



# **НАУКА СОДРУЖЕСТВО ПРОГРЕСС**

**ЕЖЕНЕДЕЛЬНИК ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Газета выходит с ноября 1957 года № 12 (4509) Пятница, 17 апреля 2020 года

# Эксперимент T2K:

## новые результаты исследования нарушения CP-симметрии с помощью осцилляций нейтрино и антинейтрино

Физические законы позволяют описать поведение материи и антиматерии в большинстве наблюдаемых явлений. Хорошо известно, что существует асимметрия между веществом и антивеществом, которая проявляется себя при наблюдении Вселенной, состоящей главным образом из материи с небольшой долей антиматерии. В соответствии с теорией Большого взрыва, в первый момент образовалось равное количество вещества и антивещества.

Для того, чтобы процесс эволюции Вселенной привел к наблюдаемому доминированию материи над антиматерией, необходимо существование нарушения комбинированной зарядово-пространственной (CP) четности (CP-симметрия – это произведение двух симметрий: C – зарядовое сопряжение, которое превращает частицу в ее античастицу, и P – четность, которая создает зеркальное изображение физической системы). До настоящего времени нарушение CP-симметрии было экспериментально обнаружено только в кварковом секторе. Однако из-за малости масс кварков по сравнению с характерным масштабом шкалы электрослабого взаимодействия (~100 ГэВ) нарушение CP-симметрии в кварковом секторе не позволяет объяснить наблюдаемый дисбаланс между веществом и антивеществом во Вселенной.

В эксперименте T2K впервые исследуется другой механизм нарушения CP-симметрии, на этот раз в лептонном секторе, который экспериментально проявляется в различии между вероятностями осцилляций для нейтрино и антинейтрино. Наблюдение нарушения CP-симметрии в нейтринных осцилляциях вместе с сохранением лептонного числа может служить косвенным аргументом в пользу объяснения барионной асимметрии Вселенной через механизм лептогенезиса (лептогенезис – процесс возникновения лептон-антилептонной асимметрии (ненулевого лептонного числа) на ранних стадиях образования Вселенной).

Эксперимент T2K (см. номер 29 еженедельника «Дубна» от 26 июля 2013) использует интенсивные пучки мюонных нейтрино и антинейтрино, полученные с помощью углеродной мишени, в ко-

торой взаимодействуют протоны от ускорительного комплекса J-PARC (Токай), расположенного на восточном побережье Японии. Небольшая доля этих нейтрино (и антинейтрино) регистрируется на расстоянии 295 км с помощью известного водного черенковского детектора Super-Kamiokande, который расположен под горой Икенояма вблизи западного побережья Японии. Процесс осцилляций нейтрино приводит к тому, что в пути от Токай до Super-Kamiokande некоторые из мюонных нейтрино (антинейтрино) переходят в электронные нейтрино (антинейтрино), взаимодействия которых регистрируются и идентифицируются в детекторе Super-

344); в результате исследования нейтринных осцилляций удалось получить наилучшие на сегодняшний день ограничения на параметр нарушения CP-симметрии в лептонном секторе. С использованием пучков мюонных нейтрино и антинейтрино изучены различия между процессами осцилляций нейтрино и антинейтрино. Параметр, который определяет степень нарушения симметрии между веществом и антивеществом,  $\delta_{CP}$ , может принимать значения в интервале от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$  (рис. 1). Новые результаты, опубликованные коллаборацией T2K, позволяют впервые исключить почти половину возможных значений параметра  $\delta_{CP}$  на уров-

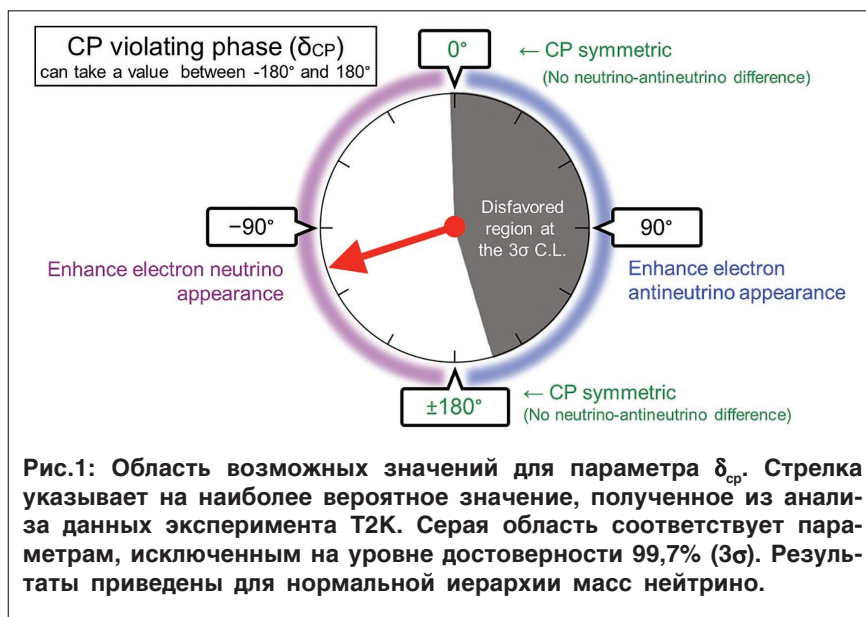


Рис.1: Область возможных значений для параметра  $\delta_{CP}$ . Стрелка указывает на наиболее вероятное значение, полученное из анализа данных эксперимента T2K. Серая область соответствует параметрам, исключенным на уровне достоверности 99,7% ( $3\sigma$ ). Результаты приведены для нормальной иерархии масс нейтрино.

Kamiokande благодаря различию между кольцами черенковского излучения для мюонов и электронов. Детектор Super-Kamiokande не позволяет различать взаимодействия нейтрино и антинейтрино, однако в эксперименте T2K можно исследовать отдельно осцилляции нейтрино и антинейтрино благодаря возможности создания пучков как нейтрино, так и антинейтрино от ускорителя J-PARC.

Коллаборация T2K недавно опубликовала новые результаты в журнале Nature (DOI: 10.1038/s41586-020-2177-0 Nature Vol. 580, pp. 339–

не достоверности 99,7% ( $3\sigma$ ), а также впервые продемонстрировать возможность исследования этого фундаментального свойства нейтрино. Это важнейший этап для понимания различий в поведении между нейтрино и его античастицей – антинейтрино. Новые результаты получены в результате анализа полного набора данных, накопленных в эксперименте T2K до 2019 года.

Коллаборация T2K проанализировала и опубликовала данные, которые соответствуют статистике сброшенных на мишень прото-

нов  $1,49 \times 10^{21}$  и  $1,64 \times 10^{21}$  для пучка нейтрино и антинейтрино, соответственно. Если бы параметр  $\delta_{cp}$  принимал значения  $0^\circ$  или  $180^\circ$ , то мюонные нейтрино и антинейтрино превращались бы в электронные нейтрино и антинейтрино с одинаковой вероятностью. Все другие значения этого пара-

тинейтрино, привело бы к наблюдению 56 взаимодействий электронных нейтрино и 22 взаимодействий электронных антинейтрино. На **рис. 2** показан энергетический спектр зарегистрированных событий для нейтрино и антинейтрино. Предсказания приведены для нормальной иерархии

ной из ключевых задач нового проекта является обнаружение нарушения CP-симметрии в лептонном секторе на уровне достоверности  $5\sigma$  и прецизионное измерение параметра  $\delta_{cp}$ .

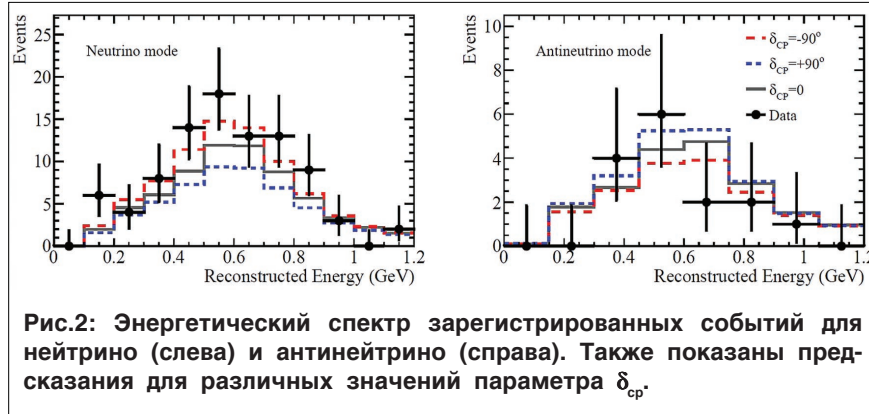
Экспериментальная установка T2K была разработана, создана и эксплуатируется международной коллаборацией, в которую входят более 450 ученых, представляющих 68 научных организаций из 12 стран (Великобритания, Вьетнам, Германия, Испания, Италия, Канада, Польша, Россия, США, Франция, Швейцария, Япония). Эксперимент финансируется Министерством образования, науки, культуры и спорта (MEXT) Японии, NSERC, NRC и CFI, Канада; CEA и CNRS/IN2P3, Франция; DFG, Германия; INFN, Италия; Министерством науки и высшего образования, Польша; Российской Академией наук, РФФИ, РНФ и Министерством высшего образования и науки, Россия; MICINN и CPAN, Испания; SNSF и SER, Швейцария; STFC, Великобритания; DOE, США.

Российский участник эксперимента T2K – Институт ядерных исследований РАН. Физики из Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ внесли определяющий вклад в прецизионные измерения выходов адронов в протон-углеродных взаимодействиях при энергии 30 ГэВ в эксперименте NA61/SHINE на ускорителе SPS (ЦЕРН). Эти данные используются для точного вычисления спектров и потоков нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K.

Недавно группа из ЛЯП ОИЯИ подключилась к работам по модернизации ближнего детектора ND280 для второй фазы эксперимента T2K. Сотрудники этой группы участвуют в тестировании прототипа элементов высокогранулированной активной мишени для этого детектора, в разработке системы калибровки и в подготовке конструкторской документации.

Более детальную информацию об эксперименте и коллаборации T2K можно найти на странице <http://t2k-experiment.org>.

**Профессор Юрий КУДЕНКО,**  
**заведующий Отделом физики**  
**высоких энергий ИЯИ РАН,**  
**Борис ПОПОВ,**  
**старший научный сотрудник**  
**Лаборатории ядерных проблем**  
**ОИЯИ,**  
**участники коллаборации T2K.**



**Рис.2: Энергетический спектр зарегистрированных событий для нейтрино (слева) и антинейтрино (справа). Также показаны предсказания для различных значений параметра  $\delta_{cp}$ .**

метра приводят к тому, что вероятность осцилляций для нейтрино и антинейтрино отличается, нарушая таким образом CP-симметрию. При этом, конечно, необходимо учитывать, что в эксперименте T2K легче наблюдать нейтрино, чем антинейтрино, так как сечение взаимодействия для последних в два раза меньше. Чтобы корректно учесть этот и другие экспериментальные эффекты при анализе данных, коллаборация T2K использует события, наблюдаемые в ближнем детекторе ND280, расположенном на расстоянии 280 м от мишени, на которую сбрасываются протоны. Это позволяет детально изучить нейтринные и антинейтринные взаимодействия с веществом, что крайне важно для контроля систематических неопределенностей. В анализе также используется результат точного измерения угла смешивания  $\Theta_{13}$ , полученный в экспериментах с реакторными антинейтрино.

В эксперименте T2K в дальнем детекторе зарегистрировано 90 событий, которые были классифицированы как взаимодействия электронных нейтрино, и 15 взаимодействий электронных антинейтрино. Для значения  $\delta_{cp} = -90^\circ$ , которое соответствует максимальному увеличению вероятности осцилляций нейтрино, мы ожидаем 82 взаимодействия электронных нейтрино и 17 взаимодействий электронных антинейтрино. Значение  $\delta_{cp} = +90^\circ$ , которое соответствует максимальному увеличению вероятности осцилляций ан-

масс нейтрино ( $m_1 < m_2 < m_3$ ). Видно, что данные лучше соответствуют значению  $\delta_{cp} = -90^\circ$ . С использованием этих экспериментальных данных коллаборация T2K определила область исключенных параметров  $\delta_{cp}$  на уровне достоверности 99,7% ( $3\sigma$ ), которая лежит в интервале от  $-2^\circ$  до  $165^\circ$ . Значения  $\delta_{cp} 0^\circ$  и  $180^\circ$ , которые не нарушают CP-симметрию, исключены на уровне достоверности 95%, что указывает на наличие нарушения CP-симметрии в лептонном секторе.

Для увеличения чувствительности эксперимента коллаборация T2K в настоящее время проводит модернизацию ближнего детектора ND280, чтобы уменьшить систематические погрешности и улучшить качество набираемых данных. Одновременно ведется работа по увеличению интенсивности пучка протонов от ускорителя J-PARC и, соответственно, увеличению мощности нейтринных и антинейтринных пучков.

Более того, недавно одобренный в Японии детектор нового поколения Hyper-Kamiokande, масса которого в 8 раз больше массы Super-Kamiokande, будет введен в эксплуатацию в 2027 году. Эта гигантская обсерватория позволит существенно улучшить чувствительность исследований по поиску распада протона, по регистрации нейтрино от астрофизических источников, а также будет использоваться в качестве нового дальнего детектора для ускорительных нейтрино. Од-