

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА P2O К ИЗМЕРЕНИЮ ФАЗЫ $CP$ -НАРУШЕНИЯ В ЛЕПТОННОМ СЕКТОРЕ

© 2025 г. В. Н. Горячев<sup>1)</sup>, М. М. Кирсанов<sup>2)</sup>, Ф. Н. Новоскольников<sup>1)</sup>,  
Р. Ю. Синюков<sup>1)</sup>, А. А. Соколов<sup>1),\*</sup>

Поступила в редакцию 09.12.2024 г.; после доработки 09.12.2024 г.; принята к публикации 10.12.2024 г.

В эксперименте P2O (Protvino-to-ORCA) планируются проведения экспериментов по определению иерархии масс нейтрино и поиска нарушения  $CP$ -инвариантности в лептонном секторе. Ранее были рассмотрены различные варианты нейтринных каналов на ускорителе У-70 для проведения данных экспериментов. В работе рассмотрены нейтринные пучки, формируемые в этих каналах; проведено сравнение их характеристик. Также рассмотрены различные типы неопределенностей в эксперименте и вклад их в погрешность измерения фазы  $CP$ -нарушения, проведен сравнительный анализ. Это даст возможность в дальнейшем формировать оптимальную архитектуру планируемых экспериментов с длинной базой (т.е. определять тип и характеристики пучка, детекторов, необходимую интегральную интенсивность эксперимента) на качественном уровне. Также в работе рассчитана чувствительность эксперимента P2O к измерению фазы  $CP$ -нарушения в лептонном секторе при использовании каждого из рассмотренных ранее нейтринных пучков. Проведен выбор оптимального варианта канала, позволяющего обеспечить максимальную чувствительность эксперимента P2O к планируемым измерениям.

**Ключевые слова:** эксперимент P2O (Protvino-to-ORCA), нарушение  $CP$ -инвариантности, ускоритель У-70, нейтрино

DOI: 10.31857/S0044002725010099, EDN: GSBRUH

### 1. 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 поиски нарушения  $CP$ -четности в  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$  осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино. Продвинуться в этих вопросах можно, изучая осцилляции нейтрино с энергией  $O(1–10)$  ГэВ, генерируемых ускорителем и детектируемых на больших расстояниях, т.е. используя длинную базу  $O(100–1000)$  км. В эксперименте P2O (Protvino-to-ORCA) рассматривается возможность направить нейтринный пучок от протонного ускорителя У-70 (Протвино, Россия) в Средиземное море для регистрации нейтрино глубоководным детектором ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) для проведения экспериментов по определению иерархии масс нейтрино и поиска нарушения  $CP$ -инвариантности в лептонном секторе [1]. Рассто-

яние от ускорителя У-70 до детектора составляет 2595 км, что идеально для рассматриваемого эксперимента. Оценки показывают, что в эксперименте P2O можно получить 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  $\sim 90$  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 [2]). Это позволит значительно увеличить чувствительность эксперимента к проводимым измерениям. Таким образом, эксперимент P2O может обладать уникальными характеристиками даже при сравнительно низкой интенсивности пучка ( $\sim 90$  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),

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” — ИФВЭ, Протвино, Россия.

<sup>2)</sup> Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

\* E-mail: sokolov\_a@ihep.ru

а также сможет обеспечить богатую научную программу исследований на короткой базе на площадке НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ в Протвино.

## 2. НЕЙТРИННЫЕ КАНАЛЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ P2O

Специализированные пучки мюонных нейтрино на протонных ускорителях высоких энергий образуются при взаимодействии пучка протонов, выведенных из ускорителя, с мишенью. Эти взаимодействия обеспечивают образование заряженных  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, которые затем отбираются по знаку заряда, фокусируются в нужном импульсном и угловом интервалах и направляются в вакуумированный распадный канал длиной  $O(100)$  м, в котором они могут распадаться, образуя нейтрино. Фокусируя мезоны определенного импульса, а также изменяя длину распадного канала, можно отбирать нейтрино различных энергий и, соответственно, изменять энергию полученного нейтринного пучка. Основные моды распада мезонов с образованием нейтрино – это  $\pi^\pm(K^\pm) \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ . Таким образом, пучки нейтрино, сформированные подобным образом на ускорителях, в основном состоят из мюонных нейтрино (антинейтрино)  $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ , в которых имеется также небольшая примесь ( $\sim 0.5$ – $2\%$ ) электронных нейтрино  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$  от распадов  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e(\bar{\nu}_e) \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$ ,  $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu_e(\bar{\nu}_e)$ . Распределение нейтрино по энергии зависит от параметров нейтринного канала и может иметь как широкий, т.е. покрывающий большой диапазон энергии, так и узкий спектр, содержащий нейтрино в небольшой области энергии.

Распадный участок заканчивается адронным и мюонным поглотителями. В эксперименте обычно формируется только пучок мюонных нейтрино или антинейтрино при фокусировке положительно или отрицательно заряженных родительских  $\pi(K)$ -мезонов соответственно.

При формировании нейтринных пучков широко применяются фокусирующие системы, состоящие из магнитных горнов, т.е. токовых аксиально-симметричных оболочек. Для достижения необходимых для фокусировки полей в магнитных горнах требуются токи в сотни кА, которые могут обеспечиваться только в импульсном режиме. Поэтому работа соответствующей фокусирующей системы основана на быстром выводе протонного пучка из ускорителя. Например, на ускорительном комплексе У-70 продолжительность быстрого вывода составляет 5 мкс. В некоторых рассматриваемых в работе нейтринных каналах (см. ниже, канал № 1, 2

[1, 3]) для создания фокусирующей системы используются параболические линзы, которые являются разновидностью магнитных горнов, у которых внешняя поверхность внутреннего проводника имеет параболическую форму.

Также возможно создание нейтринных каналов, в которых фокусирующие системы состоят из одного или двух объективов квадрупольных линз (канал № 3, 4 [4, 5]). Для выделения родительских  $\pi^\pm$ -,  $K^\pm$ -мезонов в нужном интервале импульсов и очистки пучка от частиц противоположного знака заряда здесь предполагается использовать бездисперсные четырехмагнитные системы, расположенные после первого объектива. Фактически это прямой нейтринный канал, так как направление наведения первичного протонного пучка на мишень совпадает с осью распадного участка (канал № 3 [4]).

Оптическая схема подобного канала также может содержать дипольные магниты, отклоняющие пучок  $\pi$ -,  $K$ -мезонов в одну сторону (канал № 4). В соответствующей работе [5] рассматривается нейтринный канал на основе квадрупольных линз и бездисперсной системы с двумя дипольными магнитами и полевой линзой, причем магниты также отклоняют пучок родительских частиц в одну сторону. Распадный участок такого нейтринного канала повернут относительно направления наведения первичного протонного пучка на мишень, что позволяет в значительной мере избежать проблем, присущих прямым нейтринным каналам, а именно, фоновых процессов от непроизводивших в мишени протонов, а также большей примеси электронных (анти)нейтрино в пучке. Оптическая схема канала оптимизирована для формирования нейтринного пучка на детекторе в эксперименте P2O, расположенном на расстоянии  $\sim 2595$  км от мишени, при энергии первичного протонного пучка 60 ГэВ. Для организации этого канала предполагается использовать медленно выведенный из ускорителя У-70 пучок протонов с интенсивностью до  $10^{13}$  частиц за цикл (продолжительность вывода от 0.5 до 1 с, стандартная длительность цикла около 9 с).

При создании оптической схемы канала меченых нейтрино [4, 6] значительное внимание уделялось уменьшению плотности потока родительских  $\pi$ -,  $K$ -мезонов в пучке, для чего использовались три способа. Во-первых, частицы в пучке были разнесены во времени, для чего рассматривался вывод протонов из ускорителя в течение нескольких секунд (медленный вывод) вместо традиционно используемого вывода в несколько микросекунд. Поэтому такой канал должен работать с использованием фокусирующей систе-

мы на основе квадрупольных линз. Во-вторых, частицы в пучке были разнесены в пространстве с помощью соответствующей адаптации поперечного профиля пучка  $\pi^-$ ,  $K^-$ -мезонов. Также родительские частицы были так отобраны по импульсу, чтобы в пучке оставались только  $\pi^-$ ,  $K^-$ -мезоны, которые образуют нейтрино в диапазоне энергий, оптимальном для изучаемых явлений. Такая селекция по импульсу позволяет снизить плотность потока  $\pi^-$ ,  $K^-$ -мезонов на один-два порядка за счет удаления заряженных частиц с малым импульсом.

В работе проводится сравнительный анализ всех рассмотренных ранее каналов для эксперимента P2O [1, 3–5], формирующих пучки нейтрино, пиковая энергия которых на дальнем детекторе соответствует первому осцилляционному максимуму нейтрино  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$  в районе 4.5–5 ГэВ, а именно:

- прямого канала с параболическими линзами, формирующего “интенсивный” нейтринный пучок (канал № 1) [1];
- канала с параболическими линзами с поворотом родительских частиц в одну сторону — “интенсивный узкоэнергетический” пучок (канал № 2) [3];
- прямого канала с квадрупольными линзами и бездисперсной четырехмагнитной системой — “узкоэнергетический” пучок (канал № 3) [4];

- канала с квадрупольными линзами с поворотом родительских частиц в одну сторону и бездисперсной двухмагнитной системой с полевой линзой — пучок с пониженным уровнем фона (канал № 4) [5];
- канала меченых нейтрино (канал № 5) [4, 6].

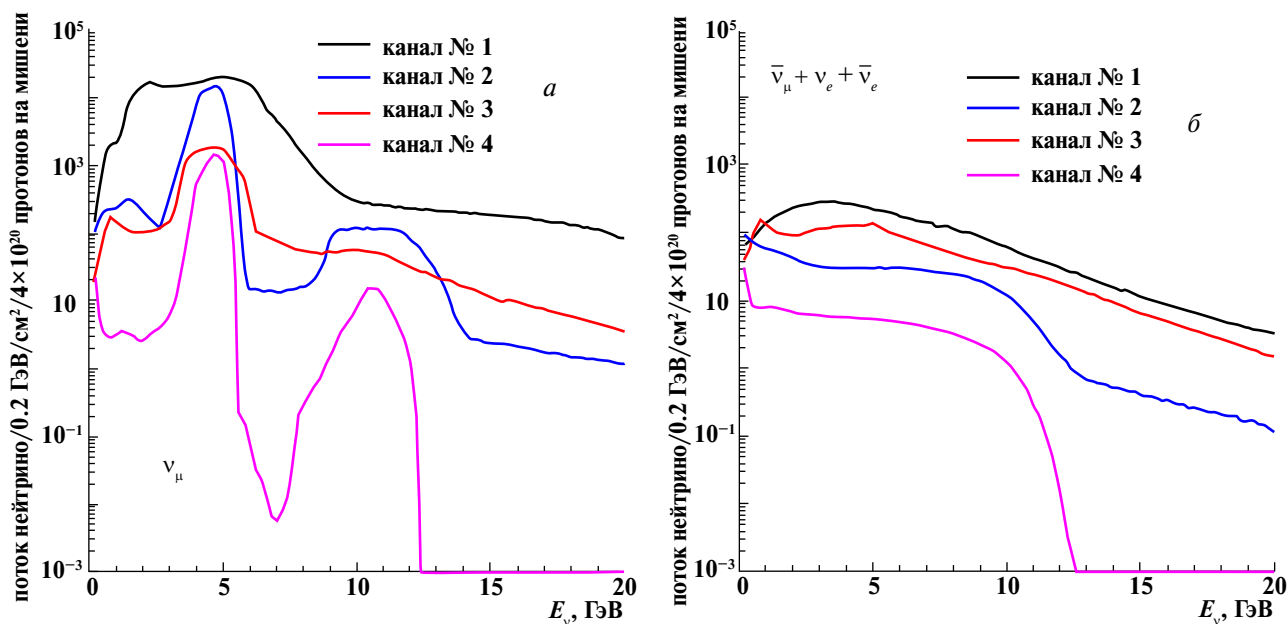
### 3. НЕЙТРИННЫЕ ПУЧКИ

В данном разделе рассматриваются характеристики пучков, создаваемых в этих каналах, — их интенсивность, энергетические распределения нейтрино, характеристики фоновых нейтрино.

На рис. 1 представлены энергетические спектры нейтрино на дальнем детекторе эксперимента P2O для рассмотренных нейтринных каналов № 1–4 при фокусировке положительно заряженных родительских частиц  $\pi^+$ ,  $K^+$ . Расчет данных спектров произведен для  $4 \times 10^{20}$  протонов, сброшенных на мишень, что соответствует годовой работе ускорителя У-70 при его мощности 450 кВт.

Для сравнения ширины энергетических спектров нейтрино  $\nu_\mu$  в каналах № 1–4 на рис. 2 приведены соответствующие спектры, нормированные на одинаковое число нейтрино в пучке.

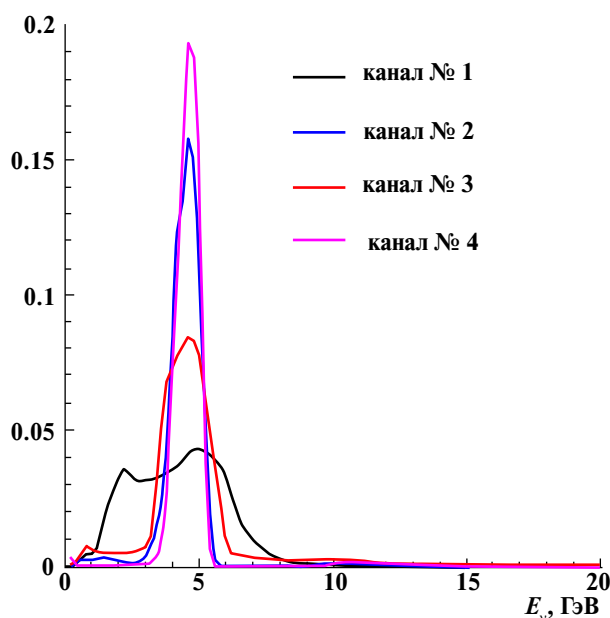
В табл. 1 представлены различные параметры нейтринных пучков в каналах № 1–4 в полном диапазоне энергий 0–60 ГэВ и диапазоне энергий 3–6 ГэВ в районе первого осцилляционного максимума нейтрино  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , “интенсив-



**Рис. 1.** Энергетические спектры мюонных нейтрино  $\nu_\mu$  (а) и суммы фоновых нейтрино  $\bar{\nu}_\mu + \nu_e + \bar{\nu}_e$  (б) на дальнем детекторе для нейтринных каналов № 1–4 для эксперимента P2O при фокусировке положительно заряженных родительских частиц  $\pi^+$ ,  $K^+$ .

**Таблица 1.** Параметры нейтринных пучков на каналах № 1–4

Канал	$E(\nu_\mu)$ , ГэВ	$\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu)$ , %	$N(\nu_\mu)$	$N(\bar{\nu}_\mu + \nu_e + \bar{\nu}_e)/N(\nu_\mu)$ , %
№ 1	0–60	40.6	66950	1.44
	3–6		40090	0.72
№ 2	0–60	9.6	14100	1.32
	3–6		13120	0.39
№ 3	0–60	16.7	3680	13.9
	3–6		2880	5.65
№ 4	0–60	7.0	1120	2.22
	3–6		1070	0.84

**Рис. 2.** Энергетические спектры мюонных нейтрино  $\nu_\mu$  для каналов № 1–4, нормированные на одинаковое число нейтрино в пучке.

ный” пучок (канал № 1) имеет более широкий энергетический спектр ( $\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu) \sim 40.8\%$ ) по сравнению с нейтринными пучками в других каналах (см. также рис. 2). Также этот пучок имеет сравнительно большую интенсивность. Число нейтрино в пучке  $N(\nu_\mu)$  в канале № 1 примерно в 3–4 раза больше, чем в канале с параболическими линзами с поворотом родительских частиц (канал № 2). Каналы, использующие квадрупольные линзы, дают значительно менее интенсивные пучки нейтрино. Так, интенсивность нейтрино в канале № 3 — прямой канал с квадрупольными линзами — в 14–18 раз меньше интенсивности канала № 1 и в 40–60 раз меньше в канале № 4 — канал с квадрупольными линзами с поворотом родительских частиц.

Доля фоновых нейтрино  $N(\bar{\nu}_\mu + \nu_e + \bar{\nu}_e)/N(\nu_\mu)$  в каждом из каналов составляет 0.5–2%. Исключение составляет прямой канал с квадрупольными линзами (канал № 3), где доля фоновых нейтрино  $\sim 6$ –14%. Причиной является то, что при разработке оптической схемы данного канала основное внимание обращалось на создание нейтринного пучка с узким энергетическим спектром, а не на уменьшение примеси фоновых нейтрино в пучке.

Для создания канала меченых нейтрино [6] использовался нейтринный пучок канала № 3 [4]. При применении современных пиксельных детекторов, которые могут использоваться для создания станций мечения, рассмотренный канал меченых нейтрино может эффективно функционировать при мощности ускорителя У-70 не выше 90 кВт. Это даст нейтринный пучок с интенсивностью более чем в 5 раз ниже пучка от канала № 3, который может функционировать при мощности У-70 450 кВт. Здесь нужно также учесть эффективность работы станций мечения 20–40%. Хотя качество пучка меченых нейтрино (точность восстановления его энергии, фоновые характеристики, измерение потока нейтрино) гораздо выше обычных нейтринных пучков, из-за его низкой интенсивности (в  $\sim 200$  раз ниже интенсивности канала № 1) чувствительность эксперимента Р2О к измерению фазы  $CP$ -нарушения с использованием рассмотренного пучка меченых нейтрино будет низка. Изучение чувствительности эксперимента Р2О к измерению фазы  $CP$ -нарушения с использованием пучка меченых нейтрино выходит за рамки представленной работы.

#### 4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА Р2О К ИЗМЕРЕНИЮ ЭФФЕКТА $CP$ -НАРУШЕНИЯ

Для выбора оптимального нейтринного канала, а также для оценки научного потенциала

эксперимента P2O изучалась чувствительность эксперимента к измерению эффекта нарушения  $CP$ -инвариантности.

Чувствительность измерения  $\delta_{CP}$  может быть оценена различными способами. Во-первых, можно определить, при каких значениях  $\delta_{CP}$  в эксперименте можно отличить нарушение  $CP$  от сохранения  $CP$ , т.е. от варианта, когда  $\delta_{CP} = 0$  или  $\delta_{CP} = \pi$ . Эта оценка определяет чувствительность измерения нарушения  $CP$ . Также с помощью построения  $\chi^2$ -функции можно определять, как значения  $\delta_{CP}$ , измеренные в эксперименте, отличаются от истинного значения  $\delta_{CP} = \delta_{CP}^R$ . Во-вторых, можно изучать точность измерения  $\delta_{CP}$ , определяя отличие экспериментального значения  $\delta_{CP}$  от  $\delta_{CP}^R$  на доверительном уровне  $1\sigma$ .

Для построения  $\chi^2$ -функции рассматривается набор из  $N$  наблюдаемых величин  $\{X_n\}_{n=1,\dots,N}$ . Для нейтринного эксперимента это обычно энергетическое распределение различных типов нейтринных событий в детекторе. Требуемая функция  $\chi^2$  измеряет  $X_n^{\text{exp}} - X_n^R$ , т.е. разность экспериментального набора наблюдаемых величин и соответствующего набора при истинном значении параметра  $\delta_{CP} = \delta_{CP}^R$  и других значениях параметров матрицы смешивания нейтрино в единицах суммарной неопределенности.

Для расчета чувствительности использовался пакет GLoBES [7], где описана процедура построения функции  $\chi^2$  и ее минимизации.

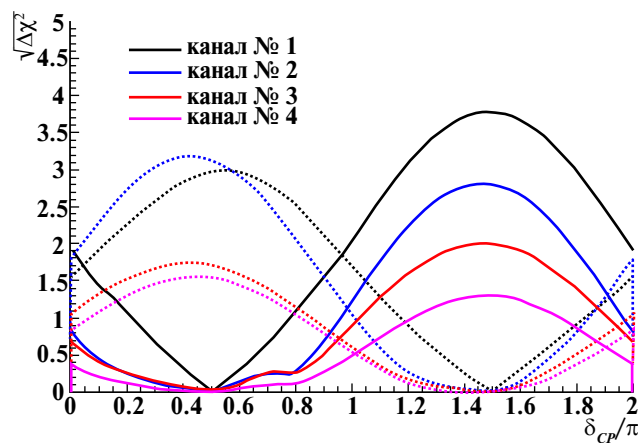
Детали отклика детектора KM3NeT/ORCA, полученные с помощью моделирования и реконструкции трековых и ливневых событий, взяты из работы [8]. Использовалась зависимость от энергии нейтрино энергетического разрешения детектора (рис. 68, 91 [8]) и идентификации частиц в детекторе (рис. 99 из [8]). Отметим, что энергетическое разрешение детектора составляет  $\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu) \approx 30\%$  при энергии нейтрино  $\sim 5$  ГэВ. Это значение разрешения использовалось в дальнейшем в большинстве расчетов. Детали отклика детектора, представленные в работе [8], были рассмотрены для исследований атмосферного нейтрино и не включают потенциальных улучшений, связанных с известным направлением и временем прихода нейтринного пучка от ускорителя на детектор. Известное направление прихода пучка может быть использовано для ограничения энергии рассеяния нейтрино в событиях нейтрального тока, что потенциально позволит идентифицировать НС-события. Пучок нейтрино в эксперименте с использованием каналов № 1, 2 приходит на детектор в течение коротких (5 мкс) сгустков пучка, что может подавить фон на фактор  $\sim 10^6$ .

При расчетах в работе использовались нейтринные сечения из пакета GENIE [9, 10]. Вероятность осцилляций вычислялась с использованием пакета GLoBES [7]. Использовались параметры осцилляций нейтрино из работы [11].

Рассчитана чувствительность к исключению определенных значений фазы  $CP$ -нарушения  $\delta_{CP}$  для некоторых истинных значений фазы  $\delta_{CP}^R$  ( $90^\circ$  и  $270^\circ$ ) при использовании нормальной иерархии масс нейтрино (NO) в эксперименте P2O. Расчет производился для 3 лет работы с пучком мощностью 450 кВт на ускорителе У-70, что соответствует  $1.2 \times 10^{21}$  протонов, сброшенных на мишень. Рассматривалась положительная поляризация пучка. Произведено сравнение уровня чувствительности при использовании нейтринных спектров от каналов № 1–4. На рис. 3 представлены зависимости  $\sqrt{\chi^2}$  от гипотетического значения  $\delta_{CP}$ , которое проверяется в данный момент в эксперименте при истинном значении  $\delta_{CP}^R \cdot \sqrt{\chi^2} = 1$  соответствует неопределенности  $1\sigma$ .

В табл. 2 представлена точность измерения фазы  $CP$ -нарушения  $\Delta\delta_{CP}$  при использовании различных нейтринных пучков и при экспозиции пучка 3 г и 10 лет. Точность определяется как изменение  $\delta_{CP}$  при отклонении  $\sqrt{\chi^2}$  от минимума на 1, усредненное по левой и правой стороне.

Из распределений на рис. 3, а также из данных в табл. 2 можно увидеть, что наибольшую чув-



**Рис. 3.** Чувствительность к исключению определенных значений фазы  $CP$ -нарушения  $\delta_{CP}$  в эксперименте P2O после 3 лет работы с пучком мощностью 450 кВт (при положительной поляризации пучка) для двух истинных значений фазы  $\delta_{CP}^R = \pi/2$  (точечные кривые),  $\delta_{CP}^R = 3\pi/2$  (сплошные кривые). Каждая кривая представляет собой зависимость  $\sqrt{\chi^2}$  от гипотетического значения  $\delta_{CP}$ , которое проверяется в данный момент в эксперименте при истинном значении  $\delta_{CP}^R$ .  $\sqrt{\chi^2} = 1$  соответствует неопределенности  $1\sigma$ .



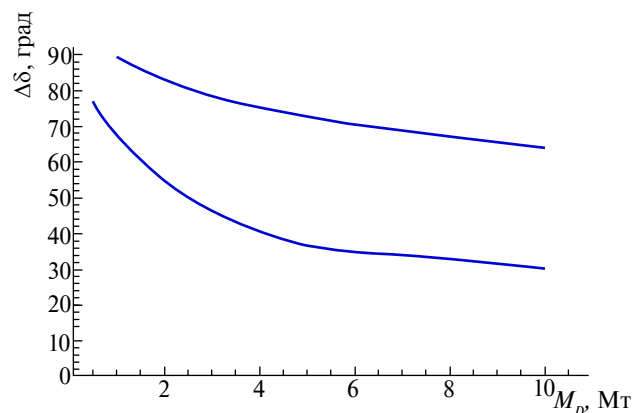
**Таблица 2.** Точность измерения фазы  $CP$ -нарушения

Канал	Экспозиция пучка 3 г.		Экспозиция пучка 10 лет	
	$\Delta\delta_{CP} (\delta_{CP}^R = 90^\circ)$	$\Delta\delta_{CP} (\delta_{CP}^R = 270^\circ)$	$\Delta\delta_{CP} (\delta_{CP}^R = 90^\circ)$	$\Delta\delta_{CP} (\delta_{CP}^R = 270^\circ)$
№ 1	$\pm 52.2^\circ$	$\pm 59.4^\circ$	$\pm 41.4^\circ$	$\pm 39.6^\circ$
№ 2	$\pm 90.8^\circ$	$\pm 75.6^\circ$	$\pm 82.8^\circ$	$\pm 66.7^\circ$
№ 3	$\pm 101.7^\circ$	$\pm 99.8^\circ$	$\pm 90.0^\circ$	$\pm 82.8^\circ$
№ 4	$\pm 130.5^\circ$	$\pm 113.4^\circ$	$\pm 109.8^\circ$	$\pm 86.4^\circ$

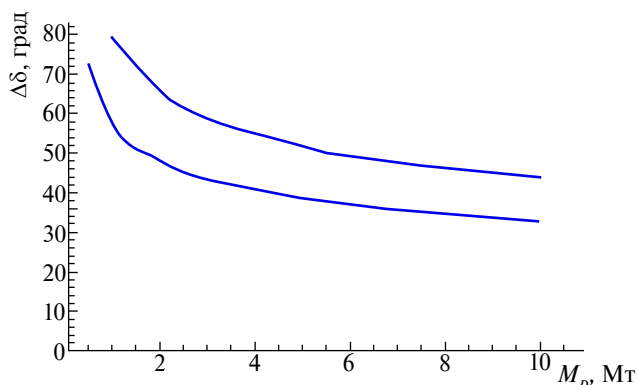
ствительность к измерению  $\delta_{CP}$  можно получить при использовании нейтринного пучка из канала № 1.

Далее рассматривается чувствительность к измерению  $\delta_{CP}$  в зависимости от различных параметров эксперимента. На рис. 4 представлена зависимость  $\Delta\delta_{CP}$  от массы детектора при использовании пучка  $\nu_\mu$  из канала № 1. Произведено сравнение данной зависимости при различном энергетическом разрешении детектора  $\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu) = 30\%$  (номинальное разрешение) и  $5\%$  (улучшенное разрешение). Улучшение энергетического разрешения в эксперименте возможно достигнуть с помощью модернизации детектора, например, увеличив его гранулярность. Также для этого можно будет использовать нейтринный пучок с узким энергетическим спектром. Однако, если использовать, например, узкий пучок из канала № 2, то он дает худшее разрешение, чем широкий пучок № 1 (см. табл. 2) из-за меньшей интенсивности пучка (см. табл. 1).

В работе также произведен расчет чувствительности к измерению  $\delta_{CP}$  при использовании пучков  $\nu_\mu$  и  $\bar{\nu}_\mu$ . На рис. 5 представлена зависимость  $\Delta\delta_{CP}$  от массы детектора при экспозиции пучка



**Рис. 4.** Разрешение измерения  $\delta_{CP}$  как функция массы детектора  $M_D$  для истинного значения  $\delta_{CP}^R = \pi/2$ . Разрешение по энергии составляет  $30\%$  (номинальное значение, верхняя кривая) и  $0.05\%$  (нижняя кривая). Экспозиция — 3 г. пучка нейтрино.

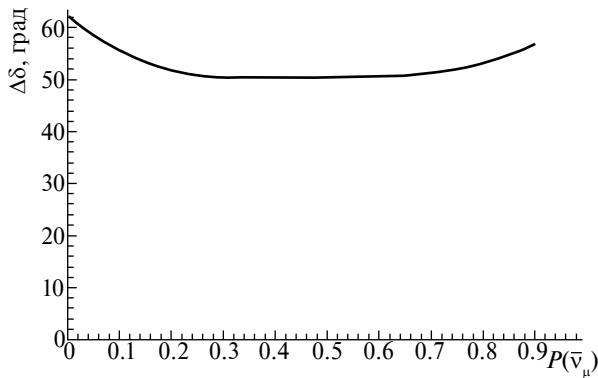


**Рис. 5.** Разрешение измерения  $\delta_{CP}$  как функция массы детектора  $M_D$  для истинного значения  $\delta_{CP}^R = \pi/2$ . Разрешение по энергии составляет  $30\%$  (номинальное значение, верхняя кривая) и  $0.05\%$  (нижняя кривая). Полная экспозиция — 3 г. пучка нейтрино, из них доля антинейтрино — 0.3.

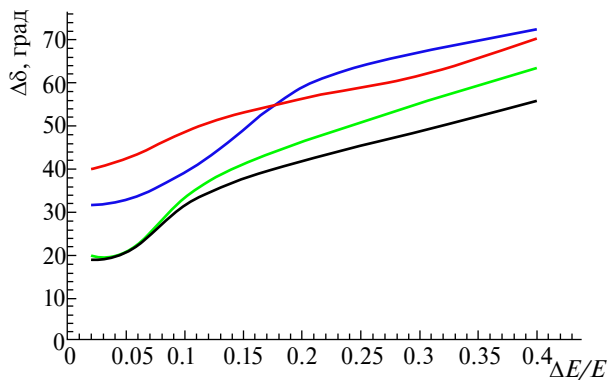
3 г. (2 г. пучка  $\nu_\mu$  + 1 г. пучка  $\bar{\nu}_\mu$  из канала № 1). Соответствующие кривые на рис. 4 (для пучка  $\nu_\mu$ ) и 5 (для пучка  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ ) для  $\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu) = 5\%$  слабо различаются. Однако применение пучков  $\nu_\mu$  и  $\bar{\nu}_\mu$  для  $\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu) = 30\%$  дает значительно улучшение чувствительности к измерению  $\delta_{CP}$  по сравнению с использованием только пучка  $\nu_\mu$ .

Рисунок 6 представляет зависимость  $\Delta\delta_{CP}$  от доли антинейтрино в экспозиции пучка  $P(\bar{\nu}_\mu) = \bar{\nu}_\mu/(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ . Для  $P(\bar{\nu}_\mu)$  в интервале от 0.3 до 0.6  $\Delta\delta_{CP}$  уменьшается на  $\sim 10^\circ$  ( $\sim 20\%$ ) по сравнению с использованием только нейтринного пучка.

На рис. 7 представлена точность измерения фазы  $CP$ -нарушения  $\Delta\delta_{CP}$  в зависимости от энергетического разрешения детектора  $\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu)$  для различных истинных значений фазы  $\delta_{CP}^R$ . При изменении энергетического разрешения детектора  $\Delta E(\nu_\mu)/E(\nu_\mu)$  от  $30\%$  до  $5\%$   $\Delta\delta_{CP}$  уменьшается на  $20^\circ$ – $35^\circ$  в зависимости от значения  $\delta_{CP}^R$ . Таким образом, улучшение энергетического разрешения детектора позволит значительно (в 2–3 раза) улучшить его чувствительность к измерению фазы  $CP$ -нарушения.



**Рис. 6.** Разрешение измерения  $\delta_{CP}$  как функция доли экспозиции антинейтрино  $P(\bar{\nu}_\mu) = \bar{\nu}_\mu / (\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$  для истинного значения  $\delta_{CP}^R = 3\pi/2$ .



**Рис. 7.** Разрешение измерения  $\delta_{CP}$  как функция энергетического разрешения нейтрино для истинного значения  $\delta_{CP}^R = 0$  (черный),  $\pi/2$  (синий),  $\pi$  (зеленый),  $3\pi/2$  (красный). Экспозиция — 3 г пучка нейтрино.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен поиск нарушения  $CP$ -инвариантности в лептонном секторе в эксперименте P2O с использованием различных вариантов нейтринных каналов, сформированных на ускорителе У-70. Рассмотрены нейтринные пучки, формируемые в этих каналах; проведено сравнение их характеристик. Рассчитана чувствительность эксперимента P2O к измерению фазы  $CP$ -нарушения при использовании каждого из рассмотренных ранее нейтринных пучков. Рассмотрены различные типы неопределенностей в эксперименте и вклад их в по-

грешность измерения фазы  $CP$ -нарушения, проведен их сравнительный анализ. Это даст возможность в дальнейшем формировать оптимальную архитектуру планируемых экспериментов с длинной базой (т.е. определять тип и характеристики пучка, детекторов, необходимую интегральную интенсивность эксперимента) на качественном уровне. Проведен выбор оптимального варианта канала, позволяющего обеспечить максимальную чувствительность эксперимента P2O к планируемым измерениям.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. V. Akindinov, E. G. Anassontzis, G. Anton, M. Ardid, J. Aublin, B. Baret, V. Bertin, S. Bourret, C. Bozza, M. Bruchner, R. Bruijn, J. Brunner, M. Chabab, N. Chau, A. S. Chepurinov, M. Colomer Molla, *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **79**, 758 (2019).
2. J. Hofestädt, T. Eberl, and M. Bruchner, in *Proceedings of the XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics ("Neutrino 2018")*, June 4–9, 2018, Heidelberg, Germany (2018), <https://doi.org/10.5281/zenodo.1292936>
3. Ф. Н. Новосколыцев, Р. Ю. Синюков, А. А. Соколов, *ЯФ* **88**, 74 (2025).
4. Ф. Н. Новосколыцев, Р. Ю. Синюков, А. А. Соколов, *Изв. РАН. Сер. физ.* **87**, 1120 (2023).
5. F. N. Novoskoltsev, R. Yu. Sinyukov, and A. A. Sokolov, *Phys. At. Nucl.* **87**, 614 (2024).
6. V. N. Goryachev, F. N. Novoskoltsev, R. Yu. Sinyukov, and A. A. Sokolov, *Phys. At. Nucl.* **87**, 799 (2024).
7. P. Huber, M. Lindner, and W. Winter, *Comput. Phys. Commun.* **167**, 195 (2005).
8. S. Adrián-Martínez, M. Ageron, F. Aharonian, S. Aiello, A. Albert, F. Ameli, E. Anassontzis, M. Andre, G. Androulakis, M. Anghinolfi, G. Anton, M. Ardid, T. Avgitas, G. Barbarino, E. Barbarito, B. Baret, *et al.*, *J. Phys. G* **43**, 084001 (2016).
9. C. Andreopoulos, A. Bell, D. Bhattacharya, F. Cavanna, J. Dobson, S. Dytman, H. Gallagher, P. Guzowski, R. Hatcher, P. Kehayias, A. Mereaglia, D. Naples, G. Pearce, A. Rubbia, M. Whalley, and T. Yang, *Nucl. Instrum. Methods A* **614**, 87 (2010).
10. C. Andreopoulos, C. Barry, S. Dytman, H. Gallagher, T. Golan, R. Hatcher, G. Perdue, and J. Yarb, *arXiv: 1510.05494 [hep-ph]*.
11. I. Esteban, M. C. Gonzalez-Garcia, M. Maltoni, I. Martinez-Soler, J. P. Pinheiro, and T. Schwetz, <http://www.nu-fit.org/?q=node/294>; *arXiv: 2410.05380*.

## SENSITIVITY OF THE $CP$ -VIOLATION PHASE MEASUREMENT IN THE LEPTON SECTOR IN THE P2O EXPERIMENT

© 2025 V. N. Goryachev<sup>1)</sup>, M. M. Kirsanov<sup>2)</sup>, F. N. Novoskoltsev<sup>1)</sup>,  
R. Yu. Sinyukov<sup>1)</sup>, A. A. Sokolov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> National Research Center “Kurchatov Institute” — IHEP, Protvino, Russia

<sup>2)</sup> Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

In the scope of the P2O (Protvino-to-ORCA) experiment it is planned to carry out experiments to determine the neutrino mass hierarchy and to search for the  $CP$ -violation in the lepton sector. Previously, various variants of neutrino channels at the U-70 accelerator were considered for these experiments. In this paper, the neutrino beams formed in these channels are considered; their characteristics are compared. Different types of uncertainties in the experiment are considered and their contributions to the measurement error of the  $CP$ -violation phase and their comparative analysis has been carried out. This will make it possible to further shape the optimal architecture of planned long-baseline experiments (i.e., to determine the type and characteristics of the beam, detectors, and the required integral intensity of the experiment) at the qualitative level. Also in this work, we calculate the sensitivity of the P2O experiment to the measurement of the  $CP$ -violation phase using each of the neutrino beams considered earlier. The choice of the optimal channel variant, which allows us to ensure the maximum sensitivity of the P2O experiment to the planned measurements, is carried out.