

PACS numbers: 95.55.Vj, 96.50.sb, 96.50.sh  
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201109i.0990

## Наблюдение эффекта Грейзена – Зацепина – Кузьмина обсерваторией Telescope Array

И.И. Ткачёв

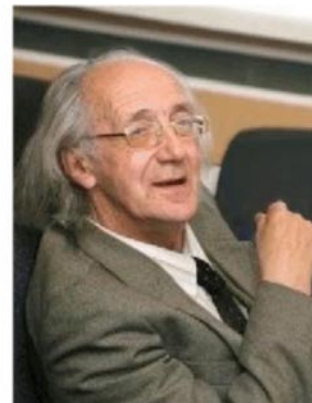
### 1. Введение

Загадка происхождения космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) стоит в ряду самых интересных и важных нерешённых проблем астрофизики частиц. Центром притяжения в этой области исследований является эффект Грейзена – Зацепина – Кузьмина (ГЗК). Недавно в штате Юта (США) начала работу обсерватория Telescope Array (ТА) — самая большая установка в Северном полушарии Земли, изучающая происхождение КЛСВЭ. В этом докладе мы представим основы ГЗК-эффекта, его историю и нынешний наблюдательный статус, а также предварительные результаты установки ТА, включая энергетический спектр, состав и результаты исследования направлений прихода первичных частиц КЛСВЭ.

Вскоре после открытия реликтового микроволнового излучения Вселенной Грейзен, Зацепин и Кузьмин [1, 2] заметили, что протоны самых высоких энергий, распространяясь на космологические расстояния от источника к наблюдателю, должны катастрофически терять энергию в пороговых реакциях фоторождения пионов во взаимодействиях с универсальным фоновым излучением. Этот процесс существенно ограничивает величину возможного расстояния до источников зарегистрированных КЛСВЭ, которое с учётом ГЗК-эффекта не может превышать 100 Мпк, и он должен приводить к подавлению высокоэнергетической части спектра.

Открытие Грейзена, Зацепина и Кузьмина основано на физических закономерностях, хорошо проверенных и изученных в лабораторных условиях, в частности на данных по измерению сечений взаимодействий частиц в области энергий порядка 1 ГэВ (в системе центра масс), и на справедливости общей теории относительности и преобразований Лоренца. Таким образом, вопрос о том, имеется ли ГЗК-подавление в наблюдаемом спектре космических лучей, относится к разряду фундаментальных, поскольку его отсутствие явилось бы недвусмысленным сигналом "новой физики".

С другой стороны, наблюдательное подтверждение ГЗК-подавления высокоэнергетической части спектра означало бы, что оптическая толща космической среды для первичных частиц высоких энергий становится сравнимой с масштабом, на котором Вселенная является заметно неоднородной. Это так, поскольку распределение материи неоднородно на масштабах нескольких сотен мегапарсек (и меньших). Значит, в такой ситуации следует ожидать анизотропии потока КЛСВЭ. Подчёркнём, что ожидается не только вариация потока на



Г.Т. Зацепин (слева) и В.А. Кузьмин стали сотрудниками ИЯИ РАН с первых дней его основания.

больших угловых масштабах. Возможно также, что мы стоим на пороге открытия точечных источников КЛСВЭ. Зарождающаяся на наших глазах астрономия заряженных частиц может иметь яркое будущее, если заметная доля первичных частиц состоит из протонов. Это говорит о важности исследования массового состава первичных частиц КЛСВЭ.

Неудивительно, что в последние десятилетия значительные усилия были направлены на тщательные измерения спектра космических лучей сверхвысоких энергий, а ГЗК-эффект является источником растущего интереса к исследованиям в физике космических лучей.

### 2. Эффекты распространения космических лучей сверхвысоких энергий

В этом разделе мы рассмотрим влияние различных космологических факторов на распространение космических лучей сверхвысоких энергий, а также проявления этого влияния в наблюдательных данных.

#### 2.1. Подавление Грейзена – Зацепина – Кузьмина

**2.1.1. Оптическая толща.** Космические лучи сверхвысоких энергий не распространяются свободно в космическом пространстве и на космологических масштабах. Их энергия достаточна для рождения массивных вторичных частиц в столкновениях с реликтовыми фотонами, а также, в зависимости от природы первичной частицы, с радиофотонами и инфракрасными фотонами.

Наиболее важной является реакция фоторождения пионов при распространении протонов (или нейтронов) в микроволновом излучении, оставшемся от эпохи горячей Вселенной. Для пороговой энергии этой реакции в лабораторной системе отсчёта находим

$$E_{\text{th}}(p + \gamma \rightarrow N + \pi) = \frac{(m_p + m_\pi)^2 - m_p^2}{2E_\gamma(1 - \cos \theta)}. \quad (1)$$

Важно отметить, что при выводе этого соотношения используются стандартные лоренц-преобразования и стандартные дисперсионные соотношения между энергией и импульсом частиц,  $E^2 = k^2 + m^2$ . Если эти предположения неверны в области сверхвысоких энергий, то пороговые условия в лабораторной системе могут выглядеть по-другому. Для чернотельного распределения реликтовых фотонов по спектру с температурой

И.И. Ткачёв. Институт ядерных исследований РАН,  
Москва, РФ  
E-mail: tkachev@m12.inr.ac.ru

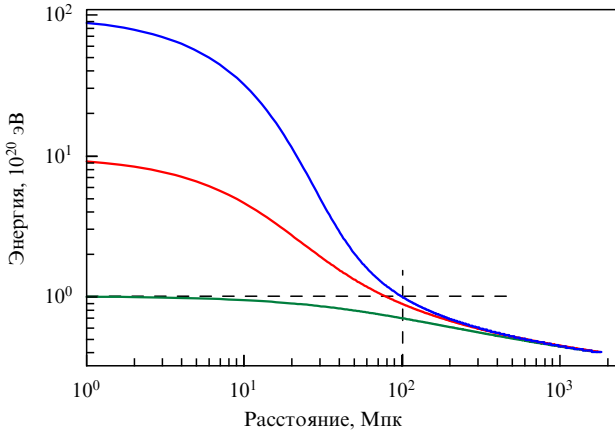


Рис. 1. Энергия первичного протона как функция расстояния, пройденного от источника.

$T = 2,7$  К реакция (1) становится эффективной при

$$E_{GZK} \gtrsim 5 \times 10^{19} \text{ эВ}. \quad (2)$$

Реакция фоторождения пионов имеет большое сечение и достигает максимума на  $\Delta$ -резонансе. На полуширине резонанса

$$\sigma \sim 300 \text{ мкб} \approx 3 \times 10^{-28} \text{ см}^2. \quad (3)$$

Плотность числа реликтовых фотонов  $n \sim T^3 \sim 400 \text{ см}^{-3}$ . Это соответствует длине свободного пробега

$$L_\sigma = (\sigma n)^{-1} \approx 8 \times 10^{24} \text{ см} \approx 2,7 \text{ Мпк}. \quad (4)$$

В каждом столкновении первичный протон теряет около 20 % энергии (что соответствует отношению масс пиона и протона). В серии последовательных столкновений энергия протона уменьшается экспоненциально, в  $e$  раз, при прохождении расстояния  $L_A$ , называемого длиной затухания. При энергиях, превышающих резонансную,  $E \approx 5 \times 10^{20}$  эВ, длина затухания  $L_A \approx 10$  Мпк. Таким образом, энергия уменьшается до значений, близких к порогу  $10^{20}$  эВ, после прохождения расстояний порядка 100 Мпк практически независимо от начальной энергии (рис. 1).

Таким образом, протоны, зарегистрированные с  $E \gtrsim 10^{20}$  эВ, должны быть ускорены в источниках, находящихся на расстоянии  $R \lesssim R_{GZK}$ ,  $R_{GZK} \equiv 100$  Мпк. Соответствующий пространственный объём называется ГЗК-сферой (или ГЗК-расстоянием).

**2.1.2. Обрезание спектра.** Предположим, что спектр инжекции для первичных протонов имеет степенной вид,  $J_{in}(E) \propto E^{-\alpha}$ , и  $n(r)$  — плотность источников. Поток частиц от индивидуального источника уменьшается как  $r^{-2}$ , что компенсируется объёмом интегрирования,  $r^2 dr$ . Поэтому поток космических лучей, зарегистрированных с энергией  $E$ , должен возрастать пропорционально радиусу сферы интегрирования,

$$J(E) \propto \int_0^{R(E)} n(r) dr \propto R(E), \quad (5)$$

если плотность источников остаётся неизменной. Здесь  $R(E)$  соответствует длине затухания, т.е. максималь-

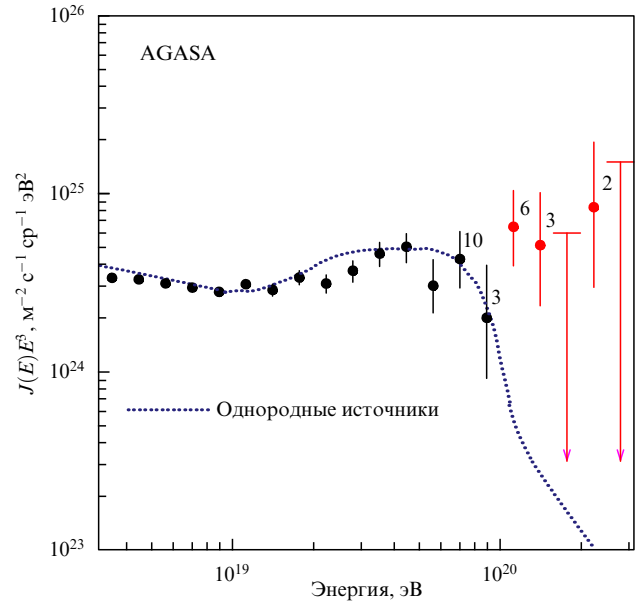


Рис. 2. Энергетический спектр космических лучей; пунктирная кривая — ГЗК-ожидание, кружками показаны данные AGASA (Akeno Giant Air Shower Array), числа рядом с кружками указывают количество зарегистрированных событий. (Обсуждение современных данных см. в разделе 3.)

ному расстоянию до источников первичных частиц, зарегистрированных с энергией  $E$ . Длина затухания для протонов с  $E < 5 \times 10^{19}$  эВ равняется  $10^3$  Мпк, тогда как при  $E > 5 \times 10^{20}$  эВ длина затухания 10 Мпк.

Таким образом, поток КЛСВЭ должен изменяться на два порядка величины при ГЗК-энергии, если распределение источников является однородным (рис. 2).

## 2.2. Магнитные поля

Оценим типичный угол,  $\sim L/R_g$ , на который траектории заряженных частиц отклоняются после прохождения расстояния  $L$  в галактическом или межгалактическом магнитных полях. Здесь  $R_g$  — ларморовский радиус; угол отклонения предполагается малым.

1. В галактическом магнитном поле для частиц, пересекающих галактический диск поперёк,

$$\frac{\Delta\theta}{Z} \approx 2,5^\circ \frac{10^{20} \text{ эВ}}{E} \frac{B}{3 \text{ мкГс}} \frac{L}{1,5 \text{ кпк}}, \quad (6)$$

где  $Z$  — электрический заряд первичной частицы, 3 мкГс — величина регулярной компоненты магнитного поля, 1,5 кпк — толщина галактического диска. (Обсуждение более слабых отклонений в турбулентной компоненте галактического поля см., например, в работе [3].) Протоны с  $E > 10^{18}$  эВ пересекают галактический диск за один проход. Траектории протонов с меньшими энергиями "запутываются" и покидают Галактику в процессе диффузии через её границу.

Космические лучи с  $E > 10^{18}$  эВ должны иметь межгалактическое происхождение, если первичные частицы являются протонами. Даже если состав КЛСВЭ соответствует ядрам железа, то при  $E > 2 \times 10^{19}$  эВ космические лучи должны попадать в Галактику извне, в противном случае имела бы анизотропия потока на галактический диск, которая не наблюдается.

2. Угол отклонения траекторий КЛСВЭ в однородном случайном межгалактическом поле с длиной когерентности  $\lambda$  определяется соотношением

$$\frac{\Delta\theta}{Z} < 0,4^\circ \frac{10^{20} \text{ эВ}}{E} \frac{B}{10^{-10} \text{ Гс}} \frac{(L\lambda)^{1/2}}{10 \text{ Мпк}}. \quad (7)$$

Межгалактические магнитные поля пока не измерены (исключение составляют центральные области галактических скоплений). Наблюдательные ограничения на их величину и корреляционную длину собраны в работе [4]. Численное моделирование процессов генерации полей в скоплениях галактик даёт верхний теоретический предел их величины порядка  $B \lesssim 10^{-12}$  Гс [5]. Недавно нижний предел  $B \gtrsim 3 \times 10^{-16}$  Гс был получен в работе [6]: этот предел вытекает из факта ненаблюдения вторичного гамма-излучения от электромагнитных каскадов, инициированных первичными фотонами ТэВ-ных энергий.

Поскольку источники космических лучей самых высоких энергий должны находиться внутри ГЗК-сферы, траектории протонов с  $E > 10^{20}$  эВ не отклоняются значительным образом галактическими или межгалактическими магнитными полями — соответствующие отклонения сравнимы с угловым разрешением современных установок.

Таким образом, *направления прихода первичных протонов с энергией, превышающей ГЗК-значение, должны указывать на их источники. Астрономия заряженных частиц принципиально возможна.*

### 3. Наблюдательный статус

При энергиях, меньших  $10^{14}$  эВ, поток космических лучей достаточно велик, так что возможны прямые наблюдения с использованием высотных воздушных шаров или спутников. При энергии  $10^{15}$  эВ поток составляет одну частицу на  $1 \text{ м}^2$  в год, что исключает прямые наблюдения на орбите. При энергии  $10^{20}$  эВ (это та область энергий, в которой должно проявляться ГЗК-подавление) поток уменьшается до одной частицы на  $1 \text{ км}^2$  за столетие, что, в частности, является причиной медленного прогресса в физике КЛСВЭ. Однако трудности прямого наблюдения КЛСВЭ состояли бы не только в исчезающе малом потоке, но и в чрезвычайно большой величине измеряемой энергии (вспомним, что детекторы современных коллайдеров весят несколько сотен тысяч тонн)

К счастью для физиков, работающих в этой области, большая часть детектора уже создана природой: земная атмосфера является подходящим калориметром. Толщина атмосферы как раз такова, что широкие атмосферные ливни (ШАЛ), состоящие из вторичных частиц, инициированных входящей первичной частицей, достигают максимума около поверхности Земли. При энергии  $10^{19}$  эВ поперечник ливня на поверхности достигает нескольких километров.

Таким образом, ливни можно регистрировать, размещая на земной поверхности решётку, состоящую из детекторов частиц, с типичным расстоянием между детекторами в несколько сотен метров. Такая установка будет собирать данные непрерывно. Возможны и другие методы регистрации ШАЛ, например основанные на измерении флуоресцентного свечения атмосферы, вызванного прохождением ШАЛ. Такие детекторы могут собирать данные только в ясные безлунные ночи. Однако к их

преимуществам относится возможность непосредственного наблюдения таких важных параметров, как продольный профиль ливня и высота атмосферы, на которой он достигает максимума, а также возможность использования калориметрического метода оценки энергии первичной частицы.

В ранних экспериментах, работавших в области ГЗК-энергий, таких как Volcano Ranch [7], SUGAR (Sydney University Giant Air Shower Recorder) [8], Haverah Park [9], "Якутск" [10, 11] и AGASA [12, 13], использовался первый метод регистрации ШАЛ, основанный на решётках. Позднее появились "телескопы" Fly's Eye [14] и HiRes [15], измерявшие флуоресцентное послесвечение атмосферы. Результаты ранних экспериментов были впечатляющими, но противоречивыми и требовали перепроверки и подтверждения. Стало ясно, что необходимы гибридные установки, использующие одновременно и решётку наземных детекторов, и флуоресцентные телескопы для регистрации одних и тех же ШАЛ. Такой гибридный подход, который позволяет уменьшить систематические ошибки и точнее определять физические характеристики первичной частицы, ввиду большего числа параметров ШАЛ, измеряемых одновременно, стал основополагающим при создании новейшего поколения обсерваторий, регистрирующих космические лучи: обсерватории им. Пьера Оже в Южном полушарии Земли [16] и Telescope Array в Северном [17].

#### 3.1. Ранние результаты и растущий интерес теоретиков к проблеме ГЗК

Для того чтобы подчеркнуть важность открытия Грейзена – Зацепина – Кузьмина, представляется уместным провести здесь исторический экскурс с обзором ранних экспериментальных результатов и кратким описанием той бури интереса, которую эти результаты вызвали в мире теоретиков, работающих в области физики высоких энергий и физики частиц.

На протяжении четырёх десятилетий после опубликования работы Грейзена, Зацепина и Кузьмина количество событий, зарегистрированных с энергиями, превышающими ГЗК-предел, возрастало, однако никаких признаков подавления в спектре и указаний на возможные источники обнаружено не было. В частности, спектр, измеренный AGASA, которая являлась самой большой установкой, регистрирующей ШАЛ, и собрала наибольшую статистику к моменту появления обсерваторий последнего поколения, показан на рис. 1.

Эти экспериментальные результаты составили головоломку, поскольку вопреки ожиданиям, основанным на Стандартной модели, было обнаружено, что:

— в спектре КЛСВЭ отсутствует ГЗК-подавление. Следует отметить, что предположение о том, что первичные частицы состоят из тяжёлых ядер или фотонов, этой проблемы не решает;

— направления прихода частиц с энергиями  $E \gtrsim 10^{20}$  эВ не приводят к идентификации астрофизических источников внутри ГЗК-сферы.

Это вызвало интерес и привлекло внимание к проблеме, и теоретики предложили большое число возможных решений этой головоломки. Рассмотрим некоторые из них.

• *Невидимые источники.* Как решение второй части головоломки, связанной с направлениями прихода первичных частиц, была выдвинута гипотеза, что источни-

ками КЛСВЭ являются не уникальные и яркие, притягивающие обычно внимание, астрофизические объекты, а *нечто*, которое находилось (или находится) внутри ГЗК-сферы, но сегодня оно невидимо и не проявляет себя как источник, за исключением наличия светимости в КЛСВЭ. В качестве объектов такого рода были предложены "мертвые" квазары [18]. Модель предполагает, что квазары, яркие и мощные в прошлом, сохраняют способность ускорять протоны вблизи горизонта сверхмассивной чёрной дыры даже после того, как процесс аккреции материи заканчивается и квазар гаснет в электромагнитном диапазоне. Однако эта модель внутренне противоречива. Процесс ускорения протонов до сверхвысоких энергий в таком компактном объекте неизбежно сопровождается интенсивным гамма-излучением в ТэВ-диапазоне энергий, и недавние результаты, полученные черенковскими гамма-телескопами, исключают эту модель [19].

- *"Локальные" модели.* ГЗК-подавление в спектре КЛСВЭ будет отсутствовать, если их источники находятся в галактическом гало. Такой сценарий воплощается в рамках гипотезы распадающейся сверхтяжёлой тёмной материи [20, 21]. Проблема генерации сверхтяжёлых, но долгоживущих (и, следовательно, невзаимодействующих) частиц разрешается весьма просто. Частицы тёмной материи в необходимом диапазоне масс,  $M_\chi \sim 10^{13}$  ГэВ, рождаются с правильной космологической концентрацией в результате самого процесса расширения Вселенной [22–24]. Модель распадающейся сверхтяжёлой тёмной материи имеет недвусмысленную сигнатуру: анизотропию потока КЛСВЭ на галактический центр [25, 26]. Эта характеристика не наблюдается в реальных данных.

- *Модели с частицами-"посредниками".* Возможно, за рамками Стандартной модели существуют частицы-посредники, которые иммунны по отношению ко взаимодействиям с реликтовым излучением и поэтому могут прилетать к нам из удалённых источников с энергиями, находящимися за ГЗК-пределом. Такие гипотетические адроны (связанные состояния лёгких глюино и обычных кварков) были предложены в работе [27]. Являясь адронами, эти частицы могли бы воспроизвести развитие ШАЛ [28]. В модели, однако, возникают противоречия, связанные с результатами ускорительных экспериментов и ненаблюдением экзотических изотопов [28]. На роль частицы-посредника был предложен также гипотетический аксион [29–31]. В этом сценарии предполагается, что фотоны высоких энергий осциллируют в аксионы в магнитном поле источника и, преодолев космологические расстояния без потери энергии, осциллируют обратно в фотоны в магнитном поле Галактики.

- *Нарушение лоренц-инвариантности.* Значение пороговой энергии (1) было получено в предположении стандартной лоренц-кинематики. Её нарушение при высоких энергиях могло бы привести к большему порогу для фотомезонных реакций, и, следовательно, спектр КЛСВЭ мог бы продолжаться без ГЗК-подавления [32, 33]

### 3.2. Новые эксперименты Telescope Array

Проект Telescope Array является коллаборацией различных институтов и университетов Японии, США, Кореи, России и Бельгии. От России в проекте участвует Институт ядерных исследований РАН.



Рис. 3. Один из наземных детекторов в пустыне штата Юта (США).

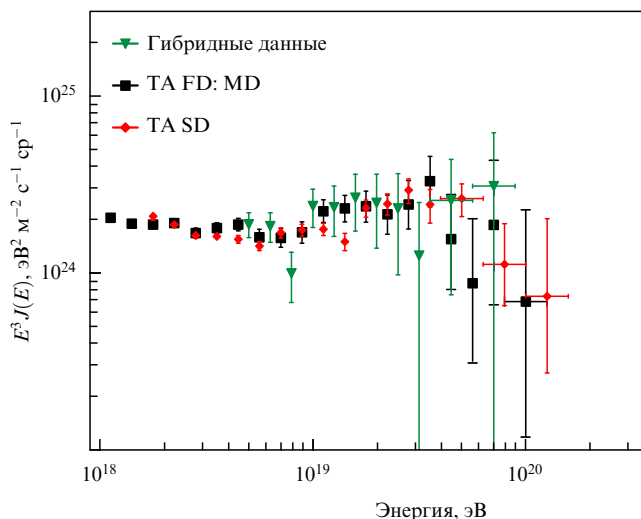


Рис. 4. Станция Middle Drum, состоящая из 14 телескопов, регистрирующих флуоресцентное послесвечение атмосферы. Ночной снимок с большой экспозицией, предоставленный Б. Стоксом.

Экспериментальный комплекс коллаборации Telescope Array (ТА) расположен в пустыне штата Юта. В настоящее время он состоит из трёх станций наблюдения, использующих флуоресцентные детекторы (FD) и решётки из 507 наземных детекторов (SD) (рис. 3), которые вместе образуют самую большую гибридную установку, регистрирующую КЛСВЭ в Северном полушарии Земли. SD образуют решётку с расстоянием 1,2 км между детекторами, которая покрывает площадь 700 км<sup>2</sup>. Три станции FD, окружающие SD-решётку, носят названия Middle Drum (MD), Black Rock Mesa (BR), и Long Ridge (LR). Станция MD (рис. 4) состоит из 14 телескопов, которые ранее использовались в эксперименте HiRes. Всё оборудование станций BR и LR создавалось специально для ТА. Наблюдения FD-станциями начались в ноябре 2007 г., наземной решёткой — в марте 2008 г.

#### 3.2.1. Энергетический спектр.

К настоящему моменту на установке ТА получены энергетические спектры КЛСВЭ для каждого из трёх наборов данных: данных SD (SD-спектр), данных станции Middle Drum (с использованием



**Рис. 5.** Спектр КЛСВЭ по данным обсерватории Telescope Array (предварительные результаты). Подавление спектра при высоких энергиях является статистически значимым и начинается в области ГЗК-энергий.

которых построен монокулярный FD-спектр) и гибридных данных.

Спектр SD построен по данным, собранным с мая 2008 г. по февраль 2010 г. Экспозиция составляет  $1500 \text{ км}^2 \text{ ср}$  в год, что примерно равняется полной экспозиции AGASA за всё время наблюдений. При реконструкции SD-событий фитируются геометрия фронта ШАЛ и поперечное (к оси ШАЛ) распределение плотности энергии. Значение плотности числа частиц  $S_{800}$  на расстоянии 800 м от оси ШАЛ используется для оценки энергии первичной частицы. Связь между  $S_{800}$  и энергией, а также эффективная апертура извлекаются с помощью метода Монте-Карло. Результирующий (предварительный) энергетический спектр приведён на рис. 5.

Полученный SD-спектр фитировался степенными функциями на отрезках. Найдены две точки излома при значениях  $\log(E[\text{эВ}])$ , равных 18,71 и 19,75, что соответствует "лодыжке"<sup>1</sup> и началу ГЗК-подавления. При энергиях, превышающих энергию точки излома  $E = 10^{19,75}$  эВ, зарегистрировано пять событий, тогда как при непрерывном степенном продолжении спектра ожидалось бы 18,4 события. Таким образом, с достоверностью  $3,5\sigma$  обнаружено подавление потока КЛСВЭ при энергиях, превышающих ГЗК-предел. Подробности SD-анализа приведены в работе [35].

Следует отметить, что ГЗК-подавление впервые наблюдалось FD-методом на установке HiRes [36] и было подтверждено обсерваторией П. Оже [37]. Отсутствие ГЗК-подавления означало бы новую физику, а новая физика может проявлять себя по-разному в различных детекторах [38]. В связи с этим важно отметить, что SD-детекторы Telescope Array идентичны использовавшимся в установке AGASA.

<sup>1</sup> Спектральная особенность (в англоязычной литературе — ankle), положение и форма которой соответствуют теоретическому предсказанию [34] изменения формы степенного спектра при учёте потерь на рождение  $e^+e^-$ -пар при взаимодействии первичных протонов с реликтовым излучением.

В спектр, полученный станцией MD, вошли данные, собранные почти за трёхлетний период, с декабря 2007 г. по сентябрь 2010 г. Предварительный результат показан на рис. 5. MD-энергетический спектр TA находится в хорошем согласии с результатами HiRes [36], в нём также наблюдается ГЗК-подавление. Детали этого анализа данных содержатся в [39].

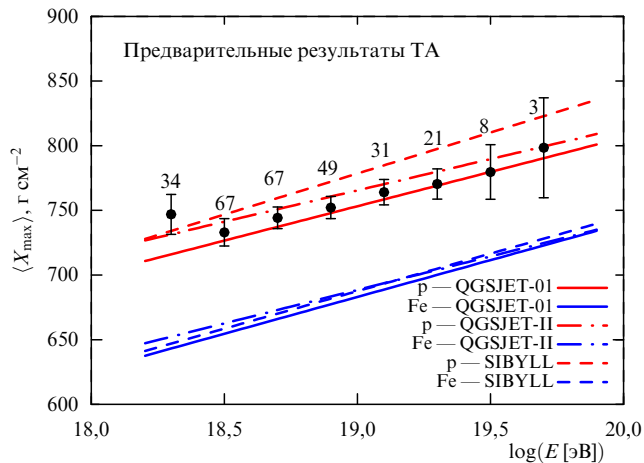
Гибридные события, т.е. события, зарегистрированные одновременно решёткой SD и какой-либо из FD-станций, хотя и имеют меньшую статистику, но для измерений спектра являются предпочтительными, поскольку энергия первичной частицы может быть определена калориметрически с помощью данных FD, а экспозиция точно определяется решёткой SD. Кроме того, гибридные события реконструируются более достоверно, поскольку имеется больше информации о каждом событии. Предварительный энергетический спектр, полученный в гибридном анализе по данным обсерватории TA, собранным за полуторагодовой период наблюдений, приведён на рис. 5; соответствующие детали могут быть найдены в работе [40].

**3.2.2. Массовый состав.** Продольное развитие ШАЛ зависит как от энергии первичной частицы, так и от её природы. Глубина атмосферы, на которой число частиц в ливне достигает максимума,  $X_{\text{max}}$ , является хорошим индикатором типа первичной частицы. Продольное развитие ШАЛ непосредственно наблюдается флуоресцентными детекторами. Вследствие этого FD-техника наиболее приспособлена для определения массового (или, как говорят, химического) состава КЛСВЭ.

Используя этот подход для анализа ШАЛ, коллаборация HiRes представила результаты, совместимые с протон-доминированным составом КЛСВЭ в диапазоне энергий от 1,6 до 64 ЭэВ ( $10^{18}$  эВ) [41]. С другой стороны, как среднее значение  $X_{\text{max}}$ , так и средне-квадратичное значение его флуктуаций, измеренные обсерваторией П. Оже, указывают на растущее значение масс первичных частиц при энергиях, превосходящих 3 ЭэВ, достигая значений, характерных для железа [42].

Мы исследуем массовый состав КЛСВЭ, измеряя  $X_{\text{max}}$  в наборе FD-стереоданных. В представляемом здесь анализе использованы данные за период с ноября 2007 г. по сентябрь 2010 г. Для событий, зарегистрированных одновременно двумя FD-станциями, реконструировалась геометрия и продольное развитие ливня. Полученная зависимость среднего значения  $X_{\text{max}}$  от энергии в диапазоне  $10^{18,2} - 10^{20}$  эВ представлена на рис. 6. Здесь же показано монте-карловское ожидание для различных моделей ядерных взаимодействий. Данные TA находятся в хорошем согласии с предсказанием QGSJET-01 для чисто протонного состава и являются несовместимыми с железистым составом для всех рассмотренных моделей взаимодействий. Детали анализа массового состава КЛСВЭ содержатся в работе [43].

**3.2.3. Ограничение на фотоны.** Подавление спектра на самых высоких энергиях не обязательно обусловлено ГЗК-эффектом. Это также может означать достижение ускорительного предела источниками, вкупе со случайным совпадением соответствующих предельных энергий. Одним из способов, помогающих различить эти альтернативы, является регистрация фотонной составляющей в составе первичных частиц. Последняя



**Рис. 6.** Среднее значение  $X_{\max}$  как функция энергии (предварительные результаты ТА). Кружки — FD-стереоданные ТА (числа около кружков указывают количество зарегистрированных событий). Три верхние линии отвечают предсказаниям различных моделей взаимодействия для случая чисто протонного состава: QGSJET-01 (сплошная линия); QGSJET-II (штрихпунктирная линия) и SIBYLL (штриховая линия). Три нижние линии отвечают случаю КЛСВЭ, состоящих из ядер железа.

появляется здесь как продукт фотоядерных реакций. Ожидаемая доля фотонов мала, и пока фотоны в КЛСВЭ не обнаружены. Экспериментальный предел потока фотонов при  $E > 10$  ЭэВ, полученный ТА, составляет [44]

$$F_{\gamma} < 3,4 \times 10^{-2} \text{ км}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ год}^{-1} \text{ (95 \% CL)}.$$

Это ограничение является самым сильным в Северном полушарии и превосходит ранее полученные ограничения [45]. Использованный метод поиска фотонной компоненты разработан в [46].

**3.2.4. Направления прихода.** Без преувеличения можно сказать, что исследования КЛСВЭ открывают окно в высокоэнергетическую Вселенную. Измерение анизотропии направлений прихода первичных частиц является одной из важнейших научных задач, стоящих перед коллаборацией Telescope Array. Обнаружение такой анизотропии является ключом к идентификации источников КЛСВЭ. Её обнаружение будет также важным шагом в установлении химического состава КЛСВЭ и измерении таких важных параметров межгалактической среды, как напряжённость и структура её магнитных полей.

Если обнаруженное подавление спектра КЛСВЭ действительно представляет собой ГЗК-эффект, то, как обсуждалось в разделе 2.1.1, источники лучей самых высоких энергий должны находиться внутри сферы радиусом 100 Мпк от нас. На таких пространственных масштабах распределение вещества во Вселенной является сильно неоднородным, поэтому следует ожидать анизотропии потока КЛСВЭ. Ожидаются как вариации потока на больших угловых масштабах, так и появление точечных источников на небесной сфере.

Здесь мы представим результаты [47] корреляционного анализа направлений прихода первичных частиц с крупномасштабной структурой Вселенной (КСВ), корреляции с активными галактическими ядрами (АГЯ), а

также рассмотрим автокорреляции на малых угловых масштабах. В этот анализ вошли данные, собранные за 28 месяцев наземной решёткой, с марта 2008 г. по сентябрь 2010 г. С обрезанием по зенитному углу в  $45^\circ$  набор данных содержит 655 событий с энергиями, большими 10 ЭэВ, 35 событий с энергиями, большими 40 ЭэВ, и 15 событий с энергиями, превышающими 57 ЭэВ.

1. *Автокорреляции.* В данных AGASA направления прихода первичных частиц образовывали кластеры (дублеты и триплеты) с угловым размером  $2,5^\circ$  [48, 49]. Эти результаты можно рассматривать как формулировку статистической гипотезы: направления прихода анизотропны. Здесь мы проведём проверку этой гипотезы, используя данные ТА. Следуя анализу AGASA, в наборе данных мы используем следующие обрезания по энергии:  $E > 10$  ЭэВ и  $E > 40$  ЭэВ. После этого пересчитываются все события, в которых направления прихода образуют пары с угловым расстоянием, меньшим  $2,5^\circ$ . Полученное число сравнивается с ожидаемым для изотропного распределения направлений прихода. В наборе с  $E > 10$  ЭэВ мы нашли 311 таких пар, тогда как для изотропного распределения ожидается 323 пары. В наборе с  $E > 40$  ЭэВ имеется одна пара при ожидаемом значении 0,838. Таким образом, избыток в данных отсутствует. Затем мы ослабили формулировку гипотезы и провели такой тест на всех угловых масштабах, от 0 до  $30^\circ$ , и опять получили отрицательный результат. Таким образом, анизотропии в данных ТА на малых угловых масштабах не наблюдается.

2. *Корреляции с активными галактиками.* Обсерватория им. Пьера Оже сообщила о корреляциях [50] КЛСВЭ с энергией, большей 57 ЭэВ, и близкими (с удалением, меньшим 75 Мпк) АГЯ. Корреляция наблюдалась на угловых масштабах  $3,1^\circ$ . В контрольном наборе данных, состоящем из 13 событий, 9 событий коррелировало, что составляет 69%. Здесь мы проверим соответствующую статистическую гипотезу.

Экспозиция ТА, в отличие от экспозиции обсерватории Оже, сконцентрирована в северной половине небесной сферы, где используемый для анализа каталог [51] содержит большее число АГЯ, и поэтому следует ожидать большей доли коррелирующих событий. В предположении, что светимости АГЯ в КЛСВЭ одинаковы, мы оцениваем эту долю в 73% для ТА. Результат соответствующего корреляционного анализа представлен на рис. 7. Пока определённых выводов сделать нельзя: при нынешней небольшой статистике данные ТА совместимы как с изотропным распределением, так и с АГЯ-гипотезой.

3. *Корреляции со структурой.* В этом случае мы проверяем гипотезу о том, что события ТА происходят в источниках, которые следуют за распределением вещества во Вселенной. Такая корреляция должна неизбежно существовать, если первичными частицами являются протоны, а межгалактические поля не чрезмерно велики. Для этого анализа мы используем разработанный в статье [52] метод, применявшийся ранее для анализа данных HiRes [53]. В этом методе сначала вычисляется ожидаемое распределение потока КЛСВЭ по небу в предположении, что источники следуют за распределением видимого вещества. Ожидаемое распределение источников затем сравнивается с реальными данными.

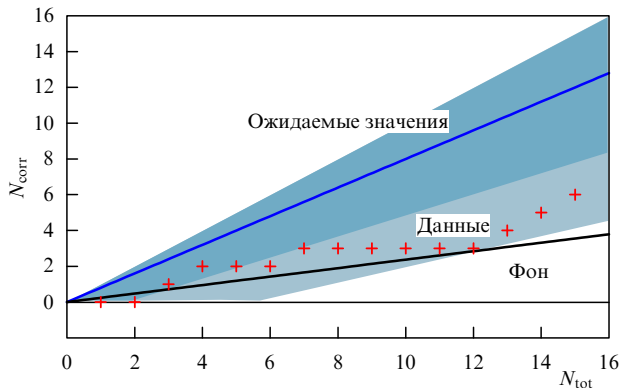


Рис. 7. Результат корреляционного теста с АГЯ. По оси абсцисс в хронологическом порядке отложено число зарегистрированных событий с  $E > 57$  ЭэВ, по оси ординат — число коррелирующих событий. Ожидание в соответствии с гипотезой Оже отобразено линией, окружённой доверительными интервалами  $1\sigma$  и  $2\sigma$ . Нижняя жирная линия — ожидание для изотропного распределения. Кресты — данные ТА.

Корреляции с крупномасштабной структурой Вселенной проверялись при энергиях  $E > 40$  ЭэВ и  $E > 57$  ЭэВ. Найдено, что оба набора данных совместимы с этой гипотезой. Набор с  $E > 40$  ЭэВ согласуется также с изотропией, тогда как набор  $E > 57$  ЭэВ несовместим с изотропным распределением с уровнем достоверности 95%. Для того чтобы различить эти две гипотезы с определённой необходимостью, необходима статистика, превышающая нынешнюю в несколько раз.

#### 4. Заключение

Telescope Array является самой большой в Северном полушарии установкой, изучающей космические лучи сверхвысоких энергий. Детекторы ТА начали работу в марте 2008 г. На установке измерен спектр космических лучей, найдено ГЗК-подавление при энергиях, больших  $10^{19.75}$  эВ, с уровнем достоверности 3,5 $\sigma$ . Массовый состав в диапазоне энергий от  $10^{18.2}$  до  $10^{20}$  эВ согласуется с чисто протонным. Распределение направлений прихода первичных частиц всё ещё совместимо с изотропным.

Эксперимент Telescope Array финансируется Министерством образования, культуры, науки и технологии Японии Какени-грантами в приоритетной области (431) "Космические лучи высоких энергий", грантами фундаментальных исследований 18204020(А), 18403004(В) и 20340057(В); грантами Американского национального научного фонда РНУ-0307098, РНУ-0601915, РНУ-0703893, РНУ-0758342, РНУ-0848320 (Юта) и РНУ-0649681 (Ратгерс); Корейским фондом исследований (KRF-2007-341-C00020); Корейским фондом науки и инженерии (KOSEF, R01-2007-000-21088-0); Российской академией наук; грантами РФФИ 10-02-01406а, 11-02-01528а; грантом Президента Российской Федерации НШ-5525.2010.2; Министерством образования и науки РФ, госконтракт 02.740.11.0244; контрактом ИСН 4.4509.10.

#### Список литературы

- Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
- Зацепин Г Т, Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **4** 114 (1966) [Zatsepin G T, Kuz'min V A *JETP Lett.* **4** 78 (1966)]

- Tinyakov P G, Tkachev I I *Astropart. Phys.* **24** 32 (2005); astro-ph/0411669
- Neronov A, Semikoz D V *Phys. Rev. D* **80** 123012 (2009); arXiv:0910.1920
- Dolag K, Grasso D, Springel V, Tkachev I *Письма в ЖЭТФ* **79** 719 (2004) [*JETP Lett.* **79** 583 (2004)]; astro-ph/0310902
- Neronov A, Vovk I *Science* **328** 73 (2010); arXiv:1006.3504
- Linsley J *Phys. Rev. Lett.* **10** 146 (1963)
- Winn M M et al. *J. Phys. G Nucl. Phys.* **12** 653 (1986)
- Lawrence M A, Reid R J O, Watson A A J. *Phys. G Nucl. Part. Phys.* **17** 733 (1991)
- Afanasyev B N et al., in *Proc. Intern. Symp. on Extremely High Energy Cosmic Rays: Astrophysics and Future Observatories* (Ed. M Nagano) (Tokyo: Univ. of Tokyo, 1996) p. 32
- Антонов Е Е и др. *Письма в ЖЭТФ* **69** 614 (1999) [Antonov E E *JETP Lett.* **69** 650 (1999)]
- Takeda M et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 1163 (1998)
- Hayashida N et al., astro-ph/0008102
- Bird D J et al. *Astrophys. J.* **441** 144 (1995)
- Jui C H et al., in *Proc. 27th Intern. Conf. on Cosmic Rays: ICRC 2001, Hamburg* Vol. 1 (Göttingen: Copernicus Gessellschaft, 2001) p. 354
- Mantsch P (for the Pierre Auger Collab.) "The Pierre Auger Observatory progress and first results", astro-ph/0604114
- Tokuno H et al. *AIP Conf. Proc.* **1238** 365 (2010)
- Boldt E, Ghosh P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **307** 491 (1999); astro-ph/9902342
- Neronov A, Tinyakov P, Tkachev I *ЖЭТФ* **127** 744 (2005) [*JETP* **100** 656 (2005)]; astro-ph/0402132
- Berezinsky V, Kachelrieß M, Vilenkin A *Phys. Rev. Lett.* **79** 4302 (1997); astro-ph/9708217
- Kuzmin V A, Rubakov V A *ЯФ* **61** 1122 (1998) [*Phys. At. Nucl.* **61** 1028 (1998)]; astro-ph/9709187
- Chung D J H, Kolb E W, Riotto A *Phys. Rev. D* **59** 023501 (1999)
- Kuzmin V A, Tkachev I I *Письма в ЖЭТФ* **68** 255 (2005) [*JETP Lett.* **68** 271 (1998)]
- Kuzmin V, Tkachev I *Phys. Rev. D* **59** 123006 (1999)
- Dubovsky S L, Tinyakov P G *Письма в ЖЭТФ* **68** 99 (1998) [*JETP Lett.* **68** 107 (1998)]; hep-ph/9802382
- Berezinsky V, Mikhailov A A *Phys. Lett. B* **449** 237 (1999); astro-ph/9810277
- Chung D J H, Farrar G R, Kolb E W *Phys. Rev. D* **57** 4606 (1998); astro-ph/9707036
- Berezinsky V, Kachelrieß M, Ostapchenko S *Phys. Rev. D* **65** 083004 (2002); astro-ph/0109026
- Gorbunov D S, Raffelt G G, Semikoz D V *Phys. Rev. D* **64** 096005 (2001); hep-ph/0103175
- Csáki C et al. *JCAP* (05) 005 (2003); hep-ph/0302030
- Fairbairn M, Rashba T, Troitsky S V, arXiv:0901.4085
- Coleman S, Glashow S L *Phys. Rev. D* **59** 116008 (1999); hep-ph/9812418
- Dubovsky S L, Tinyakov P G *Astropart. Phys.* **18** 89 (2002); astro-ph/0106472
- Berezinsky V, Gazizov A Z, Grigorieva S I *Phys. Lett. B* **612** 147 (2005); astro-ph/0502550
- Stokes B et al. (for the Telescope Array Collab.), in *Proc. of the Intern. Symp. on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation: UHECR, Nagoya, Japan, December 10–12, 2010*
- Abbasi R U et al. (HiRes Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **100** 101101 (2008); astro-ph/0703099
- Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 061101 (2008); arXiv:0806.4302
- Kalashov O E, Rubtsov G I, Troitsky S V *Phys. Rev. D* **80** 103006 (2009); arXiv:0812.1020
- Rodriguez D C, Ph.D. Thesis (Salt Lake City, UT: Univ. of Utah, 2011)
- Ikeda D et al. (for the Telescope Array Collab.), in *Proc. of the Intern. Symp. on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation: UHECR, Nagoya, Japan, December 10–12, 2010*
- Abbasi R U et al. (HiRes Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **104** 161101 (2010); arXiv:0910.4184
- Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **104** 091101 (2010); arXiv:1002.0699
- Tameda Y et al. (for the Telescope Array Collab.), in *Proc. of the Intern. Symp. on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation: UHECR, Nagoya, Japan, December 10–12, 2010*
- Rubtsov G I et al. (for the Telescope Array Collab.), in *Proc. of the Intern. Symp. on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation: UHECR, Nagoya, Japan, December 10–12, 2010*

45. Glushkov A V et al. *Письма в ЖЭТФ* **85** 163 (2007) [*JETP Lett.* **85** 131 (2007)]; astro-ph/0701245  
 46. Gorbunov D S, Rubtsov G I, Troitsky S V *Astropart. Phys.* **28** 28 (2007); astro-ph/0606442  
 47. Tinyakov P et al. (for the Telescope Array Collab.), in *Proc. of the Intern. Symp. on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation: UHECR, Nagoya, Japan, December 10–12, 2010*  
 48. Hayashida N et al. *Phys. Rev. Lett.* **77** 1000 (1996)  
 49. Tinyakov P G, Tkachev I I *Письма в ЖЭТФ* **74** 3 (2001) [*JETP Lett.* **74** 1 (2001)]; astro-ph/0102101  
 50. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Science* **318** 938 (2007); arXiv:0711.2256  
 51. Veron-Cetty M P, Veron P "Quasars and active galactic nuclei", ESO Scientific Report 19, 9th ed. (2000)  
 52. Koers H B J, Tinyakov P *JCAP* (04) 003 (2009); arXiv:0812.0860  
 53. Abbasi R U et al., arXiv:1002.1444

PACS numbers: 14.60.Pq, 25.30.Pt  
 DOI: 10.3367/UFNR.0181.201109j.0997

## Нейтринный эксперимент T2K: первые результаты

Ю.Г. Куденко

### 1. Введение

Открытие нейтринных осцилляций явилось прямым экспериментальным доказательством существования новой физики вне рамок Стандартной модели и одновременно стало началом изучения этой физики. Как следует из осцилляций, нейтрино имеют малую ненулевую массу, смешиваются, и ароматы нейтрино (лептонные числа) не сохраняются. Нейтринные осцилляции описываются так называемой Стандартной нейтринной моделью (vSM), которая является минимальной моделью, включающей в себя смешивание трёх типов нейтрино. Физика нейтринных осцилляций описывается унитарной матрицей  $U$  [1], которая связывает три типа активных нейтрино —  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ , имеющих левую спиральность, с массовыми состояниями  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ , которым соответствуют массы  $m_1, m_2, m_3$ . В удобном для физического анализа виде матрица  $U$  может быть представлена следующим образом:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \exp(-i\delta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} \exp(i\delta) & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В этом выражении  $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$  и  $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ). Осцилляции нейтрино описываются шестью параметрами: двумя независимыми разностями квадратов масс:  $\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2$  и  $\Delta m_{23}^2 = m_3^2 - m_2^2$ , тремя углами смешивания,  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ , и CP-нечётной фазой  $\delta$ .

Эксперименты с атмосферными [2], солнечными [3–8], реакторными [9] и ускорительными [10, 11] нейтрино позволили измерить четыре параметра,  $\theta_{12}, \theta_{23}, \Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$ :  $\tan^2 \theta_{12} = 0,47_{-0,05}^{+0,06}$ ,  $\Delta m_{12}^2 = 7,59_{-0,21}^{+0,21} \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{23} > 0,92$  для 90-процентного доверительного

интервала (90 % CL),  $\Delta m_{23}^2 = (2,43 \pm 0,13) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ . Следует отметить, что знак  $\Delta m_{23}^2$  неизвестен, т.е. не определена иерархия масс нейтрино. Возможна как нормальная иерархия,  $m_3 \gg m_2 > m_1$ , так и инверсная,  $m_2 > m_1 \gg m_3$ . Кроме того, не измерены параметры  $\theta_{13}$  и  $\delta$ . Наилучший предел  $\sin^2 2\theta_{13} < 0,15$  (90 % CL) для  $\Delta m_{23}^2 = 2,43 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$  получен в эксперименте Chooz [12].

Поскольку  $|\Delta m_{12}^2| \ll |\Delta m_{13}^2| \simeq |\Delta m_{23}^2|$ , а характерные базы ускорительных экспериментов для исследования осцилляций в области "атмосферных" параметров ( $\Delta m_{23}^2 \sim (2-3) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ ) составляют несколько сотен километров, вклад членов, содержащих  $\Delta m_{12}^2$ , в вероятность осцилляций мал и приближённые выражения для осцилляций мюонных нейтрино могут быть записаны в следующем виде [13, 14]:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu}, \quad (2)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \cos^4 \theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu} - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e). \quad (3)$$

Если энергия нейтрино и база эксперимента выбраны таким образом, что вероятность осцилляций  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  находится в максимуме, т.е.  $(\Delta m_{13}^2 L)/(4E_\nu) = \pi/2 + n\pi$ , то

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{13}. \quad (4)$$

Основной целью эксперимента с длинной базой второго поколения T2K (Tokai-to-Kamioka) [15], проводимого в Японии, является поиск осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  и измерение угла  $\theta_{13}$  с чувствительностью к  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0,006$  (90 % CL), а также прецизионное измерение других осцилляционных параметров с точностью  $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \sim 0,01$  и  $\delta(\Delta m_{23}^2) \sim 10^{-4} \text{ эВ}^2$ . Членами коллаборации T2K являются более 500 учёных из 12 стран. От России в эксперименте участвует Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ). Концепция этого эксперимента, экспериментальная установка, первые результаты, статус и ближайшие перспективы изложены ниже.

### 2. Экспериментальная установка T2K

Общая схема эксперимента представлена на рис. 1. Основными элементами установки являются нейтринный канал, комплекс ближних нейтринных детекторов, расположенный на расстоянии 280 м от мишени (ND280), и дальний детектор Супер-Камиоканде (SK) на расстоянии 295 км от мишени. Ближний детектор ND280 [16–18], состоящий из двух нейтринных детекторов, установленных в шахте глубиной 40 м и диаметром около 18 м, используется для измерения параметров нейтринного пучка вблизи мишени (до осцилляций), постоянного контроля за его свойствами и измерения сечений взаимодействия нейтрино с ядрами. Один детектор (монитор нейтринного пучка INGRID (Interactive Neutrino GRID)) расположен на оси пучка, т.е. под углом 0 градусов по отношению к направлению протонного пучка, а другой ближний (off-axis) детектор нейтрино расположен на оси, соединяющей распадный объём и Супер-Камиоканде, т.е. под углом 2,5°.

Ю.Г. Куденко. Институт ядерных исследований РАН, Москва, РФ  
 E-mail: kudenko@inr.ru