

# Новости

Физика атомного ядра и элементарных частиц

## О результатах эксперимента T2K по поиску CP-нарушения в нейтринных осцилляциях

В ускорительном нейтринном эксперименте T2K (Япония)\*, в котором принимают участие российские ученые из Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), было получено указание на нарушение зарядово-пространственной CP-симметрии в лептонном секторе Стандартной модели, которая описывает электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие элементарных частиц. Из этого следует, что наблюдается сильное CP-нарушение, довольно близкое к максимальному. Соответствующая статья вышла в журнале «Nature»\*\*.

Обнаружено еще одно удивительное свойство нейтрино — мистической, непредсказуемой, почти неуловимой частицы микромира. Параметр, характеризующий нарушение симметрии между веществом и антивеществом в нейтринных осцилляциях, CP-нечетная фаза  $\delta_{CP}$ , может принимать любое значение от  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ . Если фаза  $\delta_{CP}$ , равна  $0^\circ$  или  $180^\circ$ , то превращения (осцилляции) мюонных нейтрино в электронные нейтрино и мюонных антинейтрино в электронные нейтрино происходят одинаковым образом. Или, другими сло-

вами, вероятности этих процессов совпадают. В эксперименте было обнаружено, что эти процессы существенно отличаются. Пролетев почти со скоростью света расстояние 295 км от ускорителя J-PARC, где мюонные нейтрино и антинейтрино рождаются, до детектора Супер-Камиоканде, они преобразуются в электронные нейтрино и антинейтрино различно. Процесс смешивания (осцилляции) у нейтрино происходит гораздо сильнее, чем у антинейтрино, т.е. упомянутая выше симметрия между веществом и антивеществом нарушена. Удивительно то, что нарушение близко к максимальному с величиной  $\delta_{CP}$  около  $-90^\circ$ . Как следует из результата эксперимента T2K, значения  $\delta_{CP}$   $0^\circ$  и  $180^\circ$  (CP-сохранение) исключены на уровне 95%. Следует подчеркнуть, что пока это только серьезное указание на CP-нарушение в нейтринных осцилляциях. Для повышения чувствительности эксперимента T2K проводится модернизация детекторов, повышается интенсивность нейтринного пучка и будет продолжен набор статистики.

Этот результат выходит далеко за рамки чисто нейтринной физики, поскольку открывает принципиально новую возможность для объяснения таинственной загадки природы — преобладания вещества над антивеществом во Вселенной, которая состоит главным образом из материи с небольшой долей антиматерии. Дело в том, что в момент Большого взрыва должно было родиться равное число частиц и античастиц, которые проаннигилировали бы при взаимодействии и превратились бы в чистую энергию (свет). Но тогда во Вселенной не было бы материи — только световая

\* См.: Куденко Ю.Г. Нейтрино — ключ к загадкам Вселенной? Природа. 2017; 6: 3–11.

\*\* Abe K. et al. Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. Nature. 2020; 580: 339–344. DOI:10.1038/s41586-020-2177-0.

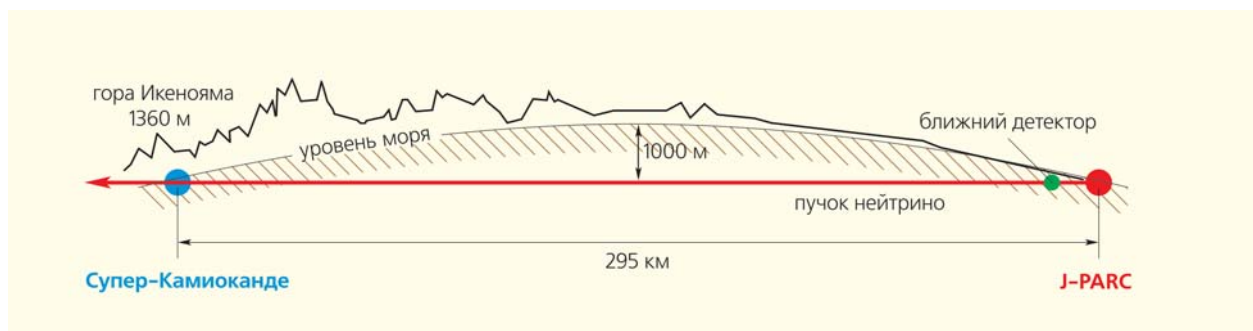
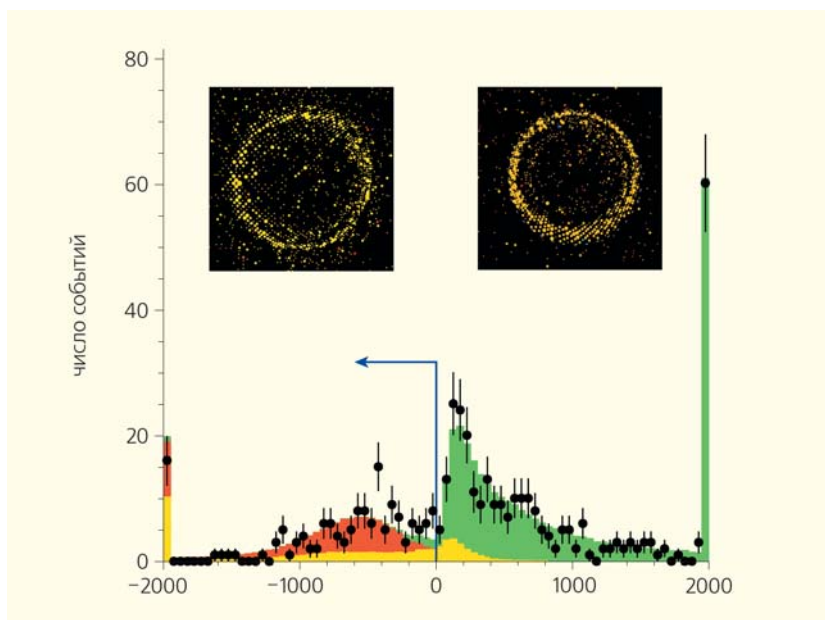


Схема эксперимента T2K.



Идентификация частиц в детекторе Супер-Камиоканде. Алгоритм распознавания электронных и мюонных нейтрино для классификации событий использует свойства распределения света, такие как размытость черенковских колец. На верхней части рисунка показаны примеры электроноподобного (слева) и мюноподобного (справа) черенковских колец. На нижнем рисунке гистограммы показывают ожидаемое число одиночных событий после нейтринных колебаний. События слева от синей стрелки классифицируются как электронные, а те, что справа, как мюноподобные. Вертикальные погрешности данных представляют стандартные отклонения из-за статистической неопределенности. По горизонтали — условные единицы, характеризующие электронные нейтрино и антинейтрино (оранжевый цвет) отрицательными величинами, а мюонные (зеленый) — положительными. События, показанные желтым цветом, отвечают нейтральным токам; они находятся в пределах ошибок.

энергия. Однако этого не произошло, и образовалась материальная Вселенная. Почему? Дело в том, что в первые несколько секунд после Большого взрыва «выжила» одна частица из 10 миллиардов. И этого оказалось достаточно для формирования галактик, звезд, планет... Для того чтобы процесс эволюции Вселенной привел к наблюдаемому доминированию материи над антиматерией, необходимо нарушение CP-симметрии. Однако обнаруженное в кварковом секторе Стандартной Модели CP-нарушение недостаточно для этого, так как дает слишком малую величину барионной асимметрии Вселенной, на много порядков меньше экспериментально наблюдаемой величины. Возможно, что ключ к решению этой проблемы — нейтрино, если эта частица содержит в себе новый источник CP-нарушения. И как мы видим, эксперимент T2K сделал очень важный шаг в этом направлении.

Действительно ли загадка существованию материи во Вселенной может быть решена с помощью

исследования свойств существующих активных нейтрино? Ответ на этот вопрос должна дать теория. Вполне вероятно, что решение проблемы связано с малостью массы нейтрино. Как известно, Стандартная модель постулирует нулевую массу нейтрино. Открытие нейтринных осцилляций явилось однозначным доказательством существования ненулевой массы нейтрино. Одна из наиболее популярных моделей, объясняющих малую массу нейтрино, — модель «качелей», которая связывает легкие активные нейтрино с тяжелыми нейтрино с массами до  $10^{14}$  ГэВ. Такие частицы могли появиться только в ранней горячей Вселенной, где они быстро распались на легкие частицы. Если механизм «качелей» верен, то вполне вероятно, что нарушение CP-симметрии среди легких нейтрино, на которое указывает T2K, есть отражение CP-нарушения у тяжелых нейтрино в ранней Вселенной. Если тяжелые нейтрино распались «асимметрично» на лептоны и антилептоны в первые секунды после Большого Взрыва, то эта лептонная асимметрия

могла частично перейти в барионную асимметрию, что в конечном итоге привело к избытку материи и сформировало нашу Вселенную.

Следует подчеркнуть, что пока в эксперименте T2K получено только указание на CP-нарушение в нейтринных осцилляциях. Требуется независимое подтверждение этого результата, а затем длительная работа на пути к окончательному открытию этого явления. Здесь ведущая роль отводится двум нейтринным экспериментам с длинной базой следующего поколения, которые сейчас находятся в стадии создания установок: T2HK с дальним детектором Гипер-Камиоканде в Японии и DUNE в США. Планируется, что оба эксперимента начнут измерения в 2027 году. Это будет началом нового интересного этапа в нейтринной физике, богатой на неожиданные открытия.

© доктор физико-математических наук **Ю.Г.Куденко**

Институт ядерных исследований РАН  
(Москва, Россия)

e-mail: kudenko@inr.ru