

## Вопрос.

Чтобы сформулировать вопрос, начну с оценки числа проосциллировавших нейтрино  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , регистрируемых установкой вроде ORCA.

Узконаправленные нейтрино  $\nu_\mu$  рождаются на ускорителе в распадах релятивистских пионов вроде  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  и вылетают в малом угловом конусе с раствором  $\theta_\nu \sim p_\perp / E_\nu$ , где  $p_\perp \sim 25$  MeV средний поперечный импульс нейтрино, ограниченный небольшим энергосделением в пионном распаде. На удалении  $L$  сечение пучка нейтрино достигнет размера  $S_\nu \sim \pi(\theta_\nu L)^2$ , из которого детектор ограниченной площади  $S$  сумеет перехватить только малую долю  $k = S / S_\nu$ .

С учетом того, что вероятность осцилляции  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  в основном зависит от энергии нейтрино и пути как  $P_\nu \sim (\Delta m_\nu^2 L / E_\nu)^2$ , получаем, что число мюонных нейтрино, рожденных  $I_\pi$  пионами и попавших в детектор уже нейтрино электронными, составляет величину  $N_\nu = P_\nu k I_\pi$ , которая не зависит ни от энергии  $E_\nu$ , ни от дистанции  $L$ .

Если это верно, тогда вопрос: в чем выгода осуществлять дорогостоящий эксперимент с ускорителем высоких энергий и со сверхдлинной базой, если ту же статистику можно набрать на менее мощной и где угодно расположенной машине?

Спасибо. А.И. Львов, ФИАН 27.04.2020

Добавление.

Увеличение энергии выгодно увеличением сечения взаимодействия и эффективности регистрации. Но вопрос о выборе большой длины остается.

А.Л. 27.04.2020

## Ответ.

Основная выгода от сверхдлинной базы состоит в увеличении эффекта вещества, который растет прямо пропорционально длине базы (для длин до  $\sim 4000$  км, см. слайд 26). Чем больше эффект вещества, тем проще его померить, и тем выше будет, при прочих равных условиях, чувствительность эксперимента к иерархии масс. Кроме того, использование сверхдлинной базы помогает более надежно разделить эффекты массовой иерархии и CP нарушения (см. слайд 13). В частности, простое измерение вероятности осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  способно гарантировать одновременное определение иерархии масс и фазы  $\delta_{CP}$  лишь при длине базы не менее  $\sim 1300$  км.

Выбор базы напрямую влияет на положение осцилляционного пика на шкале энергий. В пользу короткой базы говорит геометрический фактор расхождения пучка ( $\sim 1/L^2$ ). Среди преимуществ длинной базы (более высокой энергии) можно отметить следующие:

- более эффективная фокусировка пучка (более узкий пучок за счет кинематики);
- не требуется уходить с оси пучка;
- более высокое сечение взаимодействия нейтрино с веществом;
- возможность использования детектора с более высоким порогом (например, с менее плотным расположением фотосенсоров);
- систематические погрешности при моделировании сечений взаимодействия нейтрино с веществом в области энергий, где доминирует глубоко неупругое

рассеяние ( $E_\nu > 3$  ГэВ), как правило ниже, чем в области резонансных реакций ( $E_\nu \sim 1$  ГэВ).

Также следует иметь в виду, как максимум вакуумных осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  ( $E_\nu \sim 5$  ГэВ при базе 2600 км) расположен по отношению к максимуму резонансного превращения  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  от эффекта вещества ( $E_\nu \sim 4$  ГэВ). Совпадение обоих пиков может способствовать повышению чувствительности эксперимента.

В связи с многообразием факторов, влияющих на чувствительность эксперимента, не существует какой-либо линейной связи между длиной базы и стоимостью эксперимента. Насколько мне известно, стоимости экспериментов T2K ( $L = 295$  км) и NOvA ( $L = 810$  км) вполне сопоставимы. Планируемая стоимость экспериментов следующего поколения - T2HK ( $L = 295$  км) и DUNE (1300 км) - также находится примерно на одном уровне (по  $\sim 1$  млрд. долларов США каждый).

27.04.2020

### Вопросы.

1. Просьба оценить возможности эксперимента по сравнению с уже принятым правительством Японии экспериментом Hyper-Kamiokande (особенно с учетом последних результатов) - в докладе приведено сравнение только с DUNE.

2. Непонятно, за счет чего планируется повысить интенсивность У-70 до 450 кВт (возможно ли это вообще, хотя бы из радиационных условий). При этом встает вопрос, не противоречит ли этот проект Программе синхротронных и нейтронных исследований.

В.В. Мочалов, НИЦ КИ - ИФВЭ 28.04.2020

### Ответы.

1. Что касается чувствительности к CP нарушению, тут заявленные возможности экспериментов DUNE и T2HK (Токай  $\rightarrow$  Hyper-Kamiokande) примерно равны, возможно - с небольшим (10-20%?) преимуществом на стороне T2HK. В этом контексте всё сказанное о соотношении возможностей P2O к DUNE касается и соотношения P2O к T2HK. Думаю, что в случае успешной и полной реализации проекта T2HK обогнать его по чувствительности к CP нарушению будет очень трудно.

С другой стороны, из-за малой длины базы (295 км, без дополнительного детектора в Корее) определение иерархии масс в эксперименте T2HK будет непростой задачей. При заявленной чувствительности к массовой иерархии в  $\sim 4\sigma$  эксперимент T2HK не дотягивает даже до базового варианта P2O. Таким образом, можно говорить о некоторой комплементарности между различными экспериментами.

2. Насколько мне известно, основное кольцо У-70 технически допускает работу на интенсивностях до 450 кВт. Модернизации потребуют в первую очередь системы инжекции и предварительного разгона частиц. В этой связи можно упомянуть проект ОМЕГА (см. слайд 32), в рамках которого предлагалось создание нового каскада бустерных ускорителей протонов (линок и 3.5 ГэВ-ный синхротрон) мегаваттной мощности, предназначенного для обеспечения работы импульсного источника нейтронов. Представляется, что некая вариация этого проекта могла бы быть частью федеральной Программы синхротронных и нейтронных исследований (в части нейтронных исследований). Такой сценарий привел бы к новым возможностям по реализации проекта Р2О.

Строительство же в Протвино ускорителя электронов (для синхротронных исследований) с проектом Р2О уже не очень стыкуется. Очевидно, что будущее проекта Р2О во многом зависит от того, как будет развиваться ускорительный комплекс в Протвино. Вопрос радиационной безопасности безусловно важен и может потребовать дополнительной проработки с учетом мирового опыта создания ускорителей мегаваттной мощности.

28.04.2020