

ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО В ПОТОКЕ ЦЕРН – ГРАН САССО

В.А. Куликовский

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

E-mail: kulikovsky@inbox.ru

A CNGS project aims to prove existence of $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations in pure muon neutrino beam from SPS accelerator (CERN). Neutrinos from this beam are detected in Gran Sasso underground laboratory (Italy) located 732km from source. One of the main detector for this purpose is OPERA. It designed from Emulsion Cloud Chamber to detect tau neutrinos with very low background. Whole project began its first working cycle in 20th June.

В 1967г Р. Девис выполнил несколько серий измерений потока солнечных нейтрино в рамках своего знаменитого эксперимента HOMESTAKE (Южная Дакота, США). Зарегистрированный поток оказался в три раза меньше, чем рассчитанный в рамках солнечной модели. Эксперимент продолжался с 1967 по 1988 год. За это время были улучшены как стандартная солнечная модель, так и точность измерений потока нейтрино. Но основной результат так и остался прежним – зарегистрированный поток электронных нейтрино в три раза меньше, чем теоретический.

В настоящее время наиболее приемлемым объяснением этой проблемы является гипотеза об осцилляции нейтрино. Согласно этой гипотезе нейтрино может менять свой тип при перемещении в пространстве. При этом происходит нарушение закона сохранения лептонного заряда. При прохождении нейтрино через вещество появляются дополнительные эффекты из-за отличия взаимодействия электронных нейтрино с веществом от взаимодействия других ароматов нейтрино с веществом. Таким образом различают вакуумные осцилляции и осцилляции в веществе.

В эксперименте SNO было показано, что суммарный поток нейтрино всех ароматов совпадает с теоретическим, а чисто нейтринный поток нейтрино составляет 0.301 ± 0.033 от полного потока [1]. Таким образом можно говорить о существовании нейтринных осцилляций из электронного типа в другие.

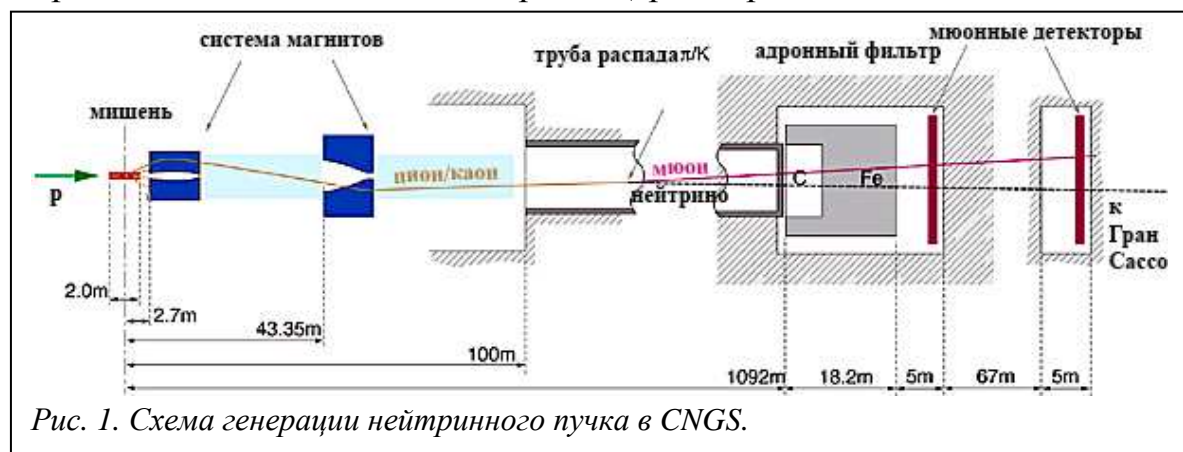
Эксперимент KamioKande по изучению атмосферных нейтрино выявил дефицит атмосферных мюонных нейтрино. В эксперименте CHOOZ по изучению реакторных нейтрино была исключена возможность объяснения этого дефицита с помощью осцилляций $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$. Таким образом, одним из приемлемых объяснений являются осцилляции $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$. Также объяснением могут быть осцилляции в стерильные нейтрино (не участвующие в слабых взаимодействиях). На последнее объяснение указывает эксперимент LSND.

В эксперименте Super-KamioKande были уточнены результаты KamioKande. Наиболее предпочтительным объяснением данных этого эксперимента, также указывающего на дефицит нейтрино, являются осцилляции $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$. При этом результаты эксперимента дают следующие наиболее вероятные значения разности квадратов и угла смешивания мюонных и таонных нейтрино:

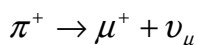
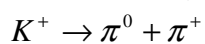
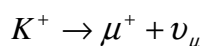
$$\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} eV^2 \sin^2 2\theta = 1.$$

Настоящая статья посвящена эксперименту по изучению осцилляций в потоке мюонных нейтрино в Земле. Поток мюонных нейтрино создаётся на ускорителе в ЦЕРНе (Швейцария), а регистрируется через 732км в Гран Сассо (Италия). Англоязычное название проекта – CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso). В ходе этого эксперимента можно будет проверить осцилляции $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$.

В подземной лаборатории Гран Сассо планируется разместить несколько детекторов нейтрино. Проект OPERA[2] создан для регистрации таонных нейтрино в потоке мюонных нейтрино Церн – Гран Сассо.



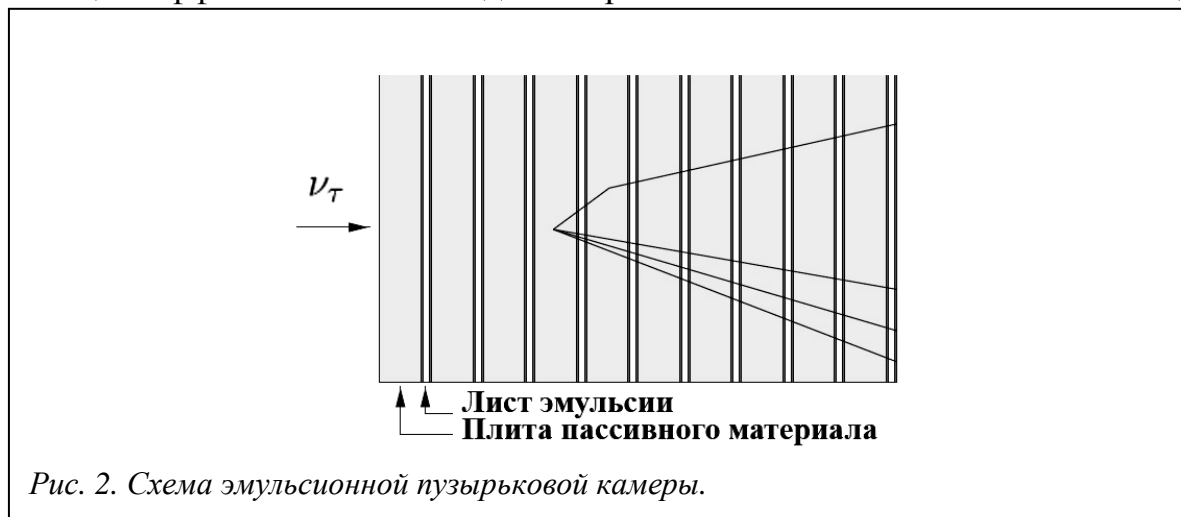
Генерация потока мюонных нейтрино для CNGS осуществляется с помощью ускорителя SPS (ЦЕРН). В этом ускорителе протоны ускоряются до энергий 400ГэВ. Импульсы длиной 10.5 мкс с 2.4×10^{13} протонов в импульсе выводятся на графитовую мишень (см. рис.1). Всего планируется выводить 4.5×10^{19} протонов на мишень в год. В результате взаимодействия протонов с мишенью рождаются различные частицы, в том числе пионы и каоны, которые собираются в пучок с помощью системы магнитов. Собранный пучок проходит через километровую вакуумную трубу, в которой происходят следующие распады мезонов:



Далее пучок проходит через графитовую и железную защиту, в которой поглощаются нераспавшиеся адроны. На выходе защиты находятся мюонные детекторы для мониторинга пучка. В дальнейшем мюоны поглощаются толщиной земли порядка 730км. В результате лишь нейтрино могут достигнуть Гран Сассо.

Основная часть детектор таонных нейтрино OPERA – эмульсионная пузырьковая камера (Emulsion Cloud Chamber - ECC). ECC – это модульная структура, в которой пластины эмульсии располагаются между пластинами железа, свинца или другого материала с большим массовым числом (см. также рис.2). Использование таких камер позволяет получить пространственную картину события, большую массу самого детектора при сравнительно низкой стоимости. Эмульсионная пузырьковая камера была успешно применена в проекте DONUT, в котором впервые зарегистрировали таонные нейтрино.

Общая эффективная масса детектора составляет 1300 тонн. Если оценки



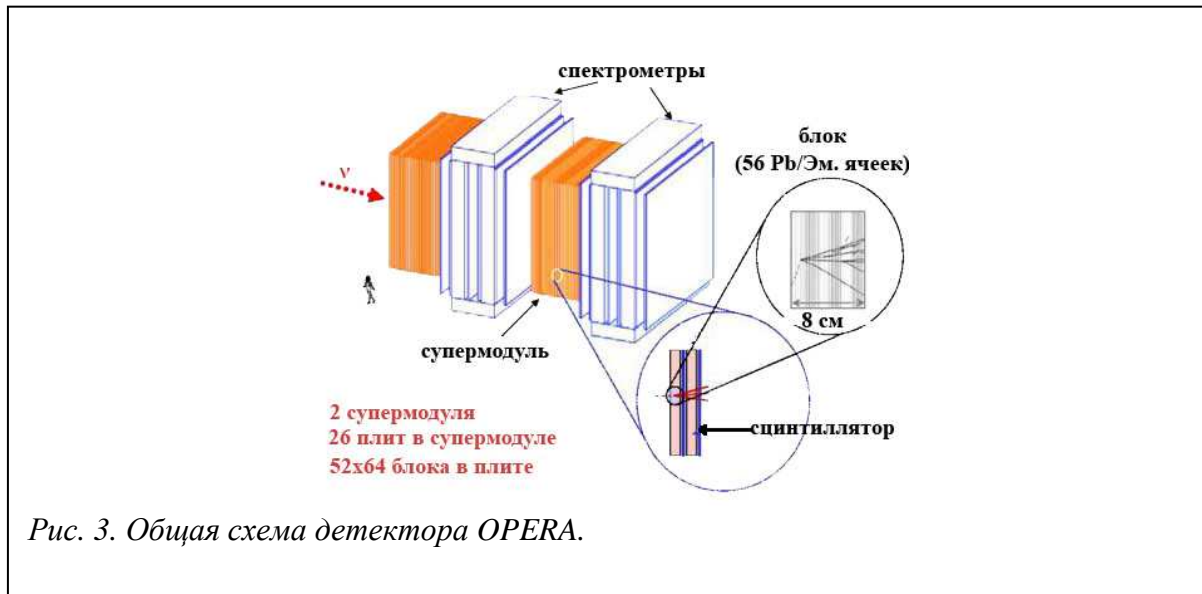
разности квадратов масс и угла смешивания из эксперимента SuperKamioKande верны, то, учитывая суммарный поток нейтрино из ЦЕРНа, можно будет зарегистрировать около 18 таонных нейтрино за год с оцененным фоном лишь в одно событие. Возможное увеличение потока ускорителя SPS приведёт к большему числу событий при практически неизменном фоне. При этом будет зарегистрировано также ~50 000 мюонных нейтрино.

Общая схема детектора OPERA приведена на рисунке 3. Детектор состоит из двух супермодулей. После каждого из них находится по спектрометру для определения энергии мюонов и их заряда. Супермодуль представляет из себя 26 плит, каждая из которых в свою очередь состоит из блоков свинец/фотоэмульсия и сцинтилляционных детекторов рядом с каждой плитой. Каждый из блоков свинец/фотоэмульсия состоит 56 ячеек, каждая из которых представляет из себя свинцовую пластину, за которой находится двухслойная фотоэмульсия.

Система сцинтилляционных детекторов создана для определения блока, в котором произошло какое-либо событие с вылетом заряженной частицы. Блоки, в которых произошли взаимодействия, извлекаются с помощью специальных роботов.

Блок свинец/фотоэмульсия имеет размеры $127 \times 102 \times 75.4 \text{ mm}^3$. Дополнительно с каждым блоком будут использованы по две эмульсионные пластины, которые крепятся в специальной упаковке к блоку снаружи. При срабатывании электронных детекторов сначала предполагается исследовать эти пластины, после чего, в случае обнаружения следов взаимодействия, будет исследован

эмульсионный блок. Эмульсии в исследуемом блоке будут помечены рентгеном, после чего на поверхности блок будет разобран, эмульсии проявлены и упакованы в защитную плёнку.



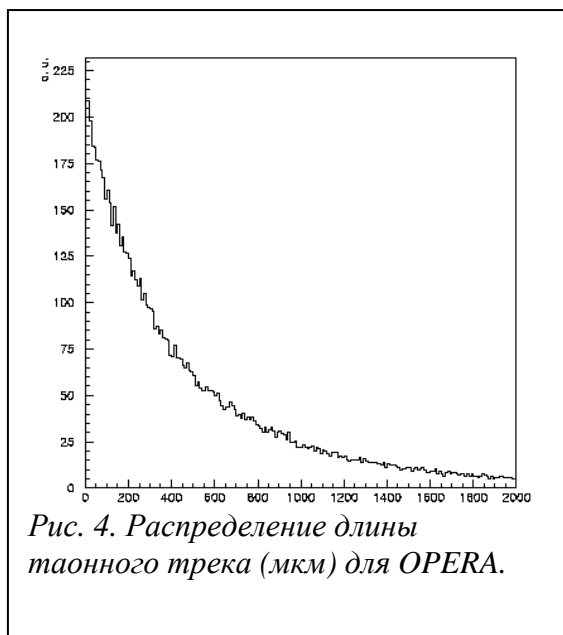
Эмульсионные пластины (для эксперимента OPERA потребуется ~10 миллионов), состоят из прозрачной пластиковой основы толщиной 200 мкм, на которую с двух сторон нанесены эмульсионные слои толщиной 50 мкм, покрытые тонким защитным слоем желатина. Радиус зерен эмульсии – около 0.2 мкм, плотность – 30 зерен/100 мкм. Пластины производились с использованием промышленных линий компании Fuji, что обеспечило ровную поверхность и постоянную толщину. Двухслойность пластин сильно повышает угловое разрешение при определении направления прошедшего трека.

Обработка эмульсионных пластин будет проходить в автоматическом режиме с помощью микроскопов. При этом планируется выделять следующие типы событий:

- $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$
- $\nu + N \rightarrow \nu + X$
- $\nu_e + N \rightarrow e^- + X$
- $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X_c$ и $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X_{c\bar{c}}$ (взаимодействие с образованием заряженных частиц)
- $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$

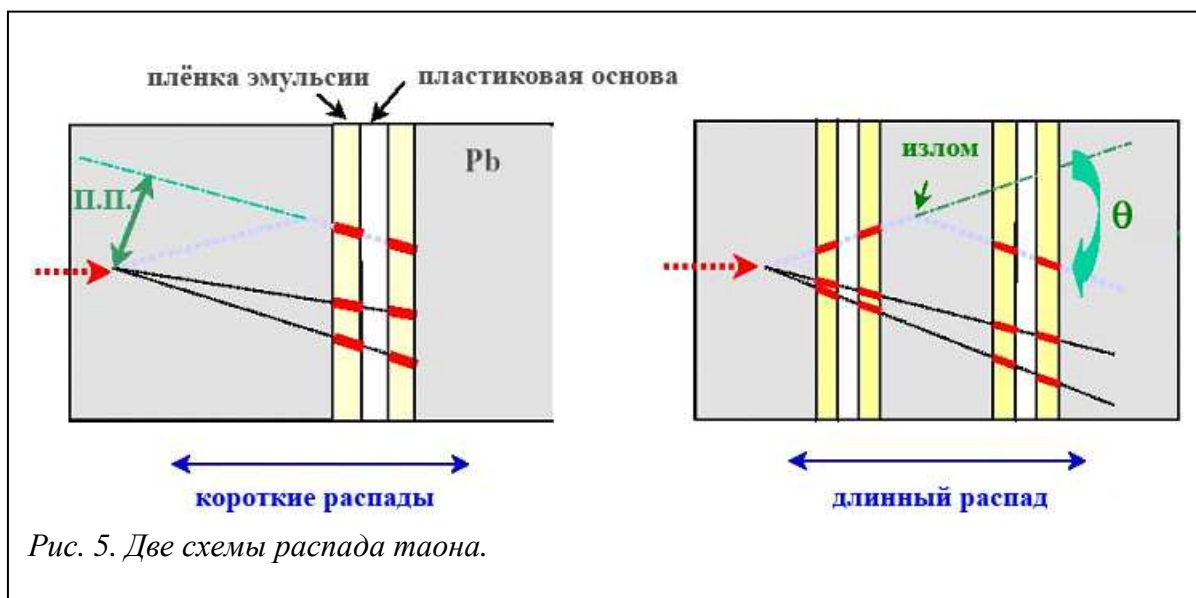
Регистрация последней реакции и является основной целью проекта. Тау лептон планируется детектировать в ходе следующих распадов (с вероятностями):

- $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau + X$ (17.8%)
- $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau + X$ (17.7%)
- $\tau^- \rightarrow h^- + \nu_\tau + (n\pi^0)$ (49.5%) – распад с вылетом одного заряженного адрона



Методологически регистрацию этих распадов разделяют на два типа: короткие и длинные. Короткие – таон распадается в той же свинцовой пластине, где и произошло взаимодействие. Длинные – далее после пластины, где произошло взаимодействие. На рисунке 4 показано распределение длины таонного трека для эксперимента OPERA при использовании параметров осцилляции из данных SuperKamiookande.

В случае коротких распадов отбор события происходит по прицельному параметру (П.П. на рис. 5.), который должен превышать величину 5 мкм. Признаком длинного распада является



угол излома трека (θ на рис. 5.), лежащий в пределах от 20 до 500 мрад.

Основным фоном при регистрации тау лептонов являются события с вылетом чармированных частиц. Их времена жизни имеют тот же порядок, что и время жизни таона. Чармированные события подразделяют на три типа:

- с образованием мюона в точке первичного взаимодействия (77.1%),
- с образованием мюона при распаде чармированной частицы (19.3%),
- без образования мюона (3.6%).

События первого типа однозначно идентифицируются. События второго типа могут быть неверно идентифицированы только, если положительный заряд вторичного мюона не определен, или определен неверно (~6% событий). В последнем случае очень эффективен кинематический анализ. Всего чармированные события дают фон в ~16 событий на 10^6 взаимодействий.

На данный момент завершено строительство детектора OPERA и с 20го июня был запущен первый цикл облучения детектора пучком нейтрино[3]. За

123 дня на ускорителе SPS в Церне суммарный поток составит 2.28×10^{19} протонов на графитовую мишень, что в случае существования нейтринных осцилляций должно привести к регистрации хотя бы одного таонного нейтрино в детекторе OPERA. Тем самым будет объяснён дефицит атмосферных мюонных нейтрино, и установлены более точные значения разности квадратов масс и углов смешивания мюонных и таонных нейтрино.

1. SNO Collaboration Independent Measurement of the Total Active 8B Solar Neutrino Flux Using an Array of ^3He Proportional Counters at the Sudbury Neutrino Observatory Phys. Rev. Lett. volume 101, 111301 (2008)
2. OPERA Collaboration An appearance experiment to search for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations in the CNGS beam, CERN/SPSC 2000-028, SPSC/P318, LNGS P25/2000, July 10, 2000.
3. OPERA Collaboration The OPERA long baseline neutrino experiment: status and first results, презентация на ICHEP2008.