

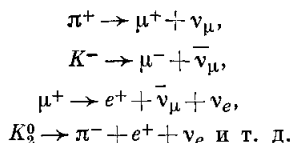
539.123

ПОДЗЕМНЫЕ НЕЙТРИННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В 1956 г. Рейнес и Коуэн впервые наблюдали реакции, вызванные нейтрино из реактора. Начиная с 1962 г. проведен ряд экспериментов с пучками нейтрино высоких энергий, полученных на ускорителях Брукхейвена и ЦЕРНа. Наконец, в 1965 г. в подземных экспериментах в Индии (объединенная индийско-японо-английская группа) и Южной Африке (группа Рейнеса) зарегистрировано взаимодействие нейтрино высоких энергий, образующихся в атмосфере Земли. Ожидается, что в ближайшие годы

будут зарегистрированы нейтринные потоки от Солнца. Планируются также поиски потоков нейтрино (в том числе и нейтрино высоких энергий) из космоса.

Нейтрино больших энергий возникают при распадах высокоэнергетических л-мезонов, К-мезонов, μ -мезонов:



Здесь ν_μ — мюонные нейтрино, ν_e — электронные нейтрино. Потоки π -, К- и μ -мезонов высоких энергий могут быть получены на ускорителях. Потоки этих мезонов и, следовательно, определенный поток нейтрино генерируются в атмосфере протонами (ядрами) космических лучей.

Впервые на возможности экспериментов с нейтрино высоких энергий в космических лучах обратил внимание М. А. Марков¹. Особенности таких экспериментов определяются спектром нейтрино высоких энергий (энергетическим и угловым), сечением нейтринных реакций и фоном, имитирующим нейтринные процессы. Существенно отметить, что в атмосфере рождаются нейтрино с энергией вплоть до 1000 Гэв и выше; такие энергии недоступны для современных ускорителей. На ускорителях Брукхейвена и ЦЕРНа изучались взаимодействия нейтрино в области энергий только от 1 до 10 Гэв.

Спектры атмосферных нейтрино рассчитаны рядом авторов¹⁻³. Нейтринный спектр ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) в вертикальном направлении имеет вид

$$I = 3 \cdot 10^{-2} E^{-3} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ Гэв}^{-1}$$

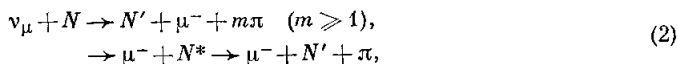
(1 Гэв < E < 100 Гэв). При E > 100 Гэв спектр падает быстрее, чем E⁻³. Спектр электронных нейтрино падает с энергией круче, чем спектр мюонных нейтрино. Отмечена угловая асимметрия потоков³. В горизонтальном направлении поток нейтрино очень больших энергий может в 2—3 раза превосходить вертикальный поток. Основная ошибка при вычислении нейтринных спектров возникает из-за плохого знания потоков К-мезонов. Однако следует подчеркнуть, что в области 1—100 Гэв нейтрино от К-распада в атмосфере не составляют основной части потоков ν_μ . Значительная часть мюонных нейтрино с энергией 1—100 Гэв в атмосфере рождается при распадах хорошо известных потоков л-мезонов. На ускорителях подавляющая часть нейтрино с энергией 4—10 Гэв возникает при К-распадах. Поэтому к настоящему времени атмосферные нейтринные потоки в области 1—100 Гэв известны с хорошей точностью, во всяком случае не худшей, чем точность, с которой определены нейтринные потоки на ускорителях в области 4—10 Гэв. Неопределенность в горизонтальной интенсивности мюонных нейтрино меньше, чем неопределенность в вертикальном направлении. Неопределенность в горизонтальном направлении $\pm 8\%$ при 10 Гэв и $\pm 12\%$ при 100 Гэв, в вертикальном направлении $\pm 17\%$ при 10 Гэв и $\pm 33\%$ при 100 Гэв⁴.

Сечения взаимодействий нейтрино с ядрами, нуклонами, электронами малы, и потоки атмосферных нейтрино пронизывают нашу планету, практически не изменяясь. Определенная вероятность поглощения нейтрино в веществе Земли тем не менее существует. Следовательно, наряду с нейтринным потоком в Земле на любой глубине и в любых направлениях существует поток продуктов нейтринных реакций, который, в принципе, может быть зарегистрирован. Этот поток определяется не только сечением взаимодействия нейтрино, он тем больше, чем больше пробеги рождающихся частиц. Наибольшие пробеги в веществе имеют μ -мезоны (μ -мезон с энергией 100 Гэв имеет пробег, эквивалентный 500-метровому слою воды). Поэтому в подземном нейтринном эксперименте выгоднее всего изучать μ -мезонные потоки в грунте, вызванные мюонными нейтрино.

Мюонные нейтрино и антинейтрино при взаимодействии с нуклонами вызывают следующие реакции:

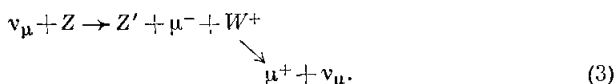


где n и p — нейтрон и протон. Это так называемые «упругие» процессы. Неупругие процессы в основном сопровождаются рождением одного или большего числа л-мезонов:



где N — нуклон, N' — нуклон отдачи, N* — изобара. Другие неупругие процессы менее вероятны.

Нейтрино может производить реакции в кулоновских полях ядер. Однако сечения реакций рождения пар различных частиц при рассеянии нейтрино энергии порядка 100 Гэв в кулоновском поле ядра, предсказываемые теорией слабого контактного взаимодействия Ферми, гораздо меньше сечений реакций (1) и (2). Другая ситуация возникла бы в случае существования промежуточного мезона (W -мезона). Если существует W -мезон, ответственный за слабые взаимодействия, он должен быстро распадаться, в частности, на μ -мезон и нейтрино. Тогда возможны реакции типа



Реакция (3) — реакция второго порядка по полуслабой константе (или первого порядка по слабой константе), сечение может достигать значительной величины. Реакция (3) также характерна тем, что рождается пара μ -мезонов.

Из экспериментов на ускорителях известно, что сечение реакций (1) при $E_{\nu} > 1 \text{ Гэв}$ постоянно и равно приблизительно $0,8 \cdot 10^{-38} \text{ см}^2$, сечение реакций (2) быстро растет с энергией в области $1-10 \text{ Гэв}$ (по крайней мере линейный рост с энергией в лабораторной системе $\sigma_{\text{неупр}} \approx 0,5 \cdot 10^{-38} E_{\nu} \text{ см}^2 (E_{\nu} \text{ в } \text{Гэв}), \bar{E}_{\mu} \approx \frac{1}{2} E_{\nu}$).

Как далеко продолжается этот рост? Каковы формфакторы в неупругих процессах слабых взаимодействий? Оказывается, что μ -мезонный поток в грунте (полный поток, энергетические и угловые характеристики), вызванный нейтрино, сильно зависит от поведения сечений (2) при энергиях порядка $10-100 \text{ Гэв}$. Уже измерение полных потоков μ -мезонов от нейтрино в грунте позволит значительно продвинуться вверх по шкале энергий в исследовании поведения сечений реакций (2). Более подробную информацию о нейтринных процессах можно получить, измеряя энергетические и угловые спектры μ -мезонов.

Нейтринные эксперименты в ЦЕРНе показали, что масса промежуточного мезона, если он существует, больше 2 Гэв . При $M_W \gg 2 \text{ Гэв}$ потоки μ -мезонов, производимые атмосферными нейтрино в Земле в реакции (3), меньше, чем потоки μ -мезонов, производимые в реакции (2). Однако специфика реакции (3) оставляет возможность для изучения проблемы промежуточного мезона. Так, наблюдение в подземном эксперименте пары μ -мезонов, выходящих из одной точки, могло бы быть указанием на существование промежуточного мезона.

Как и в других экспериментах, в подземном эксперименте необходимо избавиться от фона. Фон создают μ -мезоны высоких энергий, рождающиеся одновременно с нейтрино при распадах π - и K -мезонов в атмосфере. У поверхности Земли поток атмосферных μ -мезонов ($\sim 10^{-2} \frac{\mu\text{-мезонов}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{стер}}$) на много порядков больше потока μ -мезонов от нейтринных реакций (около $10^{-12} \mu\text{-мезонов}/\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{стер}$). С погружением под землю фон уменьшается. На глубине в несколько сотен метров в грунте поток атмосферных μ -мезонов «снизу вверх», т. е. поток атмосферных μ -мезонов, рассеянных на большие углы, становится много меньше, чем $10^{-12} \mu\text{-мезонов}/\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{стер}$. На глубинах $2-3 \text{ км}$ в грунте уже резко подавлены горизонтальные потоки атмосферных μ -мезонов (т. е. потоки под большими зенитными углами); они меньше, чем потоки μ -мезонов от нейтринных взаимодействий. Если учесть, что потоки μ -мезонов от нейтрино наибольшие в горизонтальном направлении³, то ясно, что в нейтринном подземном эксперименте на очень больших глубинах наиболее благоприятным является вертикальное расположение детектора. При такой геометрии не требуется сложных устройств, способных определить направление регистрируемых μ -мезонов, достаточно применить схемы совпадений. В нейтринном эксперименте, в котором регистрируются μ -мезоны, идущие «снизу вверх», более сложные устройства (разделение импульсов во времени, запаздывающие совпадения) необходимы.

Эксперимент группы Рейнеса⁵ проводится в золотоносных шахтах вблизи Йоганнесбурга (Южная Африка) на глубине 3200 м грунта, или 8800 м водного эквивалента. Установка состоит из двух вертикальных стен, содержащих 36 детекторных элементов (2×18) (рис. 1) с общей площадью $2 \times 55 \text{ м}^2$. Детекторный элемент (размеры см. на рис. 2) представляет собой прямоугольный бокс с 380 литрами жидкого сцинтиллятора и четырьмя фотомножителями по два с каждой стороны. Импульсы от каждого фотомножителя подаются на осциллограф и фотографируются, если имеет место по крайней мере четырехкратное совпадение, а энергия ионизации, выделенная в сцинтилляторах, через которые прошла заряженная частица, больше 20 Мэв . Таким способом практически исключается фон от случайных совпадений и естественной радиоактивности. Число четырехкратных случайных совпадений меньше, чем одно совпадение за год при энергии, большей 15 Мэв . Установка позволяет делать грубое измерение зенитного угла заряженной частицы, проходящей через нее. По отношению величин

импульсов фотоумножителей с двух концов детекторного элемента определяется место прохождения частицы на горизонтальной оси. Сумма импульсов обеспечивает измерение выделенной энергии и, следовательно, длины трека частицы в детекторе.

Установка вводилась в действие по секциям, начиная с сентября 1964 г. В июне 1965 г. работали уже шесть секций. Работу установки можно характеризовать произведением площади установки на время ее работы и на эффективный телесный угол ($ST\Omega$). Авторы приводят экспериментальные результаты для $ST\Omega = 14200 \text{ м}^2 \text{ суток} \cdot \text{стер}$. За это «время» зарегистрировано семь событий, когда частица прошла через два детекторных элемента по одному с каждой стороны (рис. 1, случай *a*), т. е. в горизонтальном направлении. Согласно оценкам авторов, очень маловероятно, что какие-либо

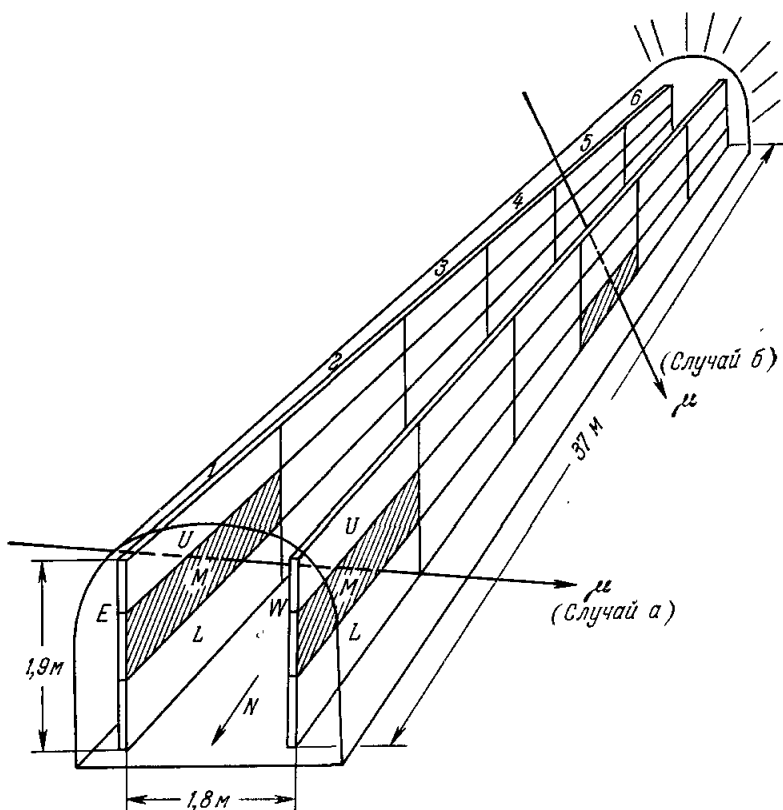


Рис. 1. Схема установки Рейнеса в Южной Африке.

из этих семи событий вызваны атмосферными μ -мезонами и продуктами реакций атмосферных μ -мезонов (электромагнитные ливни, «звезды», производимые μ -мезонами, и т. д.). Все семь случаев типа *a* отнесены к нейтринным взаимодействиям. Считается, что все остальные события (например, типа *b* на рис. 1) вызваны атмосферными μ -мезонами, хотя некоторая часть таких событий может быть вызвана и нейтринными взаимодействиями.

За период наблюдений ожидаемая на установке Рейнеса степень событий, вызванных нейтрино с энергиями из изучавшейся в ЦЕРНе области энергий 1—10 $Gэв$, равна 0,5 события от упругого процесса, 1,2 события от неупругого процесса (2), или всего 1,7 событий. Остальные события (~5) могут быть вызваны нейтрино с энергиями, большими 10 $Gэв$. Если считать, что линейный рост сечения реакции (2) продолжается до энергий 100 $Gэв$ и далее, то все равно останется расхождение между числом наблюдаемых и предсказываемых событий. Это расхождение, по мнению авторов⁵, можно было бы объяснить более быстрым ростом, чем линейный, сечения реакции (2) в области энергий больше 10 $Gэв$ (предполагается, что нейтринные потоки известны точно, возможные потоки μ -мезонов от реакций (3) не учитываются).

По последним сообщениям ⁶, число нейтринных событий, зарегистрированных в подземной лаборатории Рейнеса, достигло 10, а число событий, вызванных атмосферными μ -мезонами, — 80. Площадь установки Рейнеса будет увеличена. Несколько глубже в той же шахте планируется установить и искровую камеру для получения более точной информации о потоках как атмосферных μ -мезонов, так и μ -мезонов от нейтрино.

В золотоносных шахтах Южной Индии (Kolar Gold Fields) нейтринный эксперимент проводится при сотрудничестве индийского Института фундаментальных исследований (Бомбей) и двух университетов — японского (Осака) и английского (Дарм). Эксперимент начат в марте 1965 г. на глубине 7600 футов (7500 м.в.э.). О первых трех событиях, одно или два из которых вызваны нейтрино, было сообщено в работе ⁷. Полная сводка событий, зарегистрированных с марта по август, приведена на конференции в Кембридже ⁸.

Экспериментальная установка представляет собой два «телескопа». Каждый «телескоп» состоит из двух пластических сцинтилляторов площадью $2 \times 3 \text{ м}^2$, расположенных вертикально на расстоянии 80 см (рис. 3). Каждый «сцинтилляционный элемент» площадью 1 м^2 просматривается двумя фотоумножителями. Регистрируются

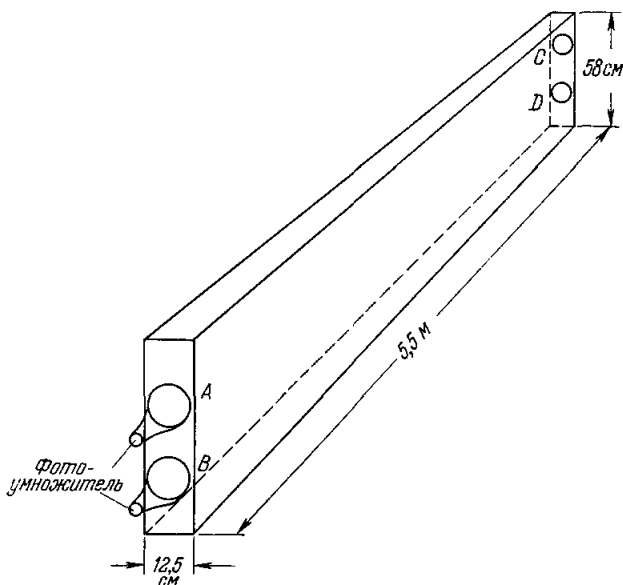


Рис. 2. «Детекторный элемент» установки, изображенной на рис. 1.

четырёхкратные совпадения между парой фотоумножителей на одной стенке и любой парой на другой стенке. Между сцинтилляторами установлены три слоя неоновых трубок «Конверси» (neon flash tubes) и между слоями неоновых трубок — две свинцовые стенки толщиной 2,5 см каждая. Если происходит четырёхкратное совпадение, импульсы фотоумножителей регистрируются на осциллографах, и после 30-микросекундной задержки высоковольтный импульс подается на электроды неоновых трубок. Система трубок «Конверси» позволяет проследить путь заряженной частицы через установку и измерить ее зенитный угол с точностью $\pm 1^\circ$. Тем самым на установке в Индии можно получать более детальную информацию об отдельном регистрируемом событии, чем на установке Рейнеса, но общая площадь установки в Индии меньше. Эффективная апертура телескопа $\sim 20 \text{ м}^2 \text{ стер}$ для изотропного потока заряженных частиц. Поток μ -мезонов в грунте, вызванный нейтрино, можно считать приблизительно изотропным. Для атмосферных μ -мезонов эффективная апертура $\sim 0,29 \text{ м}^2 \text{ стер}$, если принять, что угловое распределение для атмосферных μ -мезонов на глубине 7500 м.в.э. $I_\theta = I_{\text{верт}} \cos^8 \theta$, где θ — зенитный угол. При $\theta > 65^\circ$ поток атмосферных μ -мезонов пренебрежимо мал по сравнению с потоком μ -мезонов от нейтрино.

За период наблюдений ($ST\Omega = 4700 \text{ м}^2 \text{ сутки} \cdot \text{стер}$ для изотропного излучения) было зарегистрировано всего 13 событий. Два из них имеют зенитный угол $\theta > 65^\circ$, они определенно могут считаться нейтринными событиями. Оценки показывают, что еще по крайней мере три события с $\theta < 65^\circ$ могут быть вызваны нейтрино. Авторы заключают, что ~ 5 из 13 наблюдаемых событий вызваны нейтрино и остальные —

атмосферными μ -мезонами. Отсюда следует, что поток μ -мезонов, вызванный нейтрино, $1,2 \cdot 10^{-12}$ частиц/см²сек·стер, что согласуется с измерениями в эксперименте Рейнса ($0,6 \cdot 10^{-12}$ частиц/см²сек·стер) в пределах статистической ошибки двух измерений. Вертикальная интенсивность атмосферных μ -мезонов на глубине 7500 м.в.э. ($Z/A = 5,5$) $I_{\text{верт}} \approx 0,9 \cdot 10^{-10}$ частиц/см²сек·стер.

Один из двух «чистых» нейтринных случаев интересен тем, что он определенно представляет неупругое взаимодействие нейтрино. В этом случае (рис. 4) наблюдались два трека (с зенитными углами 99 и 96°), принадлежащие частицам тяжелее электрона. Точка встречи двух треков может быть близка к поверхности скалы или быть на расстоянии порядка 1 м внутри скалы. Неопределенность в длине каждого трека внутри скалы (именно 0—1,7 м) не позволяет определить, вызваны ли оба трека μ -мезонами или одна частица — μ -мезон, другая — π -мезон. Если бы оба трека были больше, чем несколько пробегов ядерно-активных частиц (т. е. обе частицы — μ -мезоны), было бы вероятно,

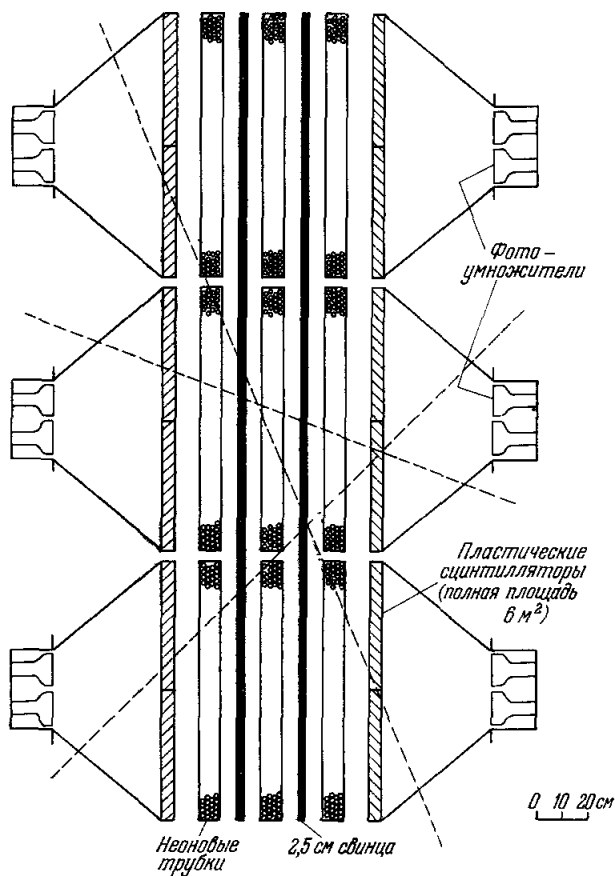


Рис. 3. «Нейтринный телескоп» объединенной группы в Индии.

быми взаимодействиями. Не исключено, однако, что существуют еще неизвестные взаимодействия элементарных частиц, в частности специфическое взаимодействие μ -мезонов или ν_{μ} -нейтрино¹⁰. Известным основанием для гипотезы о наличии особого взаимодействия у μ -мезона, помимо электромагнитного и слабого, является различие масс электрона и μ -мезона. Возможно, о наличии специфического взаимодействия у μ -мезона, которое проявляется при сверхвысоких энергиях (порядка 100 Гэв и выше), свидетельствуют некоторые данные исследований в космических лучах (ссылки на литературу см. в¹⁰). Это взаимодействие могло бы быть, например, ответственно за существование относительно проникающей нейтральной компоненты в составе космических лучей. В свою очередь такое излучение могло бы производить пары μ -мезонов в грунте, имитируя нейтринные события. Неоднозначность в интерпретации результатов подземных нейтринных экспериментов из-за возможного существования добавочной ней-

что случай соответствует рождению промежуточного мезона в реакции (3). В одном случае из 10 (см. 8) также наблюдалось одновременное прохождение двух частиц через установку, но ничего нельзя сказать о месте возникновения этих частиц.

Авторы⁸ допускают следующую интерпретацию полученных результатов:

1) существуют источники нейтрино высокой энергии (может быть, внеатмосферного происхождения), которые дают потоки большие, чем рассчитанные потоки нейтрино из π -, μ - и K -распадов в атмосфере, или (и)

2) сечение неупругих нейтринных взаимодействий при энергиях больше нескольких Гэв растет много быстрее, чем линейно.

Эти выводы аналогичны выводам работы 5. В работе 8 подчеркнута, что полученные результаты не противоречат существованию W -мезона с массой, немногим большей чем 2 Гэв (см. также оценки работы 9). Однако для точной и определенной интерпретации эксперимента необходимо прежде всего увеличить статистику наблюдаемых событий.

При анализе данных подземных нейтринных экспериментов подразумевается, что μ -мезоны обладают только электромагнитными и слабыми, а ν_{μ} -нейтрино — слабыми, и существуют еще неизвестные взаимодействия элементарных частиц, в частности специфическое взаимодействие μ -мезонов или ν_{μ} -нейтрино¹⁰. Известным основанием для гипотезы о наличии особого взаимодействия у μ -мезона, помимо электромагнитного и слабого, является различие масс электрона и μ -мезона. Возможно, о наличии специфического взаимодействия у μ -мезона, которое проявляется при сверхвысоких энергиях (порядка 100 Гэв и выше), свидетельствуют некоторые данные исследований в космических лучах (ссылки на литературу см. в¹⁰). Это взаимодействие могло бы быть, например, ответственно за существование относительно проникающей нейтральной компоненты в составе космических лучей. В свою очередь такое излучение могло бы производить пары μ -мезонов в грунте, имитируя нейтринные события. Неоднозначность в интерпретации результатов подземных нейтринных экспериментов из-за возможного существования добавочной ней-

тральной компоненты в космических лучах можно исключить, если провести измерения не горизонтальных потоков μ -мезонов в грунте, а μ -мезонов, идущих «снизу вверх». В последнем случае в качестве защиты используется вся планета.

О галактических нейтрино высоких энергий в настоящее время ничего не известно. Существуют оценки, показывающие, что их поток значительно меньше атмосферного нейтринного потока. Не исключено, что мощные дискретные источники нейтрино галактического или внегалактического происхождения все же существуют, и их обнаружение на фоне потоков атмосферных нейтрино представило бы огромный интерес,

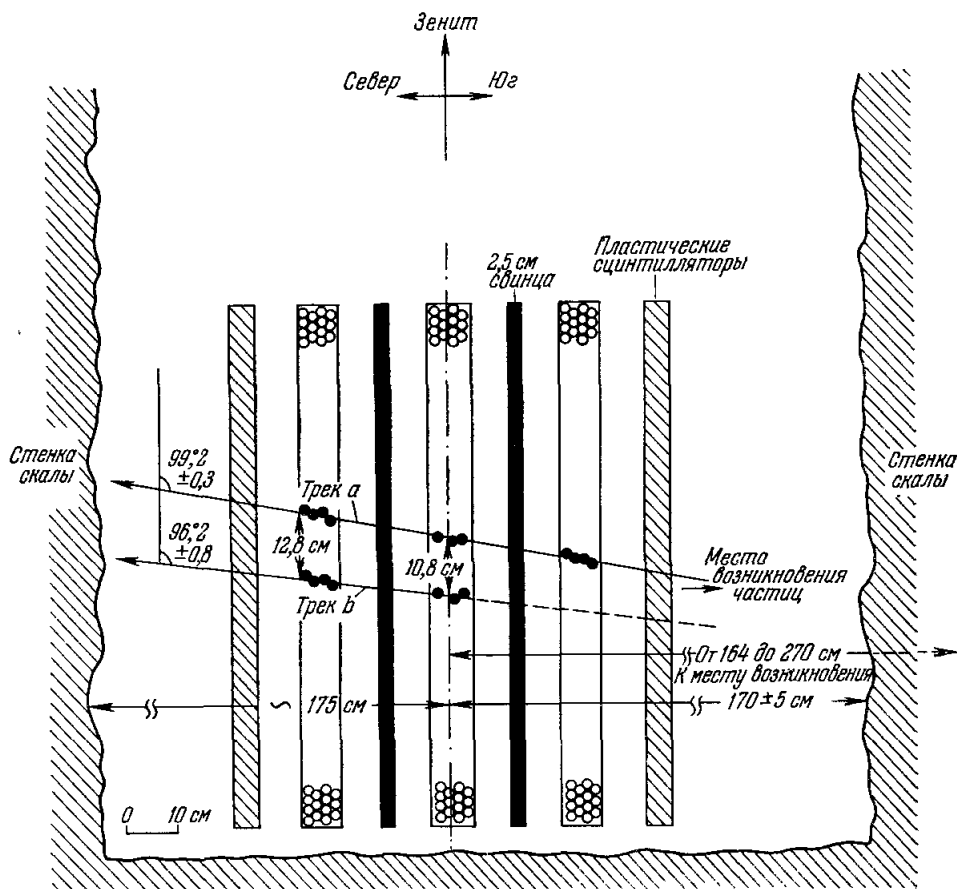


Рис. 4. Случай неупругого взаимодействия нейтрино.

особенно для астрофизики. С прицелом на изучение нейтрино больших энергий из космического пространства планируется проведение исследований на уже действующих установках ⁵, ⁸. Профессор Койфель (университет Юта, США) также работает в этом направлении ¹¹. Установка Койфеля (размером $10 \times 10 \times 6$ м³) будет состоять из водных черенковских счетчиков и искровых камер и будет расположена на глубине 2000 футов в соляной шахте. Предполагается регистрировать μ -мезоны, образующиеся в самой установке или проходящие через установку «снизу вверх».

В Институте Кэйза (Кливленд, США) думают о строительстве 100 000-тонной установки из искровых камер глубоко под землей (до 15 000 футов) ⁶.

Осуществление этих проектов позволит получить информацию о потоках нейтрино высоких энергий из космоса и еще глубже проникнуть в природу слабых взаимодействий.

Первые подземные нейтринные эксперименты выполнены. Их значение не только в том, что обнаружено новое, до того не наблюдавшееся явление, но и в том, что показано, что подобные эксперименты имеют хорошие перспективы.

И. М. Железные

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. Markov, Hyperonen und K-Mesonen, Berlin, 1960, стр. 292; M. A. Markov, Proc. 1960 Annual Intern. Conf. High-Energy Physics, Rochester, стр. 579; M. A. Markov and I. M. Zheleznykh, Nucl. Phys. **27**, 385 (1961); M. A. Markov, Нейтрино, М., изд-во «Наука», 1964.
 2. K. Greisen, Proc. Intern. Conf. Instrumentation High-Energy Physics, Berkley, 1960, стр. 209.
 3. Г. Т. Зацепин и В. А. Кузьмин, ЖЭТФ **41**, 1818 (1961).
 4. J. L. Osborne, S. S. Said, A. W. Wolfendale, Proc. Phys. Soc. **86**, 93 (1965).
 5. F. Reines, M. Crouch, T. Jenkins, W. Kropp, H. Gurr, G. Smith, J. Sellshor, B. Meyer, Phys. Rev. Letts. **15**, 429 (1965).
 6. F. Reines and J. Sellshor, Scientific American, February (1966).
 7. C. V. Achar, M. G. K. Menon, V. S. Narasimham, P. V. Ramana Murthy, B. V. Sreekantan, K. Hinotany, S. Miyake, D. R. Creed, J. L. Osborne, J. B. M. Pattison and A. W. Wolfendale, Phys. Letts. **18**, 196 (1965).
 8. C. V. Achar et al., The Ninth Int. Conf. on Cosmic Rays, September 1965.
 9. R. Cowsik, Yash Pal and S. N. Tandon, The Ninth Int. Conf. on Cosmic Rays, September 1965.
 10. М. А. Марков, Письма в редакцию ЖЭТФ **3**, 98 (1966).
 11. J. Keuffel, Proc. of Conf. on the Interaction between Cosmic Rays and High-Energy Phys., Cleveland, Ohio, September 1964, стр. 55.
-