

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1988

539.123

**НАБЛЮДЕНИЯ В ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ:
ОТ ДВУХ НЕЙТРИНО К СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ**

Л. М. Ледерман

(Фермиевская Национальная ускорительная лаборатория—ФНАЛ, Беркли, США)

(Нобелевская лекция по физике. Стокгольм, 8 декабря 1988 г.;
переработано 9 февраля 1989 г.)

І. Введение. Мои коллеги Мелвин Шварц, Джек Штейнбергер и я, разделив Нобелевскую премию 1988 г., предстали перед дилеммой. Каждый из нас мог бы расёмон-подобным ⁽¹⁾ образом описать двухнейтринный эксперимент (под таким названием он известен) в своем собственном стиле, со своими собственными воспоминаниями, в полностью объективной манере истинных ученых. Хотя это и могло бы представлять некоторый интерес для социологов и антропологов, но в этом случае несомненно имелся бы риск нагнать скуку, и поэтому мы решили логически разделить наши усилия следующим образом. Др. Шварц, оставивший эту область физики десять лет назад, сосредоточился бы на истоках и деталях первоначального эксперимента. Др. Штейнбергер сосредоточился бы на использовании нейтринных пучков — область, в которой он был выдающимся лидером на протяжении многих лет. Я вызвался обсудить «остальное» — поспешное решение, которое в конечном счете кристаллизовалось в основную тему: как открытие двух типов нейтрино стало решающим ранним шагом в «сборке» современной картины мира, которую в физике элементарных частиц мы называем «стандартной моделью». Очевидно, что даже «первый шаг» основывается на уже существовавшей до того совокупности знаний, к которой тоже можно было обратиться. Мой выбор сюжетов будет не только субъективным, но будет также до одержимости личным, что соответствует этому внушающему благоговению событию—церемонии награждения.

Я расскажу о серии экспериментов, которые, в конечном счете, возможно даже не прямо, внесли свой вклад в стандартную модель,— в эту элегантную, но все еще не полную сводку всех знаний о субъядерной физике. Эта модель описывает 12 фундаментальных фермионов—шесть кварков и шесть лептонов, сгруппированных в три поколения и подверженных силам природы, носителями которых являются 12 калибровоч-

© The Nobel Foundation 1989

@ Перевод на русский язык,

Академия наук СССР,

«Успехи физических наук», 1990

ных бозонов. Моя собственная экспериментальная работа привела меня на такие ускорители, как Невисский синхроциклотрон (Navis Synchrocyclotron—SC); Космотрон (Cosmotron) и Переменно-градиентный синхротрон (Alternate Gradient Synchrotron—AGS, синхротрон с жесткой фокусировкой) в Брукхейвенской Национальной лаборатории (Brookhaven National Laboratory—BNL), Берклевский бэватрон (Berkeley Bevatron) и Принстон-Пеннский синхротрон (Princeton-Penn Synchrotron), а также Синхроциклотрон (Synchrocyclotron—SC), Протонный синхротрон (Proton Synchrotron—PS) и Пересекающиеся накопительные кольца (Intersecting Storage Ring's—ISR) — три машины в ЦЕРНе, 400 ГэВ-ускоритель в Фермилабе (Fermilab)—электрон-позитронный коллайдер—Корнеллские электронные накопительные кольца (Cornell Electron Storage Rings—CESR) в Корнелле. Я могу здесь только лишь вскользь отметить ту потрясающую творческую активность, которая вызвала к жизни эти великолепные орудия науки.

Необходим также непосредственный опыт, связанный с параллельным развитием методики измерений. Достижения в методике были не менее яркими, так что я и мои коллеги могли использовать плоды удивительной эволюции возможностей регистрировать отдельные субъядерные события со все более тонкими пространственными деталями и все более точным определением времени. Мой собственный путь начался с камер Вильсона, некоторое время я занимался ядерными фотоэмульсиями, затем использовал прогресс в разработке диффузионных камер, перешел к небольшим блокам сцинтилляционных счетчиков, затем к искровым камерам, черенковским счетчикам высокого разрешения из свинцового стекла, сцинтилляционным годоскопам, а со временем и ко все более сложным установкам из многопроволочных пропорциональных камер, калориметров, кольцевых черенковских счетчиков и сцинтилляторов, действующим совместно с изысканно сложными системами сбора данных.

Экспериментаторы часто являются узкими специалистами по реакциям взаимодействия только определенного сорта частиц. Я слышал о физиках, которые на протяжении многих лет занимаются наблюдением только электронных столкновений. Обозревая свою собственную библиографию, я могу выделить различные периоды, которые не сильно отличаются от творческих периодов художников, вроде Голубого периода Пикассо. Моя самая ранняя работа была связана с пионами, которые взрывоподобно вторглись в мир физики примерно в то же самое время (1947 г.), когда в него скромно вошел и я. Позднее я обратился к мюонам, в основном для того, чтобы изучать их свойства и заняться возбуждающей любопытство проблемой их сходства с электронами, например, чтобы ответить на вопрос Ричарда Фейнмана: «Почему мюон весит?» или на параллельный вопрос Раби: «Кто заказал это?». Мюоны в интенсивных пучках AGS оказались мощным средством изучения субъядерных событий не только в относительно классических экспериментах рассеяния (один мюон входит, один мюон выходит), но и также в явно неклассических опытах (ни один мюон не входит, два мюона выходят). Кратковременная работа с нейтральными каонами предшествовала нейтринной программе, о которой подробно расскажут мои коллеги. Эта программа привела в результате к изучению процессов столкновений с протонами максимально возможных энергий, в которых образуются лептоны. Этот последний этап начался в 1968 г. и все еще продолжался в 80-е годы.

Ускорители и детекторы являются основой в исследованиях элементарных частиц, но необходима также и некая путеводная философия. Мой собственный подход был сформирован специфическим опытом в аспирантуре.

Моя диссертационная работа в Колумбийском университете включала в себя сооружение камеры Вильсона, которая создавалась для использования на новейшем 400 Мэв-синхроциклотроне, строившемся в Невисской лаборатории примерно в 20 милях к северу от Колумбийского университета, расположенного в Нью-Йорке.

И. А. Раби был деканом физического факультета, маэстро, учителем нас всех. Он очень интересовался новой физикой, которую производил невисский ускоритель, имевший в то время наивысшую энергию в мире. Однажды я описывал ему некоторые странные события, наблюдавшиеся в камере, которые очень взволновали Раби. Понимая, что данные неубедительны, я постарался объяснить, что нам еще далеко до точного измерения. Комментарий Раби «Вначале приходит наблюдение, затем приходит измерение» прояснил мне резкое различие между «наблюдением» и «измерением». Оба экспериментальных подхода необходимы для прогресса в физике. Наблюдения—это эксперименты, открывающие новые области в физике. Последующие измерения необходимы для их развития. Наблюдения могут быть качественными и могут довольствоваться аппаратурой, которая жертвует деталями. Измерения же чаще всего проводятся с полным набором соответствующих приборов. Конечно, границы между ними размыты. В течение последующих 30 лет, или около того, я занимался измерениями высокой точности, например магнитного момента мюона [1] или массы, заряда и времени жизни мюона [2], измерениями умеренной точности, как, например, параметра ρ в распаде мюона, упругого рассеяния мюонов [3], времени жизни каонов и лямбда-частиц [4]. А также я участвовал в наблюдениях, которые представляли собой попытки увидеть совершенно новые явления. Эти «наблюдения» с 1956 г. отмечены и в названиях статей, некоторые из которых приведены в хронологическом порядке в таблице

Таблица главных наблюдений

Наблюдение долгоживущих нейтральных V-частиц (1956) [5]
Наблюдение нарушения четности и зарядового сопряжения в распадах мезонов: магнитный момент свободного мюона (1957) [6]
Наблюдение реакций под действием нейтрино высоких энергий и существование двух типов нейтрино (1962) [7]
Наблюдение массивных мюонных пар в адронных столкновениях (1970) [8]
Наблюдение π -мезонов с большим поперечным импульсом в протон-протонных столкновениях при высоких энергиях (1973) [9]
Наблюдение димюонного резонанса при 9,5 Гэв в 400 Гэв-протон-ядерных столкновениях (1977) [10]
Наблюдение ипсилона 4-прим на CESR (1980) [11]

и в ссылках [5—11]. Я отобрал их потому, что: 1) я любил каждую из них, и 2) они были весьма важны в развитии физики частиц в этот удивительный период с 50-х по 80-е годы.

II. Долгоживущие нейтральные каоны. Наблюдение долгоживущих нейтральных V-частиц [5]. В 1955 г. Пайс и Гелл-Манн [12] заметили, что нейтральные K-мезоны представляют уникальную ситуацию в физике частиц. В отличие, например, от π^0 , K^0 —не тождествен своей античастице, даже если их невозможно различить по их распадам. Если использовать инвариантность относительно зарядового сопряжения, то возникает причудливая схема смешивания частиц: \bar{K}^0 и \bar{K}^0 адекватно описывают состояния частиц, рождающихся с хорошо определенным квантовым числом—странностью, а два других состояния K_L и K_S имеют вполне определенные свойства распадов и времена жизни.

Суть теоретической точки зрения, высказанной Абрахамом Пайсом в лекции в Колумбийском университете весной 1955, заключалась в том, что наряду с уже наблюдавшимися K_S (время жизни— 10^{-10} с) должны существовать в тех же количествах частицы со значительно большим временем жизни, поскольку для них, в отличие от K_S , распад на два пиона запрещен С-инвариантностью. Ясность этой лекции толкнула меня на поиск такого же четкого экспериментального подхода с применением камеры, которая была изобретена в 1896 г. шотландским физиком Ч. Т. Р. Вильсоном. Камера Вильсона была впервые использована в 1911 г. для наблюдения треков субатомных частиц, возникающих при распадах ядер. Помещенная в сильные магнитные поля или со свинцовыми пластинами внутри она стала рабочей лошадкой в исследованиях космических лучей и в ранних ускорительных экспериментах, и с ее помощью было сделано множество открытий, например открытие позитрона, мюона, лямбда-частицы, « θ »-частицы (теперь K_S) и K^+ -мезона. Как прибор она была в большей степени биологическим, чем физическим инструментом—подверженным отравлениям, искажениям треков, с бесконечно долгим (около минуты) нерабочим периодом. Для точных измерений импульсов и углов требовалось везение, умение старинного ремесленника, сопровождаемое не подлежащими сомнению фольклорными рецептами. Низкая частота цикла камеры Вильсона была одним из ее главных недостатков при исследованиях на ускорителях. Изобретение Дональдом Глезером пузырьковой камеры и ее быстрое использование Луисом Альваресом дали гораздо лучший инструмент для решения многих задач, и примерно к середине 50-х годов уже очень мало камер Вильсона работало на ускорителях. В Колумбии я успешно работал с камерой диаметром в 11 дюймов, построенной на невисском синхротроне во время работы над моей диссертацией, темой которой было сравнение времен жизни положительных и отрицательных пионов [13]. В суматошном финале этой диссертации я сделал вывод (неправильный, как оказалось), что равенство времен жизни подразумевает инвариантность слабых взаимодействий относительно зарядового сопряжения!

За время своего пребывания в Невисе камера Вильсона давала результаты о распадах пионов [14], о массе нейтрино, образующегося в пионном распаде [15] (образуется мюонное нейтрино; пройдет почти десять лет прежде чем это число будет улучшено), о рассеянии пионов [16], включая первые намеки на сильное рассеяние назад, которое, как было позже показано Э. Ферми, является указанием на «3, 3»-резонанс и интерференцию ядерного и кулоновского рассеяния π^+ и π^- на углеороде. Рассеяние на углеороде привело к анализу в терминах комплексных параметров оптической модели, которая и сейчас, 30 лет спустя, еще является доминирующей темой на конференциях по физике промежуточных энергий.

Примерно в 1953 г., когда начал работать Космотрон, мы построили камеру диаметром в 36 дюймов с магнитным полем 10000 Гс для изучения новых Λ^0 и θ^0 -частиц, которые интенсивно рождались пионами с энергией порядка 1 ГэВ. Эта камера казалась идеальной для изучения долгоживущих каонов. На рис. 1 показаны две установки, которые, в конечном счете, были использованы в опыте, а на рис. 2— K_L -событие в 36-дюймовой камере Вильсона. Космотрон давал достаточно большое количество 3 Гэв-протонов, а доступ к мишеням был особенно удобным благодаря магнитной структуре ускорителя. Прием заключался в том, чтобы «сместить» все заряженные частицы в сторону от камеры и уменьшить чувствительность к нейтронам за счет уменьшения толщины стенок камеры и заполнения ее гелием. К середине 1956 г. наша группа, состоявшая из пяти человек, установила существование K_L и наблюдала его основные трехчастичные моды распадов. Наше обсуждение альтер-

нативных интерпретаций V-событий, наблюдаемых в камере, было исчерпывающим и окончательным. В следующем году мы измерили время жизни, меняя время пролета от мишени до камеры (как камеру Вильсона, так и ускоритель двигать было нельзя). Это время жизни, так грубо измеренное, хорошо согласуется с величиной, приведенной в справочнике 1988 г. K_L был последним открытием, полученным с помощью ныне почтенной камеры Вильсона.

В 1958 г. мы провели тщательные исследования данных в целях поиска возможной двухчастичной моды распада K_L . Этот поиск был отражением быстрого развития событий в период 1956–1958 гг. Хотя

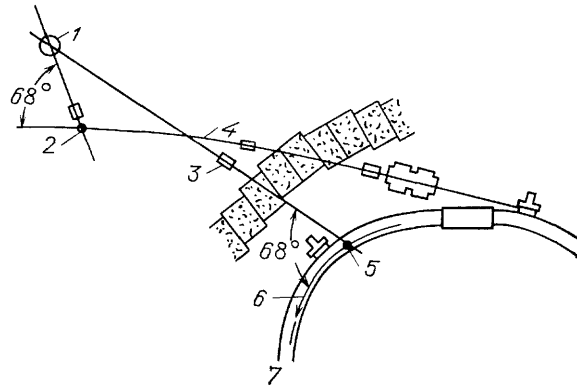


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения времени жизни K_L . (Обозначения: 1—камера Вильсона; 2—медная мишень (малая длина пробега K-мезонов); 3—очищающий магнит; 4—протонный пучок на 3 ГэВ; 5—медная мишень (большая длина пробега K-мезонов); 7—космотрон)

C-инвариантность и была ключевым аргументом, использованным Пайсом и Гелл-Манном для создания схемы смешивания нейтральных K-мезонов, однако события 1957 г. (см. ниже) доказали, что в действительности C-инвариантность сильно нарушается в слабых взаимодействиях. Так как предсказания оказались правильными, то улучшенный аргумент, предложенный Ли, Эме и Янгом [17], заменил C-инвариантность CP-инвариантностью, а фактически также CPT-инвариантностью. CP-инвариантность строго запрещала бы распад

$$K_L \rightarrow \pi^+ + \pi^-,$$

и в нашей статье 1958 г., основанной на 186 K_L -событиях, мы сделали вывод: «...В пределах ошибок, только два события имели нулевой поперечный импульс... и ни одно из них не могло быть двухчастичным распадом K_L . Верхний предел на $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ был установлен на уровне 0,6%... отсутствие двухпионного конечного состояния согласуется с предсказаниями инвариантности относительно обращения времени».

Шесть лет спустя, на значительно более мощном ускорителе AGS В. Фитч и Дж. Кронин [18], используя прогресс в разработке детекторов с искровыми камерами, смогли значительно увеличить число наблюдаемых распадов K_L . Они получили четкое доказательство двухпионной моды распада на уровне 0,22%, установив тот факт, что CP, в конце концов, не является точной симметрией природы.

Изучение K^0 , в конечном счете, дало главное ограничение на стандартную модель. С одной стороны, оно послужило лучшему пониманию свойств странного кварка, предложенного Гелл-Манном в 1963 г. С другой стороны, знаменитая матрица смешивания кварков Кобаяши—Маскавы (KM) с тремя поколениями кварков явилась экономичным предложением, как согласовать данные по K^0 -структуре и наблюдения

нарушения СР. Наконец, проблема нейтральных К-мезонов (особенно мод распадов K_S) привела к следующему важному наблюдению, а именно, к открытию нарушения зарядовой инвариантности (С) и четности (Р)—значительному продвижению в познании природы слабых взаимодействий. И в 1988 г. исследование нейтральных К-мезонов остается ведущим направлением в экспериментах с фиксированной мишенью в Фермилабе, Брукхейвенской Национальной лаборатории и ЦЕРНе.

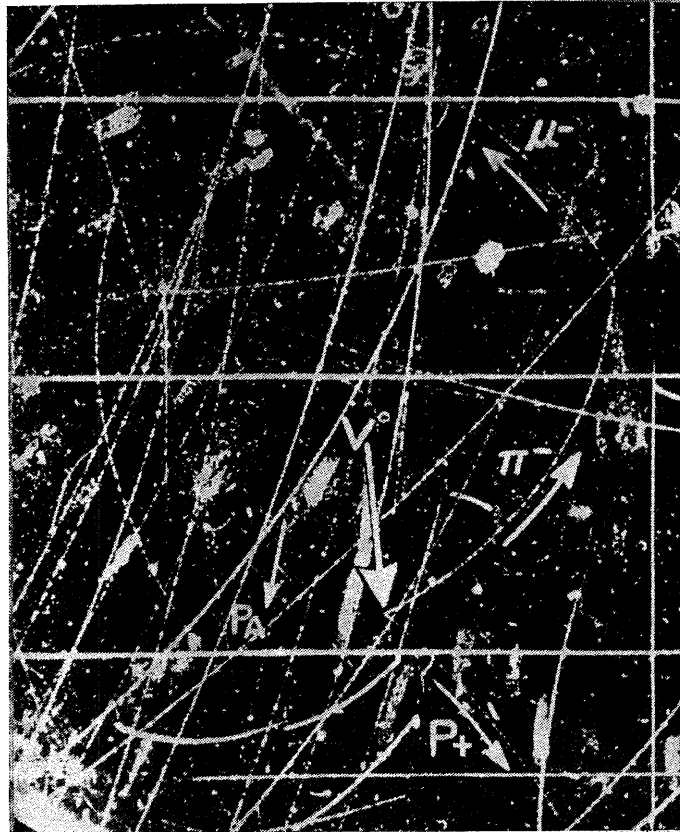


Рис. 2. Пример распада $\bar{K}_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \text{нейтральная частица}$. P_+ —пион, изучаемый с помощью ионизационных измерений. P_A — трек протона, используемый для ионизационной калибровки

III. Наблюдение нарушения сохранения четности и зарядовой инвариантности в распадах мезонов [6]. Летом 1956 г. в Брукхейвенской Национальной лаборатории Ли и Янг, обсудив загадку К-мезонов (так называемую θ , τ -загадку), предложили ряд процессов, в которых можно было бы проверить нарушение Р-четности в слабых взаимодействиях [19]. На первый взгляд все предложенные ими опыты казались довольно трудновыполнимыми, так как в то время думали об относительно малых эффектах. Только Ц. С. Ву, наш колумбийский коллега, попыталась со своими сотрудниками из Национального Бюро стандартов решить сложную проблему поляризации радиоактивного источника. Когда на рождественской вечеринке в 1956 г. Ву объявила, что предварительные результаты указывают на большие эффекты нарушения четности в распаде Co^{60} , стало казаться возможным, что цепочка процессов, нарушающих четность: $\pi \rightarrow \mu + \nu$, а затем и $\mu \rightarrow e + 2\nu$, не уменьшит эффект нарушения четности до его ненаблюдаемости. «Эффектом» в

этом случае была асимметрия испускания электронов относительно направления спина остановившегося поляризованного мюона.

Опыт работы в двух ключевых областях дал толчок серии событий, которые преобразовали обсуждение в пятницу на китайском ленче, сразу после Нового, 1957 г., в важное экспериментальное наблюдение, утром во вторник. Первым ключевым пунктом было то, что я очень много знал о том, как формируются пионные и мюонные пучки на невисском циклотроне. Еще в 1950 г. Джон Тинлот и я продумывали, как ввести пионы в камеру Вильсона. До того времени на существовавших циклотронах таких, как в Беркли, Рочестере и Ливерпуле, внешние пионные пучки были неизвестны. Мы вычерчивали траектории пионов, образующихся в результате столкновения 400 МэВ-протонов с мишенью внутри ускорителя, размещенной рядом с предельными внешними протонными орбитами, и открыли фокусирующее действие краевого поля. Отрицательные пионы действительно должны были собираться, выходя из ускорителя, в хорошо сфокусированный пучок. Оставалось только придумать крепление мишени и модифицировать толстую бетонную защиту для того, чтобы «выпустить их». Примерно через месяц мы получили первый внешний пионный пучок и увидели в камере Вильсона пионов больше, чем кто-либо когда-либо видел до нас.

Второй ключевой областью владел мой студент Марсел Вайнрих, который изучал время жизни отрицательных мюонов в различных материалах. Для получения своего мюонного пучка он проанализировал процесс распада на лету пионов в мюоны. Что было особенно нетривиальным, но что нетрудно воспроизвести в течение 30-минутной вечерней поездки из Колумбии в Невис в пятницу, так это то, что корреляция мюонного спина относительно его импульса в системе центра масс должна была сохраниться в кинематике распадающегося на лету пиона, давая в результате поляризованный мюонный пучок. Но оставался один полностью неясный вопрос: сохранит ли мюон свою поляризацию при его замедлении от 50 МэВ до полной остановки в твердом веществе. Казалось, имеется много возможностей захватить электрон и деполяризовать, но я вспомнил афоризм Раби «Спин—скользящая штука» и решил — почему бы не попробовать?

Завладев аппаратурой Вайнриха и завербовав Ричарда Гарвина — эксперта по экспериментам с прецессией спина (так же, как и почти во всем остальном), мы в пятницу ночью принялись за работу, которая достигла кульминации утром во вторник, когда мы получили нарушающую четность асимметрию в распределении электронов распада относительно мюонного спина с достоверностью в 50 стандартных отклонений. На рис. 3 показана очень простая установка, а на рис. 4 приведены данные измерений. Следующие 10 выводов содержались в публикации наших результатов:

1. Большая асимметрия, наблюдаемая в распаде $\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu$, доказывает сильную поляризацию μ^+ -пучка.
2. Угловое распределение электронов описывается формулой $1 + a \cos \theta$, где $a = -1/3$ с точностью 10%.
3. В процессах $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu$ четность не сохраняется.
4. По теореме Ли, Эме и Янга наблюдаемая асимметрия доказывает: нарушается инвариантность относительно зарядового сопряжения.
5. Определен g -фактор свободного μ^+ : $+2,00 \pm 0,10$.
6. Измеренный g -фактор и угловое распределение в мюонном распаде указывают на большую вероятность того, что спин μ^+ равен $1/2$.
7. Зависимость наблюдаемой асимметрии от энергии не сильная.
8. Отрицательные мюоны, остановившиеся в углероде, характеризуются асимметрией (так же с пиком назад) с коэффициентом $a = -1/20$, что составляет примерно 15% асимметрии для μ^+ .

9. Обнаружено, что магнитный момент μ^- , связанного в углеводе, отрицательный и согласуется в пределах точности с магнитным моментом μ^+ .

10. Обнаружена большая асимметрия для e^+ от поляризованных μ^+ , остановившихся в полиэтилене и кальции. Ядерные фотоэмюльсии дают в два раза меньшую асимметрию, чем в случае углерода.

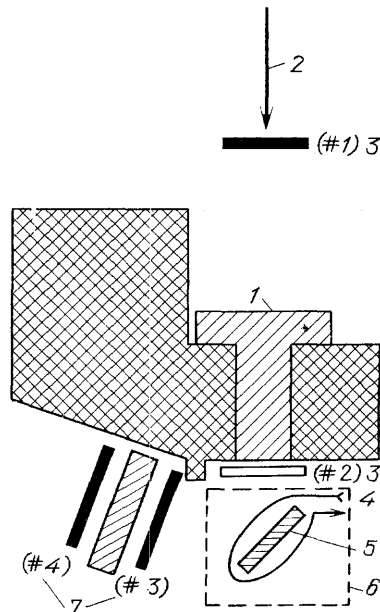


Рис. 3. Экспериментальная установка. Катушка намагничивания намотана прямо на углерод для получения однородного вертикального магнитного поля 79 Гс на ампер. (1 — углеродный поглотитель, замедляющий пионы, 2 — «пионный» пучок на 85 МэВ; 3 — счетчики (4×4 дюйма), запускающие временные ворота; 4 — ток намагничивания; 5 — углеродная мишень; 6 — магнитная защита; 7 — детектирующие счетчики, 6×5 дюйма)

Неплохо для длинного рабочего уикэнда.

Этот большой эффект установил двухкомпонентность нейтрино, которая вместе с деталями параметров распада, появившимися на следующий год, установили V—A-структуру слабых взаимодействий. Основной

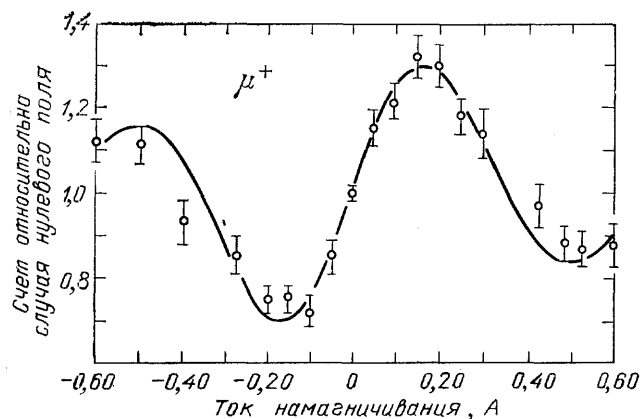


Рис. 4. Изменение темпа счета счетчиками 3—4 (счетчики 1—2 определяют начало «временных ворот») в зависимости от тока намагничивания. Непрерывная кривая отвечает предполагаемому угловому распределению электронов $1 - (1/3) \cos \theta$. С учетом разрешения счетчиков и «временных ворот»

кризис возник при использовании этой теории в области высоких энергий там, где слабое сечение грозило нарушить унитарность. Теоретические попытки предотвратить эту катастрофу натолкнулись на отсутствие каких-либо признаков существования реакции: $\mu \rightarrow e + \gamma$. Вероятность

распада, вычисленная Дж. Файнбергом, моим коллегой по Колумбийскому университету [20], была в 10^4 раз большей, чем следовало из экспериментальных данных. Этот кризис, осознанный Файнбергом, Ли и Бруно Понтекорво, побудил поставить двухнейтринный эксперимент. Были также созданы условия для возрастающе четкого рассмотрения гипотезы промежуточных векторных бозонов и, в конечном итоге, электрослабого объединения.

Открытие в 1957 г. нарушения четности в пионных и мюонных распадах дало мощное средство для дополнительных исследований и, действительно, оно поддерживало в течение десятилетий «пионные фабрики» в Колумбии, Чикаго, Ливерпуле, ЦЕРНе и Дубне, в основном изучающие физику, ставшую возможной благодаря поляризованным мюонам. Наиболее ранним применением было прецизионное измерение с помощью метода магнитного резонанса, магнитного момента мюона в Невисе в 1957 г. [1]. Высокий уровень точности в таких измерениях был ранее не известен физикам, занимавшимся частицами, которым пришлось научиться прецизионно измерять магнитные поля и переворот спина. Наиболее глубоким продолжением этого раннего измерения была длившаяся несколько десятилетий невероятно настойчивая работа в ЦЕРНе по измерению величины g для мюона. Это измерение дало одну из наиболее точных проверок квантовой электродинамики и налагает очень сильные ограничения на существование гипотетических частиц, чья связь с мюонами испортила бы современное прекрасное согласие теории с экспериментом.

Один из выводов статьи 1957 г. о четности выражает надежду: «...Представляется возможным, что поляризованные положительные и отрицательные мюоны станут мощным средством для исследования магнитных полей в ядрах, атомах и межатомных областях». Сегодня « μ SR» (мюонный спиновый резонанс) стал широко распространенным методом в физике твердого тела и химической физике, предметом ежегодных конференций, посвященных этой методике.

IV. Наблюдение реакций с нейтрино высоких энергий и существование двух типов нейтрино [7]. Поскольку это является темой лекции Мелвина Шварца, то я не буду вдаваться в детали этого исследования.

Двухнейтринный путь (кусочек составной картинке-головоломки—был бы, возможно, лучшей метафорой) к стандартной модели проходил через важную веху—кварковую гипотезу 1963 г. В ее ранней формулировке Гелл-Манном и Джорджем Цвейгом, три кварка, т. е. триплет, рассматривались как адекватные объекты наряду с другими попытками (как, например, модель Сакаты) конституентного объяснения группировки адронов в семейства.

До кварковой гипотезы предчувствие барион-лептонной симметрии двигало многими теоретиками. Один из них даже выступал против двухнейтринной гипотезы до опыта, разумеется, поскольку «...два типа нейтрино подразумевали бы существование двух типов протона». Однако после модели кварковых ароматов Бьёркен и Глэшоу в 1964 г. [21] трансформировали идею барион-лептонной симметрии в кварк-лептонную симметрию и ввели термин «чарм». Они предсказали новое семейство частиц, несущее новое квантовое число—чарм. Это развитие и его последующее дополнение механизмом Глэшоу, Илиопулоса, Майани (Glashow, Illiopolis, Maiani—GIM) в 1970 г. было другим важным ингредиентом становления стандартной модели [22].

В механизме GIM структура кварковых семейств и универсальность слабого взаимодействия объясняют отсутствие нейтральных слабых распадов с изменением странности. Это было сделано на основе предположения, что очарованный кварк является партнером второго нейтрино ν_μ .

С открытием в 1974 г. J/ψ в BNL/SLAC (Станфордский Центр линейных ускорителей—Stanford Linear Accelerator Center—SLAC) и с последующими экспериментами, установившими существование с-кварка, стандартная модель, по крайней мере с двумя поколениями, была экспериментально установлена. В эту модель была заложена дублетная структура кварков и лептонов, например (u, d) , (c, s) , (e, ν_e) , (μ, ν_μ) .

Измерения, которые последовали за этим наблюдением, подробно описаны в лекции Джека Штейнбергера. Большие нейтринные установки были сооружены в BNL, ЦЕРНе, Серпухове и Фермилабе. Они дали богатую информацию о свойствах слабого взаимодействия, включая как нейтральные, так и заряженные токи, о структурных функциях расщеплений кварков и глюонов в протонах и нейтронах, и о чисто лептонном электрон-нейтринном рассеянии.

V. Партоны и динамические кварки.

A. НАБЛЮДЕНИЕ ДИМЮОНОВ В 30 ГЭВ-ПРОТОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ [8]. Двухнейтринный эксперимент в его последующей фазе в BNL перешел к существенно большему детектору и на более мощном пучке нейтрино. Чтобы осуществить это, потребовалось вывести протонный пучок из ускорителя AGS, что вовсе не является простым делом, поскольку эффективность вывода только в 95% привела бы к неприемлемо высокому уровню радиации в ускорителе.

Однако возможность выводить пионы под углом 0° к пучку, а не 7° , как это было в первоначальном эксперименте, дала весьма значительный выигрыш в пионах, а значит, и в нейтрино. Таким образом, в эксперименте со вторым нейтрино, теперь уже при благотворном соревновании с ЦЕРНом, можно было ожидать тысяч событий вместо первоначальных 50.

Основная цель была найти W -частицы. Теория слабых взаимодействий могла предсказать сечения образования W для любой заданной массы в процессах:

$$\nu_\mu + A \rightarrow W^+ + \mu^- + A^*,$$

$$\bar{\nu}_\mu + A \rightarrow W^- + \mu^+ + A^*.$$

Поскольку W будет сразу распадаться, причем часто в заряженный лептон и нейтрино, то в конечном состоянии появятся два лептона с противоположными зарядами, вылетающие из одной вершины. На рис. 5, *a* и *b* показаны события— W -кандидаты. Относительно небольшая энергия нейтринных пучков BNL и ЦЕРНа, получаемых с помощью 30 ГэВ-протонов ($E_\nu \sim 1$ ГэВ), была причиной относительно малой эффективности поиска W -бозонов, но обе группы тем не менее смогли получить ограничения

$$M_W > 2 \text{ ГэВ}.$$

Затем мы попытались найти W -бозоны, которые образуются непосредственно 30 ГэВ-протонами, используя в качестве отличительного признака большой поперечный импульс мюона, возникающего в распаде W -бозона ($\sim M_W/2$). Эксперимент не обнаружил мюонов с большими импульсами и дал [23] улучшенное верхнее ограничение на массу W —около 5 ГэВ, которое, однако, не было свободно от теоретических неопределенностей описания процесса образования W -бозонов протонами. Эта методика счастливым образом привела к случайному открытию новой области исследований в экспериментальной физике высоких энергий.

Для наблюдения W -бозонов мишень, служившая для получения нейтрино, была убрана, и пучок протонов был направлен по бывшему 22-м пути пионов и похоронен в толстой нейтринной защите. Массивный

W -бозон мог проявить себя путем образования мюонов с большим поперечным импульсом. В 1984 г. было осознано, что этот метод захоронения пучка (beam dump) является чувствительным к короткоживущим источникам нейтрино [24], например к тяжелым лептонам, образующимся под действием 30-ГэВ протонов. Однако отдельный мюон, образующийся из гипотетического W , мог бы быть также членом пары, возникшей

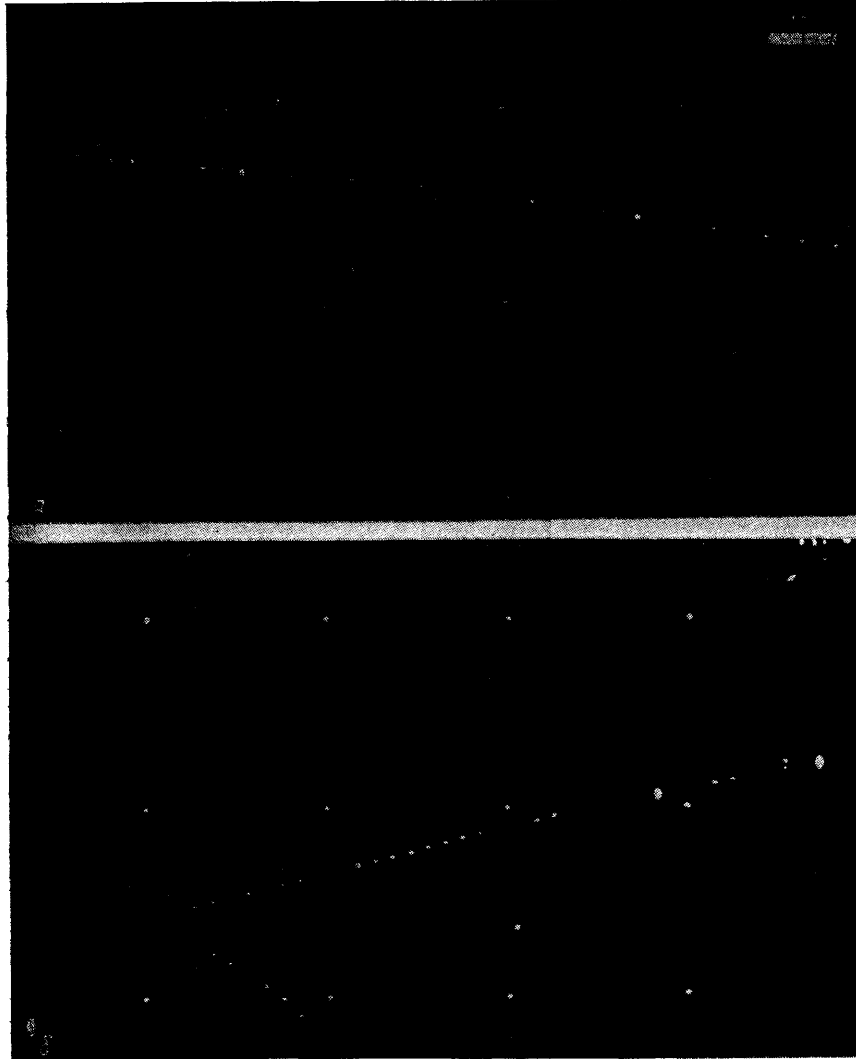


Рис. 5. *а* — Нейтринное событие с длинным мюонным треком и, возможно, вторым мюоном. *б* — Нейтринное событие с длинным мюонным треком и, возможно, электроном

за счет виртуального фотона. Это критическое замечание, сделанное Я. Ямагучи и Л. Окунем [24], преподнесло нам идею нового зонда для изучения малых расстояний: виртуальных фотонов.

Мы стали сразу проектировать эксперимент для наблюдения распада виртуального фотона в мюонные пары, надеясь, что уменьшение числа регистрируемых пар с ростом их эффективной массы является мерой физики малых расстояний, и что это уменьшение может быть прервано вкладом еще не открытых векторных мезонов. В этом случае наблюдение использовало бы светимость виртуальных фотонов, чьи пара-

метры могли быть определены из двухмюонного конечного состояния. В 1967 г. мы провели относительно простое исследование выхода мюонных пар при столкновении 30 ГэВ-протонов. Эмилио Заватини из ЦЕРНа, Джим Кристенсон—аспирант, участник эксперимента Фитча—Кроница, из Принстона и Питер Лаймон—постдок⁽²⁾ из Висконсина присоединились к этому эксперименту. На рис. 6 показана установка,

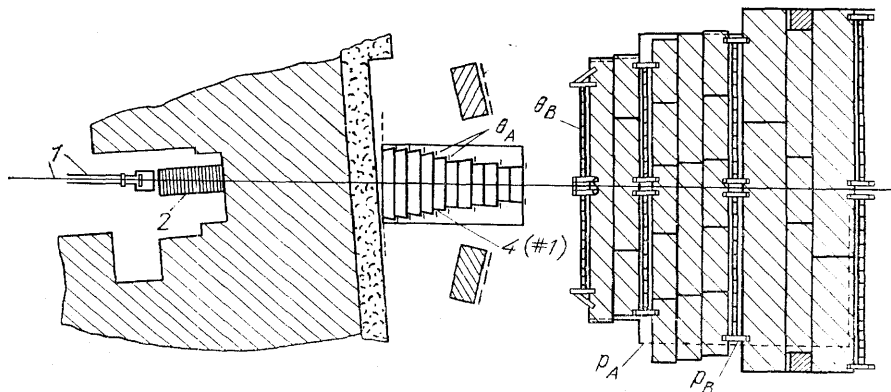


Рис. 6. Схема брукхейвского димюонного эксперимента. (1 — вакуумная трубка; 2 — урановая мишень; счетчики антипротонов выше и ниже 4 — годоскопа)

а на рис. 7—данные. Позднее нам разъяснили (Ричард Фейнман), что—это был инклюзивный эксперимент:

$$p + U \rightarrow \mu^+ + \mu^- + \text{«всё»}.$$

Выход мюонных пар быстро уменьшался в области от 1 ГэВ до кинематического предела—около 6 ГэВ, за исключением странного выступа («плеча») в области 3 ГэВ. Измерение мюонов осуществлялось по их пробегам, которые определялись жидкими и пластиковыми сцинтилляционными счетчиками, проложенными стальными пластинами. Каждый угловой интервал (всего их было 18) имел четыре интервала по пробегу и для пар мюонов это составляло всего 5000 массовых интервалов, по которым сортировались данные. Многократное рассеяние при минимальной толщине стали в 10 футов делало бесполезным использование более мелких интервалов. Таким образом, мы смогли только отметить, что «действительно, в области масс около 3,5 ГэВ наблюдаемый спектр может быть воспроизведен суммой вкладов резонанса и континуума с более крутым наклоном». Этот эксперимент, выполненный в 1968—1969 гг. был повторен в 1974 г. Обером и др. [25] с использованием магнитного спектрометра с многопроволочными пропорциональными камерами. Благодаря высокому разрешению выступ стал виден как высокий пик (см. рис. 7, а), названный J-частицей.

Огромный поток 10^{11} протонов/импульс делал наш эксперимент очень чувствительным к малым выходам, и, действительно, были зарегистрированы сигналы на уровне 10^{-12} от полного сечения. Решающим в развитии этого класса экспериментов со сверхвысоким темпом набора статистики явился абсолютно надежный (fool-proof) способ вычитания фона.

Вторым результатом этого исследования была его интерпретация, сделанная С. Дреллом и Т. М. Яном. Они постулировали образование виртуального фотона при аннигиляции кварка и антикварка в сталкивающихся частицах. Процессы с устоявшимся теперь названием Дрелла—Яна (так теоретики получают всю славу!) становились все более острым орудием в исследовании кварковой динамики.

Исследование этих процессов началось позже анализа глубоконеупругого рассеяния (DIS—deep inelastic scattering), осуществленного Бьёркеном и другими, в котором электроны, мюоны и нейтрино рассеиваются в протонах с большой потерей энергии. Процесс Дрелла—Яна в большей степени зависит от процессов сильного взаимодействия в начальном состоянии и от трудной проблемы поправок высших порядков.

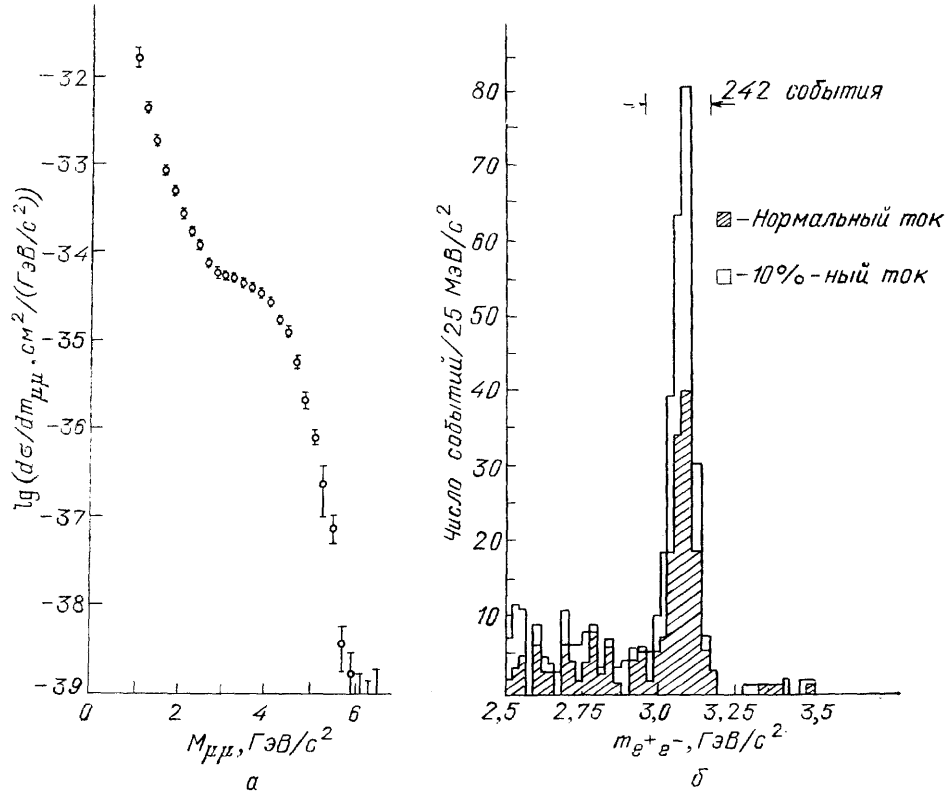


Рис. 7. а—Данные по выходу димюонов в зависимости от массы при 30 ГэВ. б—Данные по диэлектронам из эксперимента BNL с пиком при 3,1 ГэВ, названный «J»

Однако кинематика дилептонов дает прямой доступ к составной структуре адронов с возможностью экспериментального контроля важных параметров партонной функции распределения. И действительно, на всех протонных ускорителях процветает очень обширная «дрелл-яновская индустрия». Процессы Дрелла — Яна позволяют также изучать структурные функции пионов, каонов и антипротонов.

Важным следствием этой экспериментальной деятельности, сопровождаемой значительно большим потоком теоретических работ (наши первые результаты стимулировали появление свыше 100 теоретических работ!), было согласование без каких-либо свободных параметров довольно точных (временеподобных) данных [26] по «паре вылетающих лептонов» с нуклонной структурной функцией, определяемой с помощью неупругого рассеяния лептонов на нуклонах. Некоторые из наиболее точных данных по неупругому рассеянию были собраны группой CDHS Джека Штейнбергера, что он и описал в своей лекции. Согласие между такими разными экспериментами по изучению поведения кварк-глюонных составляющих сделало кварки почти столь же реальными, как и другие элементарные частицы, несмотря на ограничения, обусловленные невылетанием кварков.

Б. Наблюдение π -мезонов с большим поперечным импульсом в протон-протонных столкновениях при высоких энергиях [9]. Динамика кварк-партоновых составляющих была впервые убедительно продемонстрирована Джеймсом Бьёркеном в его анализе и интерпретации экспериментов по глубоко-неупругому рассеянию 1970 г. в SLAC. Конечно, необходимо также упомянуть партоновый подход Фейнмана. Работа Бермана—Бьёркена—Когута (BBK) [27] стала Библией для физиков, занимающихся жесткими процессами. В 1971 г. начал работать новейший ускоритель ISR в ЦЕРНе, и экспериментаторы получили возможность наблюдать лобовые столкновения 30 Гэв-протонов с 30 Гэв-протонами. ISR как ускоритель с самой высокой энергией был в 70-е годы прекрасным местом для осуществления стратегии наблюдений. Находясь под впечатлением мощности дилептонного метода в BNL и его указаниями на структуру, Родни Кул из Рокфеллеровского университета и я кооптировали Луиджи Дилелла из ЦЕРНа, для того чтобы помочь нам придумать метод, который помог бы нам увеличить разрешение за счет уменьшения светимости. Вспомним, что философия «beam dump» дала нам возможность наблюдать в BNL димьюоны с выходом менее 10^{-12} от полного сечения. Однако за это мы заплатили разрешением; это было примерно тем же самым, что использовать дно бутылки из-под кока-колы в качестве линзы для «Никона». Баланс разрешения и светимости должен был быть решающим элементом в улучшении возможностей дилептонных экспериментов.

Мы узнали от Карло Руббиа о превосходных свойствах свинцового стекла как электромагнитного спектрометра. Фотоны и электроны разноразножаются в среде с большим Z и теряют всю свою энергию на относительно небольшой длине пробега. Улучшенная технология изготовления дала плотное, но прозрачное свинцовое стекло, из которого черенковский свет мог быть эффективно собран высококачественными фотумножителями. Относительно низкая чувствительность свинцового стекла к пионам и каонам по сравнению с электронами является его большим преимуществом. Шесть месяцев тяжелой работы на брукхейвских пробных пучках дали нам хорошее владение этой методикой и уважение к ней и к ее наиболее слабому месту—процессу калибровки.

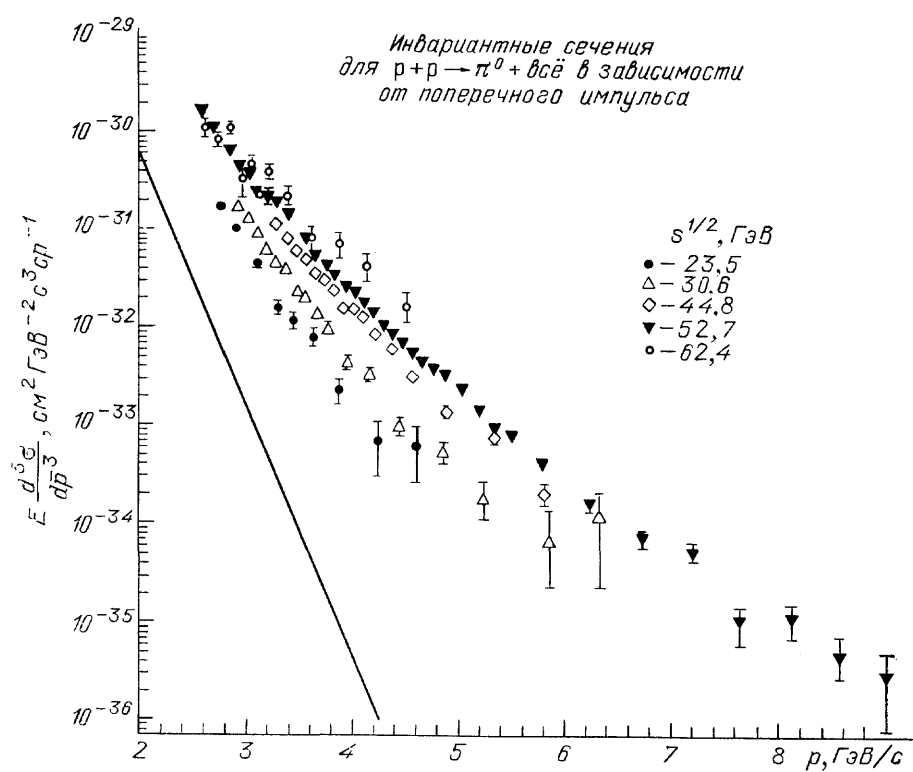
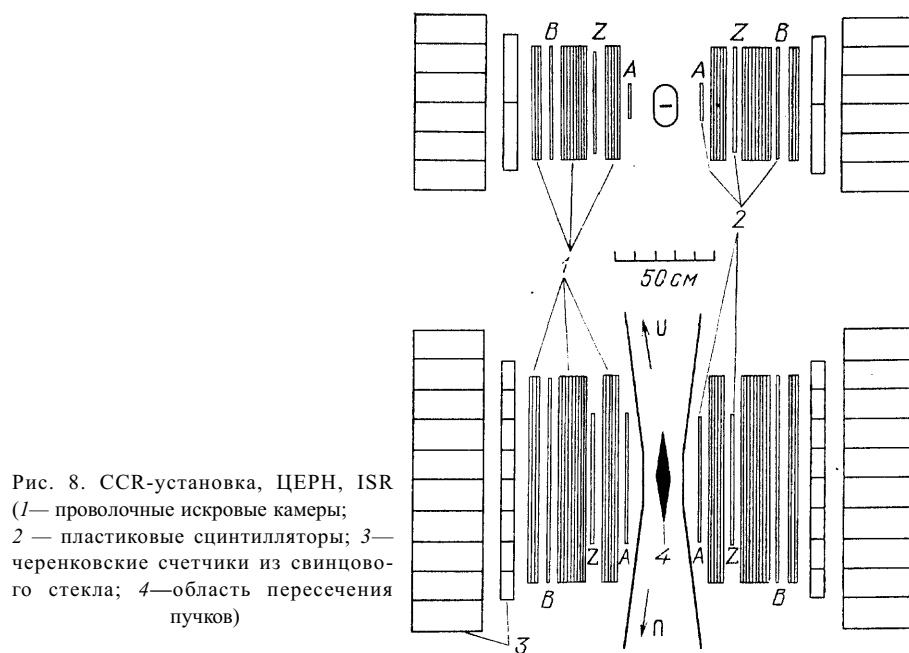
Идея в то время заключалась в том, чтобы использовать две установки, расположенных с разных сторон относительно вершины взаимодействия, каждая из которых охватывала бы угол около одногостерадиана. На рис. 8 показана аппаратура CCR, а на рис. 9—данные.

Группа ЦЕРН—Колумбия—Рокфеллер (CERN—Columbia—Rockefeller—CCR) была собрана в 1971 г. для улучшения дилептонных результатов BNL, но теперь были выбраны электронные пары, и точка взаимодействия на этом самом первом адронном коллайдере была окружена большим набором детекторов из свинцового стекла. И на этот раз открытие J/ψ не состоялось из-за интереса к фону, который был совершенно неожиданным, но и опять была открыта новая методика изучения малых расстояний — испускание адронов с большими поперечными импульсами.

До исследований на ISR существовало удобное правило, согласно которому образование адронов должно экспоненциально падать с ростом поперечного импульса. Результат CCR заключался в том, что при P_t в 3 ГэВ наблюдался на несколько порядков больший выход отдельных π_0 -мезонов, надежно зарегистрированных счетчиками высокого разрешения из свинцового стекла. Наблюдаемая вероятность образования была:

$$\sim P_t^{-8} \text{ при } s^{1/2} = 62 \text{ ГэВ,}$$

что дало строгий тест кварк-партоновой модели в начале 70-х годов, а

Рис.9. Данные, полученные из выхода инклюзивных π_0 -мезонов

через несколько лет и КХД. Другие эксперименты на ISR скоро подтвердили результаты CCR, но только CCR обладала данными, качество и количество которых было достаточно для проведения феноменологической подгонки. Оказалось, что можно было в итоге перейти прямо от этих данных к партон-партонным (или кварк-кварковым и т. д.) жестким процессам рассеяния. Изучение «отдельных инклюзивных π_0 -мезонов при больших P_t » переросло в изучение более типичной струйной структуры, которая теперь так эффектно проявляется в данных протон-антипротонного коллайдера (рис. 10).

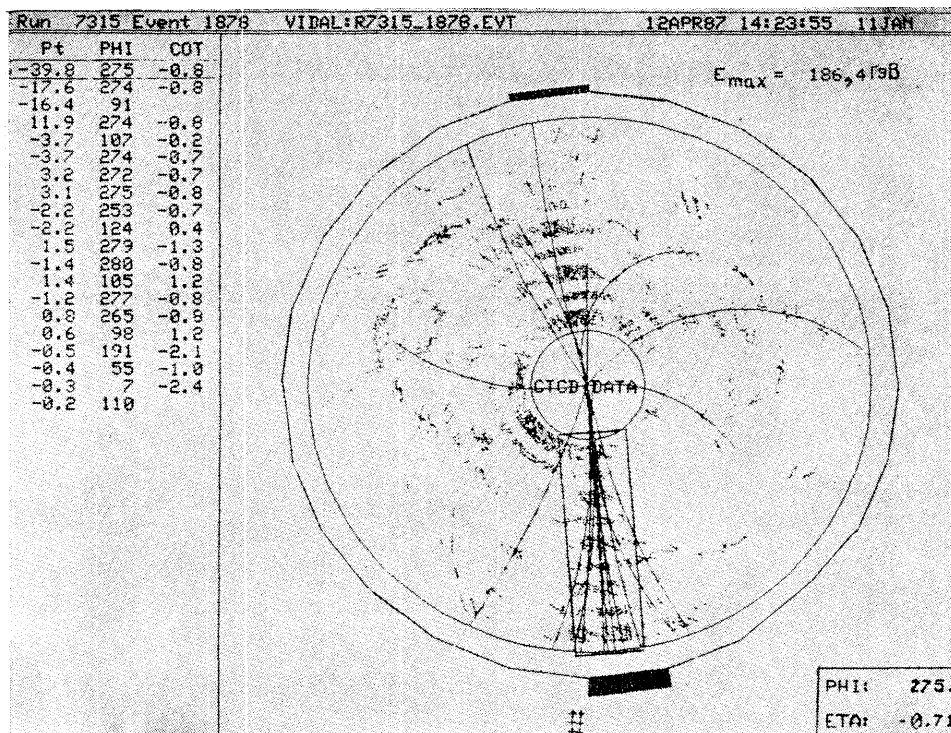


Рис. 10. CDF-двухструйное событие при 1,8 ТэВ, Фермилаб

Таким образом, дилептонные приключения с использованием сцинтилляционных счетчиков в BNL и измерения с использованием свинцового стекла на ISR инициировали независимые программы, давшие вклад в формирование убеждения о том, что протоны и пионы—связанные состояния систем запертых кварков, сильно взаимодействующих друг с другом посредством обмена глюонами, которые, в свою очередь, способны стать парами виртуальных $q\bar{q}$.

VI. Третье поколение. Наблюдение димюонного резонанса при 9,5 ГэВ в 400 ГэВ-протон-ядерных столкновениях [10]. В 1969—1970 гг. результаты BNL по димюонам не только стимулировали появление предложения эксперимента на ISR, но также и предложение провести эксперимент с высоким разрешением лептонных пар в Фермилабе (тогда известной как NAL и еще как большая дыра в земле). К тому времени, когда ускоритель стал работать в 1972—1973 гг., был установлен одноплечевой лептонный детектор, в котором использовалась очень эффективная комбинация магнитных измерений и свинцового стекла для идентифи-

кации электронов с примесью пионов 10^{-5} . Такая эффективность «отбраковки» необходима, когда наблюдается только одна частица.

В то время как коллаборация Колумбия—Фермилаб—Стони-Брук в 1974 г. была полностью поглощена изучением «прямых» электронов, в BNL и SLAC был блестяще открыт J/ψ . Оказалось, что однолептонные эффекты относительно неплодотворны, и в 1975 г. начался первоначально предложенный эксперимент с парами лептонов. В нескольких сериях измерений число событий с массами пар, превышающими 4 ГэВ, постепенно росло и в конце концов достигло нескольких сотен. В этот период намеки на резонансные пики то появлялись, то исчезали. Группа училась тому, как проводить эти сложные измерения. В начале 1977 г. был наконец найден ключ к проведению значительно улучшенного дилептонного эксперимента. Старшие дипломированные физики в коллаборации—Стив Херб, Уолтер Иннес, Чарльз Браун и Джон Иох составили редкое сочетание опыта, энергии и проницательности. Новое размещение мишени, защиты и элементов детектора было направлено на изучение лептонных пар, причем адроны поглощал бериллий, фактически 30 дюймов бериллия. Уменьшение многократного рассеяния остающихся мюонов улучшало разрешение по массе до 2%, что намного лучше по сравнению с 10—15% в эксперименте BNL 1968 г. Фильтрация всех адронов позволила увеличить число протонов, падающих на мишень, более, чем в 1000 раз по сравнению со случаем открытой геометрии. Компромисс между светимостью и разрешением был оптимизирован благодаря пристальному вниманию к устранению трещин и тщательно обдуманному расположению защиты. Вспомним, что этот тип наблюдения может потребовать столько, сколько может выдержать детектор, ~ 1 % имеющихся протонов. Многопроволочные пропорциональные камеры и триггерные сцинтилляторы были придвинуты как можно ближе к мишени для получения максимального акцептенса. «Мюонность» проверялась до и после отклонения траектории в железных торроидах, использовавшихся, чтобы дополнительно измерить импульс мюона и уменьшить фон от проникающих сквозь железо адронов (punch-throughs). На рис. 11, *a* и *б* показана установка.

В данных, полученных в течение месяца весной 1977 г., в которых было зарегистрировано около 7000 пар с массами больше 4 ГэВ, появился странный, асимметричный широкий горб, прерывающий континуум Дрелла — Яна в области около 9,5 ГэВ. В горбе было 800 событий с очень гладким континуумом Дрелла—Яна под ним и практически без фона, который измерялся путем поиска образования (одновременно) двух мюонов одного знака. Резонанс был абсолютно четким. Он был назван ипсилон, и статья была отослана в августе 1977 г. К сентябрю, имея 30000 событий, мы увидели, что горб состоит из трех четко разделенных пиков, причем третий «пик» представлял собой хорошо заметный выступ (рис. 12, *a*, *б*). Эти состояния были названы $\Upsilon, \Upsilon', \Upsilon''$. Вскоре после этого на ускорителе DORIS в DESY ипсилон был получен в e^+e^- -столкновениях, что также подтвердило единственную правдоподобную интерпретацию ипсилона как связанного состояния нового b -кварка с его античастицей \bar{b} . А Υ' и Υ'' были 2S- и 3S-состояниями этого нерелятивистского «атома». В стандартной модели у нас имелась возможность выбора заряда b -кварка— $+2/3$ (типа u) и $-1/3$ (типа d). Данные Фермилаба показали, что заряд $-1/3$.

Последствия были относительно быстрыми. Открытие Υ вместе с открытием τ -лептона Мартином Перлом и его коллегами [28] в SLAC, сделанным немного раньше, добавило к стандартной модели частицы третьего поколения: b -кварк с массой 5 ГэВ и τ -лептон с массой 2 ГэВ. Это полностью подтвердило рассуждения Кобаяши—Маскавы о том, что для нарушения CP-симметрии может потребоваться третье поколе-

ние. (Понятно, что здесь мы сильно переупрощаем усилия теоретиков.)

Система $\bar{b}b$ была прекрасным дополнением к $\bar{c}c$ (чармонию) как измерительной лаборатории для изучения потенциальных моделей сильных кварк-кварковых сил. Чтобы заняться этой интереснейшей системой, я организовал группу из Колумбийского университета и Стони-

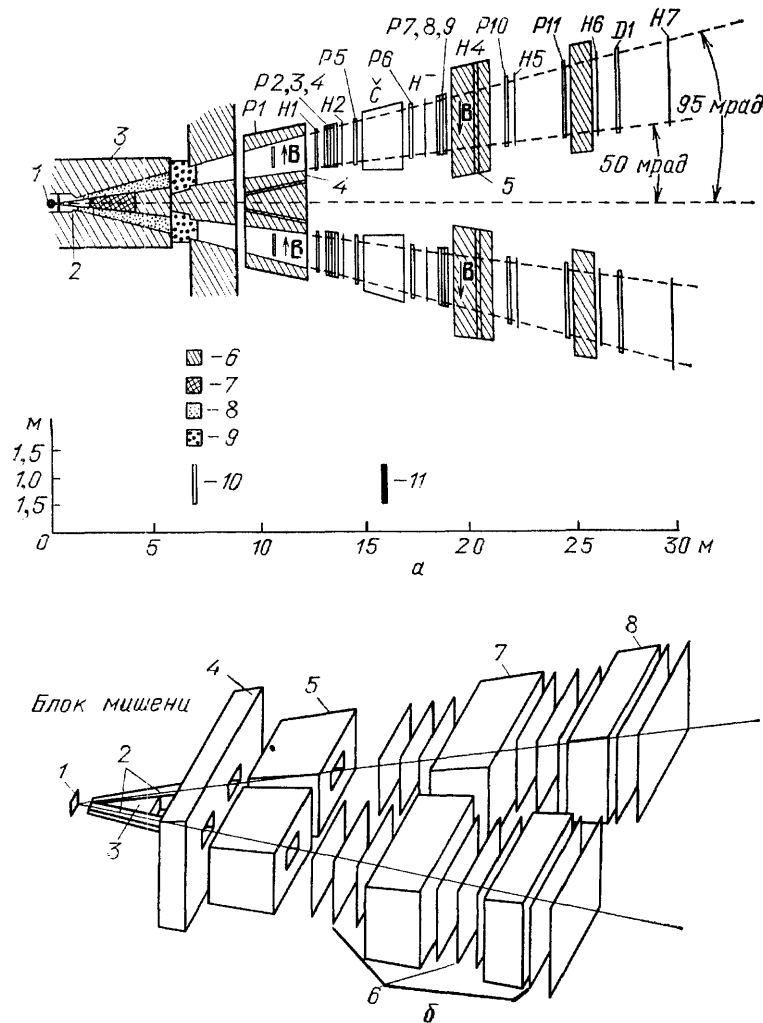


Рис. 11. *а*—Схема установки, каждое плечо спектрометра включает в себя 11 пропорциональных камер $P1-P11$, 7 сцинтилляционных годоскопа $H1-H7$, дрейфовую камеру $D1$ и газонаполненный черенковский счетчик C . (1 —мишень; 2 —перемещаемый поглотитель (Cu или Be); 3 —блок мишени; 4 —дипольный магнит; 5 —блоки намагниченного железа; 6 —сталь; 7 —тяжелый металл; 8 —бериллий; 9 — CH_2 ; 10 —сцинтилляционный счетчик; 11 —пропорциональная проволочная камера.) *б*—Схематическое изображение димьюонного эксперимента в Фермилабе, который привел к открытию ипсилон-частицы (1 —мишень; 2 —бериллиевый поглотитель; 3 —вольфрамовая мишень; 4 —железная стена; 5 —анализирующий магнит; 6 —электронные детекторы; 7 —блок намагниченного железа; 8 —железный поглотитель)

Брук (CUSB) для создания спектрометра из свинцового стекла и йодистого натрия, предназначенного для ускорителя CESR, идеально подходящего для изучения Υ -спектроскопии. Эта коллаборация Колумбии и Стони-Брук стала получать результаты в 1979 г. и вскоре помогла в идентификации состояния $4S$ [11]. Состояние $4S$ —особенно важно, так

как оно находится выше порога адронных распадов в B -состояния, т. е. в мезоны, содержащие один b -кварк и более легкий антикварк. Дальнейшие эксперименты по изучению ипсионов были проведены также и в Фермилабе. Они использовали ряд ухищрений для дальнейшего улучшения разрешения без потери светимости (рис. 13). К настоящему времени, в этой новой спектроскопии тяжелых кварков идентифицировано много других состояний, включая и P -состояния.

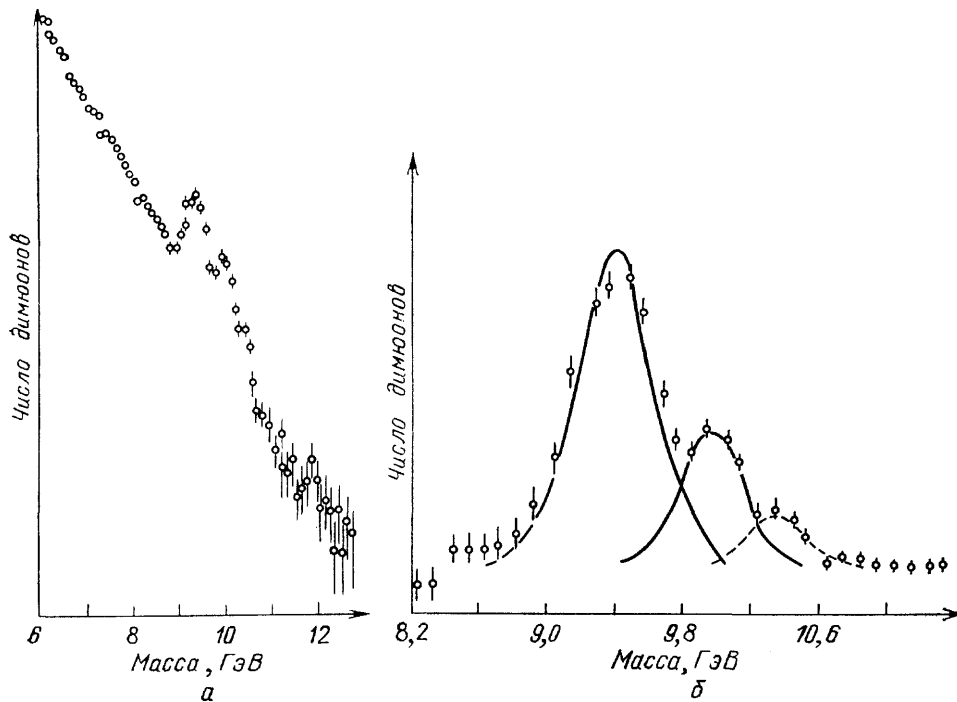


Рис. 12. a —Пики в континууме Дрелла — Яна. b —Пики с вычтенным континуумом

Недавние исследования B -состояний на электрон-позитронных коллайдерах указывают на то, что B -система может быть физически гораздо богаче, чем аналогичная D -система с чармом. B^0 -мезоны смешиваются подобно K^0 и \bar{K}^0 -частицам. Цитируя одного из ведущих феноменологов ЦЕРНа Г. Альтарелли: «Наблюдение группой ARGUS в DESY сравнительно большого $B^0 - \bar{B}^0$ -смешивания... было наиболее важным экспериментальным результатом года (1987) в физике частиц». Имеется большая вероятность того, что CP -нарушение, которое до сих пор наблюдалось только в K^0 -системе, может быть также наблюдаемым в B^0 -системе. B -фабрики, обычно это e^+e^- -ускорители с большой светимостью, предлагаются в различных лабораториях мира. Ускоритель в Корнелли модернизируется для получения порядка 10^6 $B\bar{B}$ пар в год. Тем временем на адронных ускорителях пытаются решить очень сложную экспериментальную задачу детектирования B -мезонов (например, в Фермилабе на фиксированной мишени при 800 ГэВ) при фоне неупругих столкновений, в 10^6 раз превышающем эффект. Грандиозный детектор был предложен для коллайдера Фермилаба, с целью получения 10^{10} $B\bar{B}$ пар в год. Если судить по результатам 1988 г., измерения в B -физике будут играть все более важную роль в физике частиц в течение следующего десятилетия. Стимулом является понимание того, что, по всей видимости, третье поколение необходимо для объяснения нарушения CP . Вместе с нарушением барионного числа, нарушение CP играет ключевую роль в нашем понимании эволюции Вселенной, включая

вопрос — почему мы здесь. Для физиков, имеющих перед умственным взором менее грандиозный вид, параметры кварковой матрицы смешивания являются частью базиса нашей стандартной модели, и b -физика является ключом к этим исключительно важным параметрам.

Третье поколение еще нуждается в топ-кварке, и сейчас, когда мы выступаем здесь, поиски его ведутся на коллайдере $S\bar{p}pS$ в ЦЕРНе и коллайдере Фермилаба.

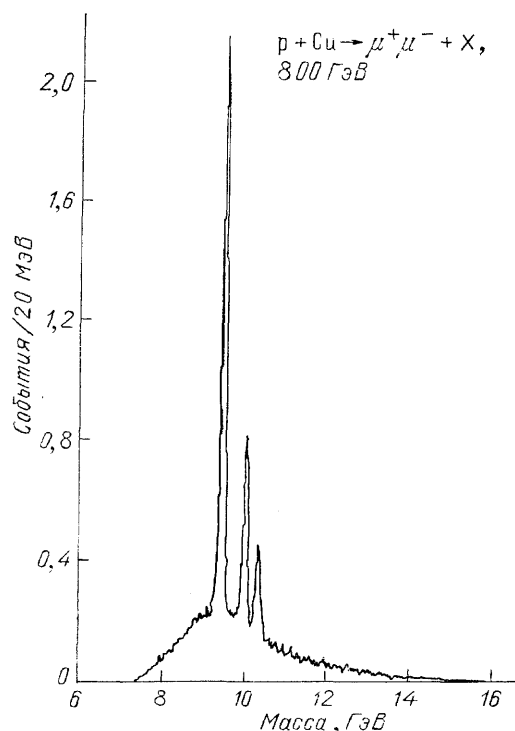


Рис. 13. Данные E-605, Фермилаб

Оба коллайдера имеют очень хорошие светимости порядка 200—400 нб·р⁻¹ в неделю. Машина Фермилаба имеет бесспорное преимущество: 1,8 ТэВ по сравнению с 0,63 ТэВ в ЦЕРНе, но все зависит от качества данных, от мудрости, вложенной в конструкцию детекторов, и конечно, от массы t -кварка. Кажется, можно безошибочно предсказать, что скоро появится статья, возможно, озаглавленная так: «Наблюдение топ-кварка».

VII. Главные проблемы в физике нейтрино сегодня. Я завершаю эту лекцию кратким обзором нашего незнания о нейтрино. Данные по взаимодействию нейтрино находятся в хорошем согласии с электрослабой теорией стандартной модели и поэтому их будут продолжать использовать для улучшения наших знаний о кварковых структурных функциях, важнейшей величине—угле Вайнберга и т. д. Однако мы еще не наблюдали ν_τ , мы не знаем, существует ли четвертое нейтрино, мы не можем ответить на крайне насущные вопросы о возможности массы у нейтрино, о смешивании различных ароматов нейтрино, о стабильности нейтрино, о том, имеет ли оно магнитный момент и, конечно, о природе антинейтрино, например, является ли оно дираковским или майорановским. Два фактора делают эти вопросы особенно интересными: 1) астрофизические следствия ответов на эти вопросы внушают благо-

говение, 2) точка зрения, высказанная Вайнбергом о том, что «...масса нейтрино высвечивает некоторые из наиболее глубоких вопросов в физике частиц». Это потому, что в стандартной модели с обычными кварками, лептонами и калибровочными бозонами нельзя ввести перенормированное взаимодействие, которое может нарушить сохранение лептонного заряда и дать массу нейтрино. Таким образом, кажется весьма правдоподобным, что наблюдение массы было бы проявлением новой физики, лежащей далеко за пределами стандартной модели, возможно при 10^{15} ГэВ, масштабе большого объединения.

А. ТРЕТЬЕ НЕЙТРИНО, ν_τ . Трехнейтринный эксперимент не был пока проведен. Хотя данные по распаду τ -лептона очень хорошо подтверждают существование ν_τ , однако прямое доказательство должно еще появиться.

Технически проблема заключается в том, что необходимо пододвинуть мишень к детектору как можно ближе и отвести в сторону неостанавливаемые магнитом мюоны. Поток ν_τ не может быть надежно предсказан, а конфигурация защиты требует больших затрат. В этом главная причина того, почему такой эксперимент не был проведен до сих пор.

Б. ЧЕТВЕРТОЕ НЕЙТРИНО? Этот вопрос является кратким выражением проблемы числа поколений. Поиски более тяжелых кварков и/или лептонов являются *sine qua non*⁽³⁾ новых ускорителей, и к настоящему времени они все дали отрицательные результаты, которые приводятся просто в виде ограничений: $M_Q > 40$ ГэВ (то же, что и для 1-кварка) и $M_L > 20\text{—}40$ ГэВ, в зависимости от типа тяжелого лептона и от предположений о массе сопутствующего ему нейтрино [29]. Важные ограничения следуют из астрофизики, в которой распространенность гелия связана с числом типов легких нейтрино [30]. Возможно, что существование еще одного типа легкого нейтрино может быть согласовано с аргументами нуклеосинтеза Большого Взрыва. Связь между космологической моделью Большого Взрыва и числом поколений в стандартной модели является одним из наиболее романтических эпизодов в интимном союзе физики частиц и *conditio sine qua non* и космологии (ранней Вселенной). Фактически, одним из наиболее важных аргументов в пользу космологии Большого Взрыва является первичный нуклеосинтез: «варка» легких элементов в котле Вселенной, начавшаяся при $t \approx 1$ с. Астрофизики ухитряются правильно получать концентрации дейтерия, гелия, лития. Ключом является гелий 4; его распространенность—чувствительный индикатор общей радиационной плотности во время его образования. Вклад в эту плотность дают все легкие, релятивистские частицы, т. е. фотоны, электроны, три поколения нейтрино и их античастицы. Дополнительное поколение, содержащее легкое нейтрино, вероятно, не разрушило бы согласие, но поставило бы его под сомнение. Вывод: может существовать четвертое поколение, но пятое поколение с легкими частицами приведет к серьезной проблеме для наших коллег астрофизиков. Конечно, может существовать нечто, что не входит в структуру поколений. Эксперимент, который скоро даст результаты, начал проводиться на e^+e^- -машинах в ЦЕРНе на Большом электрон-позитронном коллайдере (Large Electron Positron Collider—LEP) и на Стэнфордском линейном коллайдере (Stanford Linear Collider—SLC), где ширина Z^0 -бозона даст некоторое указание на число нейтринных пар, в которые он может распадаться. В остальном основной современный интерес к нейтрино связан с астрофизическими аргументами, относящимися к Темному веществу. Это в свою очередь переключает внимание на измерения массы нейтрино, к которым мы сейчас и переходим.

В. МАССЫ НЕЙТРИНО И ОСЦИЛЛЯЦИЯ. В стандартной модели массы нейтрино положены равными нулю и как полный лептонный заряд L , так и флэйворный лептонный заряд L_i ($i=e, \mu, \tau$), сохраняются. Массы нейтрино «открывают окно в мир за пределами стандартной модели», и сейчас они стали одним из наиболее интересных вопросов физики частиц. Возможность осцилляции означает, что процесс $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ не является строго запрещенным, как предполагалось нашим двухнейтринным экспериментом. Эта проблема особо подчеркивается космологами, которые все чаще вторгаются в методичное развитие физики частиц (что за радость!), и кризисом солнечных нейтрино, который обсуждается в течение нескольких десятилетий. Кризисом называют разногласие между числом наблюдаемых ν_e , приходящих от Солнца, и потоком, который предсказывала наша лучшая совокупность знаний. Наблюдение ν -сигналов от Сверхновой 1987А возбудило дополнительный интерес к данной проблеме.

На возможность осцилляций было впервые указано Б. Понтекорво в 1967 г. [30]. Смешивание различных сортов нейтрино аналогично смешиванию кварков, которое задается матрицей КМ. На сегодняшний день известны многочисленные попытки наблюдения осцилляций. Они проводятся на ускорителях высоких энергий, на мезонных фабриках, на реакторах и, конечно, в околосолнечном пространстве. В последнем случае проблема является теоретической—понять недостаток нейтрино, образующихся в процессах, которые, как известно, необходимы для поддержания светимости Солнца. Только проблема солнечных нейтрино приковала к себе внимание по меньшей мере 14 больших экспериментальных групп во всем мире и во много раз большее число теоретиков!

К сегодняшнему дню не получено убедительных доказательств существования массы или осцилляций нейтрино. Косвенные данные о разности масс и данные других экспериментов, которые относятся непосредственно к массам нейтрино, суммируются следующим образом:

$$m(\nu_e) < \sim 20 \text{ эВ},$$

$$m(\nu_\mu) < 0,25 \text{ эВ},$$

$$m(\nu_\tau) < 35 \text{ эВ}.$$

Ограничения на осцилляции обычно даются в виде пределов на разности масс Δ и на фазовый угол θ , который определяет степень смешивания. Медленно и непреклонно пространство разрешенных значений параметров на двумерной диаграмме (Δ^2 в зависимости от $\sin 2\theta$) оттесняется в нижний левый угол, хотя логарифмические масштабы будут стимулировать экспериментаторов изобретать все более чувствительные опыты.

Космологи убеждают нас, что мы живем во Вселенной, в которой основная масса вещества является темной (несветящейся) и пока не идентифицированной. Большая часть этого вещества (говорят они), по-видимому, не барионы, а какие-то массивные слабовазаимодействующие частицы (Weakly Interacting Massive Particles—WIMP's). Из принципа минимальной сложности следовало бы, что эти частицы—нейтрино с условием, что $\Sigma m_i \sim 20 \text{ эВ}$ ($i=e, \mu, \tau$). Это выдвигает на первое место ν_e , что было подчеркнуто Харари, который указал на повторное изучение процесса $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ как на настоятельную необходимость.

Другие эксперименты, которыми заняты новые пионные фабрики, (SIN, TRIUMF, LAMPF) ищут (малые) нарушения закона сохранения лептонного флэйворного заряда в очень чувствительных опытах по

поиску таких процессов как

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma \text{ (снова, но теперь при } B \sim 10^{-11})^{(4)}$$

и

$$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^- \text{ (} B < 10^{-12} \text{)}.$$

Развитие экспериментальной техники и ускорителей совместно улучшает ограничения на эти величины примерно на порядок каждые семь лет. Для полноты необходимо также указать на поиски редких распадов К-мезонов на «каонных фабриках». Пионные, каонные и В-фабрики с очевидностью указывают на индустриализацию физики частиц. Физическая цель всех этих исследований — поиски очень слабых проявлений новой физики, которая ожидается при энергиях порядка ТэВ и выше. Зрелому экспериментатору они доставляют радость, поскольку сочетают в себе возможность наблюдений (когда и если они будут) с заботой о деталях прецизионных измерений.

Ко всему сказанному выше необходимо было бы добавить исследования структурных функций нового поколения на нейтринных пучках, возможно меченых. Суммируя все, можно сказать, что двухнейтринный эксперимент 1962 г., который чествуется на этом собрании, привел к появлению ряда направлений, которые и в 1988 г. продолжают играть ведущую роль в физике частиц и в ее новых областях: астрофизике и космологии ранней Вселенной.

VIII. Заключительные замечания. Я был бы рад закончить эту историю стандартной модели, которая вообще не является историей. Время от времени она следует главным путем, например, когда двухнейтринный эксперимент указал на роль флэйвора и поколений в структуре стандартной модели. Более часто она проходит по боковым тропкам, поскольку собственные эксперименты были именно на этих путях. Поэтому мы не рассматривали такие важные вехи, как открытие нейтральных токов, τ -лептона, W- и Z-бозонов, чармония и т. д. Мы также сокрушительно пренебрегли существенными теоретическими вкладами и проскочили через цвет, нарушение симметрии и т. д.

Но больше всего я сожалею о недостатке места для более подробного рассказа об ускорителях, детекторах и людях, которые их вызвали к жизни. Невисский циклотрон был построен под руководством Юджина Буса и Джеймса Рейноутера; AGS—самая успешная из машин—Кеном Грином, Эрнстом Курантом, Стенли Ливингстоном и Харлендом Снайдером; Фермилаб, конечно,—Робертом Вильсоном и его выдающимися сотрудниками. Своим собственным опытом работы с детекторами я обязан во многом Жоржу Шарпаку из ЦЕРНа и Вильяму Сиппачу из Колумбии. Пренебрегая этими деталями, я вспоминаю моего учителя, друга и руководителя моей диссертации Джильберто Бернардини, который, когда ему показывали внутренности невисского циклотрона, воскликнул: «Покажите мне только, где выходит пучок». В заключение я хочу загладить вину перед теоретиками, которые, конечно, сыграли решающую роль в том, чего мы достигли. Я получил большое удовольствие и пользу от общения со многими физиками теоретического вероисповедания, но больше всего от Т. Д. Ли, М. Велтмана и Дж. Д. Бьёркена.

(Перевод с англ. В. М. Беляева.

Переработан и отредактирован Л. Борисовым)

ПРИМЕЧАНИЯ К ТЕКСТУ

¹ Расёмон (Rashomon, япон.),—возможно, это имя собственное, связанное с новеллой Рюноске Акутагавы «Ворота Расёмон» (Акутагава Р. Новеллы.—М., 1989.—С. 29). Во вступительной статье А. Стругацкого отмечается, что благодаря Акутагаве

(и успехам японской кинематографии) название Расёмон стало широко известно в мире. Вероятно, что использование этого названия объясняется тем, что в данной новелле независимо описывают происходившие события их участники. Это название указывает на стиль описания событий. (Примеч. пер.)

² Postdock (англ.) — научный сотрудник, недавно получивший докторскую степень—PhD, эквивалентную кандидатской степени в нашей стране. (Примеч. ред.)

³ Непременное условие («без которого нет», латин.) (Примеч. ред.)

⁴ B (от branching ratio, англ.) — относительная вероятность. (Примеч. ред.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Coffin T., Garwin R. L., Lederman L. M., Penman S., Sachs A. M.//Phys. Rev. **1957**. V. 106. P. 1108.
2. Devons S., Gidal G., Lederman L. M., Shapiro G.//Phys. Rev. Lett. **1963**. V.5 P.330
Meyer S. et al.//Phys. Rev. **1963**. V. 132. P. 2693.
3. Ellsworth R. W., Melissinos A. C., Tonlot J. H., von Briesen H., Jr., Yamanouchi T., Lederman L. M., Tannenbaum M., Cool R. L., Maschke A.//Ibidem **1968** V.165 P. 1449.
Sargent C. P., Rinehart M., Lederman L. M., Rogers K. C.//Ibidem. **1955** V.99 P. 885.
4. Blumenfeld H., Chinowski W., Lederman L. M.//Nuovo Cimento. **1958**. V. 8. P. 296.
5. Lande K., Booth E. T., Impeduglia J., Lederman L. M.//Phys. Rev. **1956**. V.103. P. 1901.
6. Garwin R. L., Lederman L. M., Weinrich M.//Ibidem. **1957**. V. 105. P. 1415.
7. Danby G., Gaillard J. M., Goulianos K., Lederman L. M., Mistry N., Shwartz M., Steinberger J.//Phys. Rev. Lett. **1962**. V. 9. P. 36.
8. Christenson J. H., Hicks S., Lederman L. M., Limon P. J., Pope B. G., Zavattini E.//Ibidem. **1970**. V. 25. P. 1523.
9. Busser F. M., Camilleri L., DiLerra L., Gladding G., Placci A., Pope B. G., Smith A. M., Yoh J. K., Zavattini E., Blumenfeld B., Lederman L. M., Cool R. L., Litt L., Segler S. L.//Phys. Lett. Ser. B. **1973**. V. 46. P. 471.
10. Herb S. W., Hom D. G., Lederman L. M., Sens J. C., Snyder H. D., Yoh J. K., Appel J. A., Brown B. C., Brown C. N., Innes W. R., Ueno K., Yamanouchi T., Ito A. S., Jostlein H., Kaplan D. W., Kephart R. D.//Phys. Rev. Lett. **1977**. V.39. P.252.
- [11] Finocchiaro G., Giannini G., Lee-Franzini J., Schamberger R. D., Jr., Sivertz M., Spencer L. J., Tuts P. M., Bohringer T., Constantini F., Dobbins J., Franzini P., Han K., Herb S. W., Kaplan D. M., Lederman L. M., Mageras G., Peterson D., Rice E., Yoh J. K., Levman G.//Ibidem. **1980**. V. 45. P. 222.
12. Gell-Mann M., Pais A.//Phys. Rev. **1955**. V. 97. P. 1387.
13. Lederman L. M., Booth E. T., Byfield H., Kessler J.//Ibidem. **1951**. V. 83. P. 685.
14. Lederman L. M., Tinlot L., Booth E.//Ibidem. V. 81. P. 281.
15. Lederman L. M. Thesis (unpublished).
16. Byfield H., Kessler J., Lederman L. M.//Phys. Rev. **1952**. V. 86. P. 17.
17. Lee T. D., Oehme R., Yang C. N.//Ibidem. **1957**. V. 106. P. 340.
18. Christenson J. H., Cronin J. W., Fitch V. L., Turlay R.//Phys. Rev. Lett. **1964**. V. 13. P. 138.
19. Lee T. D., Yang C. N.//Phys. Rev. **1956**. V. 104. P. 254.
20. Feinberg G.//Ibidem. **1958**. V. 110. P. 1482.
- [21] Bjorken J. D., Glashow S. L.//Phys. Lett. **1964**. V. 11. P. 255.
22. Glashow S. L., Iliopoulos J., Maiani L.//Phys. Rev. Ser. D. **1970**. V. 2. P. 1285.
23. Burns R., Danby G., Hyman E., Lederman L. M., Lee W., Rettberg J., Sunderland J.//Phys. Rev. Lett. **1965**. V. 15. P. 830.
24. Yamaguchi Y.//Nuovo Cimento. Ser. A. **1966**. V.43. P.193. Окунь Л. Б.//ЯФ. **1966**. Т. 3. С. 590.
25. Aubert I. J., Becker U., Biggs P. J., Burger I., Chen M., Everhart G., Goldhagen P., Leong J., McCorriston, Rhoades T. G., Rohde M., Ting Samuel C. C., Wu Sau Lan//Phys. Rev. Lett. **1974**. V. 33. P. 1404.
26. Kaplan D. M., Fisk R. J., Ito A. S., Jostlein H., Appel J. A., Brown B. C., Brown C. N., Innes W. R., Kephart R. D., Ueno K., Yamanouchi T., Herb S. W., Horn D. C., Lederman L. M., Sens J. C., Snyder H. D., Yoh J. K.//Ibidem. **1978**. V. 40. P. 435.
Ito A. S. et al.//Phys. Rev. Ser. D. **1981**. V. 23. P. 604.
27. Berman S. M., Bjorken J. D., Kogut J. B.//Ibidem. **1971**. V. 4. P. 3388.
28. Perl M.//Heavy Leptons in 1986: Proceedings of the XXIII International Conference on High Energy Physics—Berkeley, 1986—P. 596.
29. Stelgman G., Schramm D. N., Gunn J. E.//Phys. Lett. Ser. B. **1977**. V. 66. P. 202.
30. Понтекорво Б.//ЖЭТФ. **1968**. Т. 26. С. 984.