

ПОИСК ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО В КАНАЛЕ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОГО ДЕТЕКТОРА ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA

*Н. Ю. Агафонова*¹, *А. Б. Александров*², *А. М. Анохина*^{3,4},
*А. В. Багуля*², *М. С. Владимиров*², *Ю. А. Горнушкин*⁵,
Т. А. Джатдоев^{4,*}, *С. Г. Дмитриевский*⁵, *Р. И. Еникеев*¹,
*С. Г. Земскова*⁵, *Д. К. Левашев*^{3,4}, *А. С. Мальгин*¹,
*В. А. Матвеев*¹, *Д. В. Наумов*⁵, *В. В. Никитина*⁴,
*Н. М. Окатьева*², *А. Г. Ольшевский*⁵, *Д. А. Подгрудков*^{3,4},
*Н. Г. Полухина*², *Т. М. Роганова*⁴, *О. Г. Ряжская*¹, *В. Г. Рясный*¹,
*Н. И. Старков*², *В. Л. Трошина*^{3,4}, *М. М. Чернявский*²,
*А. В. Чуканов*⁵, *И. Р. Шакирьянова*¹, *А. С. Шешуков*⁵,
*Г. П. Шозиёв*⁴, *Т. В. Щедрина*², *В. Ф. Якушев*¹

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

² Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

³ Физический факультет Московского государственного
университета им. М. В. Ломоносова, Москва

⁴ Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

⁵ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	1347
ПРЕДШЕСТВЕННИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA	1349
Эксперимент DONUT	1350
Эксперимент CHORUS	1352
Эксперимент NOMAD	1353
ЭКСПЕРИМЕНТ OPERA	1353
Пучок CNGS	1354
Электронные детекторы	1356

*E-mail: timur1606@gmail.com

Эмульсионные детекторы	1359
Автоматические сканирующие микроскопы	1360
РЕКОНСТРУКЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОБЫТИЯ ГИБРИД- НЫМ ДЕТЕКТОРОМ OPERA И ПРОЦЕДУРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ	1362
Моделирование отклика детектора	1363
Восстановление характеристик событий электронными детекторами	1364
Реконструкция треков в ядерной эмульсии	1367
Оценка параметров частиц по эмульсионным данным	1371
Процедура поиска распада короткоживущей частицы	1372
Характеристики фоновых событий и стандартные критерии идентификации взаимодействий ν_τ	1373
Возможность многомерного поиска взаимодействий ν_τ	1376
КАНДИДАТЫ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ν_τ В ЭМУЛЬСИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA	1377
СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA	1380
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	1381
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	1381

ПОИСК ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО В КАНАЛЕ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОГО ДЕТЕКТОРА ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA

Н. Ю. Агафонова^{1,4}, *А. Б. Александров*², *А. М. Анохина*^{3,4},
*А. В. Багуля*², *М. С. Владимиров*², *Ю. А. Горнушкин*⁵,
Т. А. Джатдоев^{4,*}, *С. Г. Дмитриевский*⁵, *Р. И. Еникеев*¹,
*С. Г. Земскова*⁵, *Д. К. Левашев*^{3,4}, *А. С. Мальгин*¹,
*В. А. Матвеев*¹, *Д. В. Наумов*⁵, *В. В. Никитина*⁴,
*Н. М. Окатьева*², *А. Г. Ольшевский*⁵, *Д. А. Подгрудков*^{3,4},
*Н. Г. Полухина*², *Т. М. Роганова*⁴, *О. Г. Рязская*¹, *В. Г. Рясный*¹,
*Н. И. Старков*², *В. Л. Трошина*^{3,4}, *М. М. Чернявский*²,
*А. В. Чуканов*⁵, *И. Р. Шакирьянова*¹, *А. С. Шешуков*⁵,
*Г. П. Шозиёв*⁴, *Т. В. Щедрина*², *В. Ф. Якушев*¹

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

² Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

³ Физический факультет Московского государственного
университета им. М. В. Ломоносова, Москва

⁴ Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

⁵ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В настоящей работе рассматривается статус международного эксперимента OPERA, в котором проводится поиск осцилляций нейтрино $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. После общего введения описано развитие эмульсионной методики в предшествующих OPERA экспериментах — DONUT и CHORUS. Кратко рассмотрен эксперимент NOMAD, в котором подробно исследовались свойства взаимодействий ν_μ . Приводятся характеристики нейтринного пучка ЦЕРН–Гран-Сассо (CNGS), рассматривается структура гибридного детектора OPERA, функции его подсистем, дан краткий обзор технологии автоматической обработки эмульсий. Обсуждаются погрешности восстановления характеристик события с помощью электронных и эмульсионных детекторов, описана принятая в эксперименте схема идентификации взаимодействий ν_τ . Рассмотрены основные источники фона при поиске осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Представлены топологии двух первых событий-кандидатов на взаимодействие таонного нейтрино в эмульсионном детекторе

*E-mail: timur1606@gmail.com

эксперимента OPERA. Наконец, кратко обсуждаются возможности повышения эффективности выделения взаимодействий ν_τ с помощью многомерных критериев.

This article highlights the status of the international OPERA experiment on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ neutrino oscillation search. After general introduction, we give a sketch of the emulsion technique progress during operation of the OPERA predecessors — the DONUT and the CHORUS experiments. The NOMAD experiment, which allowed a detailed study of the ν_μ interaction properties, is briefly described. Characteristics of the CERN–Gran Sasso (CNGS) neutrino beam are summarized; the structure of the OPERA hybrid detector and its subdetectors' functions are examined; a brief review of the automated emulsion scanning technique is given. Then we discuss uncertainties of the event parameters estimated by means of the electronic and emulsion detectors and describe the conventional ν_τ identification chain adopted in the experiment. The main sources of background for the $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation search are reviewed. The topologies of the first two ν_τ candidates observed in the emulsion detector of the OPERA experiment are described. Finally, the possibilities for enhancing of the ν_τ interaction selection efficiency by means of multidimensional criteria are briefly discussed.

PACS: 29.40.Rg; 29.40.Mc; 29.85.Fj

ВВЕДЕНИЕ

Хотя явление нейтринных осцилляций было предсказано более 50 лет назад [1], экспериментальные результаты, которые могут быть с уверенностью интерпретированы как свидетельство осцилляций, появились сравнительно недавно.

Первые результаты, которые могли объясняться феноменом осцилляций, были получены в экспериментах с солнечными нейтрино [2, 3]. В экспериментах с атмосферными нейтрино [4–6], нейтрино от реакторов [7] и ускорительными нейтрино [8–10] наблюдались осцилляции и были измерены их параметры, разница квадратов масс и углы смешивания массовых состояний нейтрино, входящие в матрицу смешивания Понтекорво–Маки–Накагава–Саката (PMNS) [1, 11]. В 2012 г. в реакторном эксперименте Daya Bay [12] было измерено отличное от нуля значение угла смешивания θ_{13} в матрице PMNS, который оставался неизвестным до тех пор.

Однако, несмотря на очевидные успехи в экспериментальном исследовании осцилляций нейтрино, ряд проблем еще ждет своего решения. Так, до сих пор большинство экспериментов по поиску осцилляций нейтрино работало в режиме «на исчезновение», т. е. регистрировался дефицит нейтрино определенного типа на некотором расстоянии от источника. В то же время модели предсказывают потоки нейтрино нового типа, которые появляются в результате осцилляций, и прямая регистрация появления этих нейтрино служила бы убедительным аргументом в пользу справедливости теоретических моделей. Для случая канала $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ до сих пор не была проведена индивидуальная (event-by-event) идентификация тау-нейтрино, возникающего

в конечном состоянии (в дальнейшем изложении — задача «прямого» поиска осцилляций в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$). Пробег L тау-лептона с лоренц-фактором γ $L = c\tau\gamma \approx 87$ мкм $\cdot \gamma$, поэтому в эксперименте по идентификации тау-нейтрино в канале заряженного слабого тока путем наблюдения трека тау-лептона требуется высокое (~ 1 мкм) пространственное разрешение. С другой стороны, для регистрации достаточно большого (~ 10) количества событий, инициированных тау-нейтрино, масса детектора также должна быть весьма велика (~ 1 кт).

Эти в значительной степени противоречивые требования делают задачу прямого поиска осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ чрезвычайно сложной. В настоящий момент единственная методика регистрации частиц высокой энергии, способная обеспечить выполнение изложенных выше условий, — использование ядерных фотоэмульсий. В детекторе эксперимента OPERA [13], перед которым стоит задача прямого поиска событий от ν_τ , мишенная часть составлена из ≈ 150 тыс. эмульсионных блоков («кирпичей» — bricks), каждый из которых состоит из эмульсионных пластин, прослоенных свинцом, и имеет массу $\approx 8,3$ кг. Таким образом, полная масса мишени составляет около 1250 т, при этом сохраняется типичное для ядерной фотоэмульсии разрешение ~ 1 мкм.

OPERA является крупнейшим эмульсионным экспериментом в истории, общая масса эмульсионных пластин в котором составляет около 100 т. Осуществление эмульсионного эксперимента такого масштаба стало возможным благодаря разработке технологии массового производства ядерных фотоэмульсий компанией Fuji (Япония) вместе со специалистами университета г. Нагойи и значительному прогрессу в развитии систем автоматического просмотра фотоэмульсий, которые начали применяться в экспериментах-предшественниках DONUT [14] и CHORUS [15]. Кроме ядерных фотоэмульсий, OPERA использует и электронные детекторы, которые служат для определения эмульсионного блока, содержащего вершину взаимодействия нейтрино, а также могут решать ряд других задач. В настоящем обзоре описано состояние работ по прямому поиску осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ с помощью гибридного детектора эксперимента OPERA.

Теме феноменологии смешивания нейтрино и осцилляций (в вакууме и в среде) посвящено несколько специализированных обзоров, например, [16] (разд. III, см. также VII), [17] (п. 1.3–1.5), поэтому здесь мы ограничимся лишь рядом ссылок. Обзор экспериментальных данных, посвященных наблюдению и изучению осцилляций, сделан в работе [16] (для солнечных нейтрино — в разд. IV, атмосферных нейтрино — в разд. V; эксперименты с использованием реакторов и ускорителей рассматриваются в разд. VI); [17] (разд. 2).

Теоретические модели, в которых возникает явление смешивания нейтрино, обсуждаются в статьях [18–20]. Значительная часть работы Particle Data Group [21] посвящена обзору экспериментальных данных по осцил-

ляциям нейтрино, включая последние результаты коллаборации Daya Bay. Сравнительно раннее изложение феноменологии нейтринных осцилляций, сделанное вскоре после публикации [4], содержится в [22]. Краткое обсуждение рассматриваемых вопросов можно найти, например, в [23, 24]. Примеры более современных работ — [25, 26]. Нередко достаточно подробное изложение можно найти и в обзорах, посвященных различным аспектам физики нейтрино, таким как безнейтринный двойной бета-распад [27]. Упомянем также одну из статей, написанных на русском языке, — [28]. Следует отметить, что список приведенных нами работ обзорного характера далеко не полный.

В остальной части настоящей работы речь пойдет о методике поиска и идентификации взаимодействий таонных нейтрино (в дальнейшем — «событий-кандидатов») в детекторе OPERA. Ограничения на параметры осцилляций могут быть получены с использованием выборки событий-кандидатов по той или иной стандартной методике, например, [29] или [30].

В разд. 1 описаны непосредственные предшественники работ коллаборации OPERA — эксперименты DONUT, CHORUS и NOMAD [31]. Элементы детектора OPERA рассматриваются в разд. 2. Разд. 3 посвящен изложению методики восстановления параметров событий гибридным детектором и описанию схемы обработки данных в эксперименте. Там же содержится обсуждение характеристик фоновых событий. Расчеты показывают, что эффективность идентификации событий от ν_τ может быть существенно увеличена в случае использования многомерных критериев классификации ν_μ/ν_τ (см. п. 3.7). Характеристики кандидатов на взаимодействие ν_τ в эмульсионном детекторе представлены в разд. 4. Наконец, следует краткий обзор современного состояния эксперимента (разд. 5) и заключение.

1. ПРЕДШЕСТВЕННИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA

Методика наблюдения заряженных частиц с помощью фотоэмульсий давно и успешно используется в физике высоких энергий (см., например, [32, 33]). В последнее время в связи с развитием средств автоматического сканирования метод ядерных эмульсий переживает «второе рождение» [34]. Непосредственными предшественниками OPERA можно назвать три эксперимента — DONUT, CHORUS и NOMAD. В первых двух была опробована методика, во многом схожая с OPERA. Эксперимент NOMAD накопил рекордную статистику детально реконструированных взаимодействий мюонных нейтрино [35], что позволило провести тонкую настройку параметров генератора событий эксперимента OPERA [36], который используется для моделирования и интерпретации данных в задаче прямого поиска осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

1.1. Эксперимент DONUT. Хотя открытие τ -лептона состоялось достаточно давно — в 1975 г. [37], и к тому времени уже были известны два типа нейтрино — электронное [38] и мюонное [39], прямое обнаружение третьего, таонного, нейтрино в эксперименте DONUT (Direct Observation of NU Tau) произошло лишь в 2001 г. [40]. Причинами являются трудность создания интенсивного пучка τ -нейтрино, а также сложность поиска и идентификации событий, инициированных ν_τ .

Топология взаимодействий всех трех типов нейтрино по каналу нейтрального слабого тока (в дальнейшем используется обозначение NC — neutral current) качественно схожа. Самым надежным способом идентификации событий от ν_τ является использование взаимодействий в канале заряженного слабого тока — charged current (CC) с рождением короткоживущего тау-лептона, наличие которого и является признаком ν_τ . Именно использование ядерных фотоэмульсий сделало возможным прямое наблюдение треков тау-лептона в эксперименте DONUT.

Для указания на участок эмульсии, содержащий треки продуктов взаимодействия, использовалась техника сменных эмульсионных пластин (changeable sheets, CS), расположенных на расстоянии 1 см по направлению первичного пучка от границы эмульсионных блоков. Электронные детекторы состояли из трековой системы (scintillation fiber tracker, SFT) — 44 плоскости тонких сцинтилляционных волокон диаметром 0,5 мм — и спектрометра (магнит, шесть дрейфовых камер, электромагнитный калориметр и отдельный детектор для идентификации мюонов, расположенный за калориметром по направлению первичного пучка). Детекторы системы SFT позволяли восстанавливать треки заряженных частиц с хорошим пространственным разрешением ($\sim 0,3$ мм [14]). Импульс мюонов измерялся спектрометром с относительной погрешностью $\Delta p/p = 11\%$ для $p = 20$ ГэВ/с и 100% для $p = 250$ ГэВ/с. Для частиц малых энергий импульс измерялся методом многократного кулоновского рассеяния, который обеспечивал разрешение $\Delta p/p = 23\%$ для $0,8$ ГэВ/с и 30% для $1,5$ ГэВ/с.

Экспозиция эмульсионного детектора на пучке ускорителя Tevatron (FNAL) с энергией 800 ГэВ проводилась в 1997 г. и составила $3,6 \cdot 10^{17}$ p.o.t. (протонов на мишени, protons on target). Рождение τ -нейтрино происходило в основном от распада D_s -мезонов.

Локализация взаимодействий нейтрино выполнялась с использованием электронных детекторов SFT в два этапа. На первом проводилась автоматическая реконструкция вершины взаимодействия, что позволило уменьшить количество кандидатов на взаимодействие нейтрино в детекторе в ≈ 300 раз, сохранив при этом высокую эффективность поиска ($\approx 98\%$ для CC-взаимодействий). На втором этапе выполнялся визуальный просмотр событий; в среднем одно из 20 событий удовлетворяло критериям отбора при визуальном просмотре. В результате для анализа было отобрано 866 кандидатов на

взаимодействие нейтрино в детекторе, полная эффективность поиска которых составляла $0,72 \pm 0,06$ для случая СС-событий. После проявки эмульсий проводилось их автоматическое сканирование. Методика автоматического сканирования ядерных эмульсий, начиная с 80-х гг., развивалась в Университете г. Нагоя (Япония); техника, использованная при обработке материала эксперимента DONUT, описана в [41].

Как и в эксперименте OPERA, основными источниками фона являлись события с рождением короткоживущих очарованных адронов по каналу заряженного слабого тока, а также неупругие взаимодействия адронов с 1 или 3 заряженными адронами в конечном состоянии. Для классификации событий и выделения взаимодействий, инициированных ν_τ , использовались многомерные байесовы критерии. Первые результаты, основанные на наблюдении

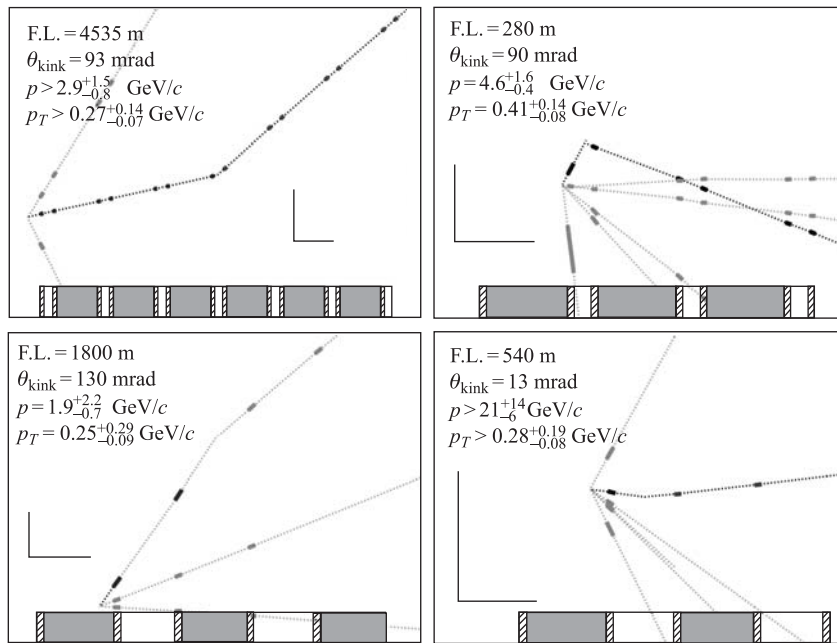


Рис. 1. Четыре кандидата на взаимодействие тау-нейтрино в детекторе эксперимента DONUT [40]. Параметры событий, указанные на рисунке: F.L. — длина трека короткоживущей частицы (мкм); θ_{kink} — угол излома трека кандидата в таоны (мрад); p — импульс дочерней частицы, возникшей от распада (ГэВ/с); p_T — компонента импульса дочерней частицы, перпендикулярная направлению первичного пучка (ГэВ/с). Положение пассивных элементов эмульсионного детектора (стальных пластин) обозначено серым цветом, эмульсии — штриховкой, пластиковые основы эмульсий не заштрихованы. Масштаб указан с помощью двух перпендикулярных отрезков: вертикальный длиной 0,1 мм и горизонтальный — 1 мм

4 событий-кандидатов (рис. 1), были опубликованы в 2001 г. [40]. В работе [42] приводятся характеристики 9 событий-кандидатов при среднем фоне 1,5 события. При этом обнаруженные ν_τ могут являться как таонными нейтрино, так и антинейтрино. Также в эксперименте DONUT было впервые измерено сечение взаимодействия таонных нейтрино высокой энергии с веществом детектора.

Открытие таонного нейтрино коллаборацией DONUT является самым значительным достижением эмульсионной методики за последнее время.

1.2. Эксперимент CHORUS. В эксперименте CHORUS (CERN Hybrid Oscillation Research apparatus) с помощью эмульсионной методики проводился поиск нейтринных осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ [43] и исследовались процессы рождения очарованных адронов [44–46] во взаимодействиях ν_μ . CHORUS был экспериментом с короткой базой и проводился в ЦЕРН с 1994 по 1997 г. на том же пучке, что и NOMAD (средняя энергия нейтрино 26 ГэВ значительно больше порога рождения ν_τ). Эмульсионный детектор массой 770 кг в четырех модулях вдоль пучка был оснащен электронным трековым детектором и дополнительными сменными пластинами (CS) для локализации вершины взаимодействия нейтрино. Для автоматического сканирования экспериментального материала использовалась та же технология, что и в эксперименте DONUT, причем эффективность поиска трека составляла не менее 98 % для углов по отношению к оси первичного пучка < 400 мрад.

В ходе эксперимента было зарегистрировано более 2000 взаимодействий ν_μ с ядрами мишени с рождением очарованных адронов. Были из-

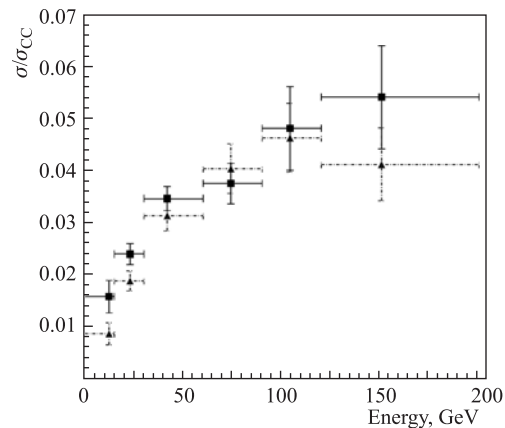


Рис. 2. Доля CC-взаимодействий нейтрино, происходящих с рождением очарованных адронов, в зависимости от энергии по данным эксперимента CHORUS [46]. Квадратами обозначены результаты для случая рождения заряженных очарованных адронов, треугольниками — нейтральных

мерены сечения рождения очарованных адронов в зависимости от энергии (рис. 2, с нормировкой на полное сечение CC -процессов).

1.3. Эксперимент NOMAD. Эксперимент NOMAD (Neutrino Oscillation MAgnetic Detector) проводился в ЦЕРН в 1995–1998 гг. Первоначально целью эксперимента был поиск осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ [35]. База измерений (расстояние от источника нейтрино до детектора) составляла всего ≈ 600 м, так как в то время, когда планировался эксперимент (1991 г.), существовали указания на возможность довольно большой массы $\nu_\tau \sim 1$ эВ. Всего за время накопления материала было зарегистрировано более 10^6 взаимодействий мюонного нейтрино по каналу заряженного слабого тока.

Установка состояла из дрейфовых камер общей массой 2,7 т, детектора переходного излучения, электромагнитного и адронного калориметров и находился в магнитном поле 0,4 Тл [31]. Такая система была способна идентифицировать электроны и мюоны, а также измерять энергии или импульсы лептонов, адронов и ливней от гамма-квантов со сравнимыми погрешностями. Хотя эксперимент NOMAD и не является эмульсионным экспериментом, он заслуживает упоминания здесь, так как в нем с хорошей точностью было выполнено измерение сечений взаимодействия ν_μ [47].

Электронные детекторы NOMAD не были способны регистрировать короткий трек тау-лептона. Поэтому поиск событий от ν_τ был основан на тонких особенностях взаимодействий, инициированных таонными нейтрино: наличии вторичных частиц, характерных для распада таона, в отличие от NC -событий, и существенном значении потерянного поперечного импульса, которыми обладают продукты распада таона вследствие наличия одного или двух нейтрино в конечном состоянии. При этом индивидуальная идентификация конкретных событий с высокой вероятностью невозможна; однако возможно поставить ограничения на количество взаимодействий ν_τ в выборке.

Данные NOMAD были использованы для настройки параметров генератора событий эксперимента OPERA. В работе [36] проведено сравнение экспериментальных и модельных распределений для нескольких величин: множественности заряженных адронов, углов вылета адронов, импульсов адронов и т. д. Было показано, что изменением параметров генератора событий возможно добиться значительного улучшения согласия данных и модели.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ OPERA

Название эксперимента OPERA является аббревиатурой от Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus — поиск осцилляций нейтрино с помощью эмульсионного детектора. Подготовка проекта началась в 1998 г. [48], когда было объявлено о наблюдении осцилляций нейтрино в эксперименте

Super-Kamiokande [4]. В этом эксперименте была продемонстрирована зависимость количества атмосферных мюонных нейтрино от расстояния между детектором и предполагаемым местом рождения нейтрино в атмосферных каскадах от космических частиц. Исчезновение мюонных нейтрино было экспериментально зафиксировано, были получены оценки параметров осцилляций. Результаты этого эксперимента показали, что для исследования осцилляций мюонных нейтрино перспективными являются эксперименты с нейтрино от ускорителя на больших базах.

Однако вопрос о том, каким именно образом происходят осцилляции и куда исчезают мюонные нейтрино, оставался открытым. Наиболее вероятной считалась модель превращения мюонных нейтрино в тау-нейтрино, но были и другие сценарии, например, с участием стерильных нейтрино, возможностью распада нейтрино и т. п. Поэтому экспериментальное обнаружение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ путем наблюдения появления тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино на расстоянии от источника было актуальной и важной задачей. После проведения дополнительных исследований в 2000–2002 гг. и выбора дизайна детектора началось его изготовление и монтаж в подземной лаборатории Национального института ядерной физики (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN) в горном массиве Гран-Сассо (Gran Sasso) (Италия). Электронные детекторы и магниты были введены в эксплуатацию в 2003–2006 гг., первый сеанс работы с нейтринным пучком состоялся в 2006 г., эмульсионные блоки были установлены в 2006–2008 гг. [13].

Первые события пучка CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso) (характеристики которого описаны далее в п. 2.1) в 2006 г. происходили, в основном, в грунте впереди детектора, в пассивных конструкциях, в массивных элементах магнитов и регистрировались только электронными детекторами [49] (см. п. 2.2). Также в ходе этой тестовой экспозиции исследовались характеристики сменных эмульсионных пластин (CS) [50], используемых для уточнения целеуказания от электронных детекторов. При подготовке эксперимента значительное внимание было уделено выбору свинцового сплава, используемого для изготовления пластин мишени [51], так как уровень его естественной радиоактивности влияет на фон в ядерной эмульсии и осложняет поиск треков (описание эмульсионных детекторов см. в п. 2.3).

Из-за проблем с пучком CNGS в 2007 г. удалось зарегистрировать только 38 взаимодействий нейтрино с мишенью детектора OPERA. Первая значительная выборка событий от нейтрино была получена в 2008 г. [52]. Для ее анализа использовались автоматические сканирующие микроскопы нового поколения.

2.1. Пучок CNGS. Расстояние от ускорителя SPS в ЦЕРН до лаборатории Гран-Сассо составляет 730 км [53], поэтому OPERA относится к ускорительным экспериментам с длинной базой в отличие от CHORUS и NOMAD. В отличие от DONUT, присутствие тау-нейтрино в исходном пучке пред-

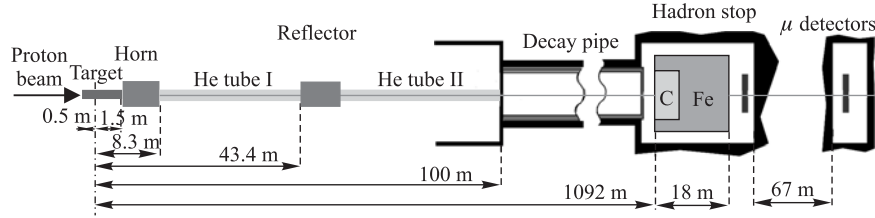


Рис. 3. Схема генерации пучка CNGS [53]. Слева направо: протонный пучок от ускорителя (направление обозначено стрелкой); мишень, в которой происходит взаимодействие протонов; система магнитных линз; распадный канал пучка; массивный поглотитель адронов в конце канала общей толщиной 18 м; детекторы мюонов, предназначенные для мониторинга пучка

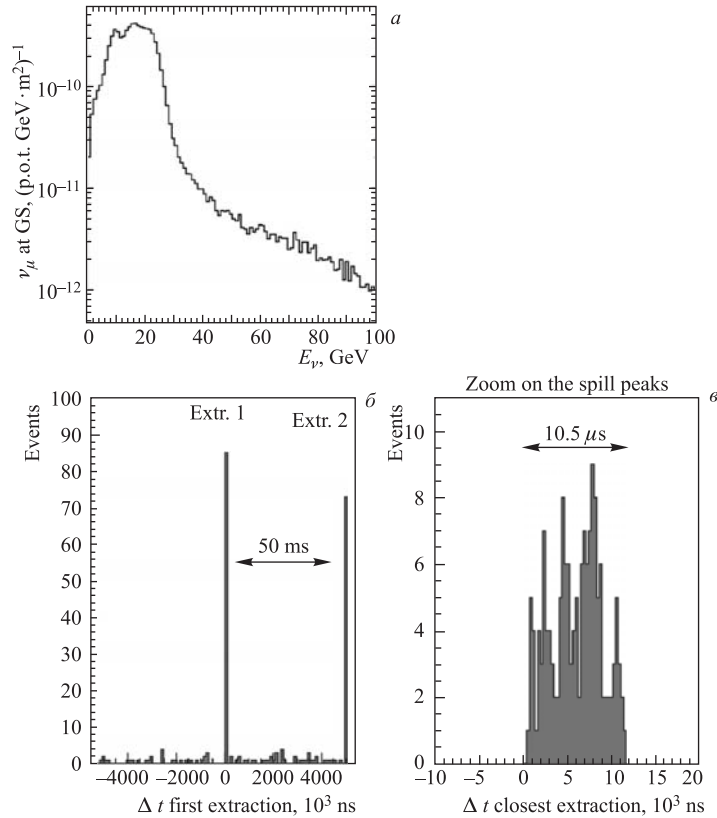


Рис. 4. *a*) Спектр ν_μ пучка CNGS в лаборатории Гран-Сассо; *б*) временная структура пучка CNGS; *в*) детально показанная структура одного из протонных импульсов [49]

ставляет собой один из источников фона при поиске осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Однако оценки потока первичных ν_τ , проведенные для условий эксперимента CHORUS, сравнимых с характеристиками CNGS, показали, что этот поток пренебрежимо мал [54].

Основная компонента пучка CNGS — мюонные нейтрино; доля взаимодействий нейтрино других типов составляет: ν_e — 0,8 %, $\bar{\nu}_\mu$ — 2,0 %, $\bar{\nu}_e$ — 0,05 % [53]. Схема аппаратуры, используемой для генерации нейтринного пучка, показана на рис. 3.

Спектр ν_μ на уровне лаборатории Гран-Сассо приводится на рис. 4, а. Импульсы протонов длительностью ≈ 10 мкс генерируются попарно и отстоят на 50 мс по времени (рис. 4, б); их временная структура регистрируется специальными детекторами в ЦЕРН с шагом 1 нс [55]. Форма протонных и нейтринных импульсов практически совпадает [56]; пример временной структуры пучка показан на рис. 4, в. Упомянем также возможность работы в специальном режиме коротких импульсов (Bunched Beam, BB) длительностью ~ 3 нс специально для задачи измерения скорости нейтрино [55]. Однако полный поток нейтрино в этом случае мал, и BB-импульсы не могут быть использованы для решения основной задачи эксперимента — наблюдения осцилляций; поэтому общая длительность сеансов работы в BB-режиме составила около четырех недель.

2.2. Электронные детекторы. OPERA является гибридным детектором; он включает в себя мишенную часть, состоящую из 150 000 эмульсионных блоков, и электронные детекторы, которые служат для регистрации времени прихода событий, для целеуказания, т. е. определения блока, где находится вершина взаимодействия, а также для измерения импульса мюонов и их идентификации [57]. Общий вид детектора OPERA, состоящего из двух одинаковых супермодулей, показан на рис. 5.

Первым по пучку стоит вето-детектор; его срабатывание сообщает о том, что взаимодействие нейтрино произошло вне детектора OPERA. Вето-детектор состоит из двух слоев RPC-камер (Resistive Plate Chambers) и покрывает общую площадь $10 \times 9,12$ м в сечении, перпендикулярном первичному пучку. Кроме событий от пучка CNGS детектор OPERA регистрирует также фон от космических мюонов — он замечен на рис. 4, б между двумя экстракциями. Помимо основной задачи поиска осцилляций в эксперименте OPERA также проводятся исследования мюонной компоненты космических лучей — например, было измерено зарядовое отношение мюонов глубоко под землей [58, 59].

Примеры нескольких событий, зарегистрированных электронными детекторами эксперимента OPERA, приведены на рис. 6. Каждому событию соответствуют два рисунка — вид сверху и вид сбоку. Сверху слева изображено событие, имеющее изолированный мюон, который был зарегистрирован плоскостями VETO и TT, начиная с первой — такая топология является

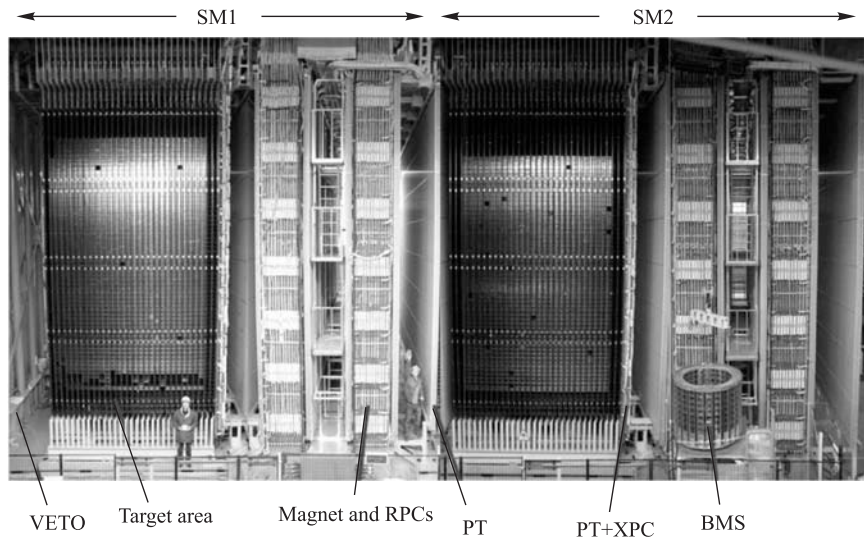


Рис. 5. Общий вид детектора OPERA [13]. Два идентичных супермодуля обозначены SM1 и SM2. Со стороны пучка расположены детекторы VETO. Каждый супермодуль включает сцинтилляционные детекторы Target Tracker (ТТ) (по 31 плоскости в каждом из двух супермодулей) и газовые детекторы: RPC (Resistive Plate Chambers) внутри магнитов и систему дрейфовых трубок HPT (High Precision Tracker)

признаком CC -взаимодействия впереди установки. CC -событие, показанное сверху справа, имеет вершину внутри детектора и кроме мюона содержит еще несколько треков заряженных частиц. Топология события, изображенного снизу справа, классифицируется как NC -взаимодействие с вершиной в мишени между плоскостями ТТ. Наконец, снизу слева показано CC -событие с вершиной в спектрометре.

Локализация вершины взаимодействия выполняется с помощью детекторов ТТ, имеющих такую же апертуру, как и мишенные стенки, — $6,7 \times 6,7$ м. Каждая плоскость ТТ имеет четыре модуля шириной 1,65 м каждый, состоящих в свою очередь из 64 полос пластического сцинтиллятора длиной 6,7 м, толщиной 10 мм и шириной 26 мм. Светосбор в сцинтилляторе осуществляется с помощью спектросмещающих световодов Kuraray диаметром 1 мм, находящихся в оптическом контакте с 64-канальными ФЭУ Hamamatsu H7546. Подробное описание детектора ТТ содержится в [60].

Каждый супермодуль детектора OPERA имеет магнитный спектрометр, служащий для измерения импульса мюонов. Спектрометры состоят из магнита, в железо которого вставлены камеры RPC, и системы координатных детекторов на основе дрейфовых трубок (High Precision Tracker, HPT). Сердечники каждого магнита состоят из 12 пластин железа толщиной 50 мм,

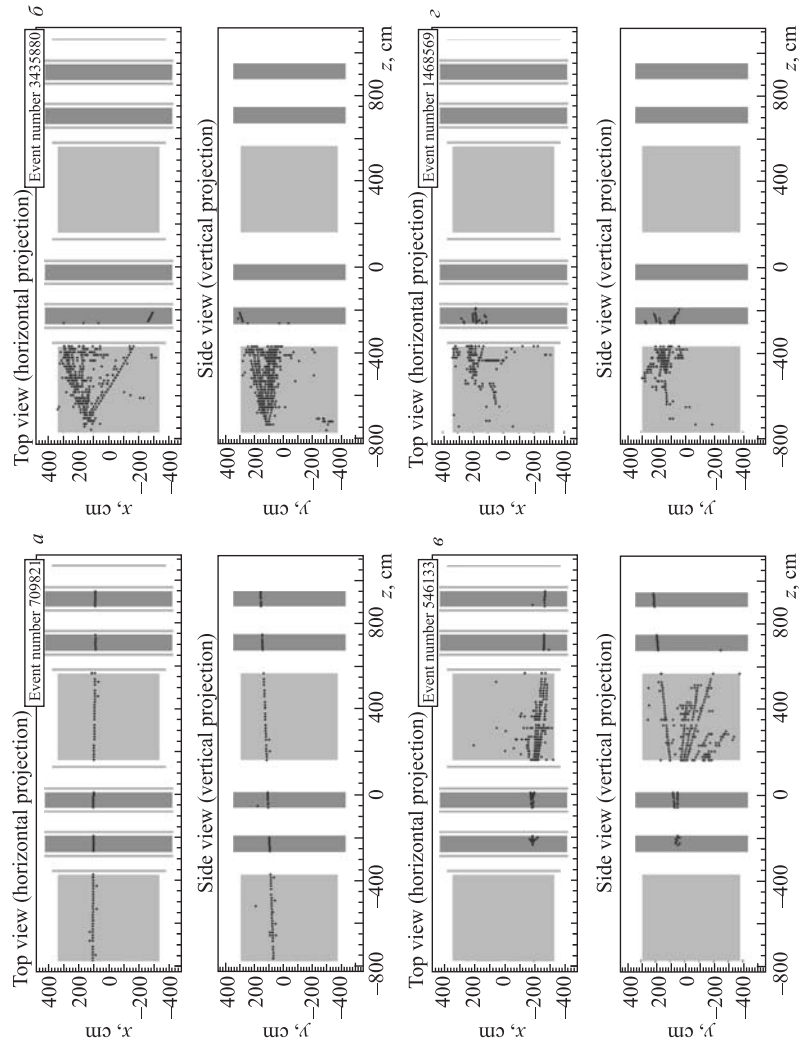


Рис. 6. События различных типов, зарегистрированные электронными детекторами эксперимента OPERA: а) СС-взаимодействие в грунте впереди установки; б) СС-взаимодействие внутри мишени между плоскостями ТТ; в) СС-взаимодействие в одном из спектрометров; г) NS-взаимодействие внутри мишени [49]

прослоенных камерами RPC (по 11 камер в каждой из двух половин сердечника), площадью $8,75 \times 8,3$ м. Через обмотку магнита пропущен ток силой 1600 А, создающий магнитное поле 1,52 Тл. Неоднородности напряженности поля по высоте детектора OPERA составляют $\sim 3\%$ [61]. Система камер RPC [62,63] снабжена добавочными наклонными модулями, расположенными под углом $42,6^\circ$ к горизонтали, которые помогают точнее восстанавливать треки частиц. Каждый спектрометр имеет по шесть модулей НРТ [64], позволяющих восстанавливать параметры треков с разрешением $\sim 0,3$ мм, что обеспечивает возможность измерения импульса и знака заряда мюонов.

2.3. Эмульсионные детекторы. Устройство и внешний вид базового элемента детектора OPERA — одного эмульсионного кирпича — показан на рис. 7 (кроме основного блока — emulsion cloud chamber (ECC), изображена также упаковка CS, прикрепленная к кирпичу). Каждая из 57 пластин ECC состоит из пластиковой основы толщиной 205 мкм, на которую нанесены два слоя фотоэмульсии толщиной 44 мкм [65]; эти пластины проложены 1-мм слоями свинца, которые служат мишенью для регистрации нейтрино. Полная площадь эмульсий составляет более 10^5 м² (для сравнения, в эксперименте CHORUS — 300 м²). Кирпичи имеют достаточно большой размер, чтобы обеспечивать возможность оценки параметров треков в большинстве событий по информации, зарегистрированной в кирпиче, содержащем вершину взаимодействия. Поперечное сечение одного эмульсионного блока 128×102 мм, толщина 79 мм, что соответствует 10 радиационным единицам.

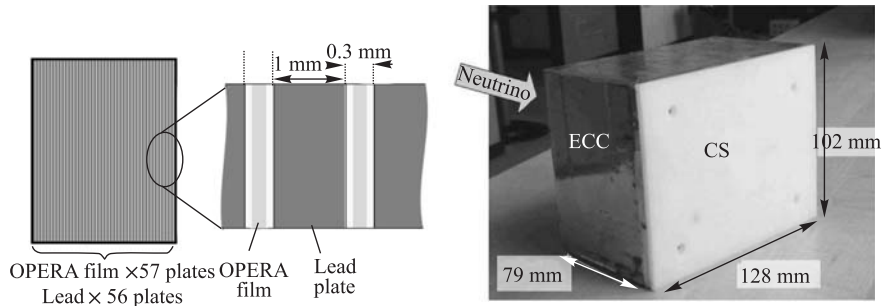


Рис. 7. *a*) Устройство и внешний вид (справа) одного эмульсионного блока детектора OPERA [13]. *б*) Разрез кирпича, в центре — его увеличенный фрагмент

Типичный диаметр светочувствительного зерна фотоэмульсии $\approx 0,2$ мкм (после проявки может возрасть до 0,6 мкм). Эффективность регистрации однозарядной релятивистской частицы кристаллом AgBr составляет $\sim 0,16$. В среднем на 100 мкм пути заряженная частица встречает около 230 таких кристаллов и таким образом производит ≈ 36 видимых зерен. Стандартная

методика хранения и проявки ядерных эмульсий эксперимента OPERA подробно описана в [66].

Ядерная эмульсия содержит все треки, накопленные за время хранения пластин. Плотность фоновых треков от космических частиц достигает ≈ 3000 треков/см². Для уменьшения количества таких треков перед отправкой эмульсии из Японии в Лабораторию Гран-Сассо использовалась специальная процедура, в ходе которой эмульсии помещались в условия высокой влажности при температуре $> 27^\circ\text{C}$ [13]. Такая операция позволяет в несколько раз уменьшить плотность фоновых треков; характерное количество зерен вуали (fog) в объеме 1000 мкм³ после проведения процедуры уничтожения фоновых треков составляет ≈ 6 .

Тем не менее за время транспортировки фон от космических частиц снова достигает уровня ≈ 1000 см⁻². Для устранения этого фона во время сборки кирпичей в условиях низкофоновой лаборатории порядок слоев менялся по сравнению с имевшим место при перевозке; кроме того, эмульсия прославивалась пластинами свинца, также разрушающими связь фрагментов трека в отдельных слоях. В результате «эффективная плотность» космических треков составляет ≈ 100 см⁻², включая фон, набранный при транспортировке.

2.4. Автоматические сканирующие микроскопы. Детальный просмотр больших площадей ядерных фотоэмульсий представляет собой сложную техническую проблему. В прошлом обработка данных эмульсионных экспериментов проводилась операторами на оптических микроскопах вручную, затем в полуавтоматическом режиме; это требовало значительных затрат труда и времени, скорость измерений оказывалась невысокой, а вероятность возникновения различных ошибок была весьма велика. В последние годы недостатки прежних методов работы с ядерными эмульсиями были в значительной мере преодолены благодаря прогрессу, достигнутому в производстве прецизионной механики, широкому применению современных цифровых камер для регистрации оптических изображений и вычислительным возможностям современных компьютеров. Впервые полностью автоматизированные системы обработки ядерных эмульсий появились в Японии в 90-е гг. XX в., что позволило ускорить процесс анализа более чем на три порядка по сравнению с работой в полуавтоматическом режиме.

Для сканирования эмульсий эксперимента OPERA используется два типа автоматических микроскопов — европейская сканирующая система (European Scanning System, ESS) в европейских лабораториях, России и Турции (рис. 8, а), а также Super-Ultra Track Selector (S-UTS) в Японии (рис. 8, б). Процедура поиска треков в этих двух системах различается: в ESS она реализована программно, в то время как S-UTS использует специально разработанный аппаратный блок.

Российские лаборатории-участники эксперимента оснащены микроскопами европейского типа, поэтому в данной работе мы приводим описание

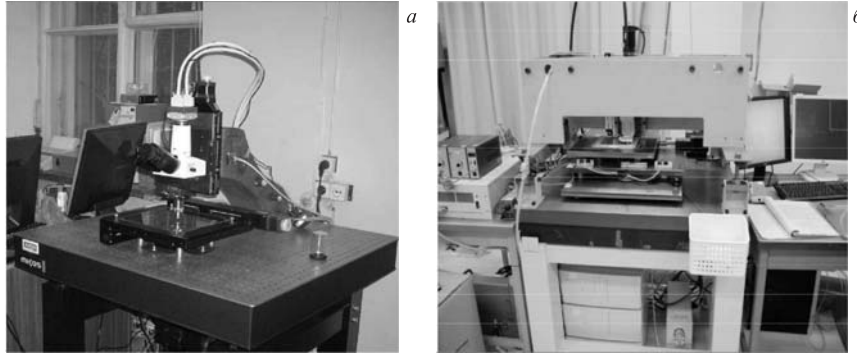


Рис. 8. Внешний вид одного из микроскопов Европейской сканирующей системы (European Scanning System, ESS) (а) и японского комплекса Super-Ultra Track Selector (S-UTS) (б)

этого микроскопа более подробно. Прототип микроскопов ESS, а также процедуры контроля качества эмульсионных данных подробно описаны в [67]. Теме разработки эффективной методики сканирования материала эксперимента OPERA посвящен еще ряд диссертаций, например, [68, 69]. Более современное описание процесса сканирования можно найти в [70].

Схема основных узлов сканирующей системы ESS показана на рис. 9; цифрами обозначены: 1 — оптическая система Nikon; 2 — быстрая цифровая камера Mikrotron MC1310; 3 — прецизионные подвижные столики MICOS

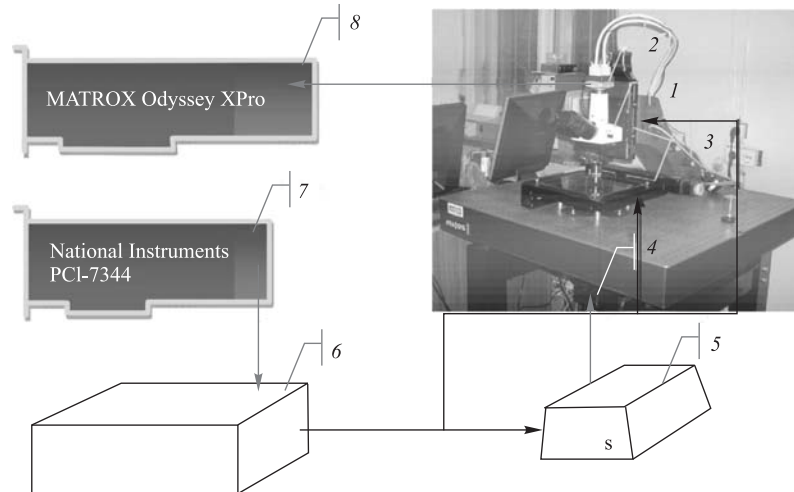


Рис. 9. Схема сканирующей системы ESS (обозначения расшифрованы в тексте)

с шаговыми двигателями; 4 — система подсветки Nikon; 5 — управляемый блок питания подсветки; 6 — усилитель питания шаговых двигателей; 7 — контроллер шаговых двигателей и подсветки National Instruments; 8 — плата захвата и обработки изображений MATROX Odyssey XPro.

Программно управляемые шаговые двигатели перемещают эмульсионную пластину на предметном столе, а также объектив микроскопа с точностью 0,1 мкм, при этом изображение в поле зрения камеры захватывается и передается на специализированное устройство обработки изображения. Некоторые системы, работающие без использования иммерсионного масла (так называемые «сухие объективы» [71]), оборудованы системой автоматической смены пластин, что позволяет сканировать пачки эмульсионных пластин практически непрерывно. Современные автоматические микроскопы позволяют обрабатывать ядерные эмульсии со скоростью 20–100 см²/ч.

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОБЫТИЯ ГИБРИДНЫМ ДЕТЕКТОРОМ OPERA И ПРОЦЕДУРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Общая схема поиска взаимодействий ν_τ иллюстрируется рис. 10. На нем схематично изображены три вида детекторов, соответствующих трем последовательным этапам обработки: 1) поиску кирпича, содержащего вершину,

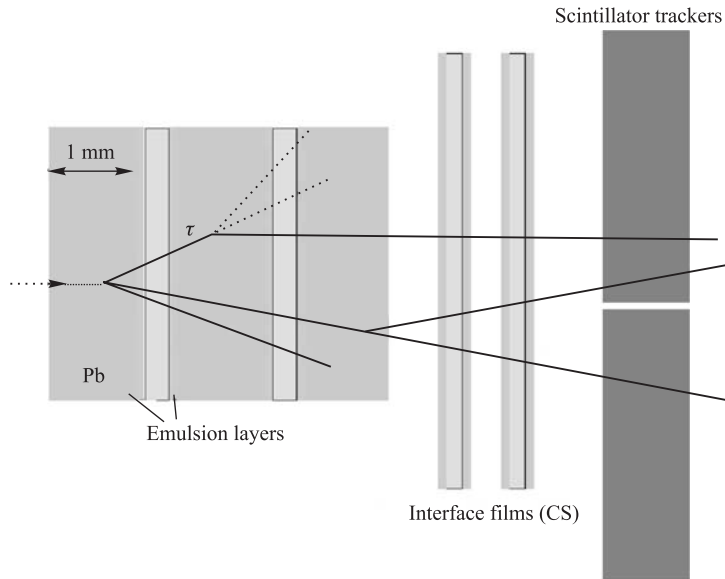


Рис. 10. Схема поиска и анализа взаимодействий нейтрино с помощью электронных детекторов (ТТ), сменных эмульсионных пластин (СЭ) и основных эмульсий (ЕСС) эксперимента OPERA

с помощью ТТ; 2) анализу треков, зарегистрированных в CS; 3) сканированию и анализу эмульсионного блока (ЕСС) по указанию CS. В настоящем разделе подробно описана данная схема [48, 72].

Прежде всего, для количественной обработки данных необходимо располагать моделью отклика детектора (п. 3.1). Затем рассматривается первый уровень анализа данных — процедура классификации событий электронными детекторами и методика поиска эмульсионного блока, содержащего вершину взаимодействия, с помощью ТТ (п. 3.2). Здесь же описана методика идентификации мюонов, измерения их импульса и определения знака их заряда также по данным электронных детекторов.

Особенности процедуры реконструкции треков в ядерной эмульсии с помощью автоматических сканирующих микроскопов обсуждаются в п. 3.3; методика восстановления импульса заряженных адронов методом многократного рассеяния, измерение энергии гамма-кванта по характеристикам вызванного им электромагнитного каскада и процедура идентификации электронов рассмотрены в п. 3.4. Далее следует описание процедуры поиска распада короткоживущей частицы (п. 3.5).

Обсуждению основных источников фона при поиске событий, инициированных ν_τ , и критериев выделения взаимодействий тау-нейтрино посвящен п. 3.6. Наконец, данный раздел завершается описанием многомерного подхода к задаче прямого поиска осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (п. 3.7).

3.1. Моделирование отклика детектора. Как известно, CC-взаимодействия нейтрино могут происходить в глубоконеупругом (Deep Inelastic Scattering, DIS), квазиупругом (Quasi Elastic, QE) и резонансном (Resonance, RES) режимах. В последних двух случаях значительная часть энергии первичного нейтрино передается лептону в конечном состоянии. В условиях эксперимента OPERA основную роль играют DIS-взаимодействия, доля которых превышает 90 % [57].

Генерация продуктов DIS-взаимодействий осуществляется несколько модифицированной версией кода LEPTO6.1 [73] (см. [36, 48, 74]). Адронизация конечного состояния производится с помощью кода JETSET 7.4 [75]. Параметры процесса адронизации были настроены так, чтобы обеспечить наилучшее согласие результатов работы генератора с данными эксперимента NOMAD (см. п. 1.3). Также учитываются повторные взаимодействия образующихся адронов внутри ядра [76]. Параметры QE- и RES-взаимодействий моделируются согласно [77] и [78] соответственно.

При моделировании отклика детектора используются коды Geant 3 [79, 80] и VMC [81]; при этом широко используются форматы данных и средства системы ROOT [82]. Для некоторых задач, как, например, для оценки количества нейтринных взаимодействий, регистрируемых детектором, но происходящих вне его, при моделировании учитывается глобальная геометрия

зала С лаборатории Гран-Сассо в окружении скальной породы (цилиндр радиусом 35 м и длиной 300 м в направлении первичного пучка).

3.2. Восстановление характеристик событий электронными детекторами. Система сбора данных эксперимента OPERA [83] регистрирует все события, отвечающие одному из двух требований: срабатывание нескольких плоскостей ТТ подряд или большое энерговыделение в одной плоскости. Вся значимая информация (т. е. все сигналы от отдельных модулей детектора выше определенного порога) поступает на основной компьютер, где она сортируется по времени срабатывания, и сигналы от сенсоров, имеющих временную отметку в пределах 3 мкс, образуют событие (дополнительные критерии описаны в [57]). Для случая СС-взаимодействий эффективность упомянутой предварительной реконструкции события составляет $> 99\%$; даже в самом трудном случае квазиупругих взаимодействий ν_τ и моды распада $\tau \rightarrow e$ она превышает 95 %.

В настоящее время полностью обработаны данные, полученные за два года экспозиции — 2008 и 2009 гг.; в течение этого периода было зарегистрировано 31 576 событий, соответствующих по времени приходу нейтринного пучка. Для грубого отбора событий с вершиной внутри детектора используется специальный алгоритм OpCarac [84]. В случае СС-взаимодействий вероятность правильной классификации таких событий, которые затем используются в задаче поиска осцилляций, составляет $(97,6 \pm 1,4)\%$.

Основной задачей электронных детекторов является локализация блока мишени — кирпича, — в котором произошло взаимодействие нейтрино (Brick Finding, BF). Решение задачи локализации вершины реализовано в рамках пакета программ Brick Finder [85]. В Brick Finder сначала с помощью алгоритма, основанного на методе нейронной сети, находятся три стенки мишени, в которых вершина взаимодействия расположена с наибольшей вероятностью. Эта задача была бы относительно несложной, если бы часть продуктов реакции не вылетала в заднюю полусферу [86]. Далее с помощью нескольких алгоритмов по сигналам в электронных детекторах восстанавливаются треки и ось адронного ливня. Затем ищется условное пересечение найденных треков и оси ливня с выбранной стенкой мишени. Результат работы алгоритма — карта вероятностей для блоков, окружающих вершину. Типичное значение эффективности процедуры Brick Finding (BF) около 70 % для смеси СС- и NS-событий в случае извлечения первого блока; эффективность возрастает при извлечении большего числа блоков, окружающих вершину [87].

Данные мюонных спектрометров позволяют провести идентификацию мюонов, измерение их импульса и знака заряда. Высокая эффективность правильной классификации мюонов важна, так как взаимодействия ν_μ с рождением очарованных частиц (основной источник фона), в отличие от событий с распадом тау-лептона, содержат мюон, исходящий из вершины взаимодействия нейтрино. Таким образом, идентификация мюона — основной крите-

рий для подавления фона от очарованных частиц. Измерение знака заряда μ также весьма полезно при поиске осцилляционных событий в канале $\tau \rightarrow \mu$: при распаде очарованных адронов подавляющее большинство мюонов положительно заряжено, в то время как распад τ^- ведет к появлению μ^- .

Для идентификации мюонов разработано два алгоритма. Первый из них не требует детальной реконструкции трека мюона; в качестве критерия отделения μ^- от адронов выступает количество сработавших плоскостей электронных детекторов. Потери на ионизацию в одной плоскости ТТ и RPC отличаются на 25 %, а пробеги до ядерного взаимодействия — всего на 10 %, поэтому оба типа слоев детектора выступают как равноправные в первом алгоритме. Если трек виден в более чем 14 слоях электронных детекторов (ТТ или RPC), он классифицируется как мюон; эффективность выделения μ составляет $(95,5 \pm 1,4) \%$. Однако приблизительно 24 % NC-событий (6 % общей статистики) при этом классифицируются ошибочно.

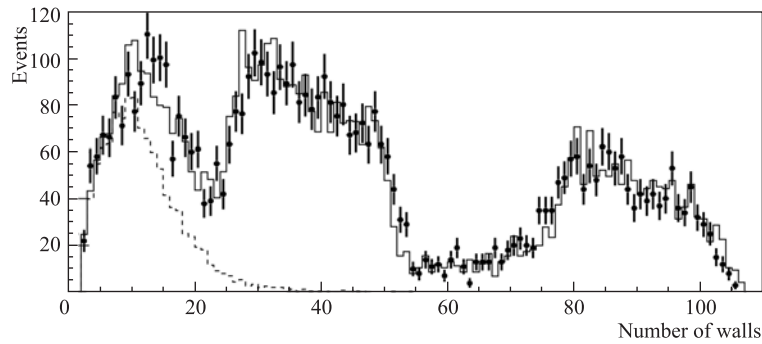


Рис. 11. Гистограмма количества сработавших плоскостей электронных детекторов [57]. Кружки с ошибками — результат обработки экспериментальных данных, сплошная линия — предсказание модели (для CC- и NC-взаимодействий); штриховая — вклад NC-событий, вычисленный в результате моделирования

Гистограмма количества сработавших плоскостей электронных детекторов представлена на рис. 11. Вклад NC-взаимодействий (результат моделирования) показан штриховой линией; эти события образуют отдельный пик на гистограмме. Два прочих максимума образованы CC-событиями, прошедшими один и два супермодуля детектора соответственно. Гистограмма, построенная по экспериментальным данным (кружки с ошибками), обнаруживает хорошее качественное согласие с предсказаниями модели (сплошная линия).

Второй метод использует реконструкцию трека мюона. Сначала производится восстановление треков в событии по координатам сработавших элементов детектора. Для идентификации мюонов используется произведение длины трека L на плотность ρ , вычисленное для самого длинного рекон-

струированного трека в событии. Этот критерий выделения мюонов в случае $L\rho > 660 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ обеспечивает 95 %-ю эффективность идентификации.

Для событий, имеющих не менее одного трека, идентифицированного как мюон, примесь NC-событий составляет 5,2 %; если трек кандидата в мюоны прошел хотя бы через один спектрометр — 0,8 %; для выборки взаимодействий, где в дополнение к двум упомянутым условиям имеется хотя бы один трек, идентифицированный как отрицательно заряженный мюон, — 0,4 %. Форма распределения величины $L\rho$ для СС-событий качественно похожа на гистограмму рис. 11 (без NC-событий) и приводится в [57]; экспериментальные и модельные распределения параметра $L\rho$ хорошо согласуются.

Для всех треков, идентифицированных как мюоны, было проведено измерение импульса. В том случае, когда μ не проходил через спектрометр, оценка импульса проводилась по пробегу в ТТ; однако определение знака заряда в этом случае невозможно. На рис. 12 показано сравнение экспериментальной (кружки с ошибками) и модельной гистограмм распределения событий по восстановленному модулю импульса треков, прошедших через спектрометр и идентифицированных как мюоны, умноженному на заряд, для случая отрицательного знака заряда. При построении модельного распределения учтены неопределенности магнитного поля ($\epsilon_{MF} \approx 3\%$) и 10 %-я погрешность оценки количества СС-взаимодействий мюонных нейтрино ϵ_{CC} (область, обозначен-

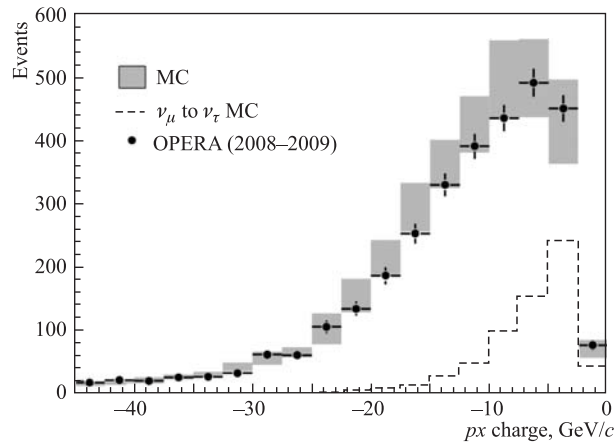


Рис. 12. Распределение экспериментальных событий по модулю измеренного импульса, умноженному на заряд, для треков, идентифицированных как мюоны, в случае отрицательного знака восстановленного заряда (кружки со статистическими ошибками) [57]. Модельная гистограмма показана областью серого цвета, ширина которой определяется, главным образом, погрешностью ожидаемого количества событий от ν_μ . Штриховая линия — гистограмма распределения по импульсу мюонов, возникающих в канале распада $\tau \rightarrow \mu$ таонных событий (произвольная нормировка)

ная серым цветом на рис. 12). Как и для двух предыдущих случаев, восстановленная по экспериментальным данным и расчетная гистограммы согласуются в пределах неопределенностей последней. Для сравнения формы проводилась нормировка на 1; величина $\chi^2 = 16,56/17$ d.o.f. без учета ϵ_{MF} и ϵ_{CC} ; нормировки исходных гистограмм согласуются в пределах 6 %.

Модельное распределение для событий от ν_τ в случае мюонного распада таонов, возникающих в результате осцилляций, также представлено на рис. 12 (нормировка произвольная) — оно позволяет показать наиболее важную область значений импульса. Средний импульс мюонов, возникших от распада таонов, существенно меньше, чем в случае СС-событий ν_μ : $-6,8$ и $-12,7$ ГэВ/с соответственно.

Эффективность определения знака заряда мюонов для диапазона импульсов $p = 2,5\text{--}45$ ГэВ/с составляет 98,8 %. Для проверки корректности работы алгоритма восстановления знака заряда мюона могут быть использованы события от $\bar{\nu}_\mu$, которые присутствуют в пучке (см. п. 2.1) и дают положительно заряженные мюоны. Измеренное значение отношения $\mu^+/\mu^- = (3,92 \pm 0,37)$ % хорошо согласуется с расчетной величиной $(3,63 \pm 0,13)$ (стат.) %.

3.3. Реконструкция треков в ядерной эмульсии. После анализа данных ТТ и определения карты вероятности нахождения вершины события для блоков мишени информация об этом заносится в базу данных эксперимента. Эмульсионные блоки извлекаются в порядке убывания вероятности с помощью робота Brick Manipulation System (BMS). Для подтверждения выбора блока мишени по данным электронных детекторов проводится проявка и сканирование сменных эмульсионных пластин (CS). Анализ данных в CS показал, что среднеквадратичное отклонение расстояния между треками мюона в СС-событиях, восстановленными по данным ТТ и CS, составляет не более ≈ 12 мм, а та же величина для разницы углов — ≈ 23 мрад [13]. В дальнейшем пространственное разрешение ТТ было улучшено до 8,6 мм, а угловое — до 16 мрад [88].

Эффективность поиска трека в двух слоях одной пластины CS составляет 86 %; если учитываются только треки во всех четырех эмульсиях — 75 %. Для повышения эффективности анализа сменных пластин используется специальная процедура поиска следов в трех слоях эмульсии CS — «3/4» (3/4 search). Эти короткие треки в одном чувствительном слое называются микротреками, а два микротрека, реконструированные в одной эмульсионной пластине, разделенные пластиковой основой и являющиеся сегментами следа одной заряженной частицы, — базовым треком. След заряженной частицы, обнаруженный во всех четырех слоях CS, называется двойным базовым треком. Применение процедуры поиска «3/4» позволяет повысить эффективность анализа CS до 90 %. Если мюонный кандидат, обнаруженный ТТ, подтвержден в CS, или же в сменных пластинах обнаружено не менее двух треков, образующих вершину, соответствующий кирпич проявля-

ется для последующего анализа, в ходе которого используется информация, полученная при сканировании сменных пластин. Методика анализа CS эксперимента OPERA подробно описана в [89].

При сканировании эмульсий ЕСС после захвата изображений в режиме реального времени производится следующий цикл обработки:

- 1) вычитание фона (выравнивание освещенности);
- 2) высокочастотная фильтрация изображения, что позволяет усилить сигнал от объектов определенного размера, в данном случае — зерен серебра в эмульсии, образованных при прохождении заряженной частицы;
- 3) выравнивание поля — устранение краевых оптических эффектов;
- 4) бинаризация — отделение сигнала от фона;
- 5) кластеринг — поиск связанных областей на выделенном сигнале, т. е. выделение кластеров;
- 6) вычисление параметров кластеров;
- 7) устранение вибраций (небольших случайных смещений между кадрами одного поля зрения);
- 8) восстановление трехмерных зерен в эмульсии по найденным кластерам на разных глубинах эмульсии (вследствие конечности глубины фокуса каждое зерно видно на 2–3 кадрах по вертикальной координате);
- 9) реконструкция треков в объеме одного поля зрения по расположению зерен;
- 10) объединение всей выборки найденных треков.

Трехмерное распределение интенсивности в поле зрения микроскопа представляет собой (трехмерную) свертку функции размытия точки (Point Spread Function, PSF) и функции «оптической плотности» наблюдаемого объекта. Так как размер зерна составляет $\approx 0,6$ мкм, при обработке изображений, полученных с помощью автоматических сканирующих микроскопов, необходимо учитывать дифракционные эффекты. В принципе, возможно провести процедуру восстановления функции оптической плотности объекта (деконволюцию), однако современные ресурсы вычислительных систем все еще не позволяют проводить такую обработку огромных массивов информации, характерных для экспериментов с ядерными эмульсиями, в режиме реального времени, поскольку количество зерен, принадлежащих трекам, обычно составляет лишь очень малую часть по сравнению с многочисленными зернами вуали, которые появляются в процессе проявки эмульсии.

Поэтому для ускорения процедуры поиска треков используются упрощенные методы; все три указанные функции представляются как дискретные трехмерные поля точек; кроме того, задача факторизуется (по горизонтальным и вертикальной координатам). Методика выделения темных пятен на светлом фоне основана на использовании двумерного фильтра с конечной импульсной характеристикой [34]. В коллаборации OPERA разработано два

комплекса программ, предназначенных для обработки данных автоматических сканирующих микроскопов: SySal (System of Salerno) [90,91] и FEDRA (Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis) [92].

Прежде всего, рассмотрим возможную схему реконструкции микротреков согласно [34]. Следует отметить, что зерна эмульсии в процессе сканирования не находятся точно в фокальной плоскости микроскопа (в дальнейшем предполагается, что фокальная плоскость и поверхность эмульсии горизонтальны). На практике координата z известна с некоторой погрешностью dz ; величина последней зависит от шага перемещения объектива микроскопа в вертикальном направлении.

Прямая линия, отрезком которой аппроксимируется микротрек, имеет вид $\mathbf{I} + \alpha \cdot \mathbf{T}$, где $\mathbf{I} = (x_0, y_0, z_0)$ — координаты опорной точки микротрека; $\mathbf{T} = (s_x, s_y, 1)$ — вектор направления трека, $\alpha = z - z_0$. Пусть $\mathbf{S} = (s_x, s_y)$, а $\mathbf{n}_{\parallel} = (n_x, n_y)$ — единичный вектор, такой, что $\mathbf{S} = S\mathbf{n}_{\parallel}$; $\mathbf{n}_{\perp} = (n_y, -n_x)$ — вектор нормали. Если горизонтальная плоскость, в которой лежит зерно G , находится на расстоянии Δ_z от фокальной плоскости, вектор расстояния от зерна до трека может быть выражен как $\Delta_{\perp} \cdot \mathbf{n}_{\perp} + (\Delta_{\parallel} + S \cdot \Delta_z) \mathbf{n}_{\parallel}$ (рис. 13, а). Таким образом, неопределенность по z входит только в продольную компоненту n_{\parallel} . Поэтому величина Δ_{\perp} , которая не зависит от формы трека S , может выступать как критерий качества реконструкции микротрека.

Гистограмма распределения по величине Δ_{\perp} , построенная в результате анализа экспериментальных данных, показана на рис. 13, б. Пик на малых расстояниях ($\sim 0,1$ мкм) указывает на хорошую точность реконструкции.

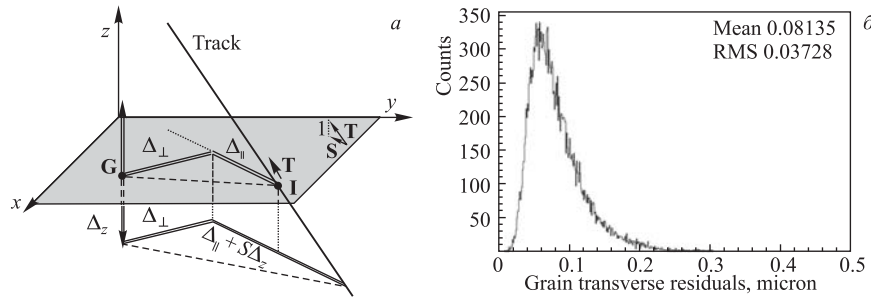


Рис. 13. а) Схема, поясняющая процедуру реконструкции микротрека с помощью автоматического сканирующего микроскопа. Зерно эмульсии с координатами \mathbf{G} находится в плоскости $z = 0$. Фокальная плоскость микроскопа $z = -\Delta_z$; \mathbf{I} и \mathbf{T} — координаты опорной точки и направление прямой, аппроксимирующей восстановленный микротрек, соответственно; \mathbf{S} — направление проекции этой прямой на плоскость $z = 0$. Δ_{\parallel} и Δ_{\perp} — продольная и поперечная компоненты расстояния от зерна до аппроксимации микротрека соответственно. б) Гистограмма распределения по величине Δ_{\perp} , полученная в результате реконструкции выборки микротреков [34]

Эффективность поиска микротреков, перпендикулярных эмульсионным пластинам, $> 95\%$ [93]; эта эффективность уменьшается с ростом угла треков по отношению к оси первичного пучка в диапазоне $0\text{--}400$ мрад до $\approx 91\%$.

После того как микротреки в эмульсии найдены, проводится их связывание в базовые треки. На этом уровне реконструкции хорошей иллюстрацией методики является двумерное распределение по параметрам σ и числу зерен в базовом треке. σ — «параметр качества» базового трека; он определяется

$$\text{как } \sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta S_{t\perp}}{S_{\perp\text{tol}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{t\parallel}}{S_{\parallel\text{tol}}}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta S_{b\perp}}{S_{\perp\text{tol}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{b\parallel}}{S_{\parallel\text{tol}}}\right)^2}, \text{ где } \Delta S_{\perp(\parallel)} —$$

разница углов между аппроксимациями микротреков и базового трека в поперечном (продольном) направлениях.

Двумерная гистограмма распределения по указанным параметрам показана на рис. 14 (следует учесть, что среднее количество зерен, оставляемых однозарядной ионизирующей частицей при прохождении 100 мкм эмульсии, для случая работы [34] составляет ≈ 31). Штриховая линия является границей между этими двумя областями в процедуре отбора базовых треков. После проведения процедуры выделения остаточный фон «шумовых» треков составляет 1 базовый трек/см².

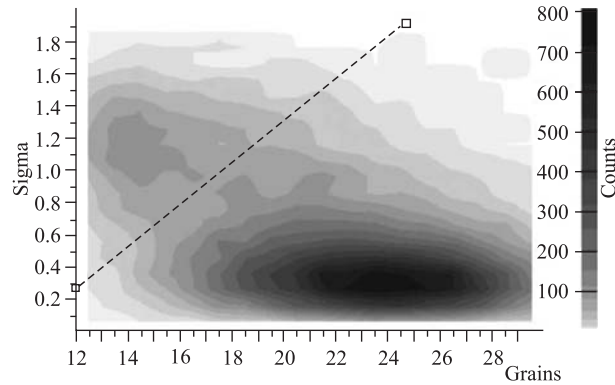


Рис. 14. Двумерная гистограмма распределения по параметрам σ («параметр качества») и числу зерен в реконструированных базовых треках [34]. На диаграмме видны две области: первая — малого количества зерен и высоких значений σ (область фоновых треков); вторая область большого количества зерен и малых σ (область правильно восстановленных треков)

Еще более высокий уровень реконструкции — восстановление длинных следов частиц, как правило, проходящих через много эмульсионных пластин — так называемых «объемных» треков. Одна из важнейших характеристик на этом уровне обработки — так называемая трековая эффективность,

которая определяется как отношение количества найденных базовых треков к общему количеству эмульсионных пластин для выборки следов ионизирующих частиц, проходящих через эмульсионный блок насквозь. Среднее значение трековой эффективности $\approx 93\%$ для случая почти перпендикулярных треков.

Дополнительные детали о производительности быстрого сканирования можно найти в [93, 94]. Предельные точности, достижимые при реконструкции треков современными оптическими микроскопами, обсуждаются в [95].

3.4. Оценка параметров частиц по эмульсионным данным. После того как проведена реконструкция «объемных» треков в эмульсионном блоке, для успешной идентификации событий от ν_τ требуется провести оценку параметров заряженных частиц — продуктов взаимодействия первичного нейтрино, а также некоторых характеристик события в целом (подробнее см. [48, 87] и п. 3.6 настоящего обзора).

При использовании ядерных фотоэмульсий импульс заряженных частиц p может быть измерен путем оценки угла многократного рассеяния в свинцовых слоях. Детали процедуры восстановления импульса адронов для случая эксперимента OPERA описаны в [96, 97]. Используется так называемый угловой метод: в качестве информации, по которой измеряется p , выступают углы отклонения сегментов трека от прямой линии. Диапазон p , в котором применим угловой метод, простирается от нескольких сотен МэВ/с до нескольких ГэВ/с; относительная погрешность измерений растет с увеличением импульса. Распределение по величине $1/p$ гауссово (см. выражение (1) в работе [97]), поэтому удобно приводить погрешность оценки именно этой величины.

Для случая треков, перпендикулярных поверхности эмульсии и проходящих через все 56 слоев свинца одного блока, погрешность измерения параметра $1/p$, оцененная с помощью моделирования, составляет: в случае $p = 1$ ГэВ/с — $\approx 14\%$; если $p = 4$ ГэВ/с — $\approx 20\%$; при $p = 8$ ГэВ/с — $\approx 26\%$. Гистограммы распределений по p и $1/p$ для $p = 4$ ГэВ/с приведены на рис. 15. При уменьшении количества проходимых слоев погрешность восстановления величины $1/p$ растет: для случая $p = 4$ ГэВ/с и 20 пластин она составляет $\approx 32\%$.

В области энергий 1–10 ГэВ основной канал потери энергии электронами, в отличие от заряженных адронов, — тормозное излучение. Это позволяет провести идентификацию электронов по информации, доступной в эмульсии [98, 99]. В работе [98] рассматривается алгоритм разделения электронов и заряженных пионов, основанный на использовании нейронной сети, входными данными для которой являются характеристики продольного, поперечного и углового распределений электромагнитного каскада, образованного электроном в эмульсионном блоке. Для энергий > 2 ГэВ эффективность идентификации электронов составляет $\approx 90\%$, в то время как ошибка неправильной классификации пионов — $< 1\%$. Несколько отличная методика,

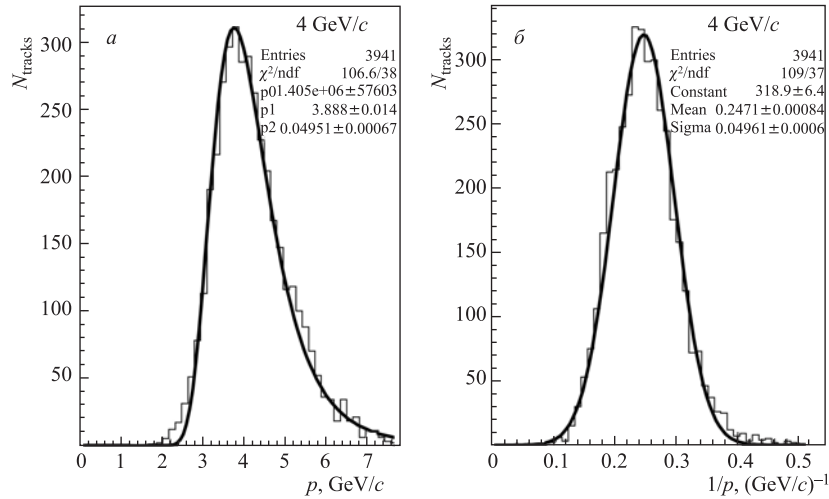


Рис. 15. Гистограмма распределения по восстановленному импульсу p (а) и величине $1/p$ (б) для случая монохроматического пучка заряженных пионов с импульсом 4 ГэВ/с (результаты моделирования). Распределение $1/p$ гауссово. Все результаты приводятся для случая сквозных треков, проходящих через 56 свинцовых пластин эмульсионного блока

основанная на особенностях процесса многократного рассеяния для электронов и пионов, изложена в [100].

Та же самая нейронная сеть может быть использована для восстановления энергии электронов и гамма-квантов по характеристикам электромагнитного ливня с погрешностью $< 30\%$ для $E_\gamma > 3$ ГэВ [101]. Отметим также, что измерения плотности ионизации трека позволяют разделять протоны и заряженные пионы с импульсом ~ 1 ГэВ/с [102].

3.5. Процедура поиска распада короткоживущей частицы. Как уже неоднократно отмечалось, хорошее пространственное разрешение ядерных эмульсий позволяет наблюдать трек тау-лептона, рождающегося в СС-взаимодействиях таонных нейтрино, непосредственно. Для этого прежде всего необходимо найти и просканировать область, окружающую вершину взаимодействия первичного нейтрино. Поиск вершины производится по указаниям СС. Все треки, найденные в сменных пластинах, прослеживаются в обратном направлении в эмульсионных слоях до исчезновения в трех пластинах подряд; это является указанием на близость вершины — либо первичной, либо точки распада короткоживущей частицы. Затем производится сканирование области 1 см^2 в 15 слоях, окружающих вершину. Полная эффективность описанной процедуры локализации вершины (начиная с процедуры Brick Finding) составляет около 60%. Наконец, треки, найденные в области, окружающей

вершину, могут быть прослежены до выхода из эмульсионного блока, и, если требуется, в следующих блоках.

Стандартная процедура поиска распада короткоживущей частицы (Decay Search, DS) в эксперименте OPERA описана в [103]. Эта процедура используется для поиска событий, инициированных ν_τ , а также взаимодействий ν_μ с рождением очарованных адронов. С точки зрения алгоритма DS все события можно разделить на два основных типа: взаимодействия, имеющие реконструированную вершину, и события с изолированным мюоном или адроном.

В первом случае особое значение имеет анализ первой пластины, расположенной за вершиной взаимодействия в направлении первичного пучка. Область вершины подвергается визуальному просмотру. На этом этапе можно идентифицировать треки электрон-позитронных пар, которые не используются в процедуре DS. Затем строится распределение по импакт-параметру (IP) — расстоянию от трека до реконструированной вершины. Более 95% треков во взаимодействиях ν_μ без рождения очарованных частиц имеют значение $IP < 10$ мкм (большинство значений $IP > 10$ мкм возникает в результате многократного рассеяния низкоэнергичных адронов в свинце эмульсионного блока).

Пусть VD — расстояние от эмульсионной пластины до реконструированной вершины взаимодействия. Треки, имеющие $IP > 10$ мкм для случая $VD < 500$ мкм, или $IP > (5 + 0,01VD)$ для $VD > 500$ мкм и оцененное значение импульса > 1 ГэВ/с, являются кандидатами на след распадной частицы и подвергаются дальнейшему изучению. Распады делятся на два основных типа — короткие (которые произошли в той же пластине свинца, где расположена вершина) и длинные (в этом случае в эмульсии видны треки материнской и дочерних частиц). Детали поиска коротких и длинных распадов изложены в [103]. Для случая изолированного мюона или адрона также возможен поиск длинного распада по наличию излома трека.

3.6. Характеристики фоновых событий и стандартные критерии идентификации взаимодействий ν_τ . Наконец, после обнаружения трека распадной частицы наступает последний этап анализа, на котором происходит выделение взаимодействий ν_τ из массы фоновых событий [87, 104]. Для разработки критериев поиска таонных событий было проведено детальное изучение характеристик фона. Согласно [104], основные источники фоновых событий — взаимодействия ν_μ с рождением очарованных адронов, а также неупругое рассеяние адронов и мюонов на большие углы (фон от мюонов оценен в [48]).

Как показывают расчеты, рождение очарованных частиц — наиболее важный источник фона; он дает вклад около 75%. Пример распределения по одному из параметров — длине распадного трека для очарованных событий — приведен на рис. 16. Гистограмма для событий, зарегистриро-

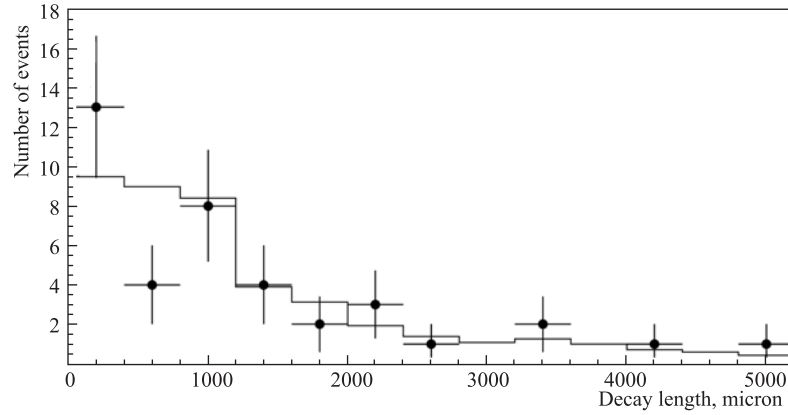


Рис. 16. Распределение по длине трека очарованной частицы для событий, реконструированных в детекторе OPERA [104]: экспериментальные данные (кружки с ошибками) и результаты моделирования (гистограмма)

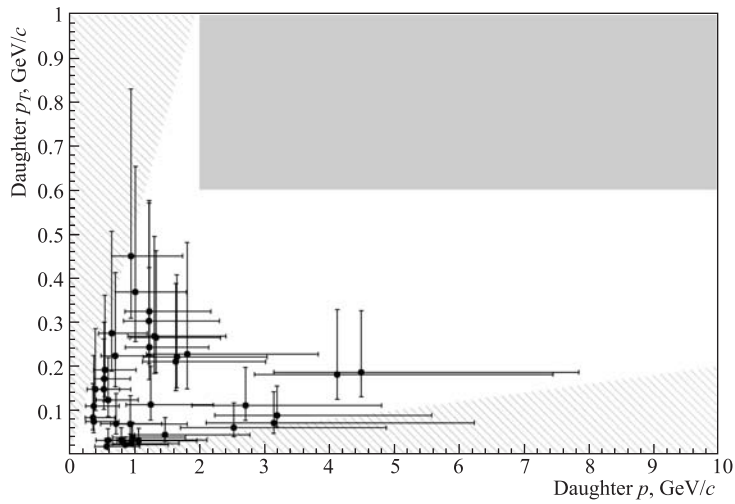


Рис. 17. Измеренное значение поперечной компоненты импульса p_T в зависимости от модуля импульса p для π^- в выборке отсканированных событий [104] (общая длина треков 14 м, что соответствует ≈ 2300 НС-взаимодействиям). Штриховкой обозначена запрещенная область $p < p_T$ и область, исключаемая наложением дополнительного условия на p_T . Прямоугольник справа сверху ограничивает область значений параметров, которым должны удовлетворять кандидаты на взаимодействие ν_τ в эмульсионном детекторе эксперимента OPERA в канале распада $\tau \rightarrow h$

ванных в эксперименте, представлена кружками с ошибками; непрерывная линия — результат моделирования. Детальное исследование фона, создаваемого очарованными адронами для случая условий эксперимента OPERA, можно найти в [105].

Второй по важности источник фона — неупругое рассеяние адронов в свинце блоков мишени. Для проверки используемой модели неупругого рассеяния адронов был проведен поиск случаев рассеяния для адронных треков в некоторых отсканированных событиях. Кроме того, аналогичный анализ выполнен для нескольких эмульсионных блоков, специально облученных пучком заряженных пионов с импульсом 4 ГэВ/с. Зависимость поперечной компоненты импульса рассеянной частицы от полного импульса для первой из этих выборок приведена на рис. 17. Как видно из рис. 17, ни одно из найденных событий не лежит в области $p_T > 0,6$ ГэВ/с и $p > 2$ ГэВ/с, в которой ведется поиск взаимодействий таонных нейтрино.

Первое событие-кандидат наблюдалось в канале $\tau \rightarrow h$; оно удовлетворяло всем критериям отбора, выработанным еще на этапе написания проекта эксперимента [48]:

1. Для треков, составляющих первичную вершину:

а) ни один из треков не идентифицирован как электрон или мюон (в противном случае это СС-взаимодействие электронного или мюонного нейтрино соответственно);

б) импульс в направлении, перпендикулярном первичному пучку («потерянный поперечный импульс»), составляет не более 1 ГэВ/с (это условие отбирает хорошо реконструированные события);

в) азимутальный угол ϕ между кандидатом в таоны и вектором суммарного импульса остальных адронов $> \pi/2$ (расчеты показывают, что в событиях с распадами очарованных адронов среднее значение ϕ значительно меньше, чем для взаимодействий ν_τ).

2. В случае длинного распада и канала $\tau \rightarrow h$:

а) угол излома трека > 20 мрад (это условие используется для подавления фона от рассеяния адронов и мюонов на небольшие углы);

б) вершина распада отделена от вершины взаимодействия нейтрино не более чем двумя пластинами свинца (подавление фона от неупругого взаимодействия адронов, так как вероятность взаимодействия растет с расстоянием);

в) импульс видимых продуктов распада > 2 ГэВ/с (в вершине распада могут присутствовать каскады от гамма-квантов);

г) компонента импульса дочерней частицы, перпендикулярная первичному пучку, $> 0,6$ ГэВ/с; в случае наличия в событии каскадов от гамма-квантов, исходящих из вершины распада, эта величина уменьшается до 0,3 ГэВ/с (см. обсуждение рис. 17).

В середине 2012 г. было объявлено о наблюдении второго события-кандидата в канале $\tau \rightarrow 3h$ [106]. Кроме того, в докладе [106] содержатся

первые ограничения на параметры осцилляций $\sin^2(2\theta_{13})$ и Δm_{13}^2 , полученные в эксперименте OPERA.

3.7. Возможность многомерного поиска взаимодействий ν_τ . Ввиду сложности поиска и идентификации событий в детекторе OPERA средняя эффективность обнаружения вершины взаимодействия внутри эмульсионных блоков составляет $\approx 60\%$ [104]. Дополнительная потеря полезного сигнала происходит на этапе поиска распада короткоживущей частицы. Как было показано в предыдущем подразделе, для снижения фона на события-кандидаты накладываются весьма жесткие кинематические ограничения — это приводит к дальнейшему снижению эффективности поиска событий от ν_τ . Согласно [104], полная эффективность поиска взаимодействий ν_τ с помощью стандартной методики составляет $\approx 7\%$, а среднее число таонных событий, ожидаемых за пять лет эксперимента, — всего $\approx 7,5$. Поэтому представляет интерес задача оптимизации критериев выделения ν_τ . Такая оптимизация возможна при использовании многомерных критериев, которые учитывают зависимости между различными характеристиками взаимодействий. Напомним, что многомерная методика классификации уже была успешно использована в эксперименте DONUT (см. п. 1.1).

Первый опыт применения многомерных критериев для выделения таонных событий был получен для канала распада $\tau \rightarrow 3h$ [107, 108]. В этом случае возможно определить координаты вершины распада тау-лептона с высокой точностью, что существенно упрощает поиск взаимодействий ν_τ . Противоположный случай, когда количество информации о событии весьма ограничено, был рассмотрен в [109] (кроме того, в [109] расчеты проведены для малой энергии первичного нейтрино — всего 10 ГэВ, а также случая короткого распада, что ведет к дополнительному усложнению задачи). В качестве примера там приводится случай топологии, содержащей три трека — мюон и два адрона. Трудность классификации таких событий заключается в том, что вершина, образованная двумя адронами, может являться как точкой взаимодействия первичного нейтрино, так и вершиной распада D^0 . Идентификация мюона также не помогает выделять события-кандидаты для этого канала в случае моды распада $\tau \rightarrow \mu$.

В [109] для классификации взаимодействий использовались многомерные байесовы критерии [110], основанные на семи параметрах: трех значениях импульса частиц, трех углах между треками и IP (в данном случае это расстояние от вершины до трека мюона). Была разработана упрощенная модель отклика эмульсионного блока, использующая генератор событий Neugen3.5.5 [111] — официальный программный пакет коллаборации MINOS, — и комплекс программ Geant4 [112] для прослеживания продуктов взаимодействия первичного нейтрино. Показано, что в рамках сделанных приближений возможно выделить $\approx 75\%$ взаимодействий ν_τ , при этом ошибка классификации очарованных событий составляет $\approx 3\%$. Эффективность 75% здесь

относится только к последнему этапу идентификации событий от ν_τ , когда распад короткоживущей частицы — кандидата в таоны — уже успешно обнаружен.

Наконец, методика идентификации таонных нейтрино, использующая метод нейронных сетей, представлена в [113]. Хотя в настоящее время в эксперименте OPERA нет законченной и общепринятой процедуры многомерного поиска событий от ν_τ , вполне вероятно, что такая методика будет разработана и применена в ближайшем будущем.

4. КАНДИДАТЫ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ν_τ В ЭМУЛЬСИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA

В заключение приведем схемы двух событий-кандидатов, зарегистрированных к настоящему моменту. Общий вид первого из них, обнаруженного в канале распада $\tau \rightarrow h$, приведен на рис. 18. Событие содержит пять заряженных адронов, исходящих из вершины, трек кандидата в таоны, который распадается с образованием заряженного адрона и двух гамма-квантов, а также один нейтральный адрон, который подвергся процессу упру-

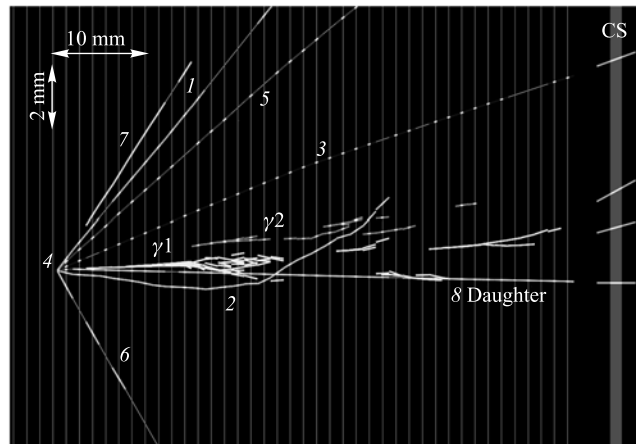


Рис. 18. Общий вид первого события-кандидата [87]. Видны пять адронов (1–3, 5, 6), исходящих из первичной вершины; кроме того, можно заметить короткий трек кандидата в таоны 4. Два ливня от гамма-квантов (γ_1 и γ_2), а также адрон 8 являются продуктами распада короткоживущей частицы. Трек 7 возник в результате взаимодействия нейтральной частицы в свинце эмульсионного блока. Тонкими вертикальными линиями обозначены положения эмульсионных слоев. Стрелками показан масштаб в направлениях вдоль и поперек первичного пучка

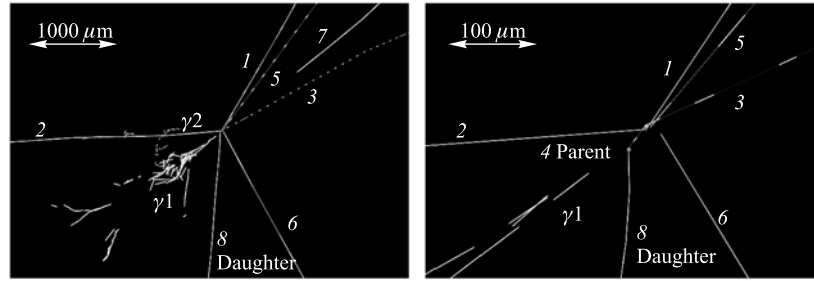


Рис. 19. Область вершины первого события-кандидата [87], показанная с большим увеличением по сравнению с рис. 18. Горизонтальными стрелками обозначен масштаб. Заметен короткий трек кандидата на «длинный распад» таона (4), обнаруженный по излому (отличию направлений треков 4 и 8). На рисунке справа видно, что один из гамма-квантов исходит из вершины распада

гой перезарядки. Область вершины событий в увеличенном масштабе показана на рис. 19.

На рис. 20–22 представлены значения характеристик первого события-кандидата, рассмотренных в п. 3.6, а также модельные распределения этих величин. На рис. 20 показаны измеренные значения геометрических параметров — длины пролета короткоживущей частицы и угла излома трека кандидата в таоны, а также распределения этих величин для СС-событий, инициированных ν_τ , вычисленные в результате моделирования. Событие-кандидат удовлетворяет критериям отбора, так как значения параметров лежат вне

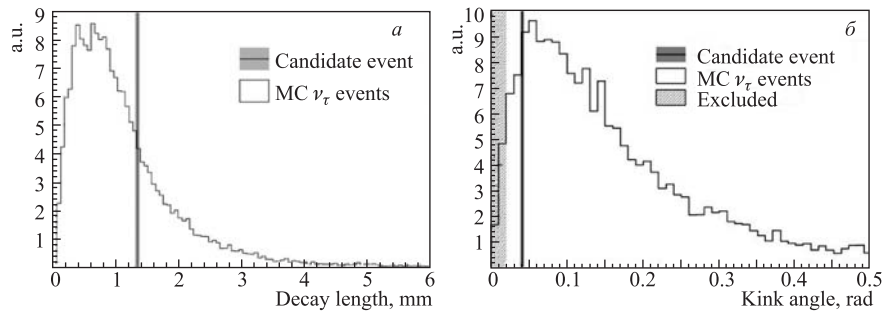


Рис. 20. а) Измеренное значение длины трека короткоживущей частицы для первого события-кандидата и модельное распределение этой величины в СС-взаимодействиях ν_τ [87]. б) То же для угла излома трека кандидата в таоны. В соответствии с критериями отбора взаимодействий ν_τ (см. п. 3.6) параметры взаимодействий должны лежать вне заштрихованной области. Ширина вертикальных полос на рисунке обозначает погрешность измерения параметров

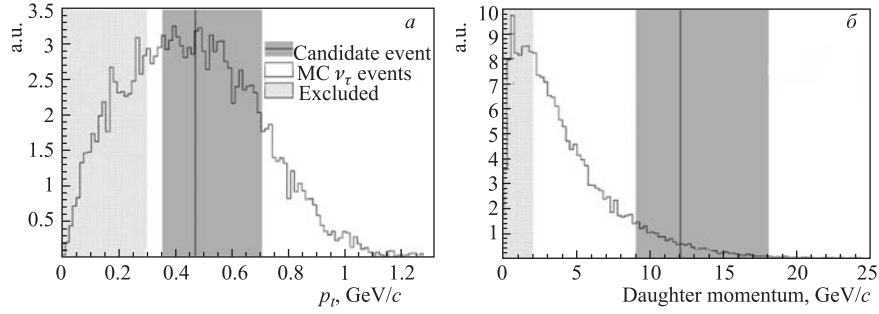


Рис. 21. То же, что на рис. 20, но для случая других величин: *a*) поперечной компоненты импульса дочерней частицы, возникшей от распада кандидата в тау-лептоны; *б*) импульса дочерней частицы [87]

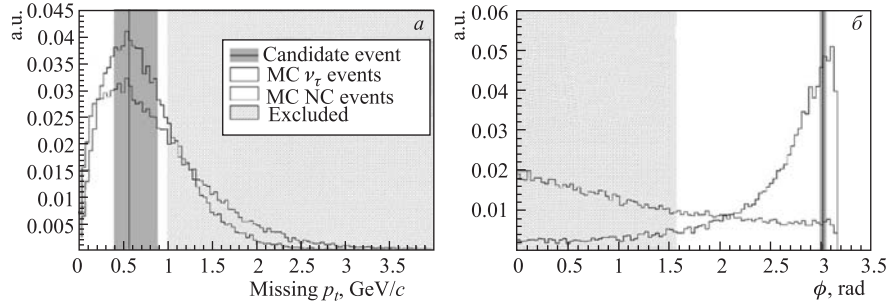


Рис. 22. То же, что и на рис. 20, 21, но для случая полного импульса в направлении, перпендикулярном первичному пучку (*a*) угла ϕ (*б*) [87]. В данном случае помимо модельных распределений для ν_τ приведены также расчетные гистограммы для NC-взаимодействий ν_μ

заштрихованной области (в данном случае кинематическое ограничение накладывается только на один из параметров — угол излома). Геометрические параметры в эмульсии измеряются с большой точностью, поэтому ширина вертикальных полос на рисунке, обозначающих погрешность измерения параметров, мала.

На рис. 21 также приведены два модельных распределения и значения соответствующих величин для события-кандидата, но для случая других параметров: компоненты импульса продуктов распада короткоживущей частицы в направлении, перпендикулярном первичному пучку, и величины импульса дочерней частицы. Погрешности восстановления импульсов значительно превышают неопределенности прямых геометрических измерений в эмульсии, которые имели место для случая рис. 20, поэтому полосы, обозначающие доверительный интервал значений параметров, в данном случае гораздо шире.

Значительная часть модельных событий на обоих графиках попадает в заштрихованную область, что иллюстрирует необходимость жестких кинематических ограничений в стандартной методике поиска взаимодействий ν_τ .

Рис. 22 демонстрирует гистограммы распределений по полному импульсу в направлении, перпендикулярном первичному пучку («потерянный» поперечный импульс), а также по азимутальному углу ϕ между кандидатом в таоны и вектором суммарного импульса остальных адронов, исходящих из первичной вершины.

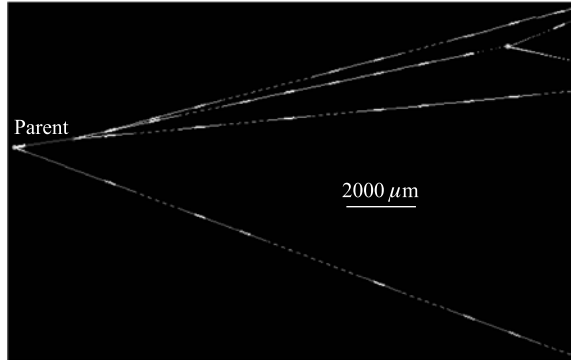


Рис. 23. Общий вид второго события-кандидата в канале $\tau \rightarrow 3h$ [106]

Наконец, общий вид второго события-кандидата показан на рис. 23. Кандидат в таоны распался с образованием трех заряженных частиц; кроме того, имеется еще один трек, исходящий из вершины первичного взаимодействия.

5. СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА OPERA

В настоящее время накопление материала в эксперименте OPERA приближается к завершению. Экспозиция 2008–2012 гг. составила $1,82 \cdot 10^{20}$ протонов на мишени (p.o.t.) при плановом значении $2,25 \cdot 10^{20}$ p.o.t. [106]. Таким образом, к концу 2012 г. было набрано $\approx 80\%$ экспериментального материала. Обработка первых двух лет экспозиции, 2008–2009 гг., завершена; в этой выборке обнаружен один кандидат на взаимодействие таонного нейтрино в эмульсионном детекторе; в событиях, зарегистрированных в 2010–2011 гг., также найден один кандидат в ν_τ . Обработка материала 2010–2011 гг. еще не завершена; уже анализируются некоторые взаимодействия экспозиции 2012 г.

По состоянию на 1 июля 2012 г. среднее ожидаемое число событий-кандидатов, зарегистрированных в эмульсиях эксперимента OPERA, удовлетворяющих стандартным критериям отбора (см. п. 3.6), составляет $\approx 5,5$.

Поэтому в ближайшее время, в случае реальности явления осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, можно ожидать регистрации в эксперименте OPERA еще 1–2 событий-кандидатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре представлен статус работ по прямому поиску осцилляции нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ с помощью гибридного детектора эксперимента OPERA, основной частью которого являются эмульсионные блоки.

Методика поиска взаимодействий тау-нейтрино базируется на достижениях прямых предшественников OPERA — DONUT, CHORUS и NOMAD (разд. 1). В разд. 2 был описан источник нейтрино — пучок CNGS, а также рассмотрена структура детектора OPERA. Разд. 3, который является центральным в настоящей работе, посвящен изложению алгоритмов реконструкции и анализа событий, начиная с уровня показаний отдельных сенсоров электронных детекторов и одиночных зерен, зарегистрированных в эмульсии.

Эксперимент OPERA по прямому наблюдению осцилляций нейтрино приближается к завершению набора данных. В результате анализа части экспериментальных данных обнаружено два кандидата на взаимодействие таонного нейтрино в эмульсионном детекторе (см. разд. 4). Детально изучены основные источники фона — события с рождением очарованных адронов и рассеянием адронов и мюонов на большие углы. Многомерная методика выделения событий, инициированных ν_τ , в будущем, возможно, позволит повысить соотношение сигнал/фон и, следовательно, статистическую достоверность получаемых результатов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 11-02-00476_а, 12-02-00213_а, 12-02-12142-офи_м, 12-02-12127-офи_м, 12-02-31173-мол_а), Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ НШ 871.2012.2, программ фундаментальных исследований президиума РАН «Фундаментальные свойства материи и астрофизика» и «Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных взаимодействий, связанные с работами на ускорителях ЦЕРН». Работа выполнена при поддержке МОН РФ, ГК № 11.519.11.2040. Авторы НИИЯФ МГУ благодарят ПНР-3 за финансовую поддержку. Работа Т. А. Джатдоева поддержана стипендией Ученого совета МГУ для молодых ученых и преподавателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pontecorvo B. M. Mesonium and Antimesonium // J. Exp. Theor. Phys. 1957. V. 33. P. 549–551.
2. Davis R. J., Harmer D. S., Hoffman K. C. Search for Neutrinos from the Sun // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 20. P. 1205–1209.

3. Hirata K. S. *et al.* (*Kamiokande-II Collab.*). Observation of B-8 Solar Neutrinos in the Kamiokande-II Detector // *Phys. Rev. Lett.* 1989. V. 63. P. 16–19.
4. Fukuda Y. *et al.* (*Super-Kamiokande Collab.*). Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. P. 1562–1567.
5. Ambrosio M., Antolini R., Aramo C. (*MACRO Collab.*). Measurement of the Atmospheric Neutrino-Induced Upgoing Muon Flux Using MACRO // *Phys. Lett. B.* 1998. V. 434. P. 451–457.
6. Allison W. W. M. *et al.* (*SOUDAN-2 Collab.*). Neutrino Oscillation Effects in Soudan 2 Upward-Stopping Muons // *Phys. Rev. D.* 2005. V. 72. P. 052005–052016.
7. Araki T. *et al.* (*KamLAND Collab.*). Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. 081801. 5 p.
8. Ahn M. H. *et al.* (*K2K Collab.*). Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment // *Phys. Rev. D.* 2006. V. 74. 072003. 39 p.
9. Michael D. G. *et al.* (*MINOS Collab.*). Observation of Muon Neutrino Disappearance with the MINOS Detectors in the NuMI Neutrino Beam // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97. 191801. 6 p.
10. Adamson P. *et al.* (*MINOS Collab.*). Search for Active Neutrino Disappearance Using Neutral-Current Interactions in the MINOS Long-Baseline Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. 221804. 5 p.
11. Maki Z., Nakagawa M., Sakata S. Remarks on the Unified Model of Elementary Particles // *Prog. Theor. Phys.* 1962. V. 28. P. 870–880.
12. An F. P. *et al.* (*Daya Bay Collab.*). Observation of Electron–Antineutrino Disappearance at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. 171803. 7 p.
13. Acquafredda R. *et al.* (*OPERA Collab.*). The OPERA Experiment in the CERN to Gran Sasso Neutrino Beam // *JINST.* 2009. V. 4. P04018. 61 p.
14. Kodama K. *et al.* (*DONUT Collab.*). Detection and Analysis of Tau-Neutrino Interactions in DONUT Emulsion Target // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 493. P. 45–66.
15. Eskut E. *et al.* (*CHORUS Collab.*). The CHORUS Experiment to Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Oscillation // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1997. V. 401. P. 7–44.
16. Gonzalez-Garcia M. C., Nir Y. Neutrino Masses and Mixing: Evidence and Implications // *Rev. Mod. Phys.* 2003. V. 75. P. 345–402.
17. Gonzalez-Garcia M. C., Maltoni M. Phenomenology with Massive Neutrinos // *Phys. Rep.* 2008. V. 460. P. 1–129.
18. Altarelli G., Feruglio F. Models of Neutrino Masses and Mixings // *New J. Phys.* 2004. V. 6. 106. 39 p.
19. Mohapatra R. N. *et al.* Theory of Neutrinos: A White Paper // *Rep. Prog. Phys.* 2007. V. 70. P. 1757–1867.
20. Altarelli G., Feruglio F. Discrete Flavor Symmetries and Models of Neutrino Mixing // *Rev. Mod. Phys.* 2010. V. 82. P. 2701–2729.
21. Beringer J. *et al.* (*PDG*). Neutrino Mass, Mixing and Oscillations // *Phys. Rev. D.* 2012. V. 86. 010001. 58 p.
22. Bilenky S. M., Giunti C., Grimus W. Phenomenology of Neutrino Oscillations // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 1999. V. 43. P. 1–86.

23. *Bilenky S. M.* Neutrino Masses, Mixing and Oscillations // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2006. V. 57. P. 61–67.
24. *Giunti C.* Theory and Phenomenology of Neutrino Mixing // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 2007. V. 169. P. 309–320.
25. *Bilenky S. M.* On the Theory of Neutrino Mixing and Oscillations. hep-ph/1012.4966. 2010. 28 p.
26. *Bilenky S. M.* Neutrino Masses and Oscillations. hep-ph/1105.2306. 2011. 22 p.
27. *Bilenky S. M.* Neutrinoless Double Beta Decay // *Part. Nucl.* 2010. V. 41. P. 1287–1336.
28. *Биленький С. М.* Массы, смешивание и осцилляции нейтрино // *УФН*. 2003. Т. 173. С. 1171–1186.
29. *Feldman G. F., Cousins R. D.* Unified Approach to the Classical Statistical Analysis of Small Signals // *Phys. Rev. D*. 1998. V. 57. P. 3873–3889.
30. *Junk T.* Confidence Level Computation for Combining Searches with Small Statistics // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1999. V. 434. P. 435–443.
31. *Altegoer J. et al. (NOMAD Collab.)*. The NOMAD Experiment at the CERN SPS // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1998. V. 404. P. 96–128.
32. *Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д.* Исследование элементарных частиц фотографическим методом: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
33. *Niu K., Mikumo E., Maeda Y.* A Possible Decay in Flight of a New Type Particle // *Prog. Theor. Phys.* 1971. V. 46. P. 1644–1646.
34. *Armenise N. et al.* High-Speed Particle Tracking in Nuclear Emulsion by Last-Generation Automatic Microscopes // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2005. V. 551. P. 261–270.
35. *Astier P. et al. (NOMAD Collab.)*. Final NOMAD Results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ and $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ Oscillations Including a New Search for ν_τ Appearance Using Hadronic τ Decays // *Nucl. Phys. B*. 2001. V. 611. P. 3–39.
36. *Autiero D.* The OPERA Event Generator and the Data Tuning of Nuclear Reinteractions // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 2005. V. 139. P. 253–259.
37. *Perl M. L. et al.* Evidence for Anomalous Lepton Production in $e^+ - e^-$ Annihilation // *Phys. Rev. Lett.* 1975. V. 35. P. 1489–1492.
38. *Cowan C. L. et al.* Detection of the Free Neutrino: A Confirmation // *Science*. 1956. V. 124. P. 103–104.
39. *Danby G. et al.* Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos // *Phys. Rev. Lett.* 1962. V. 9. P. 36–44.
40. *Kodama K. et al. (DONUT Collab.)*. Observation of Tau Neutrino Interactions // *Phys. Lett. B*. 2001. V. 504. P. 218–224.
41. *Aoki S.* Tracking and Vertex Reconstruction in Modern Emulsion Experiments // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2001. V. 473. P. 192–196.
42. *Kodama K. et al. (DONUT Collab.)*. Final Tau-Neutrino Results from the DONUT Experiment // *Phys. Rev. D*. 2008. V. 78. 052002. 20 p.
43. *Eskut E. et al. (CHORUS Collab.)*. Final Results on ν_μ to ν_τ Oscillation from the CHORUS Experiment // *Nucl. Phys. B*. 2008. V. 793. P. 326–343.
44. *Onengut G. et al. (CHORUS Collab.)*. Measurements of D -zero Production and Branching Fractions in Neutrino Nucleon Scattering // *Phys. Lett. B*. 2005. V. 613. P. 105–117.

45. *Onengut G. et al. (CHORUS Collab.)*. Measurement of Fragmentation Properties of Charmed Particle Production in Charged-Current Neutrino Interactions // *Phys. Lett. B*. 2004. V. 604. P. 145–156.
46. *Kayis-Topaksu A. et al. (CHORUS Collab.)*. Measurement of Charm Production in Neutrino Charged-Current Interactions // *New J. Phys.* 2011. V. 13. 093002. 15 p.
47. *Wu Q. et al. (NOMAD Collab.)*. A Precise Measurement of the Muon Neutrino–Nucleon Inclusive Charged Current Cross-Section off an Isoscalar Target in the Energy Range $2.5 < E_\nu < 40$ GeV by NOMAD // *Phys. Lett. B*. 2008. V. 660. P. 19–25.
48. *Guler M. et al. (OPERA Collab.)*. An Appearance Experiment to Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Oscillations in the CNGS Beam. CERN/SPSC 2000-028 (Proposal). 2000. 270 p.
49. *Acquafredda R. et al. (OPERA Collab.)*. First Events from the CNGS Neutrino Beam Detected in the OPERA Experiment // *New J. Phys.* 2006. V. 8. 303. 14 p.
50. *Anokhina A. et al. (OPERA Collab.)*. Emulsion Sheet Doublets as Interface Trackers for the OPERA Experiment // *JINST*. 2008. V. 3. P07005. 22 p.
51. *Anokhina A. et al. (OPERA Collab.)*. Study of the Effects Induced by Lead on the Emulsion Films of the OPERA Experiment // *Ibid.* P07002. 20 p.
52. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.)*. The Detection of Neutrino Interactions in the Emulsion/Lead Target of the OPERA Experiment // *JINST*. 2009. V. 4. P06020. 20 p.
53. *Bailey R. et al.* The CERN Neutrino Beam to Gran Sasso (NGS). CERN-SL/99-034(DI). 1999. 33 p.
54. *Van de Vyver B.* Prompt ν_τ Background in Wide Band ν_μ Beams // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1997. V. 385. P. 91–99.
55. *Adam T. et al. (OPERA Collab.)*. Measurement of the Neutrino Velocity with the OPERA Detector in the CNGS Beam // *JHEP*. 2012. V. 10. 093. 37 p.
56. *Brunetti G.* Neutrino Velocity Measurement with the OPERA Experiment in the CNGS Beam. PhD Thesis. Univ. Claude Bernard Lyon-I – Univ. of Bologna, 2011. 182 p.
57. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.)*. Study of Neutrino Interactions with the Electronic Detectors of the OPERA Experiment // *New J. Phys.* 2011. V. 13. 053051. 22 p.
58. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.)*. Measurement of the Atmospheric Muon Charge Ratio with the OPERA Detector // *Eur. Phys. J. C*. 2010. V. 67. P. 25–37.
59. *Mauri N.* Measurement of the Atmospheric Muon Charge Ratio with the OPERA Detector. PhD Thesis. Univ. of Bologna, 2011. 149 p.
60. *Adam T. et al.* The OPERA Experiment Target Tracker // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2007. V. 577. P. 523–539.
61. *Cazes A. et al.* Electromagnetic Characterization of the 990 Ton Gapless Magnets for the OPERA Experiment // *JINST*. 2007. V. 2. T03001. 11 p.
62. *Bergnoli A. et al.* Tests of OPERA RPC Detectors // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2005. V. 52. P. 2963–2970.
63. *Bergnoli A. et al.* The Quality Control Tests for the RPCs of the OPERA Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2004. V. 533. P. 203–207.
64. *Zimmermann R. et al.* The Precision Tracker of the OPERA Detector // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2005. V. 555. P. 435–450.

65. *Nakamura T. et al.* The OPERA Film: New Nuclear Emulsion for Large-Scale, High-Precision Experiments // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 556. P. 80–86.
66. *Sirignano C.* R&D on OPERA ECC: Studies on Emulsion Handling and Event Reconstruction Techniques. PhD Thesis. Univ. of Salerno, 2005. 168 p.
67. *Sirri G.* Automatic Scanning of Emulsion Films for the OPERA Experiment. PhD Thesis. Univ. of Bologna, 2003. 115 p.
68. *Pistillo C.* An Automatic Scanning System for Nuclear Emulsion Analysis in the OPERA Experiment. PhD Thesis. Univ. of Napoli, 2004. 95 p.
69. *Di Ferdinando D.* Experimental Study of Neutrino Interactions in the OPERA-Like Emulsion Cloud Chambers. PhD Thesis. Univ. of Bologna, 2007. 127 p.
70. *Pozzato M.* Reconstruction of CNGS Neutrino Events in the Emulsions of the OPERA Experiment. PhD Thesis. Univ. of Bologna, 2009. 134 p.
71. *Kreslo I. et al.* High-Speed Analysis of Nuclear Emulsion Films with the Use of Dry Objective Lenses // JINST. 2008. V. 3. P04006. 14 p.
72. *Rescigno R.* The Neutrino Interaction Analysis Chain in OPERA. PhD Thesis. Univ. of Salerno, 2011. 160 p.
73. *Ingelman G., Edin A., Rathsmann J.* LEPTO 6.5 — A Monte Carlo Generator for Deep Inelastic Lepton–Nucleon Scattering // Comp. Phys. Commun. 1997. V. 101. P. 108–134.
74. *Eskut E. et al. (CHORUS Collab.).* Search for ν_μ to ν_τ Oscillation Using the τ Decay Modes into a Single Charged Particle // Phys. Lett. B. 1998. V. 434. P. 205–213.
75. *Sjostrand T.* High-Energy-Physics Event Generation with PYTHIA 5.7 and JETSET 7.4 // Comp. Phys. Commun. 1994. V. 82. P. 74–89.
76. *Ranft J.* DPMJET Versions II.3 and II.4: Sampling of Hadron Hadron, Hadron Nucleus and Nucleus Nucleus Interactions at Cosmic Ray Energies According to the Dual Parton Model Description of the Model and Code Manual. INFN-AE-97-45. 1997. 71 p.
77. *Llewellyn-Smith C. H.* Neutrino Reactions at Accelerator Energies // Phys. Rep. 1972. V. 3. P. 261–379.
78. *Rein D., Sehgal L. M.* Neutrino-Excitation of Baryon Resonances and Single Pion Production // Ann. Phys. 1981. V. 133. P. 79–153.
79. *Brun R. et al.* Geant3. Technical Report CERN-DD/EE/84-1. 1987.
80. *CERN Application Software Group.* Geant — Detector Description and Simulation Tool. CERN Program Library Long Writeup W5013. 1993. 430 p.
81. *Gheata A.* The Virtual Monte Carlo: Status and Applications // Talk at CHEP2004 Conf., Interlaken, Switzerland, 2004.
82. *Brun R., Rademakers F.* ROOT — An Object Oriented Data Analysis Framework // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P. 81–86.
83. *Marteau J.* The OPERA Global Readout and GPS Distribution System // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 617. P. 291–293.
84. *Bertolin A., Tran N. T.* OpCarac: An Algorithm for the Classification of the Neutrino Interactions Recorded by OPERA. OPERA Public Note 100. 2009. 24 p.
85. *Dmitrievsky S. G., Gornushkin Yu. A., Ososkov G. A.* Neural Networks, Cellular Automata, and Robust Approach Applications for Vertex Localization in the OPERA Target Tracker Detector. JINR Commun. E10-2005-216. Dubna, 2005. 17 p.

86. *Gornushkin Yu. A.* Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Oscillations in Appearance Mode in the OPERA Experiment // *Part. Nucl.* 2011. V. 42. P. 1077–1086.
87. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.)*. Observation of a First ν_τ Candidate Event in the OPERA Experiment in the CNGS Beam // *Phys. Lett. B.* 2010. V. 691. P. 138–145.
88. *Di Marco N., Hamada K., Nonoyama Y.* The Emulsion Scanning System of the OPERA Experiment // Presentation at Neutrino-2010 Conf., Athens, 2010.
89. *Pupilli F.* Search for ν_τ Interactions in the OPERA Experiment. PhD Thesis. Univ. of L'Aquila, 2011. 139 p.
90. *Bozza C.* Neutrino Oscillation Experiments with Nuclear Emulsions. PhD Thesis. Univ. of Salerno, 2000. 215 p.
91. *Amendola S. et al.* SySal: System of Salerno // Proc. of the First Intern. Workshop on Nuclear Emulsion Techniques, Nagoya, Japan, 1999. hep-ph/9901031. 26 p.
92. *Tioukov V. et al.* The FEDRA — Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis in the OPERA Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2006. V. 559. P. 103–105.
93. *Arrabito L. et al.* Track Reconstruction in the Emulsion-Lead Target of the OPERA Experiment Using the ESS Microscope // *JINST.* 2007. V. 2. P05004. 13 p.
94. *Arrabito L. et al.* Hardware Performance of a Scanning System for High Speed Analysis of Nuclear Emulsions // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2006. V. 568. P. 578–587.
95. *De Serio M. et al.* High Precision Measurements with Nuclear Emulsions Using Fast Automated Microscopes // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2005. V. 554. P. 247–254.
96. *De Serio M. et al.* Momentum Measurement by the Angular Method in the Emulsion Cloud Chamber // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 512. P. 539–545.
97. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.)*. Momentum Measurement by the Multiple Coulomb Scattering Method in the OPERA Lead-Emulsion Target // *New J. Phys.* 2012. V. 14. 013026. 19 p.
98. *Arrabito L. et al.* Electron/Pion Separation with an Emulsion Cloud Chamber by Using a Neural Network // *JINST.* 2007. V. 2. P02001. 16 p.
99. *Esposito L. S.* Study of Electron Identification in the Emulsion Cloud Chambers of the OPERA Experiment. PhD Thesis. Univ. of Bologna, 2005. 130 p.
100. *Cozzi M.* Study of the Pion Identification in the Emulsion Cloud Chambers of the OPERA Experiment. PhD Thesis. Univ. of Bologna, 2005. 159 p.
101. *Juget F.* Electromagnetic Shower Reconstruction with Emulsion Films in the OPERA Experiment // *J. Phys. Conf. Ser.* 2009. V. 160. 012033. 8 p.
102. *Toshito T. et al.* π/p Separation at 1.2 GeV/c by an Emulsion Cloud Chamber // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2004. V. 516. P. 436–439.
103. *Ariga A. et al.* A Method to Search for Short-Lived Particle Decays in the OPERA Experiment. OPERA Public Note 128. 2011. 7 p.
104. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.)*. Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Oscillation with the OPERA Experiment in the CNGS Beam // *New J. Phys.* 2012. V. 14. 033017. 17 p.
105. *Strauss T.* Charm Production in the OPERA Experiment and the Study of a High Temperature Superconducting Solenoid for a Liquid Argon Time Projection Chamber. PhD Thesis (ETH N 19247). ETH Zurich Univ., 2010. 231 p.

106. *Nakamura M.* Results from OPERA // Talk at Neutrino-2012 Conf., Kyoto, Japan, 2012.
107. *Lavy M.* Developpement des outils d'analyse et de reconstruction dans OPERA et analyse du canal $\tau \rightarrow 3h$ hadrons charges. PhD Thesis (LAPP-T-2004-03). Univ. Lyon I, 2004. 243 p. (In French).
108. *Besnier M.* Reconstruction et analyse d'interactions de neutrinos dans les blocs cibles emulsions d'OPERA et discrimination du fond charme dans le canal $\tau \rightarrow 3h$. PhD Thesis (LAPP-T-2008-02). Univ. de Savoie, 2008. 243 p. (In French).
109. *Agafonova N. Yu. et al.* Present Status of the OPERA Experiment for the Direct Observation of Neutrino Oscillations in the $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Channel // Bul. of the Rus. Acad. of Sciences: Physics. 2011. V. 75. P. 423–426.
110. *Theodoridis S., Koutroumbas K.* Pattern Recognition. Elsevier, 2003.
111. *Gallagher H.* The NEUGEN Neutrino Event Generator // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2002. V. 112. P. 188–194.
112. *Agostinelli S. et al. (Geant4 Collab.).* Geant4 — a Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250–303.
113. *Tran T.* Recherche des oscillations de neutrinos par apparition du muonique du ν_τ avec desintegration muonique du τ dans l'experience OPERA. PhD Thesis. IPNL Lyon, 2011. 190 p.