нанопроволок, нанопор, фильтров высокой очистки [69, 70].

Наноразмерная модификация материалов при помощи БТИ даёт возможность создания областей с изменёнными электронными свойствами [71], в том числе ансамблей квантовых точек в наноэлектронике [72]. Ионная терапия применяется в медицине для лечения онкологических заболеваний [73], например, для уничтожения неоперабельных опухолей внутри головного мозга пациента [74].

Одной из основных проблем, связанных с облучением тяжёлыми ионами, является радиационная безопасность. Космические лучи представляют опасность для космических полётов [75]: ионы высоких энергий разрывают связи ДНК [76] и молекулы воды, производя химически активные фрагменты и свободные радикалы, кото-

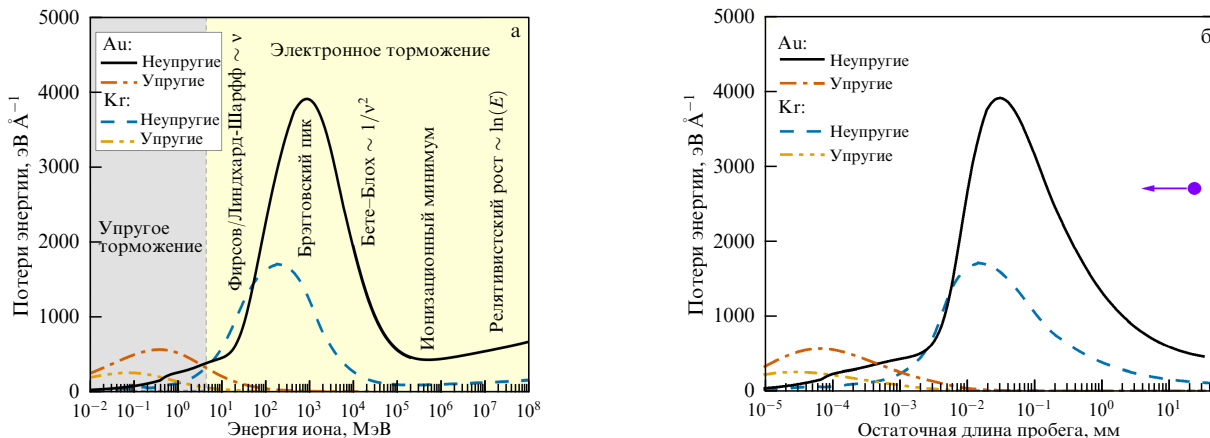


Рис. 27. Упругие и неупругие потери энергии ионов Au и Kr в Al_2O_3 , рассчитанные с помощью кода SRIM [80] для нерелятивистских и кода TREKIS [81, 82] для релятивистских энергий, в зависимости от (а) энергии налетающего иона или (б) от остаточного пробега частицы (направление проникновения иона показано стрелкой).

рые взаимодействуют с генетическим материалом [77], что может вызывать повреждение ДНК вплоть до летальной дозы [76, 77]. Прохождение БТИ приводит к программным сбоям и повреждению элементов в вычислительной технике [78]. Длительное воздействие БТИ может привести к макроскопическим повреждениям материалов, что необходимо учитывать при использовании ядерных материалов и обращении с ядерными отходами [79]. Ключевой проблемой этих исследований остаётся возможность соотнести параметры налетающего ядра (тяжёлого иона) с результатами повреждений материала мишени и последующего травления, т.е. калибровка.

На подавляющей части траектории, вдоль которой возникает детектируемый трек, налетающие тяжёлые ионы имеют энергию $E > 0,1$ МэВ на нуклон и тормозятся, возбуждая электронную подсистему конденсированной мишени [80]. Максимум электронных потерь на единицу длины траектории (брэгговский пик, рис. 27) достигается при скорости налетающего иона, примерно равной скорости атомных электронов [80]. Для тяжёлых ионов (Au, Bi, U) электронные потери в области этого пика достигают значений 40–50 кэВ на нанометр траектории. Электронные потери энергии становятся меньше упругих потерь при энергиях ионов ниже ~ 1 кэВ на нуклон.

Исследование кинетики формирования трека БТИ представляет также значительный фундаментальный интерес [62]. Кинетика трека БТИ стартует из состояния, в котором электронная подсистема материала в нанометрической окрестности траектории иона достигает экстремальных уровней возбуждения, а атомная подсистема при этом остаётся невозмущённой. Такое состояние материала существует очень короткое время (~ 1 фс) и не наблюдается при иных способах воздействия. Кинетика возбуждения решётки материала в результате её взаимодействия с релаксирующей электронной подсистемой в треке БТИ характеризуется пространственно-временными масштабами в интервалах ~ 10 нм и 10–100 фс. Эти масштабы настолько малы, а интенсивность возбуждения настолько велика, что макроскопические модели, основанные на предположении локального равновесия, становятся слабо применимыми.

Экспериментальная и теоретическая активность по этой тематике резко возросла в 1990-х гг., когда разви-

тие экспериментальных методик дало толчок к развитию нанотехнологий на основе облучения БТИ [63]. К 2010–2015 гг. были сформулированы, по крайней мере, четыре класса моделей, использующих полуэмпирические правила выбора параметров БТИ для конкретных целей. В недавнем обзоре [62] детально обсуждаются недостаточная фундаментальная обоснованность используемых приближений и отсутствие предсказательной силы этих моделей: кулоновского взрыва [83], экситонной модели [84, 85], модели, основанной на распространении ударных волн [86], и различных вариантов модели термической вспышки [87, 88]. Общим их недостатком является то, что из-за применения подгоночных параметров упомянутым выше моделям не хватает предсказательной силы.

Проблема описания кинетики трека БТИ может быть решена с учётом её мультимасштабной природы. Процессы, инициированные пролётом иона, охватывают более десяти порядков по времени (рис. 28). Для различных процессов, участвующих в создании трека на разных интервалах этой временной шкалы, доступно несколько методов моделирования, подходящих для количественного описания каждой стадии формирования трека с требуемой точностью. Однако до настоящего времени не существовало самосогласованной модели, способной, реализуя на каждом временном интервале наиболее подходящий подход и обеспечивая последовательную связь этих стадий, с хорошей точностью рассматривать весь временной интервал кинетики трека.

Эта возможность впервые была успешно реализована в модели, которая разрабатывалась в течение последних десяти лет при активном участии ЛЭЧ ФИАН [89–91]. Идея модели основывается на том, что ввиду быстрого остывания электронной подсистемы, её динамика разделена во времени с динамикой атомного ансамбля. На временах после пролёта иона меньших ~ 100 фс используется оригинальный Монте-Карло (МК) код TREKIS [89], описывающий взаимодействия налетающего БТИ с мишенью, возбуждение и релаксацию электронной подсистемы, а также возбуждение атомной системы мишени в результате передачи ей части энергии электронного возбуждения.

В качестве начального условия используется распределение энергии, переданной в атомный ансамбль от

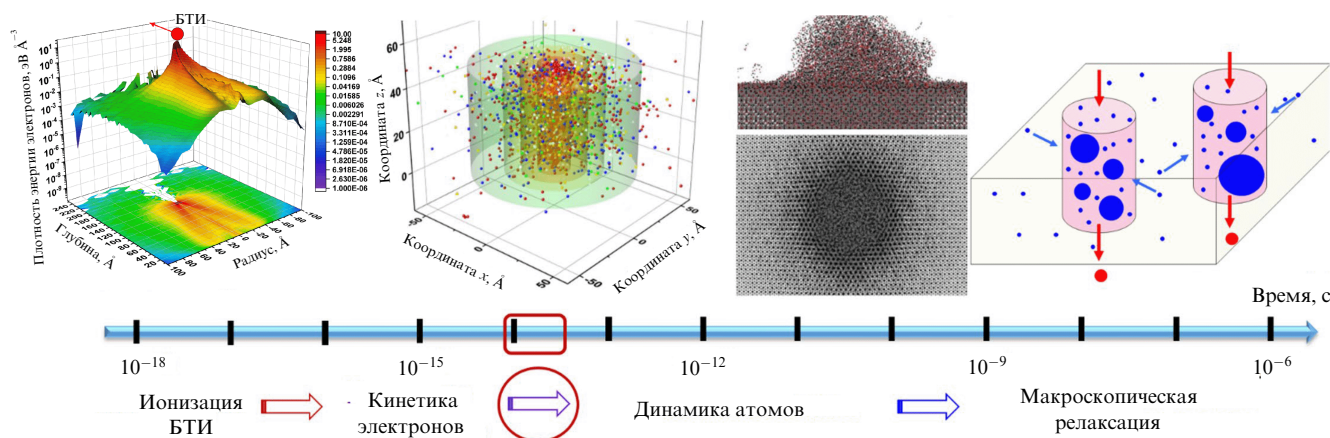


Рис. 28. Схематическая иллюстрация характерных временных масштабов кинетики возникновения трека БТИ [63].

электронной подсистемы. Такой подход обеспечивает надлежащее перекрытие и обмен информацией между блоками модели и сохраняет требуемый уровень точности на протяжении всего моделирования. При этом молекулярно-динамическое моделирование проводится на временных масштабах от ~ 100 фс до ~ 100 пс отклика атомной подсистемы на вносимое возбуждение и формирование наблюдаемых структурно-изменённых треков БТИ. Принципиальной особенностью модели является использование в МК-коде сечений, учитывающих в формализме динамического структурного фактора коллективную реакцию электронной и ионной подсистем материала на вносимое возбуждение, а также "нетермического" механизма передачи энергии в ионную подсистему в результате ускорения атомов, инициированного резким изменением межатомного потенциала твердотельной мишени в результате экстремального возбуждения её электронной подсистемы [92].

Построенная модель без использования подгоночных параметров может предсказывать параметры треков различных ионов, что является принципиальным достижением в задаче описания эффектов облучения материалов пучками БТИ. Применение модели позволило впервые выявить наиболее важные эффекты и дало возможность описать образование треков "от начала до конца" без использования подгоночных параметров и в хорошем согласии с экспериментом. Модель была многократно протестирована в исследованиях, проводимых различными экспериментальными группами (см., например, [62, 93]).

В отношении методики травления треков применение модели позволило впервые количественно определить параметры и морфологию структурно изменённых областей вдоль траекторий различных ионов в метеоритном оливине [94]. На рисунке 29 показаны аморфизированная область, ядро трека и переходная к кристаллической матрице область трека (оболочка).

Для сравнения на рис. 30 представлены кривые потерь электронной энергии. Видно, что положение на траектории иона пика потерь энергии (пика Брэгга) не совпадает с положением области максимального структурного повреждения. Например, для ионов Хе максимальный радиус повреждённой области наблюдается при энергии ~ 130 МэВ, что значительно отличается от энергии ~ 500 МэВ, реализующей брэгговский пик. Максималь-

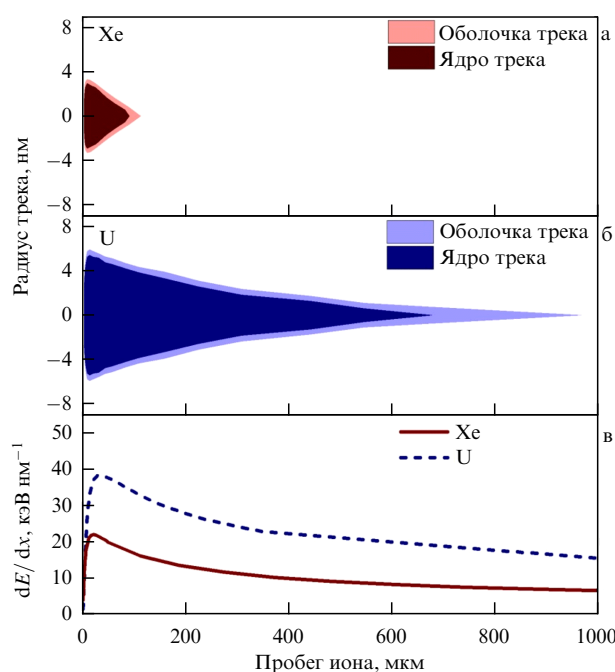


Рис. 29. Области трека в зависимости от положения на траектории для ионов (а) Хе (длина 104 мкм) и (б) U (длина 978 мкм) в оливине [94]. На рисунке в для сравнения показаны зависимости электронных потерь энергии ионов.

ное повреждение, вызванное ионами U, приходится на гораздо более низкие энергии (~ 250 МэВ), чем положение пика Брэгга (~ 1000 МэВ). Это указывает на универсальность несоответствия: максимальная потеря энергии ионами не приводит к максимальному повреждению материала. При торможении высокоэнергичного БТИ максимальное повреждение происходит на большей глубине вдоль траектории ионов, чем та, на которой возникает брэгговский пик электронных потерь энергии иона (рис. 30а). Этот эффект связан с различием в спектрах электронов, генерируемых "медленными" и "быстрыми" ионами и важен для экспериментов и приложений по ионному облучению и для ионной терапии [95].

Используя в качестве начальной информацию о характере и особенностях структурных изменений, удалось построить модель химической активации оливина вдоль траектории налетающего БТИ [95] и сформулировать оригинальную модель жидкостного травления ионных

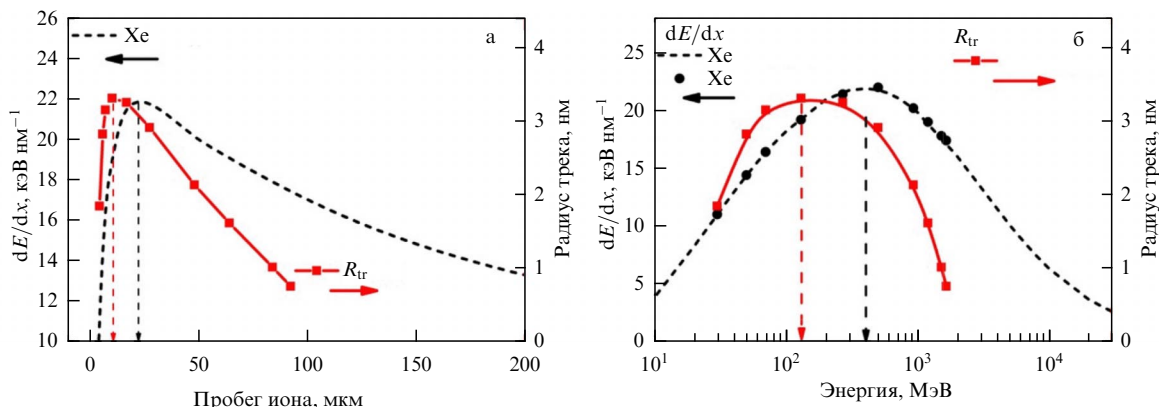


Рис. 30. Размеры треков и потери электронной энергии иона Хе в зависимости от (а) пробега иона и (б) энергии иона [93]. Вертикальные стрелки указывают положение максимумов на соответствующих кривых.

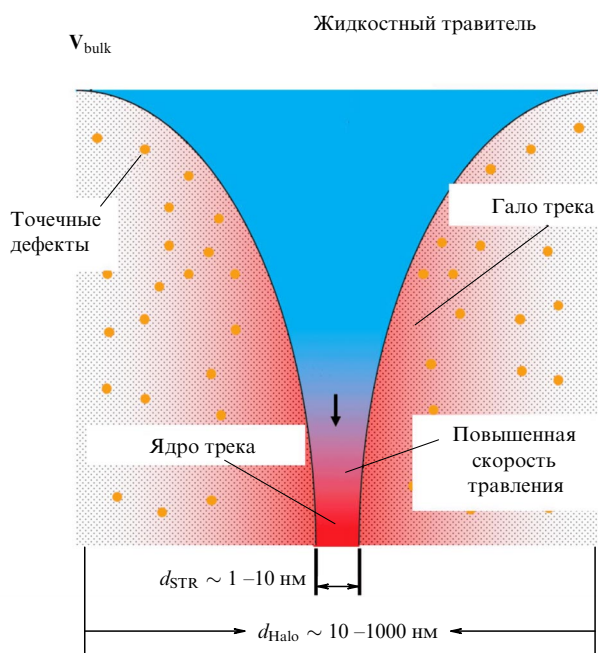


Рис. 31. Иллюстрация модели жидкостного травления ионных треков БТИ в оливине [96].

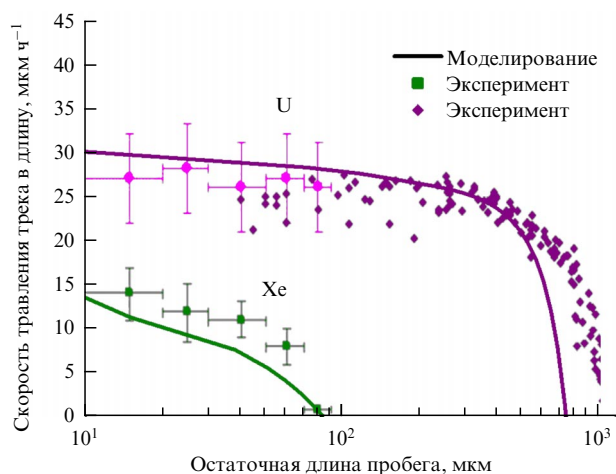


Рис. 32. Зависимости скорости травления треков в длину от остаточной длины пробега по результатам проведённых калибровочных экспериментов [57, 58] и по результатам применения мультимасштабной модели травления [97].

треков БТИ в этом материале [96, 97] (см. иллюстрацию на рис. 31). Важно, что модель не использует подгоночных параметров, что имеет принципиальное значение для процедуры калибровки трековой методики, требующей однозначной связи параметров налетающего иона с параметрами растравленной области.

Модель была оттестирована по результатам калибровочных экспериментов, проведённых в лабораториях GSI (Дармштадт, Германия) и IMP (Ланчжоу, Китай) в рамках эксперимента ОЛИМПИА [57]. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рис. 32.

Проведённое моделирование позволило откалибровать разработанную в ЛЭЧ методику определения зарядов налетающих тяжёлых ядер из состава ГКЛ по параметрам их растравленных треков в метеоритном оливине. Закономерным продолжением этой работы стало описание травления оливина на атомном уровне при помощи оригинальной атомистической модели, которая предсказала формирование некруговых в поперечном сечении нанопор при травлении оливина [98].

4. Новейшие методы обработки и анализа данных трековых детекторов

Эффективная обработка постоянно увеличивающихся объёмов получаемых данных возможна при непрерывном развитии новых методов анализа изображений в трековых детекторах. Новый этап в развитии технологии трековых детекторов связан с достижениями в области сканирующих систем, направленными на повышение эффективности и скорости обработки данных, в первую очередь, за счёт внедрения автоматических методов автономного анализа на основе быстрой электроники и механизированных предметных столов с высокой точностью перемещения.

В ЛЭЧ ФИАН в конце 1990-х – начале 2000-х гг. специально для эксперимента ЕМУ-15 (см. раздел 2.1.2) был создан автоматизированный оптический измерительный комплекс ПАВИКОМ для высокотехнологичной обработки экспериментальных данных в области ядерной физики, физики космических лучей и физики высоких энергий, полученных с помощью трековых детекторов [99, 100]. На ПАВИКОМ в режиме полной автоматизации осуществляется поиск и оцифровка координат треков заряженных частиц в материале детектора,

распознавание и прослеживание треков, систематизация и первичная обработка данных.

Главной отличительной особенностью комплекса ПАВИКОМ от аналогичных сканирующих систем в других лабораториях мира является его независимость от типа обрабатываемых данных. Состоящий из трёх независимых измерительных установок комплекс позволяет обрабатывать данные трековых детекторов различных типов (таких как ядерная эмульсия, пластиковые детекторы, фосфатные стёкла, кристаллы оливинов из метеоритов и т.д.). Установки ПАВИКОМ различаются прежде всего размерами предметных столов, что определяет диапазон перемещения оптической системы в плоскости детектора и, соответственно, допустимые размеры материалов для обработки.

Режим функционирования комплекса ПАВИКОМ удовлетворяет целому ряду жёстких требований к измерительной системе, в том числе, обладает возможностью безостановочного сканирования и обработки изображений в режиме реального времени, возможностью быстрой адаптации к новому оборудованию, возможностью эффективной работы в многопроцессорных системах и участия в распределённых вычислениях. В основе программного обеспечения комплекса лежит модульный подход, обеспечивающий необходимую гибкость при настройке системы и позволяющий производить сканирование различных типов детекторов.

В 2021 – 2022 гг. была проведена масштабная модернизация комплекса, способствующая увеличению скорости сканирования и повышению эффективности обработки данных путём увеличения разрешающей способности и скорости захвата изображения. Модернизация позволила подтвердить статус установок ПАВИКОМ как уникальных для России и соответствующих лучшим образцам мирового уровня [101]. Оборудование для микроскопов ПАВИКОМ было дополнено следующими комплектующими: видеокамерой Mikrotрон EoSens4CXP (монохромная, с фронтальной платой C-Mount), кабелем для видеокамеры CXP 5W5 DIN1.0/2.3 to DIN1.0/2.3 длиной 5 м, платой захвата изображений microEnable 5 ironman AQ8-CXP6D, объективом Nikon CFI Plan Fluor 20X MI, 20x, графической станцией (ПК iRU Corp 719 TWR i9 9900K//64gb/4 + 4TB 7.2k/SSD512GB/RTX2080ti 11GB/NVIDIA GeForce RTX 2080Ti/W10Pr64), светодиодами PT-121-RAX-L15-MPH (Luminus Devices), программируемым источником питания EA-PS 3040-20 и др.

На самой крупной установке комплекса, ПАВИКОМ-1, установлен большой прецизионный стол фирмы MICOS с оптической системой, комплектуемой в соответствии с поставленной экспериментальной задачей. Он включает массивную платформу и подвижный предметный столик размером 500 × 800 мм (рис. 33). Над столом закреплён оптический блок, оснащённый видеокамерой Mikrotрон EoSens 4CXP C-mount, с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Точность позиционирования предметного стола относительно микроскопа составляет 0,5 мкм. Виброустойчивость стола достигается большой массой установки (~ 1 т). С целью уменьшения теплового расширения кронштейн для крепления микроскопа выполнен из гранита. Управление предметным столом осуществляется как с компьютера, так и в ручном режиме с помощью джойстика. Управление аппаратурой комплекса и онлайн-обработка данных осуществляются с помощью современных компьюте-

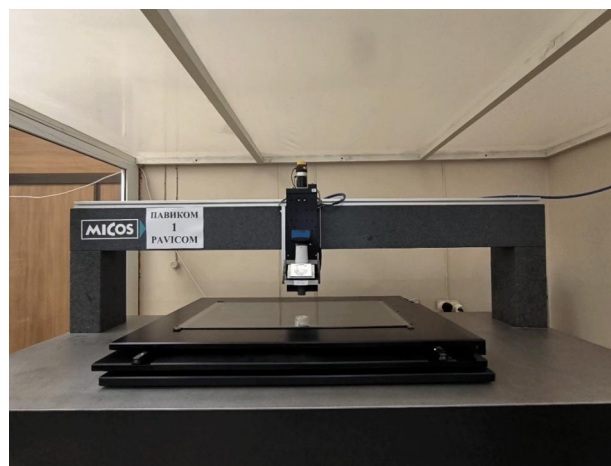


Рис. 33. Установка ПАВИКОМ-1.



Рис. 34. Установка ПАВИКОМ-2.

ров, входящих в состав оборудования каждого микроскопа.

Установленная на ПАВИКОМ-1 видеокамера Mikrotрон EoSens 4CXP C-mount представляет собой устройство на основе монохромной CMOS-цифровой матрицы с разрешением 2336 × 1728 пикселей и максимальной частотой 563 кадра в секунду. В оптической системе используется объектив Nikon CFI Plan Fluor 20X MI, имеющий числовую апертуру 0,75 и дающий 20-кратное увеличение. Аналоговый сигнал с видеокамеры передается по специальному дата-кабелю CXP5W5 на вход платы захвата изображений SiliconSoftware microEnable-5, технические характеристики которой совместимы с параметрами камеры и графической станции. Данная комплектация была разработана в сотрудничестве сотрудников ЛЭЧ ФИАН и Национального института ядерной физики (INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Италия) [102].

Ещё одна установка комплекса, ПАВИКОМ-2 (рис. 34), адаптированная для работы с кристаллами и оптическими стёклами, создана на базе микроскопа ЛОМО МПЭ-11 с интегрированным прецизионным столом немецкой фирмы Carl Zeiss, совмещённым с блоком управления. Оптика микроскопа проецирует изображение объекта на CMOS-камеру с увеличением до 90×.

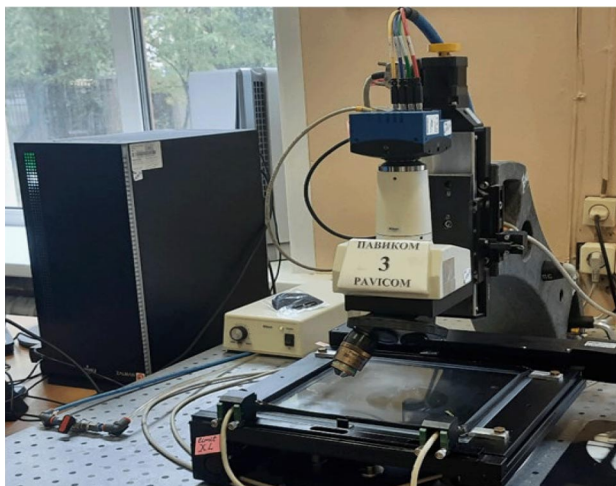


Рис. 35. Установка ПАВИКОМ-3.

Перемещение оптического стола ПАВИКОМ-2 по всем координатам осуществляется шаговыми двигателями, управляемыми контроллером Carl Zeiss, на который поступают команды от компьютера. Точность измерения координат x , y и z составляет 0,25 мкм. Пределы автоматического перемещения стола по оси x составляют от 0 до 120 мм, а по оси y — от 0 до 100 мм; пределы перемещения объектива по координате z — 10 мм.

Установка ПАВИКОМ-3 (рис. 35) использовалась главным образом для сканирования ядерных эмульсий эксперимента OPERA. Моторизованный предметный стол микроскопа ПАВИКОМ-3 аналогичен столу ПАВИКОМ-1, но имеет меньший диапазон перемещения (200 × 200 мм). Вакуумная система для фиксирования эмульсии на предметном столе в процессе сканирования поддерживает давление в пределах 250–500 мбар. На компьютере, подключённом через контроллер управления к механике стола фирмы MICOS, установлена программа PAVICOM/LASSO [103], управляющая движением сканирующей станции.

Графическая станция одновременно с движением стола обрабатывает изображения с камеры Mikrotron EoSens4CXP, подключённой к ней через плату захвата изображений microEnable5. Используемая для начальной обработки плата GPU с технологий CUDA состоит из нескольких потоковых мультипроцессоров SMP и даёт возможность значительного ускорения анализа получаемых данных. В процессе модернизации системы был разработан и реализован программный модуль, позволяющий узлам обмениваться большими массивами данных с высокой скоростью и надёжностью. Модуль обеспечивает передачу данных по TCI/IP-сетям, позволяет контролировать целостность передаваемых данных и демонстрирует надёжную работу в системе, использующей обычную сеть, работающую на скорости 1 Гбит с⁻¹. Гигантский объём обрабатываемых данных требует использования нескольких компьютеров для комплексного анализа. Для начальной идентификации треков в режиме offline после модернизации используется отдельный компьютер с программным обеспечением на базе программного комплекса FEDRA [104]. Итогом модернизации систем ПАВИКОМ стало увеличение скорости сканирования до современного мирового стандарта 190 см² ч⁻¹.

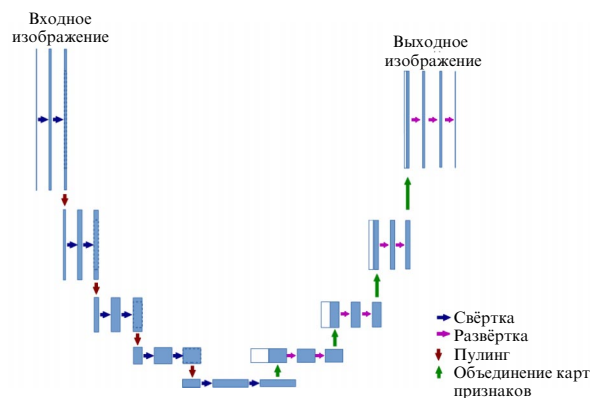


Рис. 36. Архитектура свёрточной нейронной сети U-Net [107].

На ПАВИКОМ проводилась обработка таких экспериментов, как упомянутые в данном обзоре EMU-15, OPERA, ОЛИМПИА и др., обрабатываются и анализируются данные эксперимента SND@LHC и мюнографических исследований объектов культурного наследия на территории России [105, 106]. Такой гигантский объём данных требует инновационных методов анализа изображений, позволяющих обеспечить скорость и качество обработки экспериментальных данных на принципиально новом уровне. Широкое развитие методов распознавания образов привело к разработке новых алгоритмов работы с изображениями.

На начальном этапе обработки изображений в ядерных эмульсиях производится выделение тёмных областей, соответствующих проявленным зёрнам серебра, так называемая сегментация. Для этой процедуры используется предварительная обработка изображений, включающая фильтрацию, бинаризацию и др. (см. [26]). Сотрудники группы ПАВИКОМ (ЛЭЦ, ФИАН) впервые осуществили сегментацию изображений в ядерных эмульсиях при помощи нейронной сети на архитектуре U-Net, которая позволяет эффективно выявлять как глобальные, так и локальные особенности изображений [107]. Преимуществами использования этой сети для сегментации изображений являются открытый код и гибкость системы, которые обеспечивают адаптацию кода под любые аналитические задачи без необходимости создания сети с нуля.

Для сети U-Net, как для любой нейронной сети с обучением, требуется набор "исходное изображение – сегментированное изображение". Процесс обучения заключается в подборе таких параметров сети, при которых она наилучшим образом выполняет задачу сегментации. На ПАВИКОМ-3 была подготовлена обучающая выборка из 1261 исходных изображений размером 1280 × 1024 пикселей каждое и столько же эталонных сегментированных изображений, полученных стандартным методом.

Архитектура U-Net состоит из двух частей: сужающей (свёртки) и расширяющей (пулинга), которые образуют U-образную структуру (рис. 36), что позволяет эффективно извлекать информацию о контексте изображения на разных уровнях иерархии, а затем использовать эту информацию для точной сегментации объектов.

На первом этапе обработки поступающие на вход сужающейся части нейронной сети (левая часть рис. 36) исходные изображения претерпевают следующие преоб-

разования. Вначале в каждом пикселе изображения и его окрестности производится свёртка (convolution) с числовыми матрицами (ядрами) размерностью 3×3 или 5×5 , последовательность пикселей которых отражает определённый признак (линию, угол, пятно и т.п.). Полученные свёрточные изображения преобразуются путём наложения маски (матрицы размером 2×2), которая перемещается по изображению. Внутри каждого из положений матрицы определяется число, обычно максимальное из чисел внутри матрицы (max-pooling), которое становится элементом новой матрицы. Полученная матрица образует карту признаков. В результате этой процедуры размеры карт признаков становятся в два раза меньше свёрточных изображений, а изучаемые признаки усиливаются. Процедура получения свёртки и карт признаков многократно повторяется, при этом размерность карт поэтапно уменьшается. На каждом шаге число карт признаков растёт.

Следующим этапом является обратный процесс — расширение (expansion) полученных карт признаков исходного изображения (правая часть рис. 36), которое производится с помощью числовых матриц с таким же количеством шагов, что и при свёртке. При этом карты признаков на каждом шаге объединяются (concatenation), их число уменьшается, а размерность растёт (up convolution). К концу процедуры остаётся одна матрица. В результате исходное изображение преобразуется в сегментированное. Оно сравнивается с эталонным сегментированным изображением, подготовленным для обучения.

Важным аспектом обучения нейросети на архитектуре U-Net является выбор функции потерь, которая определяет, насколько точно сегментация, произведённая сетью, соответствует эталонному образцу. В применении к обработке изображений в ядерных эмульсиях в качестве функции потерь использовалась бинарная фокальная кросс-энтропия, наиболее оптимальная для задач бинарной классификации [108]. После сравнения преобразованных исходных и эталонных изображений вычисляются поправки к параметрам сети методом обратного распространения ошибки. Для этого используется метод градиентного спуска.

Этапы обработки изображений с помощью нейронной сети определяются эпохами, каждая из которых включает обработку всех образцов. После каждой эпохи обучения изображение на выходе сравнивается с поданной эталонным сегментируемым изображением и вычисляется коэффициент, характеризующий долю площади правильно отмеченных кластеров — коэффициент Жаккара (Jaccard similarity coefficient). Коэффициент Жаккара определяется как отношение площади пересечения (логическая операция "И") к площади объединения (логическая операция "ИЛИ"). Чем ближе его значение к единице, чем точнее сеть выделяет кластеры, относящиеся к сигналу. В начале процедуры с ростом числа эпох степень совпадения сегментированных изображений, полученных сетью, и эталонных изображений повышается. Однако после определённого числа эпох результат работы сети перестаёт улучшаться и даже может ухудшиться (так называемое "переобучение" — одна из проблем глубоких нейронных сетей). Для этого случая был реализован алгоритм, выбирающий наилучший результат из имеющихся эпох.

Программный код для работы с обучающим набором фотографических изображений фрагментов об-

Таблица 2. Модули программного кода для нейросети U-Net и их функции

Наименование модуля	Функции модуля
Импорт всех библиотек	Подключение библиотек Python для извлечения данных из облачного хранилища, их обработки, вывода на экран, внесения в обучающий набор, а также библиотек, необходимых для создания и обучения нейронной сети
Выделение файлов из хранилища и их преобразование	Извлечение, обработка и конвертация в необходимый формат исходных изображений
Image Data Generator	Создание генератора, который на основе известных изображений формирует похожие
Создание нейросети и её обучение (с сохранением наилучшего результата)	Построение свёрточной нейросети и её обучение в течение нескольких эпох
Результаты обучения	Вывод на экран нескольких примеров изображений из обучающего набора и сгенерированного нейросетью изображения (с указанием коэффициента Жаккара)
Сохранение модели	Загрузка в один файл (расширение *.h5) больших объёмов числовых, графических и текстовых данных
Загрузка натренированной модели	Выгрузка на сервер Google Colab файла *.h5, т.е. модели нейросети, что позволяет не обучать сеть заново и сократить время работы
Проверка сети на другом наборе	Проверка работы сети после её обучения. На входе подаются изображения файлов вне обучающего набора, нейронная сеть обрабатывает изображения и генерирует выходной файл в виде изображения с восстановленными кластерами
Intersection over Union (IoU)	Проверка исходного и сгенерированного нейросетью изображений при помощи метода IoU [109]

лучённой ядерной эмульсии был разбит на несколько модулей, каждый из которых выполняет свою конкретную задачу (табл. 2).

Для решения поставленной задачи при выбранной архитектуре нейросети потребовалось восемь эпох обучения. Чистое время обучения сети составило $\sim 1,5$ ч. После каждой эпохи точность работы модели изменялась, причём к концу работы появилась тенденция к её ухудшению. По окончании работы нейросети программа выбрала вариант с наилучшей точностью. Точность, полученная для разных эпох, представлена на рис. 37.

Наилучшее значение коэффициента Жаккара ($\sim 0,912$) было получено в эпохе 6. В эпохах 7 и 8 у нейросети произошло переобучение, следовательно, для имеющегося тренировочного набора изображений добиться большей точности невозможно.

После обучения нейросети была проведена проверка её работы на дополнительных изображениях, которые не были включены в обучающий набор. Для каждой проверки использовался способ сравнения изображений

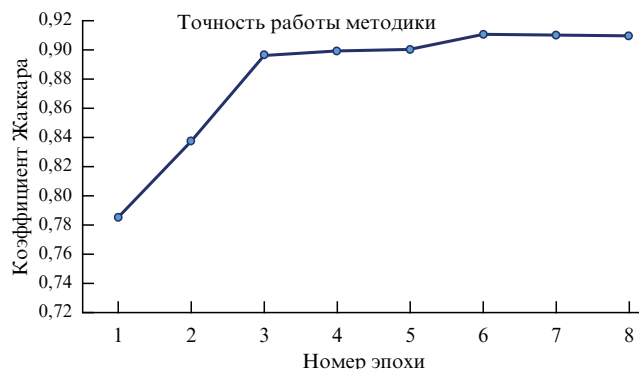


Рис. 37. Точность работы модели для различных эпох обучения.

путём наложения их друг на друга (Intersection over Union). Рисунок 38 демонстрирует работу нейросети по восстановлению кластеров, полученных после её обучения, в случае, когда исходное изображение взято не из обучающего набора. Совпадение с исходным изображением достигает $\sim 93\%$. Увеличение числа изображений обучающего набора приведёт к увеличению точности работы нейронной сети по восстановлению изображений кластеров, однако потребует больших ресурсов оперативной памяти, а также дискового пространства.

Результаты данной работы были представлены на XVI Черенковских чтениях "Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц" [110].

В дальнейшем планируется имплементация блока обработки изображений и выделения кластеров с помощью нейронной сети в работающий программный комплекс ПАВИКОМ. Для этого потребуются создание исполняемого модуля для сегментации изображений, написанного на языке программирования Python, и встраивание его в программный комплекс, написанный на C++. При успешной реализации имплементации данного программного кода и последующем тестировании на сканирующих станциях нового поколения планируется дальнейшая модернизация программного кода и обучение свёрточной нейронной сети на архитектуре 3D U-Net с использованием набора изображений, воспроизводящих трёхмерный объект.

Таким образом, сотрудниками ЛЭЧ непрерывно проводится модернизация измерительного комплекса ПАВИКОМ, расширяющая его технические и аналитические возможности, в результате чего увеличивается

диапазон осуществляемых экспериментов, скорость и качество обработки получаемых данных.

5. Заключение.

Перспективы развития трековой методики в Лаборатории элементарных частиц

Развитие и совершенствование ядерно-физической трековой методики открывает возможности для уникальных исследований в области современной фундаментальной физики, а также позволяет развивать новые подходы к решению широкого круга важнейших прикладных задач.

Трековые детекторы, обладающие высочайшим пространственным разрешением и, как следствие, возможностью разделения треков частиц, сыграли заметную роль в развитии экспериментальной ядерной физики благодаря наглядности формы предоставления данных и возможности получения исчерпывающей пространственной картины изучаемых процессов. Трековая методика применяется в физике высоких энергий и космических лучей, астрофизике, в прикладных исследованиях методом мюонографии.

Первостепенное значение имеют технологии, обеспечивающие быструю и качественную обработку данных трековых детекторов, в частности, автоматизированные сканирующие микроскопы, получившие активное развитие в последние 25 лет. До этого времени обработка данных интегральных трековых детекторов, проводившаяся на оптических микроскопах вручную, требовала огромных затрат труда и времени, а невысокая скорость такой обработки не позволяла получить достаточное статистическое обеспечение данных. Практикуемый в настоящее время метод автоматизированных измерений привёл к увеличению скорости обработки данных более чем на три порядка и, как следствие, позволил обрабатывать большие массивы экспериментальных данных, существенно увеличивая статистику событий. Внедрение оптических автоматизированных комплексов, работающих с программными пакетами на основе объектно-ориентированного программирования, позволяет перейти на более высокий уровень проведения экспериментов, использующих трековую методику регистрации частиц, и существенно расширяет круг задач, где она может быть использована. Следует отметить, что не существует универсальных алгоритмов для обработки изображений в трековых детекторах, что требует непрерывного создания новых оригинальных алгоритмов, в том числе на

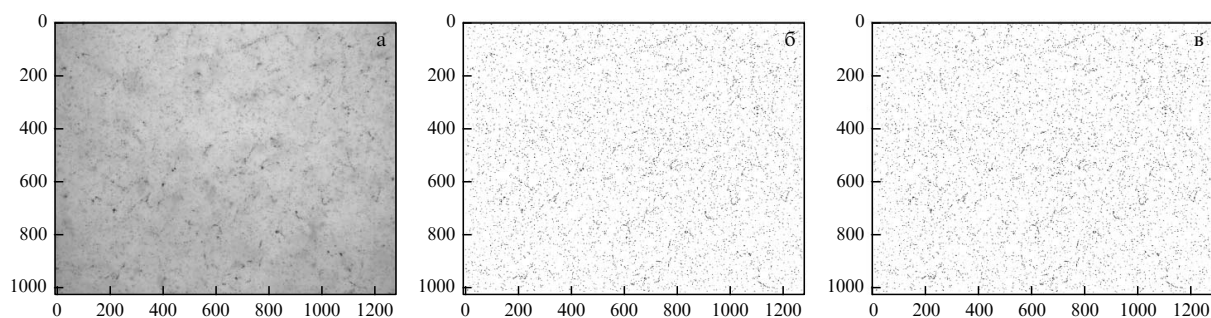


Рис. 38. Изображение вне обучающего набора: (а) исходное изображение размером 1280×1024 пикселей, полученное на измерительном комплексе ПАВИКОМ-3; (б) кластеры, восстановленные с помощью графического процессора, (в) кластеры, восстановленные с использованием нейросети.

основе искусственных нейронных сетей, учитывающих особенности эксперимента и характеристик треков частиц.

Большой интерес представляет использование трековых детекторов на основе фотографической ядерной эмульсии для целого ряда прикладных задач, в частности, для неинвазивного исследования внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов, а также при проведении геологоразведочных работ методом мюонографии. Метод заключается в регистрации степени поглощения потоков космических мюонов при их прохождении через вещество изучаемого объекта [111]. Об актуальности метода свидетельствует широкий круг задач, для решения которых он может применяться, — это мониторинг крупных природных объектов (вулканов, геологических плит, карстовых пещер и т.п.), неразрушающий контроль промышленных объектов (шахт и рудников, установок ядерно-энергетического комплекса, производственных и строительных объектов), мониторинг пожароопасных углепородных отвалов, анализ сейсмических процессов. Метод также может быть использован как перспективное дополнение к традиционным геофизическим методам разведки полезных ископаемых. Отдельный интерес представляют исследования археологических памятников без риска их повреждения. То, что метод мюонографии позволяет решить эти задачи доступным и безопасным способом, было продемонстрировано в целом ряде работ, проведённых в последние годы сотрудниками ЛЭЧ [105, 106, 112], были получены важнейшие результаты. Сочетание возобновления производства ядерной эмульсии в России и наличия высокотехнологичной сканирующей аппаратуры создало условия для развития и широкого применения метода мюонографии — эффективного и одновременно экономичного, экологически безопасного метода для проведения исследований во многих областях научно-практической деятельности.

Таким образом, опыт и квалификация сотрудников ЛЭЧ нашли своё применение в целом ряде важнейших экспериментов, результаты некоторых из них описаны в данном обзоре. Методы и подходы, используемые сотрудниками Лаборатории элементарных частиц, традиционное совмещение ими экспериментальной деятельности и теоретических разработок, большая образовательная деятельность — совокупность этих факторов является базой успешно реализуемых в течение нескольких десятков лет и запланированных на будущее работ на основе трековой методики.

Работы поддержаны Российским научным фондом по программе "Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами" (проект № 23-12-00054).

Список литературы

1. Дайон М И, Мерзон Г И, Федоров В М (Сост.) *Артем Алиханян. Очерки, воспоминания, документы* (М.: РИИС ФИАН, 2000)
2. Мамиджанян Э А, Мерзон Г И (Ред.-сост.) *Артем Алиханян в воспоминаниях друзей и коллег: к 100-летию со дня рождения* (М.: Физматлит, 2008)
3. Ландау Л Д, в сб. *Собрание трудов* Т. 1 (Под ред. Е М Лифшица) (М.: Наука, 1969) с. 482; Landau L J. *Phys. USSR* **8** 201 (1944)
4. Алиханян А И, в сб. *Проблемы ядерной физики и физики элементарных частиц: Сборник статей, посвященных памяти академика А.И. Алиханова* (Отв. ред. Л Б Окунь) (М.: Наука, 1975) с. 3
5. Ariga A et al., in *Particle Physics Reference Library* Vol. 2 (Eds C W Fabjan, H Schopper) (Cham: Springer, 2020) p. 383, https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_9
6. The SHiP Collab., Ahdida C et al. *JINST* **17** P03013 (2022) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/03/P03013>
7. Chernyavskiy M M et al. *JINST* **17** P02002 (2022) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/P02002>
8. Agafonova N et al. (OPERA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **120** 211801 (2018)
9. Kaplon M, Peters B, Ritson D M *Phys. Rev.* **85** 900 (1952)
10. Niu K, Mikumo E, Maeda Y *Prog. Theor. Phys.* **46** 1644 (1971) <https://doi.org/10.1143/PTP.46.1644>
11. DONUT Collab., Kodama K et al. *Phys. Lett. B* **504** 218 (2001)
12. Agafonova N et al. *JINST* **4** P06020 (2009) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/06/P06020>
13. The ATLAS Collab., Aad G et al. *JINST* **3** S08003 (2008) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003>
14. Болдырев А С и др. *Приборы и техника эксперимента* (3) 27 (2012); Boldyrev A S et al. *Instrum. Exp. Tech.* **55** 323 (2012)
15. Гинзбург В Л, Франк И М *ЖЭТФ* **16** 15 (1946); Ginzburg V L, Frank I M *J. Phys. USSR* **9** 353 (1945)
16. Dolgoshein B *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **326** 434 (1993) [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90846-A](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90846-A)
17. the ATLAS TRT Collab., Abat A et al. *JINST* **3** P06007 (2008) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/06/P06007>
18. Cornelissen T et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **119** 032014 (2008)
19. ATLAS Collab., Aad G et al. *Phys. Lett. B* **716** 1 (2012)
20. Boos E G et al., Experiments at CERN in 1996 (Geneva: CERN, 1996) p. 122
21. Добротин Н А и др. *Изв. РАН. Сер. физическая* **63** 485 (1999); Dobrotin N A et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **63** 393 (1999)
22. Дрёмин И М, Кайдалов А Б *УФН* **176** 275 (2006); Dremin I M, Kaidalov A B *Phys. Usp.* **49** 263 (2006)
23. Котельников К А и др. *Наука – производству* (12) 29 (2000)
24. Dremin I M et al. *Phys. Lett. B* **499** 97 (2001)
25. Дремин И М, Иванов О В, Нечитайло В А *УФН* **171** 465 (2001); Dremin I M, Ivanov O V, Nechitailo V A *Phys. Usp.* **44** 447 (2001)
26. Полухина Н Г "Исследования актуальных проблем ядерной физики на основе методики полностью автоматизированной обработки трековых детекторов на многофункциональной установке ПАВИКОМ", Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 2006)
27. Апанасенко А В и др. *Письма в ЖЭТФ* **30** 157 (1979); Apanasenko A V et al. *JETP Lett.* **30** 145 (1979)
28. Agafonova N et al. *Eur. Phys. J. C* **74** 2986 (2014)
29. Agafonova N et al. *Phys. Lett. B* **691** 138 (2010)
30. Agafonova N et al. (OPERA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **115** 121802 (2015)
31. Polukhina N, Konovalova N, Shchedrina T *Physics* **5** 499 (2023)
32. Acampora G et al. *JINST* **19** P05067 (2024); arXiv:2210.02784
33. Di Crescenzo A "Neutrino expectations at advanced SND@LHC", Report on 14th SND@LHC Collaboration Meeting, 4–7 Sept. 2023
34. Roesler S, Engel R, Ranft J, in *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications* (Eds A Kling et al.) (Berlin: Springer, 2001) p. 1033, https://doi.org/10.1007/978-3-642-18211-2_166
35. Ahdida C et al. *Front. Phys.* **9** 788253 (2022) <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.788253>
36. Albanese R et al. (SND@LHC Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **131** 031802 (2023)
37. Kaplon M F et al. *Phys. Rev.* **88** 295 (1952)
38. The JACEE Collab., Burnett T H et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **251** 583 (1986)

39. RUNJOB Collab., Apanasenko A V et al. *Astropart. Phys.* **16** 13 (2001)
40. Osedlo V I et al., in *Proc. 30th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC 2007* Vol. 4 (Mexico: Yucatan Autonoma Univ., 2007) p. 667
41. Osedlo V I et al., in *Proc. 30th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC 2007* Vol. 4 (Mexico: Yucatan Autonoma Univ., 2007) p. 663
42. Манагадзе А К и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **71** 530 (2007); Managadze A K et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **71** 513 (2007) <https://doi.org/10.3103/S1062873807040223>
43. Манагадзе А К "Особенности пространственных характеристик ядерных взаимодействий космических лучей сверхвысоких энергий", Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: НИИЯФ МГУ, 2010)
44. Лохтин И П, Манагадзе А К, Снигирев А М *ЯФ* **76** 645 (2013) <https://doi.org/10.7868/s0044002713040089>; Lokhtin I P, Managadze A K, Snigirev A M *Phys. Atom. Nucl.* **76** 602 (2013) <https://doi.org/10.1134/S1063778813040078>
45. Павлюченко В П *Изв. АН СССР. Сер. физическая* **63** 457 (1999)
46. Гинзбург В Л и др. *Докл. РАН* **402** 472 (2005); Ginzburg V L et al. *Dokl. Phys.* **50** 283 (2005)
47. Cecchini S et al., in *Proc. 16th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research* (Ed. B Warmbein) (Noordwijk: ESA Publ. Division, 2003) p. 529
48. Fowler P H et al. *Astrophys. J.* **314** 739 (1987)
49. Binns W R et al. *Astrophys. J.* **346** 997 (1989)
50. Weaver B A, Westphal A J *Astrophys. J.* **569** 493 (2002)
51. Donnelly J et al. *Astrophys. J.* **747** 40 (2012)
52. Багуля А В и др. *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42** (5) 49 (2015); Bagulya A V et al. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **42** 152 (2015) <https://doi.org/10.3103/S1068335615050073>
53. Александров А Б и др. *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40** (5) 29 (2013); Aleksandrov A B et al. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **40** 126 (2013) <https://doi.org/10.3103/S1068335613050059>
54. Horn P, Maurette M, Von Oertzen W Z. *Naturforsch. A* **22** 1793 (1967) <https://doi.org/10.1515/zna-1967-1117>
55. Flerov G N, Ter-Akopian G M *Pure Appl. Chem.* **53** 909 (1981) <https://doi.org/10.1351/pac198153050909>
56. Александров А Б и др. *Вестн. Отделения наук о Земле РАН* **1** NZ2003 (2009)
57. Alexeev V et al. *Astrophys. J.* **829** 120 (2016)
58. Багуля А В и др. *Письма в ЖЭТФ* **97** 811 (2013); Bagulya A V et al. *JETP Lett.* **97** 708 (2013) <https://doi.org/10.1134/S0021364013120047>
59. Тан Найнг Со "Облученные космическими лучами метеоритные оливины как инструмент поиска сверхтяжелых элементов в природе", Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 2022)
60. Alexandrov A et al. *Adv. Space Res.* **70** 2674 (2022)
61. Alexandrov A B et al. *Phys. At. Nucl.* **85** 446 (2022) <https://doi.org/10.1134/S1063778822050039>
62. Комаров Ф Ф *УФН* **187** 465 (2017); Komarov F F *Phys. Usp.* **60** 435 (2017)
63. Medvedev N et al. *J. Appl. Phys.* **133** 100701 (2023)
64. Price P B et al. *Phys. Rev.* **164** 1618 (1967)
65. Perron C et al. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. D Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **15** 231 (1988) [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(88\)90137-9](https://doi.org/10.1016/1359-0189(88)90137-9)
66. Green P F, Bull R K, Durrani S A *Nucl. Instrum. Meth.* **157** 185 (1978)
67. Villa F et al. *Radiat. Meas.* **28** 543 (1997)
68. Dalton H et al. *Chem. Geol.* **558** 119899 (2020)
69. Spohr R et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **268** 676 (2010)
70. Kozhina E P et al. *Appl. Sci.* **11** 1375 (2021)
71. Choudhury N, Singh F, Sarma B K *Radiat. Eff. Defects Solids* **168** 498 (2013)
72. Kamaev G N et al. *Proc. SPIE* **11022** 1102213 (2019) <https://doi.org/10.1117/12.2522161>
73. Pompos A, Durante M, Choy H *JAMA Oncol.* **2** 1539 (2016) <https://doi.org/10.1001/jamaoncol.2016.2646>
74. Gunderson L L, Tepper J E *Clinical Radiation Oncology* (Cham: Elsevier, 2015) e-book
75. Cucinotta F A, To K, Cacao E *Life Sci. Space Res.* **13** 1 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.01.005>
76. Douki T et al. *Int. J. Radiat. Biol.* **82** 119 (2006)
77. Ferruz M B et al., in *Nanoscale Insights into Ion-Beam Cancer Therapy* (Ed. A Solov'yov) (Cham: Springer, 2017) p. 379, https://doi.org/10.1007/978-3-319-43030-0_12
78. Murat M, Akkerman A, Barak J *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3046 (2009) <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2007646>
79. Tracy C L et al. *Nat. Commun.* **6** 6133 (2015)
80. Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York: Pergamon Press, 1985)
81. Medvedev N A, Rymzhanov R A, Volkov A E *J. Phys. D* **48** 355303 (2015)
82. Medvedev N, Volkov A E *J. Phys. D* **53** 235302 (2020)
83. Szenes G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **298** 76 (2013)
84. Itoh N, Marshall Stoneham A *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **146** 362 (1998)
85. Yavlinskii Yu N *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **166–167** 35 (2000)
86. Митереv А М *УФН* **172** 1131 (2002); Miterev A M *Phys. Usp.* **45** 1019 (2002)
87. Каганов М И, Лифшиц И М, Танатаров Л В *ЖЭТФ* **31** 232 (1956); Kaganov M I, Lifshitz I M, Tanatarov L V *Sov. Phys. JETP* **4** 173 (1957)
88. Toulemonde M, Dufour C, Paumier E *Phys. Rev. B* **46** 14362 (1992)
89. Medvedev N et al. *Adv. Theory Simul.* **5** 2200091 (2022) <https://doi.org/10.1002/adts.202200091>
90. Rymzhanov R A, Medvedev N A, Volkov A E *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **388** 41 (2016)
91. Medvedev N A, Rymzhanov R A, Volkov A E *J. Phys. D* **48** 355303 (2015)
92. Medvedev N, Volkov A E *J. Appl. Phys.* **131** 225903 (2022)
93. Rymzhanov R A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **440** 25 (2019)
94. Tsujii H *J. Phys. Conf. Ser.* **777** 012032 (2017)
95. Gorbunov S A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **365** 656 (2015)
96. Gorbunov S A et al. *J. Phys. D* **50** 395306 (2017)
97. Gorbunov S A, Rymzhanov R A, Volkov A E *Sci. Rep.* **9** 15325 (2019)
98. Gorbunov S A et al. *J. Phys. Chem. C* **127** 5090 (2023)
99. Aleksandrov A B et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **535** 542 (2004)
100. Александров А Б и др. *Изв. вузов. Физика* (10) 61 (2007); Aleksandrov A B et al. *Russ. Phys. J.* **50** 1026 (2007) <https://doi.org/10.1007/s11182-007-0148-7>
101. Alexandrov A et al. *Measurement* **187** 110244 (2022)
102. Alexandrov A, De Lellis G, Tioukov V *Sci. Rep.* **9** 2870 (2019)
103. Alexandrov A, Vladymyrov M, Tioukov V *Zenodo* (2020) <https://doi.org/10.5281/zenodo.4385773>
104. Tioukov V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **559** 103 (2006)
105. Александров А Б и др. *ЭЧАЯ* **53** 1423 (2022); Alexandrov A B et al. *Phys. Part. Nucl.* **53** 1146 (2022) <https://doi.org/10.1134/S1063779622060028>
106. Alexandrov A et al., Preprints 2023090820 (2023) <https://doi.org/10.20944/preprints202309.0820.v1>
107. Ronneberger O, Fischer P, Brox T, in *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention — MICCAI 2015* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9351, Eds N Navab et al.) (Cham: Springer, 2015) p. 234, https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28; arXiv:1505.04597
108. Lin T-Y et al., arXiv:1708.02002, Subjects: Computer Vision and Pattern Recognition (2018)
109. Intersection over Union (IoU). CloudFactory Ltd, <https://hasty.ai/docs/mp-wiki/metrics/iou-intersection-over-union>

110. Васильев В Т и др. "Нейронные сети для обработки ядерных эмульсий", в сб. *XVI Черенковские чтения: Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц, Москва, ФИАН, 18 апреля 2023 г.*, https://x4u.lebedev.ru/che2023/program_ru-RU.html; *Ядерная физика и инжиниринг* **15** (1) 31 (2024) <https://doi.org/10.56304/S2079562923010293>
111. Александров А Б и др. *УФН* **187** 1375 (2017); Aleksandrov A B et al. *Phys. Usp.* **60** 1277 (2017)
112. Александров А Б и др. *ЖЭТФ* **161** 590 (2022); Aleksandrov A B et al. *J. Exp. Theor. Phys.* **134** 506 (2022) <https://doi.org/10.1134/S106377612204001X>

Track technique in present-day physics of atomic nuclei and elementary particles, astrophysics, and nanotechnology

S.A. Gorbunov^(a), A.E. Volkov^(b), K.I. Zhukov^(c), N.S. Konovalova^(d), N.G. Polukhina^(e), N.I. Starkov^(f), T.V. Shchedrina^(g)
Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
E-mail: ^(a) s.a.gorbunov@mail.ru, ^(b) a.e.volkov@list.ru, ^(c) Konstantin.Zhukov@cern.ch, ^(d) ninakonovalova@yandex.ru,
^(e) polukhinang@lebedev.ru, ^(f) starkovni@lebedev.ru, ^(g) tvshchedrina@gmail.com

Track detectors, contributing to the understanding of the structure and properties of matter, are widely used in fundamental and applied research using modern accelerators, in studying the nature of particles of cosmic origin, and for muography. The advantage of the technique is the visibility of the results and the possibility of reconstructing trajectories, interaction vertices, and particle decay points with an accuracy of several microns. Specific features of various experiments, requiring original solutions in their design, data processing, and interpretation, have brought about the multidisciplinary development of the subject. In addition to the tasks of experimental physics, the evolution of the track technique is determined by the problems of innovative technologies and the creation of new materials. These trends can be traced in the work of the Laboratory of Elementary Particles of the Lebedev Physical Institute, which has been using track detectors of various types in its experiments for many decades. The review presents the ideas and results of world-class experimental and modeling studies conducted previously and currently being conducted with the participation of laboratory researchers, as well as those planned for the near future.

Keywords: experiments based on track technique, modeling of track formation processes, methods for processing and analyzing track detector data

PACS numbers: 29.40.Gx, **61.85. + p**, 95.55.Vj

Bibliography — 112 references

Received 30 September 2023, revised 27 October 2023

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (8) 826–852 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (8) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.10.039585>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.10.039585>