

Перспективы поиска стерильных нейтрино на эксперименте T2K.

Нейтрино

Нейтрино (итал. *neutrino* — нейтрончик, уменьшительное от *neutrone* — нейтрон) —нейтральная фундаментальная частица с полуцелым спином, участвующая только в слабом и гравитационном взаимодействиях, и относящаяся к классу лептонов. Нейтрино малой энергии чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом: так, нейтрино с энергией порядка 3—10 МэВ имеют в воде длину свободного пробега порядка 10^{18} м(около 100 св. лет). Также известно, что каждую секунду через площадку на Земле в 1 см^2 проходит около $6 \cdot 10^{10}$ нейтрино, испущенных Солнцем. Однако никакого воздействия, например, на тело человека они не оказывают. В то же время нейтрино высоких энергий успешно обнаруживаются по их взаимодействию с мишенями.

Свойства нейтрино

Каждому заряженному лептону соответствует своя пара нейтрино/антинейтрино:

- электронное нейтрино/электронное антинейтрино;
- мюонное нейтрино/мюонное антинейтрино
- тау-нейтрино/анти-тау-нейтрино

Масса нейтрино крайне мала. Верхняя экспериментальная оценка суммы масс всех типов нейтрино составляет всего 0,28 эВ. Разница квадратов масс нейтрино разных поколений, полученная из осцилляционных экспериментов, не превышает $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$.

Масса нейтрино важна для предположения объяснения феномена скрытой массы в космологии, так как, несмотря на её малость, возможно, концентрация нейтрино во Вселенной достаточно высока, чтобы существенно повлиять на среднюю плотность.

Если нейтрино имеют ненулевую массу, то различные виды нейтрино могут преобразовываться друг в друга. Это так называемые нейтринные осцилляции, в пользу которых свидетельствуют наблюдения солнечных нейтрино и угловой анизотропии атмосферных нейтрино, а также проведённые в начале этого века эксперименты с реакторными и ускорительными нейтрино. Кроме того, существование нейтринных осцилляций напрямую подтверждено опытами в Садбери, в котором были непосредственно зарегистрированы солнечные нейтрино всех трёх сортов и было показано, что их полный поток согласуется со стандартной солнечной моделью. При этом только около трети долетающих до Земли нейтрино оказывается электронными. Это количество согласуется с теорией, которая предсказывает переход электронных нейтрино в нейтрино другого поколения как в вакууме (собственно «нейтринные осцилляции»), так и в солнечном веществе («эффект Михеева — Смирнова — Вольфенштейна»). Подтверждение нейтринных осцилляций потребует внесения изменений в Стандартную модель.

В экспериментах с рождением ультрарелятивистских частиц, нейтрино обладают отрицательной спиральностью, а антинейтрино — положительной.

Перспективы использования

Одно из перспективных направлений использования нейтрино — это нейтринная астрономия. Известно, что звёзды, кроме света, излучают значительный поток нейтрино, которые возникают в процессе ядерных реакций. Поскольку на поздних стадиях звёздной эволюции за счёт нейтрино уносится до 90 % излучаемой энергии (нейтринное охлаждение), то изучение свойств нейтрино (в частности — энергетического спектра солнечных нейтрино) помогает лучше понять динамику астрофизических процессов. Кроме того, нейтрино без поглощения проходят огромные расстояния, что позволяет обнаруживать и изучать ещё более удалённые астрономические объекты.

Другим (практическим) применением является развиваемая в последнее время нейтринная диагностика промышленных ядерных реакторов. Проведённые в конце XX века физиками Курчатовского института эксперименты показали перспективность этого направления, и сегодня в России, Франции, Италии и других странах ведутся работы по созданию нейтринных детекторов, способных в режиме реального времени измерять реакторный нейтринный спектр и тем самым контролировать как мощность реактора, так и состав топлива (включая наработку оружейного плутония).

Теоретически потоки нейтрино могут быть использованы для создания средств связи, что привлекает интерес военных: частица теоретически делает возможной связь с подводными лодками, находящимися на глубине.

Стерильное нейтрино

Стерильные нейтрино представляют собой гипотетический тип нейтрино, которые не взаимодействуют с помощью любого из фундаментальных взаимодействий в Стандартной модели, кроме гравитации. Это *right-handed* нейтрино или *left-handed* антинейтрино, которые могут быть добавлены к стандартной модели и могут принять участие в явлениях, таких как осцилляции нейтрино.

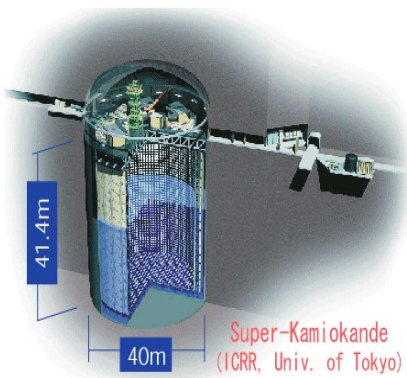
Мотивация

Экспериментальные результаты показывают, что (почти) все произведенные и наблюдаемые нейтрино имеют левую спиральность (спины антипараллельны импульсам), и все антинейтрино имеют правую спиральность, в рамках погрешности. В безмассовом пределе, это означает, что только одна из двух возможных хиральностей наблюдается для каждого типа частиц. Стандартная модель предсказывает существование только этих нейтрино.

Недавние эксперименты (с нейтринными осцилляциями), однако, показали, что нейтрино имеют ненулевую массу, которая не предсказывается Стандартной моделью и предлагается новой, еще неизвестной физике. Эта неожиданная масса объясняет нейтрино с правой спиральностью и антинейтрино с левой спиральностью тем, что они не перемещаются со скоростью света, их спиральность не является релятивистски инвариантной. Тем не менее, все нейтрино были обнаружены с левой хиральностью, и все антинейтрино с правой. Хиральность является фундаментальным свойством частиц и она релятивистски инвариантна: она не зависит от скорости и массы частицы в любой системе отсчета. Вопрос, таким образом, остается: можно ли нейтрино и антинейтрино отличать только по хиральности? или у правых нейтрино и левых антинейтрино существуют отдельные частицы?

T2K

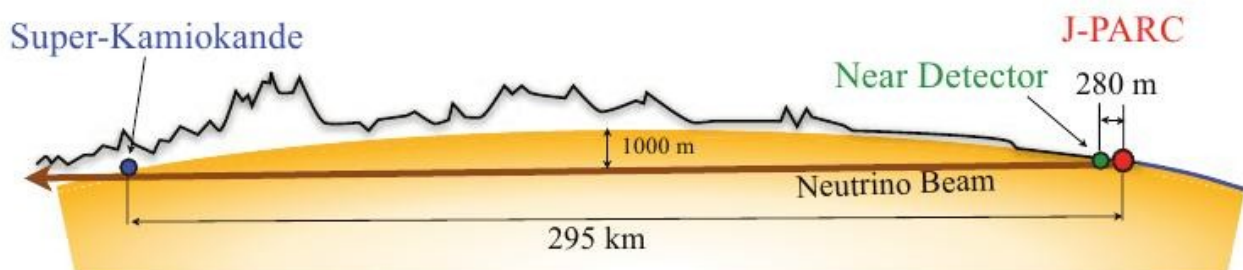
T2K - (Токай 2 Камиока) эксперимент в Японии с осцилляциями нейтрино



Super K

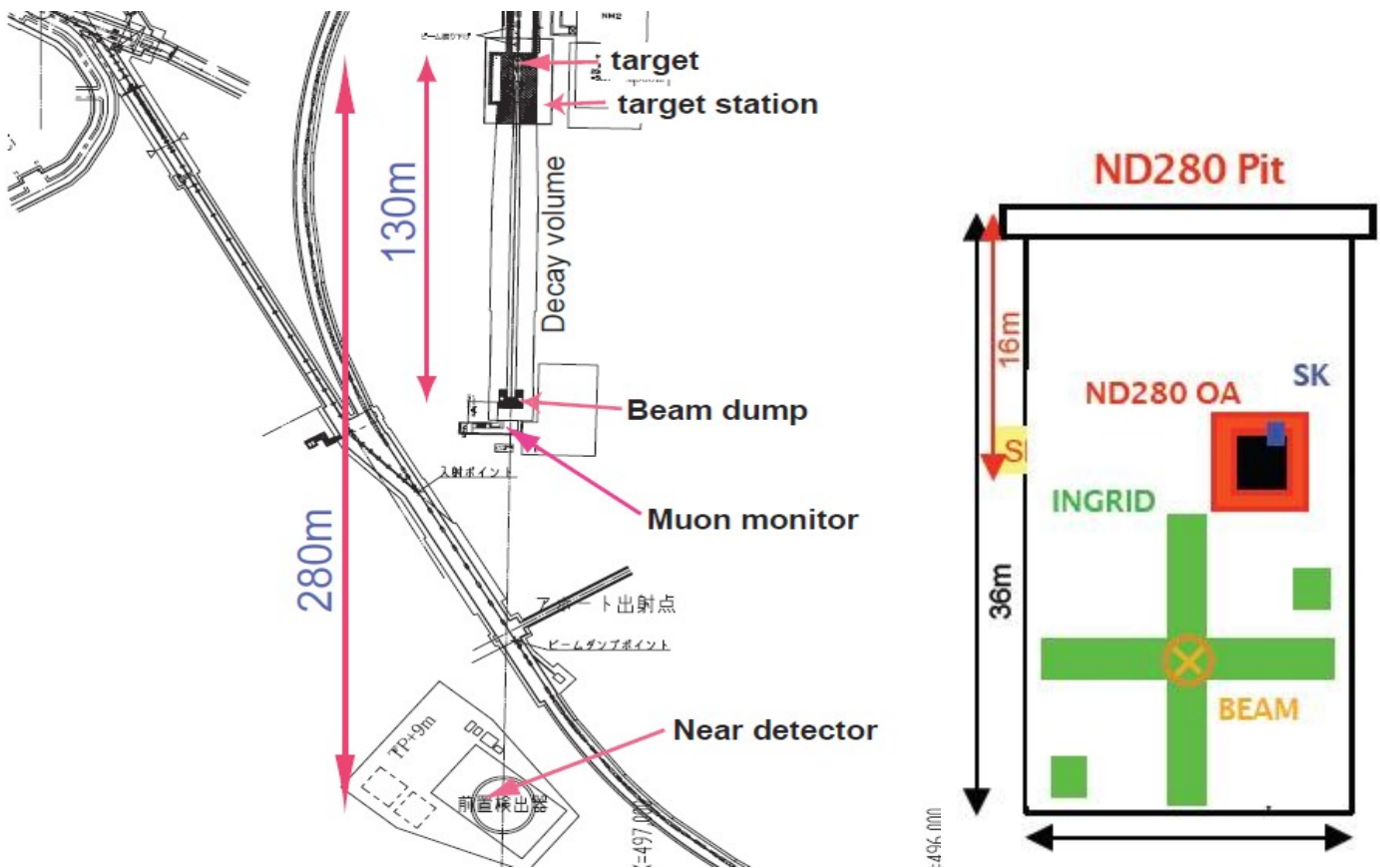
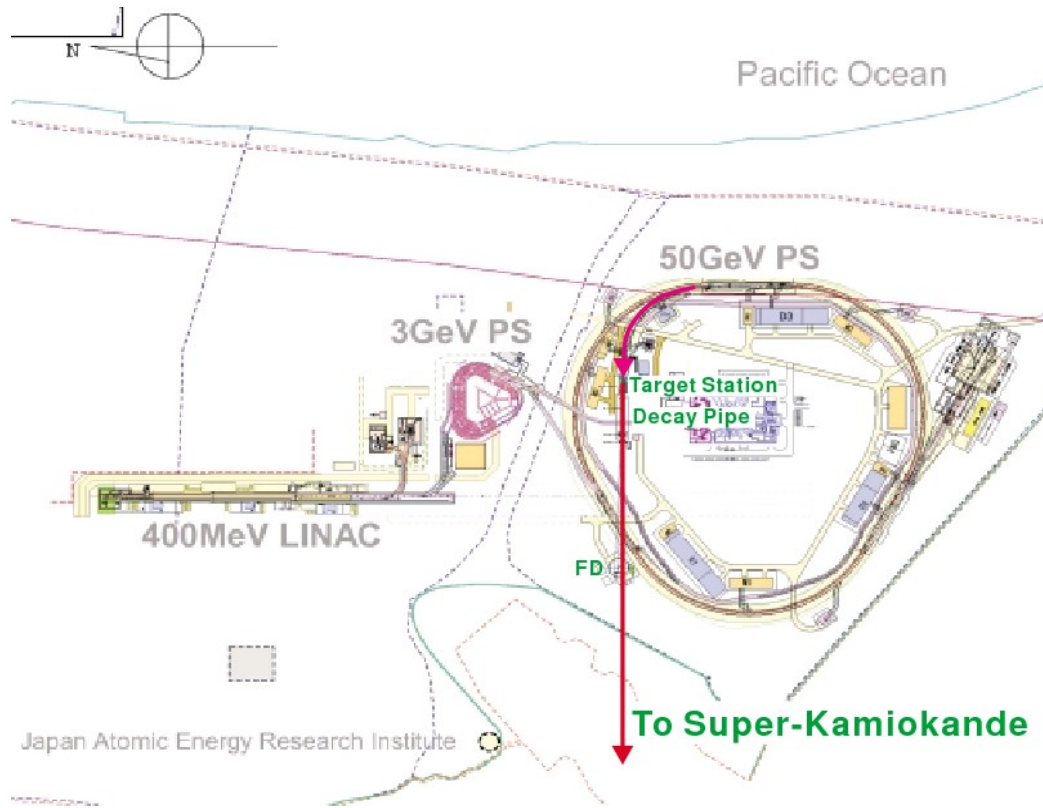


JPARC



JPARC

JPARC - Japan Proton Accelerator Research Center - ускоритель протонов (50 GeV), находится в Токае. После разгона протоны ударяют по мишени (target), откуда вылетают коны, пионы и прочие. Далее они летят по распадному объему (Decay Volume) в вакууме, где распадаются на нейтрино различных видов.

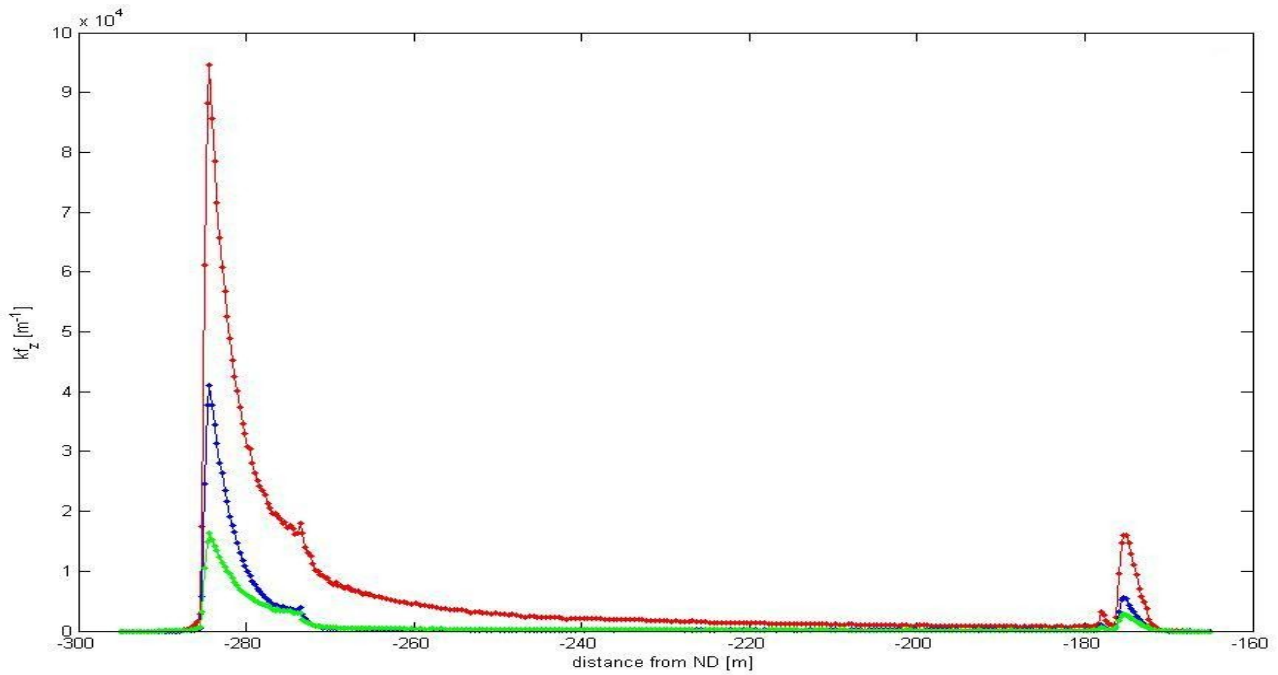


распадный объем и ближний детектор

ближний детектор, вид от мишени*

*далее ND (Near Detector) - куб 2x2x1,5 м, внутри которого детектируются нейтрино.

Исходные данные



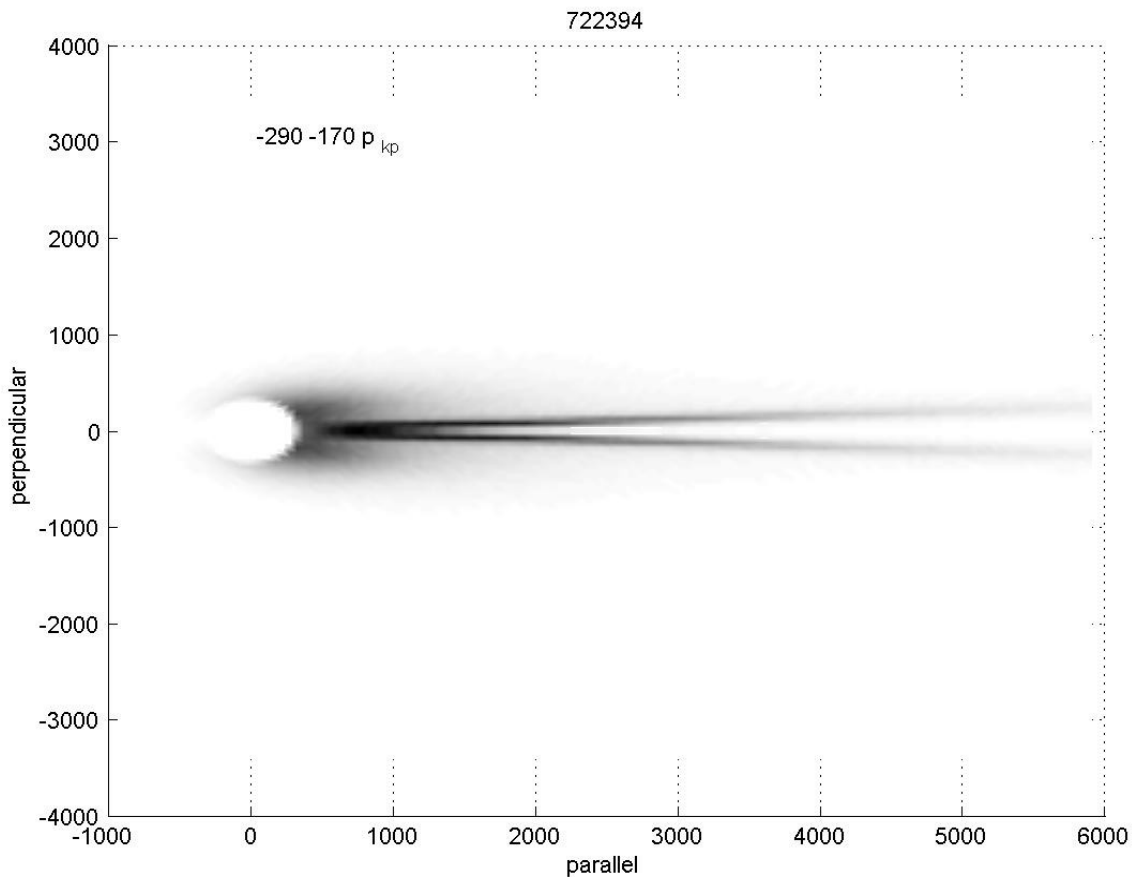
распределение распадов положительных (красный) (722000 шт.), отрицательных (синий) (197000 шт.) и долгих (зеленый) (116000 шт.) каонов , при 10^7 ударах протонов по мишени

Исходные данные представляют собой множество распадов каонов, где для каждого распада известно:

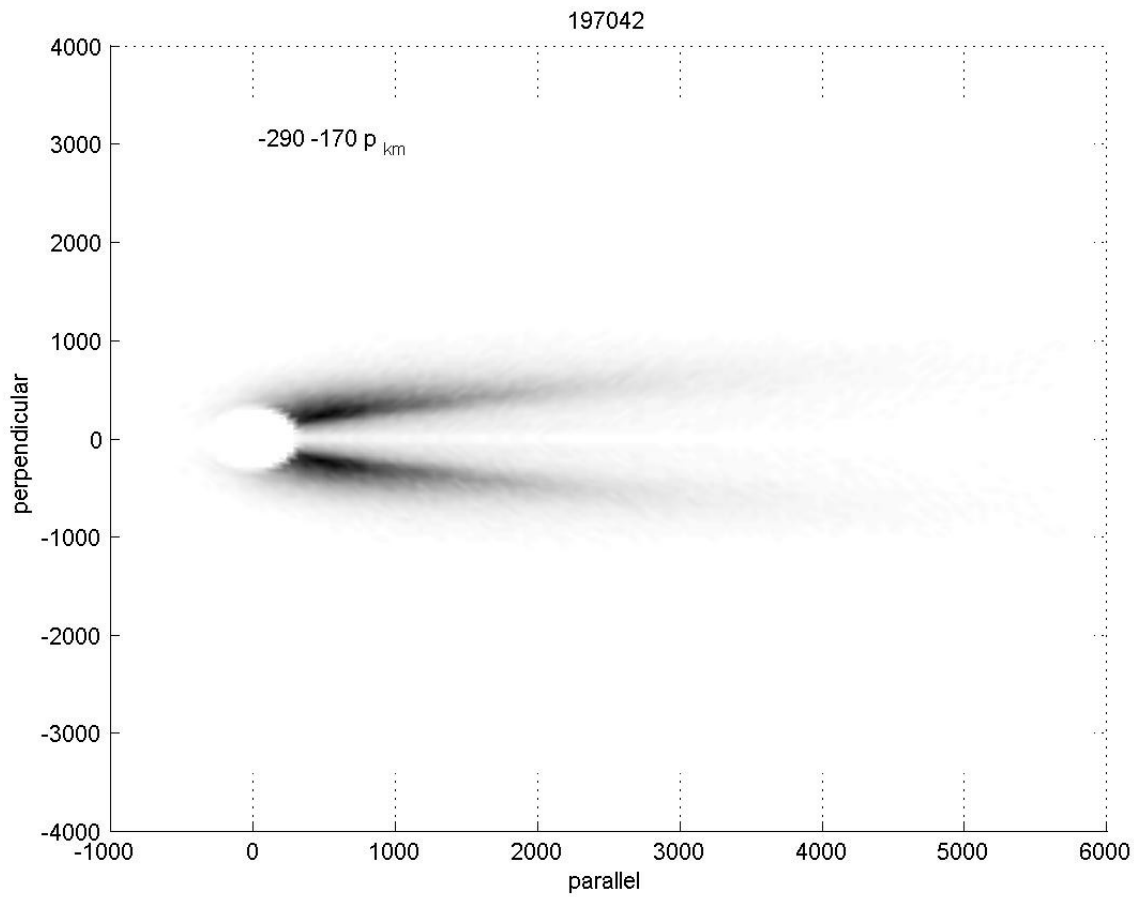
- его расстояние от Ближнего детектора,
- импульс каона в момент распада,
- угол между импульсом и осью распадного объема

Источником этих каонов были 10_000_000 протонов, ударивших по мишени

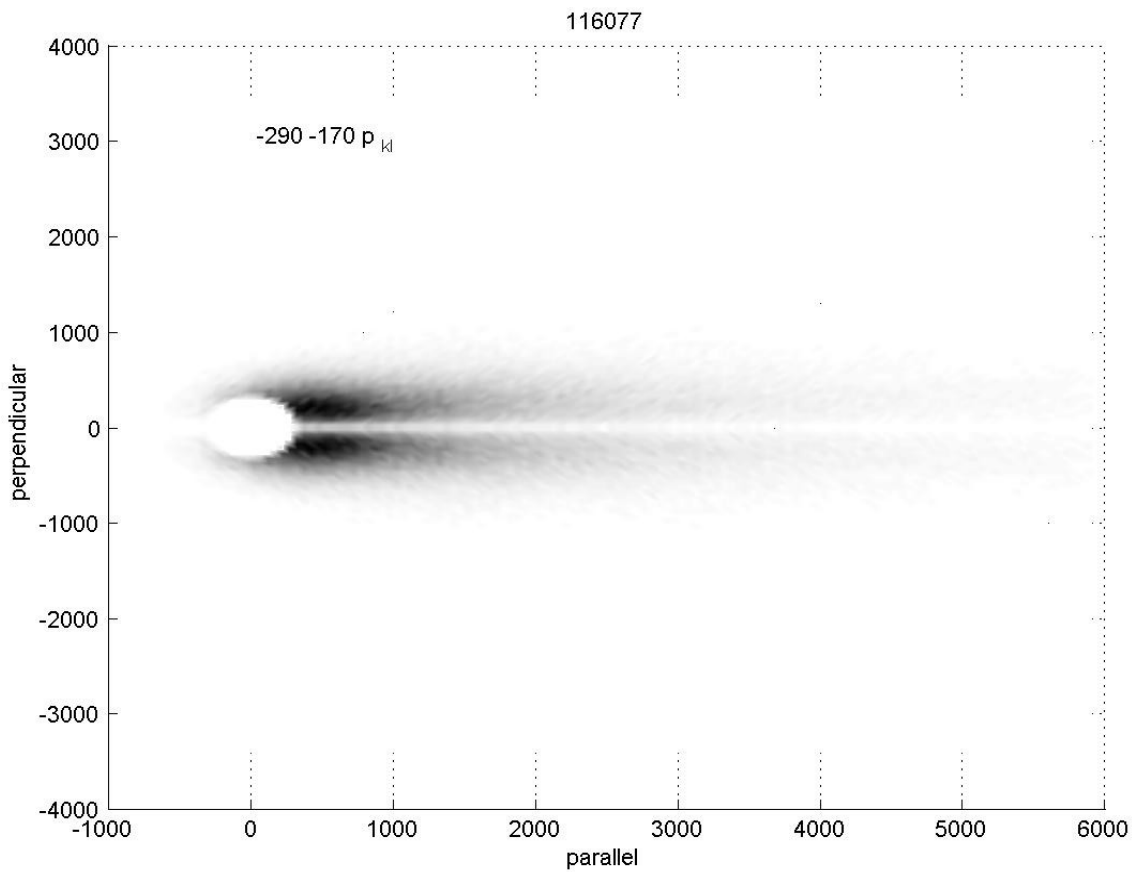
Ниже приведены распределения этих каонов по импульсам (на протяжении всего распадного объема) положительные (722_000 шт.): (масштаб по осям MeV/c; в заголовке указано число частиц, изображенных на графике)



отрицательные (197_000 шт.):



нейтральные-долгоживущие (116_000 шт.):



также можно ознакомиться с распределениями в наиболее интересных точках распадного объема, обратившись к автору этой работы.

цель

найти, сколько стерильных нейтрино пролетит сквозь ND, и их распределение по импульсам зная распределения нейтрино по импульсам в системе отсчета покоя каона (оно сферически симметричное)

идея расчетов

есть метод Монтекарло: Пусть каждый каон - 10 каонов, и он распадается в 10 нейтрино. (вопрос к самому себе: почему именно стерильных?) Генерируем случайным образом импульсы нейтрино в системе отсчета покоя каона в соответствии с заданным распределением. Предположив некоторую массу нейтрино (я делал для 120 и 170 MeV/c²) находим их импульсы (и скорость) в лабораторной СО. Находим длину траектории каждого нейтрино, находящуюся в ND, отсюда можно найти время гипотетического нахождения нейтрино в ND в течении которого он мог распасться. Далее при построении распределений это время берм вес каждого нейтрино. Отметим, что результаты при вычислении скоростей, времен и т.п. практически (в рамках погрешности) не должны отличаться от результатов, когда мы просто найдем нейтрино пересекающие ближнюю стенку ND.

Расчеты проводились *только* для двухчастичных распадов, и соответственно *только* для положительных и отрицательных каонов. Так как масса стерильного нейтрино не известна, расчеты проводились для 2х ее значений: 120 и 170 MeV/c². А также мне точно не известно, на сколько отстоит ND от оси пучка, и я выбрал 3 его расположения: 10-12м, 12-14м, и 14-16м. от оси пучка.

этапы вычисления

имеется 4 реакции:

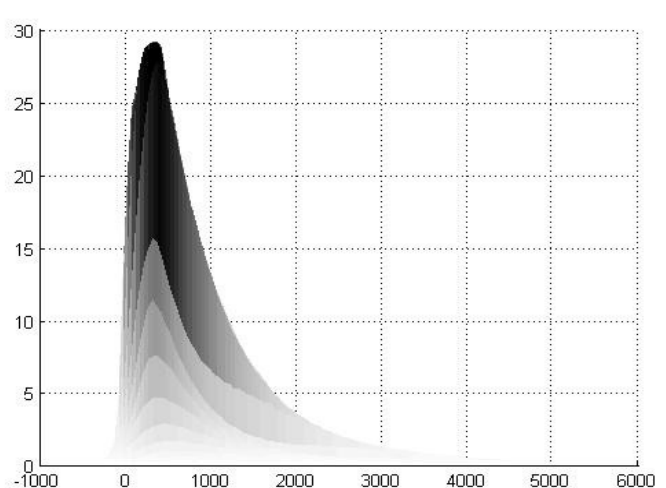
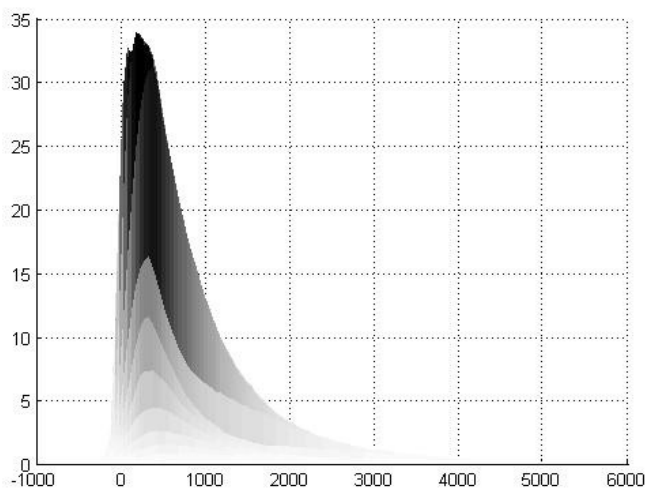
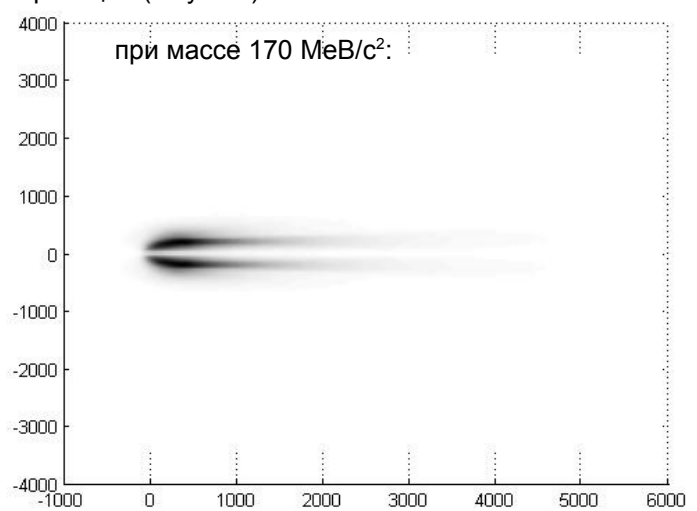
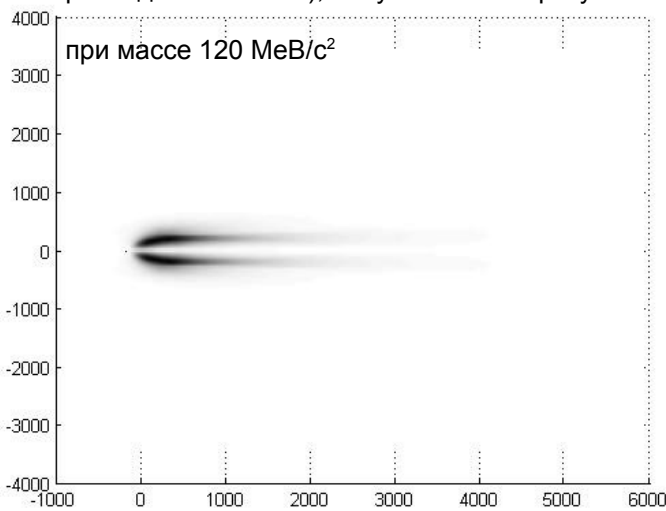
$K^+ \rightarrow \mu^+ N$ (56.2%) ($p_N=219$ MeV/c)

$K^+ \rightarrow e^+ N$ (43.8%) ($p_N=232$ MeV/c)

$K^- \rightarrow \mu^- N$ (56.2%) ($p_N=219$ MeV/c)

$K^- \rightarrow e^- N$ (43.8%) ($p_N=232$ MeV/c)

Ниже приведены распределения стерильных нейтрино по импульсам (на протяжении всего распадного объема), получившихся в результате этих реакций (в сумме)

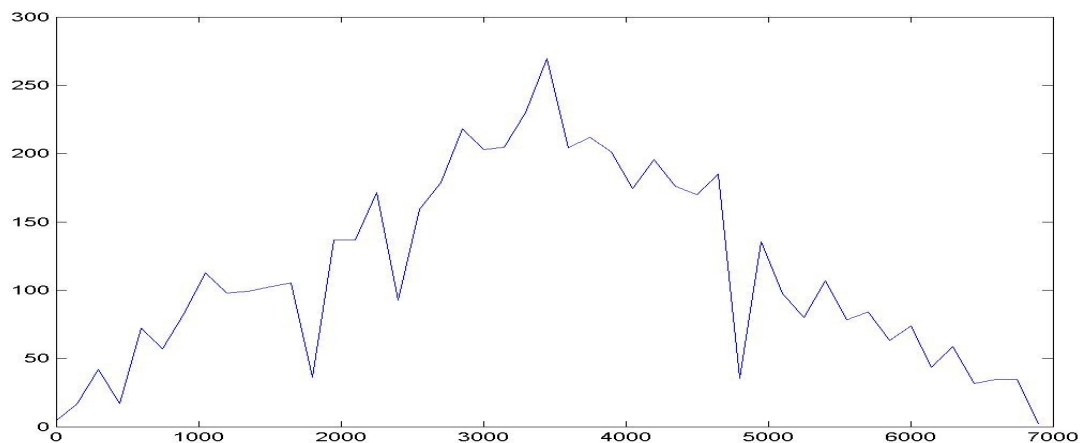


результаты

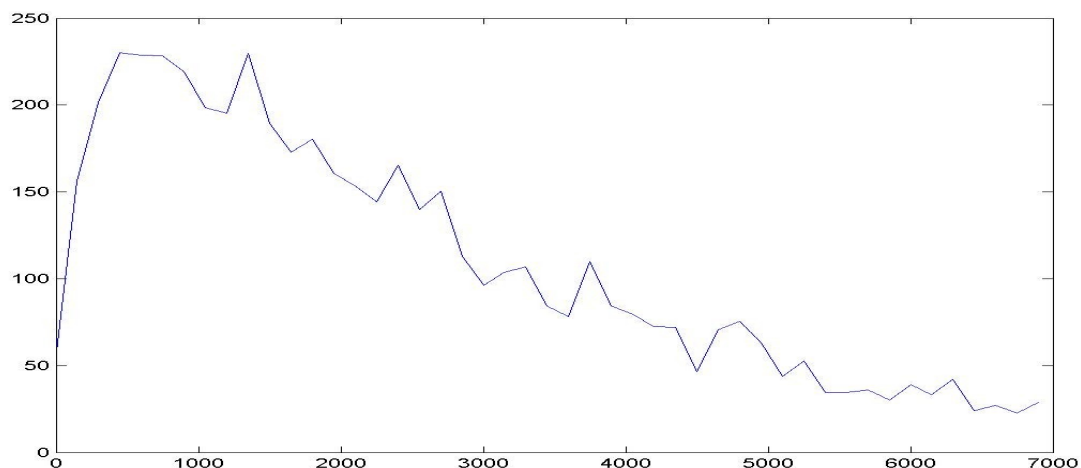
Распределения по импульсам стерильных нейтрино, прошедших через ND. (пределы от 0 до 7000 MeV): по горизонтали

для массы $120 \text{ MeV}/c^2$

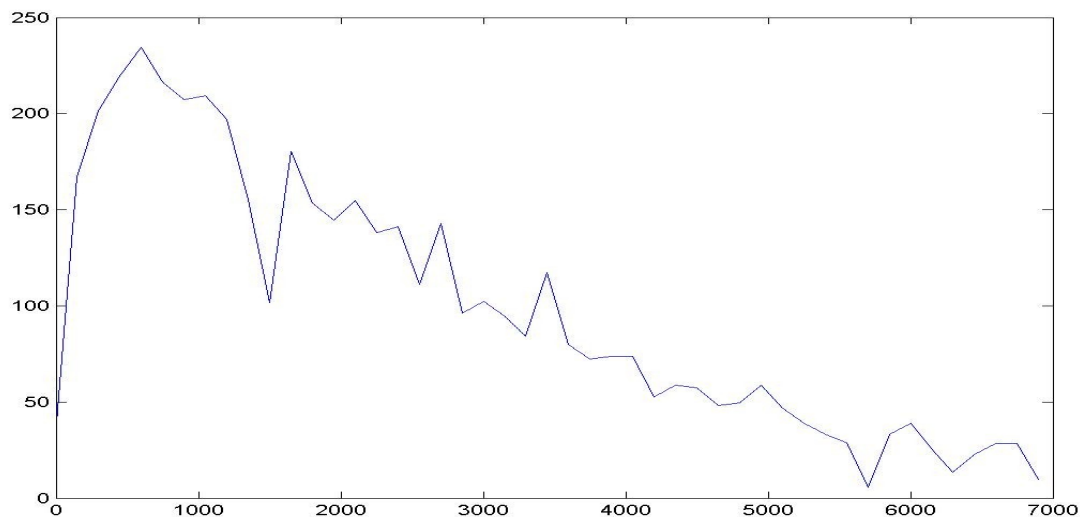
для детектора, стенки которого находятся на расстоянии 10 и 12м от оси пучка (3859 N на 10^8 p):



для детектора, стенки которого находятся на расстоянии 12 и 14м от оси пучка (3656 N на 10^8 p):

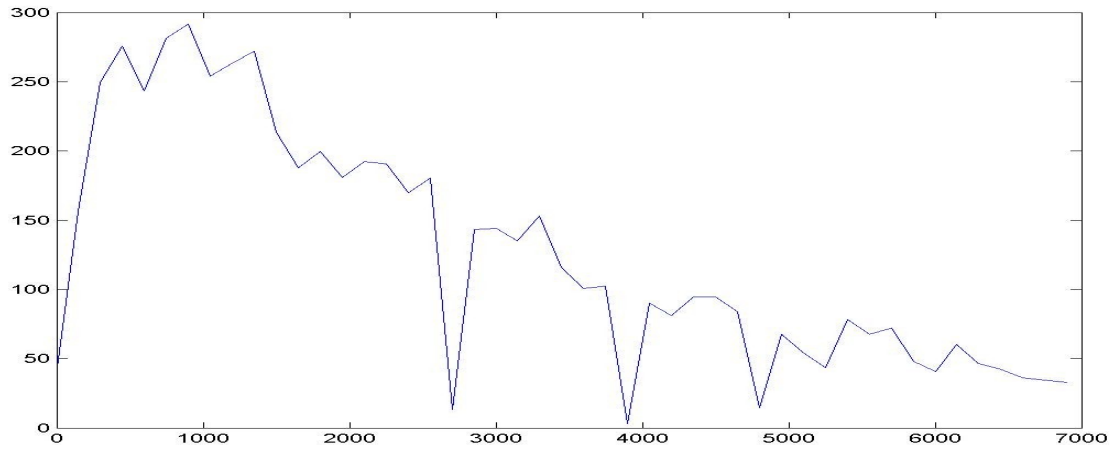


для детектора, стенки которого находятся на расстоянии 14 и 16м от оси пучка (3377 N на 10^8 p):

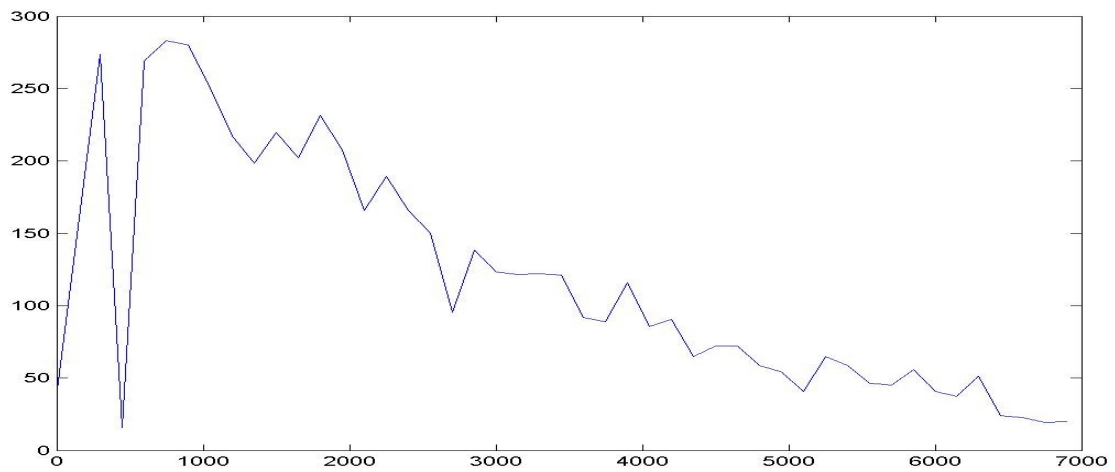


для массы $170 \text{ MeV}/c^2$:

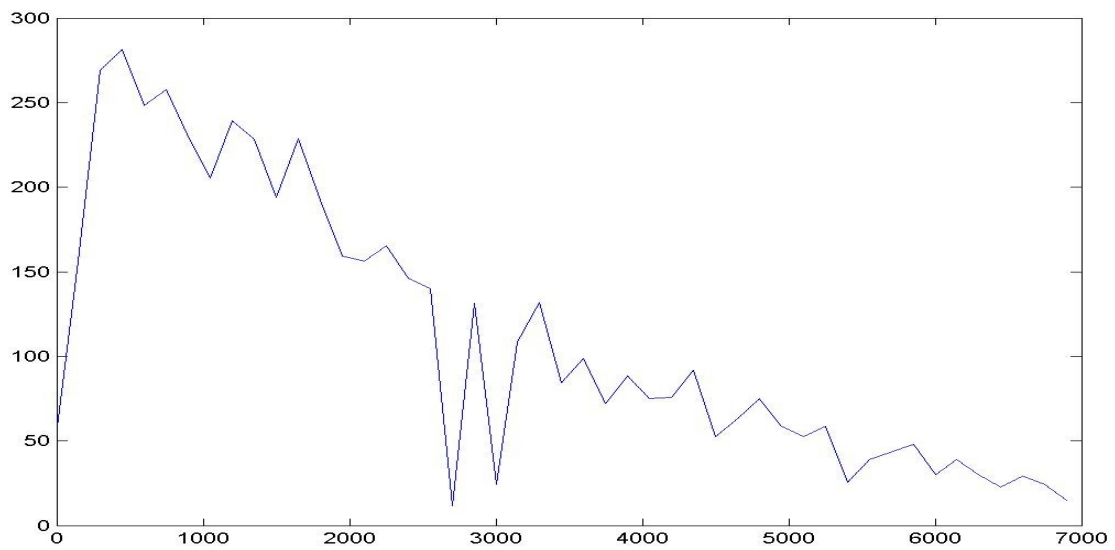
для детектора, стенки которого находятся на расстоянии 10 и 12м от оси пучка ($4555 \text{ N на } 10^8 \text{ p}$):



для детектора, стенки которого находятся на расстоянии 12 и 14м от оси пучка ($4181 \text{ N на } 10^8 \text{ p}$):



для детектора, стенки которого находятся на расстоянии 14 и 16м от оси пучка ($3855 \text{ N на } 10^8 \text{ p}$):



Список Литературы

информация о нейтрино списана с википедии

картинки объектов T2K взяты из презентаций T2K, свободно доступных в интернете

исходные данные были переданы автору работы его научным руководителем Дмитрием Горбуновым

все посчитано в системе MatLab

Автор: Усков Филипп (207 группа физического факультета МГУ)

дата 22.05.12