

539.123

ПЕРВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

М. Шварц

(Р. 1932 г.; «Digital Pathways, Inc.», Маунтин-Вью, США)

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 1988 г.)
Les Prix Nobel 1988.— Stockholm: Norstedts Tryckeri, 1989.— Pp. 93—105)

В первой части своей лекции я хотел бы рассказать немного о состоянии дел в области физики элементарных частиц в начале шестидесятих годов, уделив особое внимание слабым взаимодействиям. Во второй части я затрону вопросы планирования, осуществления и анализа результатов первого эксперимента с нейтрино высоких энергий. Мои коллеги, Джек Штейнбергер и Леон Ледерман, обсудят развитие нейтринной физики высоких энергий после этого эксперимента и его значение в контексте современной теории элементарных частиц.

1. Исторический обзор. К 1960 г. взаимодействия элементарных частиц были подразделены на четыре основных типа. Самое слабое из взаимодействий, гравитационное, играет незначительную роль при изучении элементарных частиц в лабораторных условиях и им можно пренебречь. Рассмотрим остальные взаимодействия:

1. Сильные взаимодействия. Этот класс охватывает взаимодействия между так называемыми адронами. К адронам относятся всем знакомые нейтроны и протоны, а также пионы и другие мезоны, связывающие их в ядрах. Очевидно, что взаимодействие, которое связывает два протона в ядре, должно превосходить электростатическое отталкивание, стремящееся растащить протоны. Сильные взаимодействия — короткодействующие, они проявляются на расстояниях 10^{-13} см, но на этих расстояниях сильные взаимодействия на два порядка сильнее электромагнитных взаимодействий.

В общем, сейчас известно, что адроны являются комбинацией наиболее элементарных сильно взаимодействующих частиц, называемых кварками. Позже вы услышите о них подробнее.

2. Электромагнитные взаимодействия. Вы знакомы с электромагнитными взаимодействиями из повседневного опыта. Заряды одного знака отталкиваются друг от друга. Заряды противоположных знаков притягиваются. Земля действует как гигантский магнит. Кроме того, электромагнитные взаимодействия между электронами и ядрами связывают само вещество. Все элементарные частицы за исключением нейтрино взаимодействуют посредством электромагнитных сил или через заряд, или через магнитные свойства, или через способность непосредственно взаимодействовать с зарядом или магнитным моментом. В 1960 году единственными известными элементарными частицами кроме адронов были три лептона — электрон, мюон и нейтрино — с некоторым подозрением, что возможно существование двух типов нейтрино. И электрон, и мюон испытывают электромагнитные взаимодействия.

3. Слабые взаимодействия. В начале века было открыто, что некоторые ядра являются нестабильными и распадаются на оста-



точные ядра и электроны или позитроны. У этих распадов были две важные характеристики.

а) Они были «медленными». То есть время жизни распадающихся ядер соответствовало взаимодействию, которое гораздо слабее электромагнитного.

б) Наблюдался недостаток энергии и импульса.

При проверке спектра испускаемых электронов становилось ясно, что для сохранения при распаде энергии, импульса и углового момента необходимо присутствие еще одного продукта распада. Этот продукт распада должен иметь массу, близкую к нулю, и полуцелый спин. Это наблюдение впервые сделал Паули. Позже Ферми назвал этот продукт распада нейтрино.

Развитие теории слабых взаимодействий (теория Ферми) в действительности выявило еще более специфические свойства нейтрино. Нейтрино имеет спин $1/2$ и очень низкую вероятность взаимодействия в веществе. Предсказанное сечение взаимодействия распадного нейтрино с нуклонами составляет около 10^{-43} см². Таким образом, в среднем нейтрино пройдет без взаимодействия путь в свинце длиной в световой год.

Реакции β -распада можно легко записать в виде:

$$Z \rightarrow (Z + 1) + e^- + \bar{\nu},$$

$$Z \rightarrow (Z - 1) + e^+ + \nu.$$

Из отсутствия безнейтринного двойного β -распада, а именно процесса $Z \rightarrow (Z + 2) + e^- + e^-$, можно сделать вывод, что нейтрино и антинейтрино действительно являются разными частицами. В 1950 г. с помощью серии экспериментов, в которых открыто несохранение четности, было также установлено, что нейтрино и антинейтрино рождаются в состоянии

полной продольной поляризации или спиральности, причем нейтрино являются левыми частицами, а антинейтрино — правыми.

В 1940—1950 гг. были обнаружены другие слабые взаимодействия. Пион, являющийся адроном и служащий для связи частиц в ядре, может рождаться в свободном состоянии. Его масса составляет приблизительно 273 массы электрона. Распадается пион примерно за $2,5 \cdot 10^{-8}$ с на мюон и частицу с нейтриноподобными свойствами. Мюон, в свою очередь, проявляет все свойства тяжелого электрона с массой около 207 масс электрона. Мюон распадается приблизительно за $2,2 \cdot 10^{-6}$ с на электрона и два нейтрино. Предполагаемые реакции в момент их открытия записывались так:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu},$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}.$$

К 1960 г. было также известно, что эти распады происходят с нарушением четности и что нейтрино в этих реакциях имеет ту же спиральность, что и нейтрино, испускаемое при β -распадах.

Не приходится и говорить, что в 1959 г. все сходились на том, что нейтрино, связанные с β -распадом, были теми же самыми частицами, что и нейтрино, связанные с распадом пионов и мюонов. Единственным намеком на то, что это, возможно, не так, была статья Дж. Фейнберга 1958 г., в которой он показал, что распад $\mu \rightarrow e + \nu$ должен появляться с частотой 10^{-4} , если заряженный промежуточный бозон (W) подавляет слабое взаимодействие. Так как экспериментальный предел был много ниже (10^{-8}), эта статья считалась доказательством того, что промежуточного бозона нет. Фейнберг, однако, указал на возможность существования промежуточного бозона в случае, если мюонное нейтрино и электронное нейтрино различны.

Одно заключительное историческое замечание относительно нейтрино. В середине пятидесятых годов Коуэн и Райнес в экстремально сложном пионерском эксперименте смогли осуществить прямое наблюдение взаимодействий нейтрино в веществе. Они использовали реактор, в котором рождалось большое количество антинейтрино, и наблюдали реакцию $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$. Наблюдаемое сечение согласовалось с сечением, предсказываемым теорией.

П. Замысел, планирование и осуществление эксперимента. Первый замысел эксперимента появился в конце 1959 г. На физическом факультете Колумбийского университета есть традиция: в течение часа за кофе обсуждать актуальные проблемы физики. На одном из таких обсуждений профессор Т. Д. Ли говорил о возможностях исследований слабых взаимодействий при высоких энергиях. Несколько экспериментов были рассмотрены и отклонены как неосуществимые. После окончания дискуссии осталось общее чувство подавленности из-за тех сложностей, которые встают на пути выделения слабых взаимодействий при высоких энергиях из фона, возникающего при взаимодействии энергичных частиц с мишенью. Единственную надежду оставляло предположение о том, что сечения слабых взаимодействий растут пропорционально квадрату энергии в системе центра масс по крайней мере до тех пор, пока не начнет действовать какой-либо механизм подавления (например, за счет промежуточного бозона).

Тем же вечером у меня появилась ключевая идея — возможно, нейтрино от распада пионов могли бы генерироваться в количестве, достаточном для их использования в эксперименте. Быстрый расчет «на обо-

рофе конверта» показал осуществимость этой идеи на каком-либо из строящихся или планируемых ускорителей. Я позвонил домой Т. Д. Ли и сообщил ему результаты своих расчетов; он загорелся этой идеей. На следующий день мы серьезно взялись за планирование эксперимента. Между тем Ли и Янг начали детальный расчет сечений взаимодействия, а также попытались выяснить, какие выводы можно будет сделать из результатов эксперимента.

Вскоре после этого мы узнали, что Бруно Понтекорво высказал многие из тех идей, что были у нас. Он подробно описал предложенный эксперимент с нейтрино от остановившихся пионов, а также на конференции в Советском Союзе обсудил возможности использования энергичных пионов. Его полный вклад в развитие нейтринной физики был, конечно, весьма велик.

Леон Ледерман, Джек Штейнбергер, Жан-Марк Гайар и я потратили много времени, пытаясь выбрать идеальный нейтринный детектор. Вначале мы остановили свой выбор на большой пузырьковой камере, заполненной фреоном, которую построил Джек-Штейнбергер. (В результате мы имели бы в 10 раз меньше событий на синхротроне в Брукхейвене, чем мы получили, используя искровую камеру.)

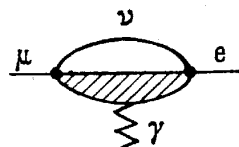
К счастью для нас, как раз примерно в это время была изобретена искровая камера. Гайар, Ледерман и я поехали в Принстон в лабораторию Кронины посмотреть на одну такую камеру. Камера была небольшая, но положенная в ее основу идея была безусловно правильной. Мы решили поставить эксперимент, используя 10-тонную искровую камеру.

Летом 1960 г. Ли и Янг снова нанесли решающий удар по нашим представлениям. Они показали, что по существу невозможно объяснить отсутствие распада $\mu \rightarrow e + \gamma$, если не постулировать существование двух типов нейтрино. Их аргументы, представленные на Рочестерской конференции в 1960 г., были примерно следующими:

1. Простая четырёхфермионная точечная модель, которая объясняет слабые взаимодействия при низких энергиях, приводит к сечению взаимодействия, растущему пропорционально квадрату энергии в системе центра масс.

2. В то же самое время точечное взаимодействие должно быть S-волной, и, таким образом, сечение взаимодействия не может превышать $\lambda^2/4\pi$ без нарушения унитарности. Такое нарушение должно было бы происходить при энергиях около 300 ГэВ.

3. Следовательно, должен существовать механизм, который подавляет рост полного сечения взаимодействия до того, как энергия достигнет 300 ГэВ. Этот механизм должен подразумевать определенный размер области взаимодействия, который, в свою очередь, должен приводить к зарядам и токам, которые связываются с фотонами. Такая связь привела бы к реакции $\mu \rightarrow e + \gamma$ через диаграмму



4. Ожидаемый брэнчинг для $\mu \rightarrow e + \gamma$ не должен существенно отличаться от 10^{-5} . Тот факт, что экспериментальный верхний предел на брэнчинг составляет 10^{-8} , является сильным аргументом в пользу гипотезы существования двух типов нейтрино. С учетом этих соображений одной из целей планируемого эксперимента стало изучение вопроса, действительно ли $\nu_\mu = \nu_e$. Если существует только один тип нейтрино, то теория предсказывает, что должно рождаться одинаковое число мюонов и

электронов. Если существует два типа нейтрино, то частота генерации электронов и мюонов должна быть различной. Действительно, если следовать аргументам Ли и Яяга, то в отсутствие $\mu \rightarrow e + \gamma$ мюонное нейтрино вообще не должно генерировать электроны.

Теперь перейдем к проекту эксперимента. Над ним работали Гордон Дэнби, Жан-Марк Гайар, Константин Гулианос, Нариман Мистри и вместе с ними Леон Ледерман, Джек Штейнбергер и я. Для генерации пионов использовался недавно построенный синхротрон с жесткой фокусировкой (Alternate Gradient Synchrotron, A. G. S.) — синхротрон с переменным градиентом) в Брукхейвенской национальной лаборатории. Хотя максимальная энергия ускорителя составляла 30 ГэВ, мы могли работать только при 15 ГэВ, чтобы уменьшить фон от энергичных мюонов.

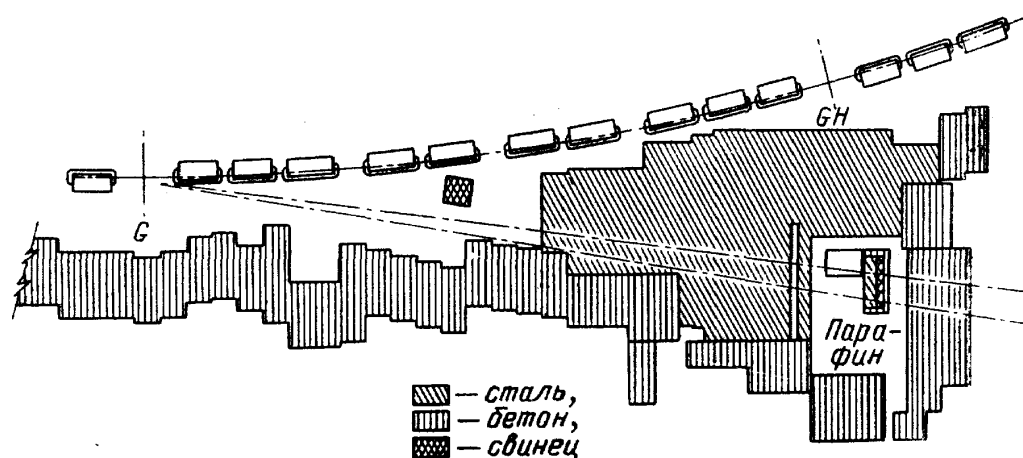


Рис. 1. Схема нейтринного эксперимента на синхротроне A. G. S.

Пионы генерировались в столкновениях пучка протонов с бериллиевой мишенью в конце трехметровой прямой секции (рис. 1). Детектор был установлен под углом $7,5^\circ$ к направлению протонного пучка позади стальной стены толщиной 13,5 м, сделанной из палубных плит демонтированного крейсера. Была поставлена также дополнительная защита из бетона и свинца, как показано на рисунке.

Чтобы уменьшить фон космических лучей, важно сократить период времени, в течение которого пучок сталкивается с мишенью. Любые так называемые «события», которые появляются вне этого временного окна, могут быть, следовательно, исключены из рассмотрения как события, не генерированные высокоэнергичными частицами от ускорителя.

A. G. S. при энергии 15 ГэВ работал с частотой один импульс за 1,2 с. Импульс состоял из цугов длительностью по 20 нс с интервалами 220 нс. Пучок отклонялся на мишень в течение 20—30 мкс в каждом цикле синхротрона. Таким образом, мишень в действительности бомбардировалась протонами только в течение $2 \cdot 10^{-6}$ с в каждую секунду реального времени.

Для того чтобы эффективно использовать структуру пучка, необходимо было открывать детектор только на время прихода сгустка пионов, появляющегося в момент бомбардировки мишени. Это было сделано с помощью временного окна длительностью 30 нс, которое открывалось триггером от черенковского счетчика, находившегося перед стеной защиты. Фашировка черенковского счетчика относительно детектора была достигнута путем увеличения энергии A. G. S., что позволило мюонам проникать через защиту.

Рис. 2. Энергетический спектр нейтрино, ожидаемый от синхротрона А. G. S., работающего при энергии 15 ГэВ

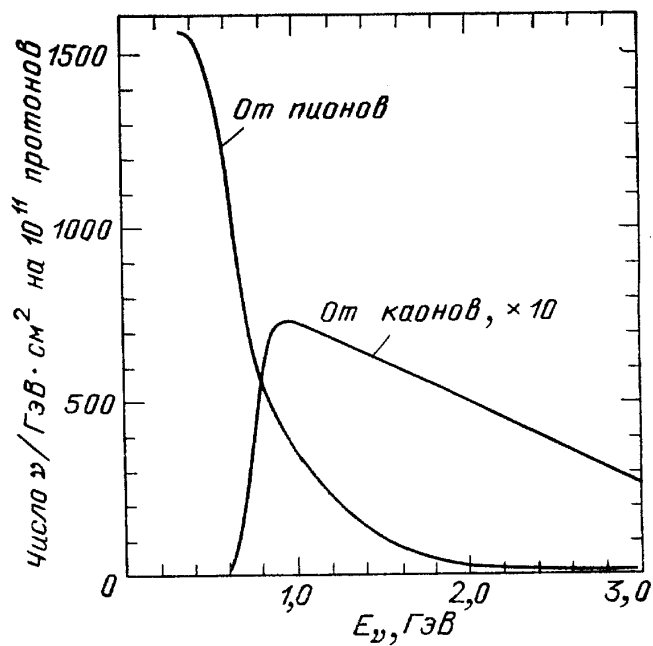


Рис. 3. Искровая камера и окружающие ее счетчики. Это вид спереди, нейтрино приходят слева. А — триггерные счетчики, В, С и D используются в схеме антисовпадений

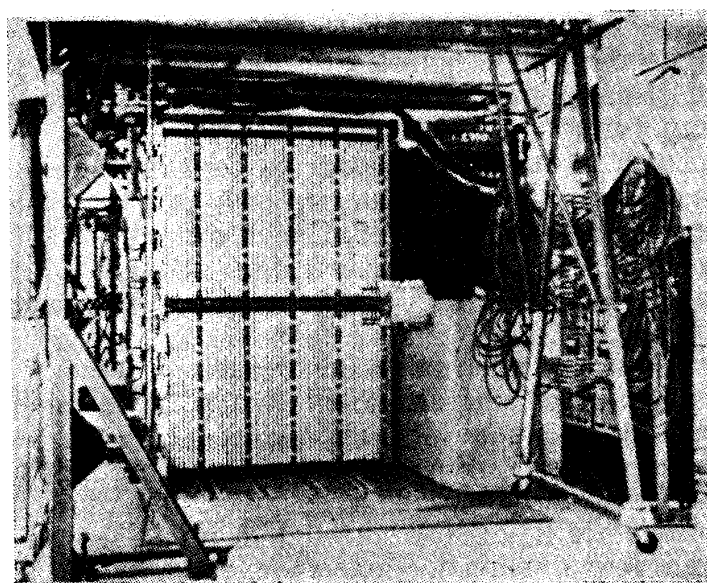
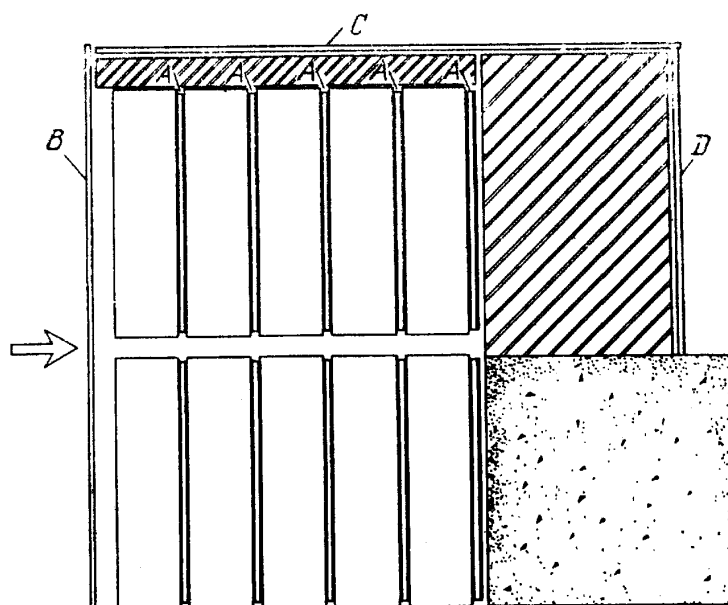


Рис. 4. Фотография камер и счетчиков

Такая жесткая синхронность позволяет также исключить 90% фона, обусловленного медленными нейтронами.

Скорость генерации пионов и каонов была в то время хорошо известна, и ожидаемый поток нейтрино было достаточно просто рассчитать. На рис. 2 представлен энергетический спектр нейтрино для пучка протонов с энергией 15 ГэВ, дающего распады пионов и каонов. Ясно, что распад каонов вносит основной вклад при энергиях нейтрино больших, чем примерно 1,2 ГэВ. (Эти нейтрино рождаются в реакции $K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + (\nu/\bar{\nu})$.)

Основная стена защиты имела достаточную толщину для того, чтобы подавить все сильно взаимодействующие частицы. Ожидалось, что только адроны, генерируемые во взаимодействиях нейтрино примерно на последнем метре, могут выходить из защиты. Мюоны с энергией до 17 ГэВ, проникающие в стену, должны останавливаться за счет ионизационных потерь. Единственный серьезный фон был обусловлен нейтронами, проникающими через бетонный пол; этот фон был эффективно исключен на второй стадии эксперимента.

Искровая камера показана на рис. 3 и 4. Она состояла из 10 модулей, каждый модуль, в свою очередь, содержал 9 алюминиевых пластин размером $44 \times 44 \times 1$ дюйм (толщина), разделенных зазорами толщиной $3/8$ дюйма. Для уменьшения фона от космических лучей и мюонов, которые проникают через стену защиты, спереди, сверху и с задней стороны установки были поставлены счетчики, включенные на антисовпадения, как показано на рисунке. Сорок триггерных счетчиков были размещены между модулями и в конце установки. Каждый триггерный счетчик состоял из двух пластин сцинтиллятора, разделенных алюминием толщиной $3/4$ дюйма. Сцинтилляторы были включены на совпадения.

События отбирались для дальнейшего изучения, если они возникали внутри рабочего объема, который исключал первые две пластины, по два дюйма сверху и снизу и по четыре дюйма спереди и сзади установки. События с одиночным треком также должны были останавливаться в рабочем объеме. Кроме того, эти события включались в анализ только тогда, когда угол их рождения относительно направления нейтрино был меньше 60° .

Было найдено 113 событий, которые удовлетворяли этим критериям. 49 из них были событиями с очень короткими одиночными треками. Все эти события за исключением трех были зарегистрированы на первой стадии эксперимента до того, как была усовершенствована защита; поэтому они были отнесены к фону. В ретроспективе некоторые из этих событий являлись, по-видимому, событиями с нейтральными токами, но в то время было невозможно отличить их от событий, генерированных нейтронами, проходящими над и под защитой.

Остальные события подразделяются на следующие категории:

а) 34 «одиночных мюона» с видимым импульсом больше 300 МэВ/с. Некоторые из них показаны на рис. 5. Среди этих событий есть несколько событий с одной или двумя дополнительными вспышками (искрами в камерах) вблизи вершины, которые обусловлены, по-видимому, ядерными осколками.

б) 22 «вершинных» события. В некоторых из них выделяется существенная энергия. Эти события, по-видимому, обусловлены мюонами, которые сопровождалась пионами (рис. 6).

в) 8 «ливневых» кандидатов. 6 из них были отобраны таким образом, что если бы это были мюоны, то их импульс превышал бы 300 МэВ/с. Это были единственные кандидаты на одиночные электроны в эксперименте. Мы рассмотрим их вкратце более подробно.

Достаточно легко можно продемонстрировать, что почти все из 56 событий категорий а) и б) имеют нейтринное происхождение.

Проведя эксперимент с выключенным ускорителем и запуская детектор от космических лучей, мы поставили предел 5 ± 1 на полное число событий с одиночными мюонами, которые могут быть обусловлены таким фоном. Действительно, незначительная асимметрия на рис. 7 согласуется с этой гипотезой.

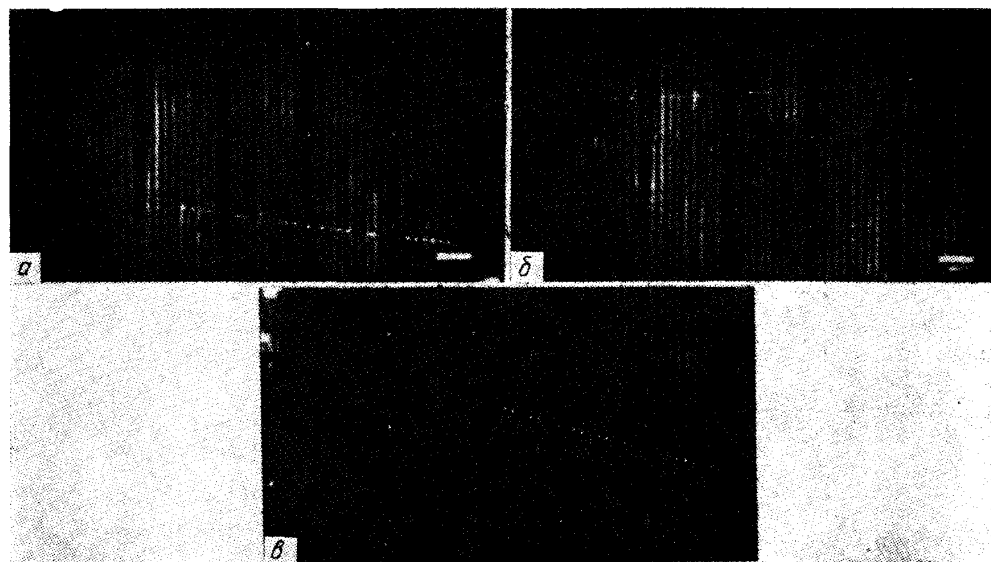


Рис. 5. Несколько типичных событий с одиночными мюонами

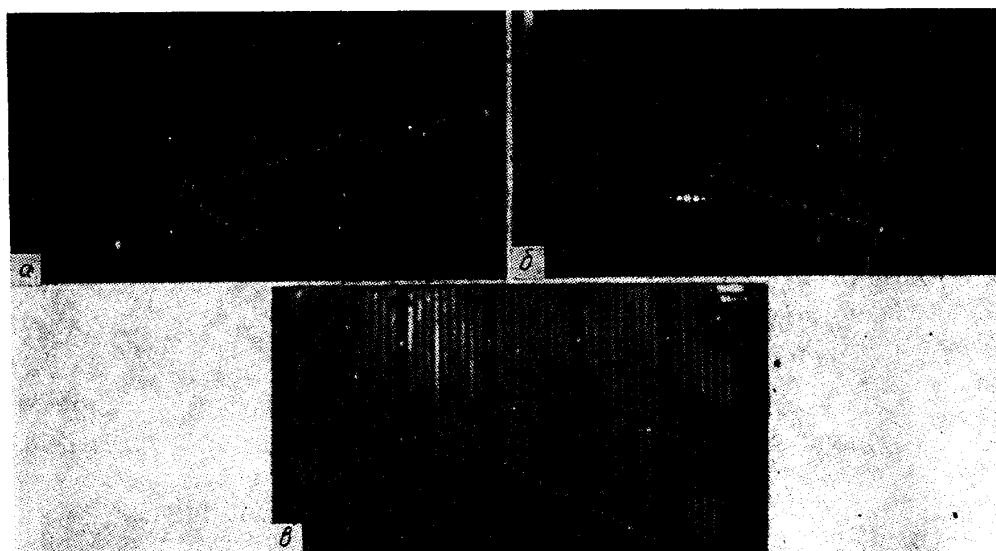


Рис. 6. Несколько типичных «вершинных» событий

Легко продемонстрировать, что эти события не генерируются нейтронами. Из рис. 7 мы видим, что они имеют тенденцию концентрироваться вблизи направления к мишени (это направление проходит через основную часть стальной защиты). Нейтроны, проникающие через защиту, могут генерировать не более 10^{-4} событий (если не считать событий, генерированных нейтрино на последнем футе самой защиты). Действительно, удаление четырех футов стали от передней части установки увеличилось бы скорость счета событий в 100 раз; такого увеличения не наблюдалось. Кроме того, если бы события были обусловлены нейтронами, они бы группировались в первых камерах. Фактически события с импульсом больше 300 МэВ/с были равномерно распределены по детектору.

Доказательство того, что треки одиночных частиц обусловлены главным образом мюонами, основывается на отсутствии взаимодействий. Если бы эти треки были пионами, мы должны были ожидать 8 взаимодействий. В действительности, даже если считать, что все остановившиеся треки испытали взаимодействие, это привело бы к заключению, что средний свободный пробег этих треков в 4 раза больше, чем ожидается для адронов.

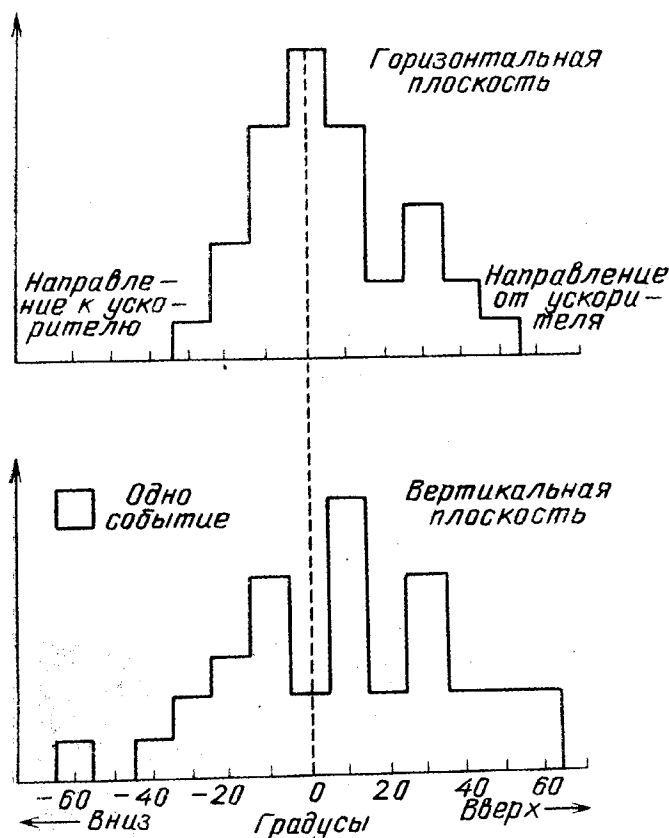


Рис. 7. Проекция углового распределения событий с одиночными треками. Направление прихода нейтрино принято за нуль градусов

Для окончательной проверки происхождения этих событий мы заменили 4 фута защиты эквивалентным количеством защиты вблизи бериллиевой мишени. Это уменьшило распадное расстояние в 8 раз. Скорость счета событий при этом уменьшилась от $1,46 \pm 0,02$ до $0,3 \pm 0,2$ на 10^{16} падающих протонов.

Все вышеприведенные аргументы убедили нас в том, что мы на самом деле наблюдаем нейтринные события и что 29 из 34 событий с одиночными треками обусловлены мюонами, генерированными нейтрино (остальные пять событий — фон, связанный с космическими лучами). Именно эти события составили основу наших аргументов относительно идентичности ν_μ и ν_e . Но сначала мы должны были увидеть, как выглядят события при прохождении электронов через наши искровые камеры. Электрон в среднем потеряет половину своей энергии приблизительно в четырех алюминиевых пластинах, излучив γ -кванты, которые, в свою очередь, превращаются в электрон-позитронные пары. В конечном счете получится ливень. Электронный ливень обычно виден в виде нескольких вспышек в каждом зазоре между пластинами. Общее число вспышек в ливне увеличивается приблизительно линейно с энергией электрона в области энергий 400 МэВ.

Для калибровки камер мы экспонировали их в пучке электронов с энергией 400 МэВ на Брукхейвенском Космотроне (рис. 8). Заметим, что эффективность триггерной системы по отношению к этим электронам составляла 67%. Затем мы построили распределение вспышек, показан-

ное на рис. 9, для ожидаемого числа ливней ($2/3 \times 29$). На рис. 9 показаны также 6 «ливневых» событий. Очевидно, что различие между ожидаемым распределением в случае существования одного типа нейтрино и наблюдаемым распределением является существенным. Мы сделали вывод о том, что $\nu_\mu \neq \nu_e$.

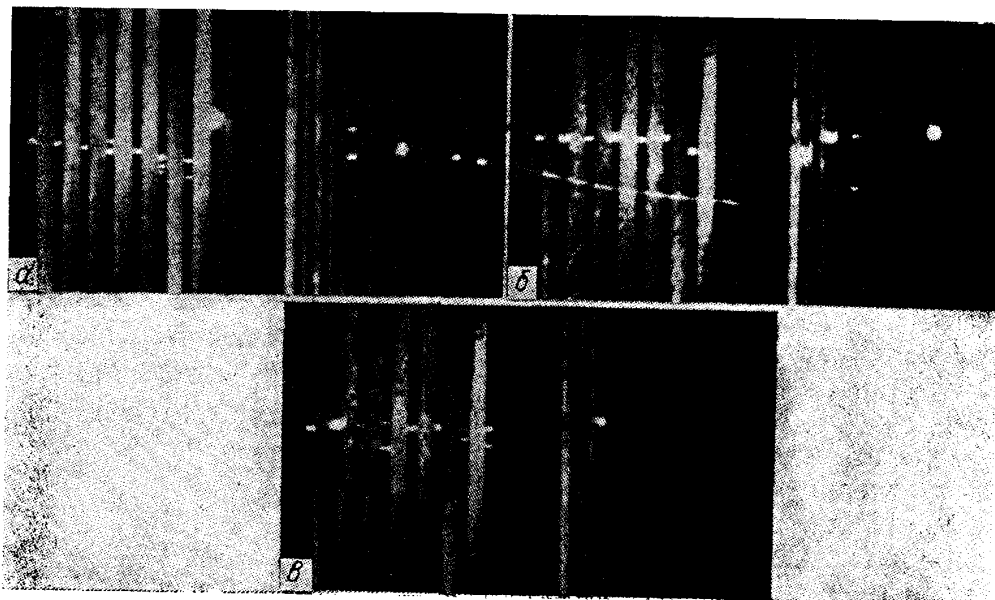


Рис. 8. Типичные электронные события с импульсом 400 МэВ/с в калибровочном эксперименте на Космотроне

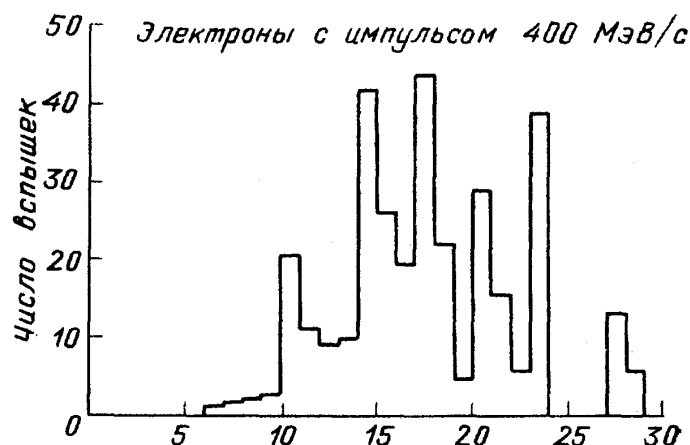
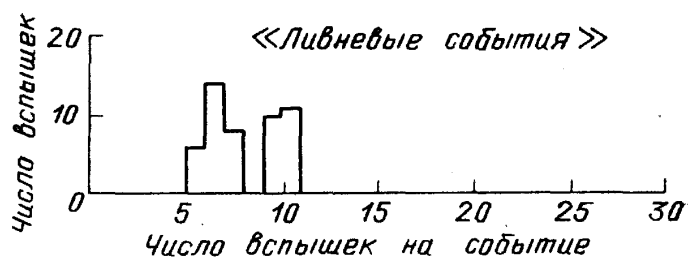


Рис. 9. Распределение вспышек для электронов с импульсом 400 МэВ/с, нормированное на ожидаемое число ливней при $\nu_\mu = \nu_e$. Показано также распределение наблюдаемых «ливневых» событий



В дальнейшем мы сравнили ожидаемый темп счета нейтринных событий с темпом счета, предсказываемым теорией Ферми, и обнаружили согласие в пределах 30%.

Результаты эксперимента описаны в статье в журнале «Physical Review Letters» (1962. V.9.P.36).

(Перевод с англ. Е. В. Корольковой)