

УДК 539.121.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРИНО НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70

© 2023 г. Ф. Н. Новоскольников¹, Р. Ю. Синюков¹, А. А. Соколов¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение

“Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”, Протвино, Россия

*E-mail: sokolov_a@ihep.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Рассматривается метод пучков меченых нейтрино, который заключается в том, что на основе восстановления кинематики $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ распада родительской частицы можно с высокой точностью реконструировать импульс и тип образованного нейтрино. Описана методика формирования пучка родительских частиц π^+ на канале ускорительного комплекса У-70 (Протвино), обсуждаются расчетные характеристики соответствующего пучка.

DOI: 10.31857/S0367676523702010, EDN: ZBRSGI

ВВЕДЕНИЕ

Нейтринные исследования сегодня — наиболее активно развивающееся направление в физике элементарных частиц с высоким потенциалом открытий. Наиболее важные проекты мирового уровня нацелены на решение таких ключевых задач, как изучение нарушения СР-четности в $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино. Продвинуться в этих вопросах можно, изучая осцилляции нейтрино с энергией $\mathcal{O}(1-10)$ ГэВ, генерируемых ускорителем и детектируемых на больших расстояниях, т.е. на “длинной” базе $\mathcal{O}(100-1000)$ км.

В эксперименте P2O (Protvino-to-ORCA) планируется направить нейтринный пучок от протонного ускорителя У-70 (Протвино, Россия) в Средиземное море для регистрации нейтрино создаваемым вблизи побережья Франции глубоководным детектором ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) для проведения экспериментов по определению иерархии масс нейтрино и поиска нарушения СР-инвариантности в лептонном секторе [1]. Расстояние от ускорителя У-70 до детектора составляет 2595 км, что идеально для рассматриваемого нейтринного эксперимента. Оценки чувствительности эксперимента P2O показывают, что этот эксперимент даст беспрецедентную чувствительность к эффектам материи в Земле. Это позволит определить иерархию масс нейтрино с высокой степенью достоверности всего после нескольких лет работы

эксперимента даже при умеренной интенсивности протонного пучка ~ 90 кВт.

Использование нейтринного пучка из Протвино в нейтринном телескопе ORCA позволит избежать значительных затрат на проведение подземных работ и потенциально позволяет значительно увеличить массу детектора. Также здесь возможно сравнительно легко произвести модернизацию и создать уплотненную версию детектора ORCA (Super-ORCA). Это позволит значительно увеличить чувствительность эксперимента к проводимым измерениям.

Таким образом, эксперимент P2O будет обладать уникальными характеристиками даже при сравнительно низкой интенсивности пучка (~ 90 кВт на первой стадии эксперимента) У-70.

Для реализации проекта необходимо сооружение нового нейтринного канала на ускорителе У-70, который обеспечит формирование пучка нейтрино для проведения эксперимента на дальнем детекторе (ORCA), а также сможет обеспечить богатую научную программу исследований на короткой базе, на площадке НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ в Протвино.

МЕТОД МЕЧЕНЫХ НЕЙТРИНО

Пучки нейтрино, создаваемые на ускорителях, в основном получают путем формирования интенсивного пучка заряженных $\pi(K)$ -мезонов, которые в дальнейшем распадаются по каналам $\pi(K)^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ или K_{e3} . В настоящее время рас-

смачивается вариант создания канала по формированию пучка “меченых” нейтрино, идея которого была предложена и осуществлена в 1980-х гг. в Протвино на установке “Комплекс Меченых Нейтрино” (КМН) [2]. Идея создания пучка “меченых” нейтрино [3] состоит в том, что одновременно с регистрацией нейтринного взаимодействия в детекторе, при помощи специальной станции мечения измеряются характеристики остальных частиц (импульс, заряд, тип частицы), образовавшихся в распаде родительского $\pi(K)$ -мезона. По этим данным и известному импульсу родительской частицы оказывается возможным с хорошей точностью восстановить точку образования нейтрино, его импульс, тип нейтрино, его киральность, т.е. параметры меченого нейтрино.

Для реализации метода мечения нейтрино важна способность регистрировать в нейтринном канале все заряженные частицы, а также возможность связать нейтрино, взаимодействующие в детекторе, с мечеными нейтрино.

В эксперименте, с использованием пучка меченых нейтрино возможно: улучшение измерения потока нейтрино, подавление фоновых процессов, улучшение точности измерения энергии нейтрино, улучшение идентификации аромата нейтрино, возможность определения киральности нейтрино.

Для регистрации большого потока заряженных частиц в станции мечения возможно использование кремниевых пиксельных детекторов. За последние несколько лет был достигнут значительный прогресс в совершенствовании таких детекторов и возможно их использование при высоких плотностях пучков заряженных частиц в канале [4–6].

Для уменьшения плотности потока заряженных частиц в пучке можно использовать следующие факторы. Прохождение частиц в пучке можно разнести во времени, извлекая их из ускорителя за несколько секунд (медленный вывод) вместо использования обычного цикла вывода в несколько микросекунд. Возможно уширить поперечный профиль пучка родительских частиц. Наконец, можно формировать пучок родительских частиц в диапазоне импульсов, которые будут производить нейтрино с энергиями, оптимальными для изучаемых явлений.

Техника мечения нейтрино основана на установлении однозначного соответствия между взаимодействующими и мечеными нейтрино. Это соответствие устанавливается на основе временного и углового совпадения этих нейтрино. Моделирование показало, что меченые и взаимодействующие нейтрино могут быть однозначно связаны для более, чем 90% событий с

очень незначительной зависимостью от импульса $\pi^\pm$ -мезонов. Оставшиеся 10% фоновых событий будут удалены при физическом анализе из-за неоднозначной ассоциации. Оценки показывают, что мечение нейтрино с плотностью пучка $10^{11} \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)/\text{с}$ возможно с помощью технологии, использующей кремниевые пиксельные детекторы.

Использование системы мечения нейтрино (“умный канал”), которая до настоящего времени не рассматривалась в экспериментах с “дальними” нейтрино, сможет обеспечить необходимую статистику нейтринных событий даже при сравнительно низкой интенсивности пучка У-70.

О СОЗДАНИИ НЕЙТРИННОГО КАНАЛА

Специализированные пучки мюонных нейтрино на протонных ускорителях высоких энергий получают как частицы от распадов $\pi^\pm, K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$, а сам нейтринный канал обычно состоит из фокусирующей системы, формирующей пучок π, K -мезонов в нужном импульсном и угловом интервалах, и свободного распадного участка, заканчивающегося адронным и мюонным поглотителями.

Для создания нейтринного канала в ИФВЭ предполагается использовать медленно выведенный из ускорителя У-70 пучок протонов с энергией 60 ГэВ и интенсивностью до 10^{13} частиц за цикл длительностью около 9 с. Ниже рассматривается принципиальная оптическая схема нейтринного канала и обсуждаются основные расчетные характеристики формируемых пучков. Приводятся параметры пучков нейтрино на дальнем детекторе, расположенном на расстоянии 2595 км после конца распадного участка канала, а также характеристики пучка $\pi^\pm$ -мезонов в начале распадного участка. Результаты всех расчетов приведены для 10^{13} протонов, сбрасываемых на мишень.

В расчетах используется упрощенная схема, при которой источниками мюонных нейтрино являются только распады $\pi^\pm$ -мезонов, причем все пионы, попадающие при транспортировке по каналу в вещество, выбывают из рассмотрения. Непровзаимодействовавшие в мишени первичные протоны также в дальнейшем не рассматриваются.

ГОЛОВНАЯ ЧАСТЬ КАНАЛА

Схематический план начальной части нейтринного канала показан на рис. 1. Пучок первичных протонов, направленный вдоль оси z , с поперечными размерами $\sigma_x = \sigma_y = 1.5$ мм сбрасывается на мишень Т из алюминия длиной 60 см и

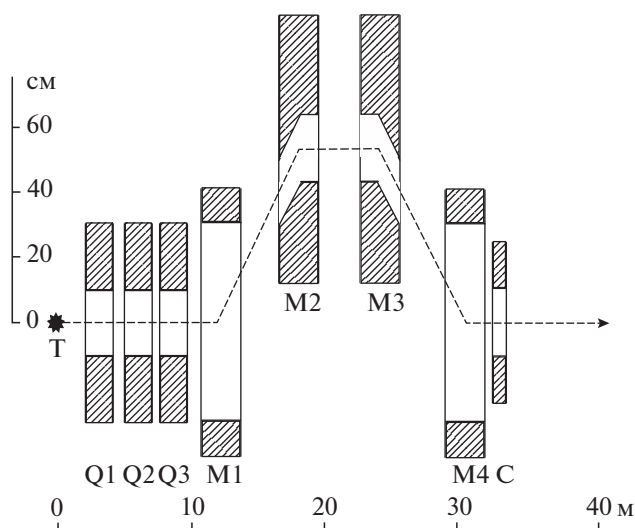


Рис. 1. Схематический план начальной части нейтринного канала.

радиусом 5 мм. Из образовавшихся в мишени π^+ -мезонов объектив (триплет) из квадрупольных линз Q_1 – Q_3 формирует узкорасходящийся пучок частиц, а бездисперсная четырехмагнитная система из дипольных магнитов M_1 – M_4 обеспечивает выделение частиц в нужном интервале импульсов¹. Между M_2 и M_3 находится область мечения, в которой устанавливаются детекторы, измеряющие импульсы π -мезонов и мюонов от распада $\pi^+ \rightarrow \mu + \nu_\mu$. За последним коллиматором С начинается распадная труба длиной 150 м и радиусом 750 мм.

Обычно непроявлявшие взаимодействия в мишени протоны сбрасываются на поглотитель, который расположен в центре четырехмагнитной системы или в конце распадной трубы. В любом случае необходима специальная коллимация пучка в начальной части канала. В данной работе этот вопрос не изучался, и поэтому непроявлявшие взаимодействия протоны выбывали из рассмотрения.

Квадрупольная линза имеет длину 2 м и диаметр апертуры 200 мм. Длина магнита составляет 3 м, а его вертикальный межполюсной зазор равен ± 100 мм. Режимы линз и магнитов, а также раскрытие коллиматора С и коллиматоров, размещенных внутри магнитов M_2 и M_3 , выбирались из условия формирования на детекторе пучка нейтрино в интервале энергий от 3 до 6 ГэВ, соот-

¹ В работах [7, 8] была рассмотрена фокусирующая система для формирования нейтринных пучков, состоящая из двух триплетов квадрупольных линз, между которыми расположена бездисперсная четырехмагнитная система для выделения частиц в нужном интервале импульсов и очистки пучка от частиц другого знака.

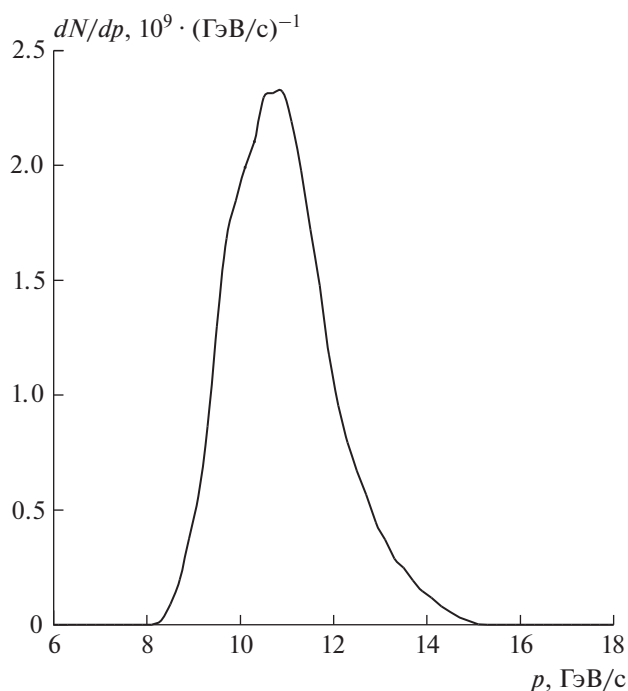


Рис. 2. Спектр π -мезонов в начале распадного участка канала.

ветствующему первому осцилляционному максимуму $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ на дальнем детекторе ($L = 2595$ км) в районе ~ 5 ГэВ. У всех коллиматоров полное раскрытие $H \times V$ равно 200×200 мм².

ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА π -МЕЗОНОВ В НАЧАЛЕ РАСПАДНОЙ ТРУБЫ

На рис. 2 представлены распределения пучка π -мезонов по импульсам p , поперечным координатам $\{x, y\}$ рис. 3а и углам $\{x' = p_x/p_z, y' = p_y/p_z\}$ рис. 3б в начале распадного участка. Общее количество π -мезонов в начале распадного участка канала составляет $6.3 \cdot 10^9$ частиц за цикл. Здесь и далее все результаты приведены для 10^{13} протонов за цикл, сбрасываемых на мишень.

Из определения углов видно, что реально это не углы, а тангенсы углов. Поскольку для малых значений углов π -мезонов в нашем пучке углы равны своим тангенсам, то далее везде тангенсы углов будем называть просто углами движения частицы в каждой поперечной плоскости.

Действительно, после последнего коллиматора перед распадным участком канала формируется узкорасходящийся ($\sigma[x'] = 1.75$ мрад и $\sigma[y'] = 3.05$ мрад — здесь и далее под сигмой подразумевается среднеквадратичное отклонение) пучок π -мезонов в интервале импульсов от 8 до 15 ГэВ/с со средним значением ~ 10.5 ГэВ/с.

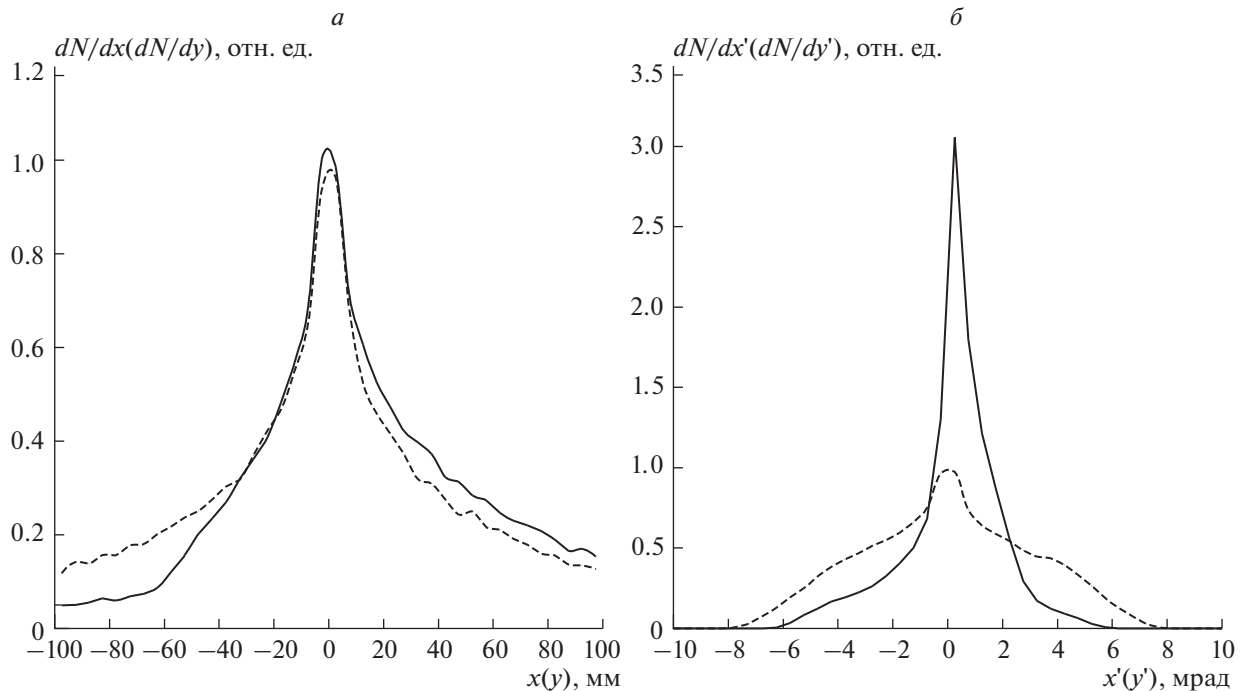


Рис. 3. Распределения π -мезонов по координатам (а) и углам (б) в начале распадного участка канала: сплошная линия — горизонтальная плоскость, пунктирная линия — вертикальная плоскость.

Что касается пространственного распределения пучка π -мезонов, то в начале распадной части канала его поперечные размеры ограничены раскрытием последнего коллиматора $200 \times 200 \text{ мм}^2$, причем $\sigma[x] = 39.7 \text{ мм}$ и $\sigma[y] = 43.6 \text{ мм}$.

СПЕКТР НЕЙТРИНО НА ДАЛЬНОМ ДЕТЕКТОРЕ

Число нейтринных взаимодействий в детекторе зависит от его массы, потока нейтрино через детектор и их энергии. (Спектр взаимодействий нейтрино нормируем на массу детектора в одну килотонну). Поток нейтрино, их энергию и, соответственно, распределение по энергиям нейтринных взаимодействий для дальнего детектора можно рассчитать по упрощенной схеме.

На рис. 4 показано распределение по энергиям нейтринных взаимодействий в дальнем детекторе (количество взаимодействий в интервале 3–6 ГэВ равно $9.6 \cdot 10^{-9}$ событиям за цикл на 1 кТ массы детектора).

Угловая расходимость пучка π -мезонов $\theta_\pi \cong \sqrt{x'^2 + y'^2}$ в начале распадного участка канала равна $\sigma[\theta_\pi] \cong 2.4 \text{ мрад}$, что при характерном размере дальнего детектора 100 м и расстоянии до него $z \cong 2595 \text{ км}$ значительно больше углового размера детектора $\theta_d \cong 3.85 \cdot 10^{-2} \text{ мрад}$.

Соотношение $\theta_d \ll \sigma[\theta_\pi]$ позволяет использовать упрощенную схему расчета нейтринных спектров. При столь небольших значениях углового

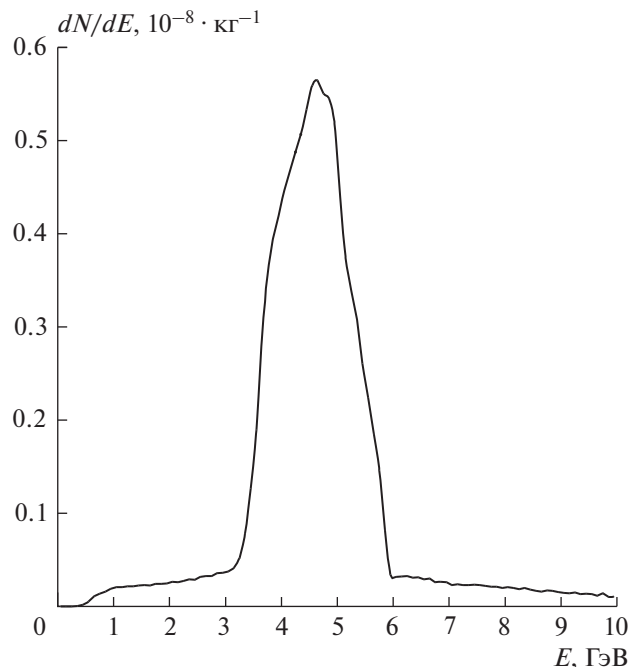


Рис. 4. Распределение по энергиям ν_μ взаимодействий в дальнем детекторе.

размера детектора θ_d плотность углового распределения нейтрино при распаде π -мезона (1)

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi\gamma^2(1 - \beta \cos \theta)^2} \quad (1)$$

практически постоянна в пределах углового размера дальнего детектора (здесь β и γ — скорость и гамма-фактор распадающегося π -мезона, θ — угол вылета нейтрино относительно направления π -мезона в лабораторной системе координат).

Поток нейтрино Φ через детектор с поперечной площадью S будет равен (2)

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{S} \int \frac{dN}{d\Omega} d\Omega \cong \\ &\cong \frac{1}{S} \frac{dN}{d\Omega} \Delta\Omega \cong \frac{1}{S} \frac{dN}{d\Omega} \frac{S}{z^2} = \frac{1}{z^2} \frac{dN}{d\Omega} \end{aligned} \quad (2)$$

и практически не зависит от площади детектора. При этом для вычисления значения $\cos\theta$ достаточно полагать, что все нейтрино попадают в центр детектора, что также позволяет однозначно определить их энергию E (E^* — энергия нейтрино в с.ц.м.) (3):

$$E = \frac{E^*}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)}. \quad (3)$$

ПРОДОЛЬНЫЙ И ПОПЕРЕЧНЫЙ РАЗМЕРЫ РАСПАДНОЙ ТРУБЫ

При разработке нейтринного канала всегда возникает вопрос оптимизации параметров распадного участка для получения максимального количества нейтринных взаимодействий в детекторе и минимизации размеров распадной трубы.

Расчеты показывают, что наблюдается слабая зависимость числа взаимодействий мюонных нейтрино в дальнем детекторе в интервале энергий от 3 до 6 ГэВ от поперечного размера распадной трубы. Так даже при длине распадной трубы

150 м относительная разница числа взаимодействий для радиусов трубы 400 и 800 мм составляет всего ~13%. Возможно также использовать распадный участок с постепенно увеличивающимся диаметром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе восстановления кинематики $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ распада родительской частицы в канале меченых нейтрино можно с высокой точностью восстановить импульс и тип образованного нейтрино. В данной работе описана методика формирования пучка родительских частиц π^+ на канале ускорителя У-70 (Протвино), приведены расчетные характеристики канала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00107).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akindinov A.V., Anassontzis E.G., Anton G. et al. // Eur. Phys. J. C. 2019. V. 79. Art. No. 758.
2. Anikeev V.B., Belikov S.V., Gurzhiev S.N. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1998. V. 419. P. 596.
3. Pontecorvo B. // Lett. Nuovo Cim. 1979. V. 25. P. 257.
4. Aglieri Rinella G., Alvarez Feito D., Arcidiacono R. et al. // JINST 2019. V. 14. Art. No. P07010.
5. Lai A. A system approach towards future trackers at high luminosity colliders: the timespot project. Sydney: IEEE, 2018. P. 1.
6. Sadrozinski H.F.W., Ely S., Fadeyev V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. 2013. V. 730. P. 226.
7. Гаркуша В.И., Карташев В.П., Котов В.И., Новоскольцев Ф.Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 6. С. 92.
8. Гаркуша В.И., Карташев В.П., Котов В.И., Новоскольцев Ф.Н. // Авторское свидетельство № 1690234. Бюллетень "Открытия и изобретения". 1991. № 41. С. 245.

Study of tagged neutrino beam characteristics at the U-70 accelerator

F. N. Novoskoltsev^a, R. Yu. Sinyukov^a, A. A. Sokolov^{a, *}

^a National Research Centre "Kurchatov Institute" — IHEP, Protvino, 142281 Russia

*e-mail: sokolov_a@ihep.ru

The method of tagged neutrino beams is considered, based on the reconstruction of the kinematics of $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ decay of the parent particle one can accurately recover the momentum and type of the produced neutrino. We described the technique of the π^+ parent particle beam formation on the U-70 accelerator (Protvino) channel. Also, the calculated characteristics of the corresponding beam are given.