

Размышления об открытии τ -лептона

М.Л. Перл

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 1995 г.)

PACS numbers: 14.60.Fg

Первые размышления

При подготовке этой лекции я прежде всего думал о девушках и юношах, начинающих свою жизнь в науке: студентах и молодых ученых. За 45 лет работы в области экспериментальных научных исследований я провел несколько хороших экспериментов, среди которых лучшим было открытие τ -лептона. Я также проводил исследования, которые, как оказалось, были неинтересными, и работал над экспериментами, которые провалились. И поэтому, в процессе подробного рассказа об открытии τ , за которое я был удостоен этой великой чести, я постараюсь поделиться тем, чему научился, занимаясь экспериментальной наукой. Я начну свои размышления с возврата во времена до открытия τ , даже до возникновения моего интереса к лептонам. Я учился в Политехническом университете (тогда Бруклинский политехнический институт) (Polytechnic Institute of Brooklyn) и всегда начинал проектирование эксперимента с инженерных чертежей и с инженерных расчетов. Мой повышенный интерес к инженерному и механистическому взгляду на природу был перенесен и на занятия физикой.

Моя диссертационная работа [1] была выполнена в Колумбийском университете (Columbia University) в начале 1950-х гг. под руководством профессора Исидора Раби (Isidor Rabi). В исследованиях использовался метод резонанса в атомных пучках, изобретенный Раби (за который он получил Нобелевскую премию в 1944 г.). Оборудование моего эксперимента (рис. 1) было сугубо механическим и включало в себя медную вакуумную камеру, пучок атомов натрия, аккумуляторы с подводной лодки для снабжения магнитов электроэнергией и, в начале эксперимента, настенный гальванометр для измерения тока пучка. В ходе этого диссертационного эксперимента я выработал основы своего экспериментального стиля. В процессе проектирования эксперимента и размышлений о физике у меня всегда преобладал механистический взгляд. Что более важно, мои размышления об элементарных частицах были физическими и механистическими. В основном процессе рождения τ -лептонов



я представляю позитрон, e^+ , и электрон, e^- , мельчайшими частичками, которые сталкиваются друг с другом

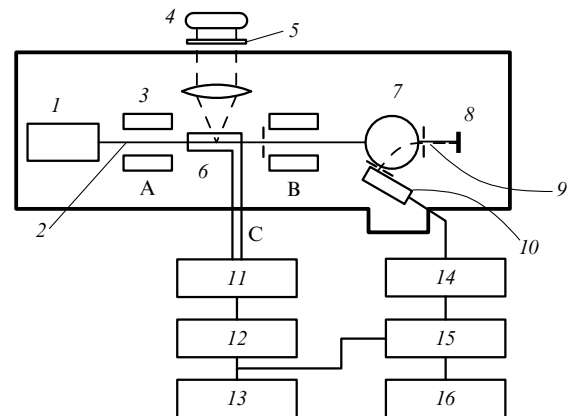


Рис. 1. Из авторского диссертационного (Ph. D. thesis) эксперимента в атомных пучках [1]: 1 — источник атомов, 2 — атомный пучок, 3 — линза, 4 — источник света, 5 — затвор, 6 — шпилька, 7 — масс-спектрометр, 8 — источник ионов, 9 — пучок ионов, 10 — электронный умножитель, 11 — источник радиоволн, 12 — модулятор, 13 — источник звуковых колебаний, 14 — узкополосный усилитель, 15 — запирающий детектор, 16 — записывающее устройство. "Схема установки. Для простоты источник света изображен сбоку от установки, но в действительности он расположен выше установки. Магнит С, обеспечивающий однородное поле внутри "шпильки", не показан для простоты. Положение шести внешних прямоугольников, обозначающих основные компоненты электроники, не соответствует реальному расположению".

и аннигилируют. Я вижу мельчайшее сформировавшееся облачко энергии, которое мы технически называем виртуальным фотоном, $\gamma_{\text{вирт}}$; и затем я вижу, что это облачко превращается в две мельчайшие частицы нового вещества — положительный τ -лептон, τ^+ , и отрицательный τ -лептон, τ^- .

В моем диссертационном эксперименте я впервые испытал удовольствие, тревогу и иногда боль, сопутствующие экспериментальной работе: удовольствие, когда эксперимент завершен и данные надежно записаны; тревогу, когда эксперимент развивается плохо или прерван; боль, когда эксперимент проваливается или когда экспериментатор совершает глупость. В этом эксперименте обработка данных занимала около одного дня, и поэтому за неделю периоды тревоги и радости сменяли друг друга по несколько раз. Когда я сломал вакуумный измерительный прибор МакКлауда (McCloud), и ртуть разлилась в вакуумной камере, боль от необходимости восстанавливать прибор растянулась на несколько недель. При открытии τ эмоциональные

спады и подъемы растягивались на годы. И теперь я расскажу об исследовании, натолкнувшем меня на мысль о тяжелых лептонах.

От сильных взаимодействий к электрон-мюонной проблеме

В течение восьми замечательных и плодотворных лет в Мичиганском университете я изучил технику экспериментальных исследований в физике элементарных частиц (сцинтилляционные счетчики, пузырьковые камеры, триггерную электронику и анализ данных), работая с моими коллегами Лоуренсом Джонсом (Lawrence Jones), Дональдом Мейером (Donald Meyer) и позднее Михаэлем Лонго (Michael Longo). Мы изучали эту технику вместе, часто добавляя наши собственные усовершенствования. Одним из наиболее приятных опытов стала разработка люминесцентной камеры (рис. 2) Джонсом и мной с помощью нашего студента Кван Лей (Kwan Lai) [2]. Мы фотографировали и регистрировали треки заряженных частиц в кристаллах иодистого натрия, используя примитивные электронные трубки, усиливающие сигнал света, приходящего от трека.

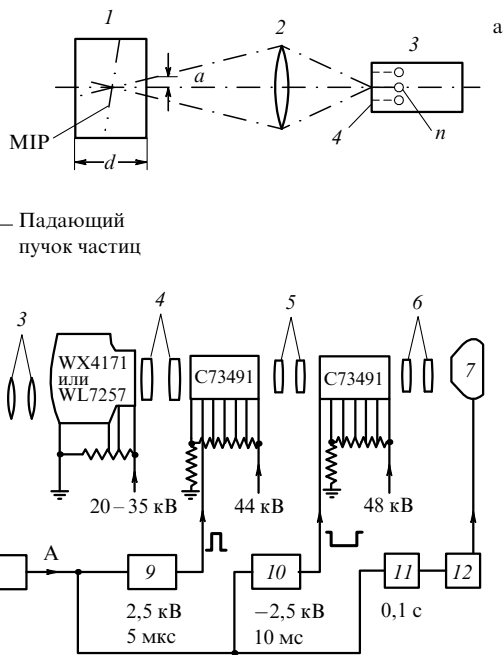


Рис. 2. Новый трековый детектор, люминесцентная камера, разработанная Лоуренсом Джонсом и автором [4] до появления оптической искровой камеры. (а) Соотношения между разрешением трека, a , глубиной поля, d , и информацией о треке, n , для однородной люминесцентной камеры. Для NaI (TI) имеем $N = 10^5$, $n = 1,7$ мм при $d = 10$ и $n = 10$ фотоэлектронов на 1 см трека в кристалле; 1 — сцинтилляционный кристалл, 2 — линза, 3 — фотоумножитель, 4 — фотокатод с квантовой эффективностью ϵ ; MIP — трек минимально ионизирующей частицы (N квантов см^{-1}), n — число фотоэлектронов на 1 см трека в кристалле 1 ($n = N\Omega\epsilon$, где телесный угол перекрываемый линзой $\Omega = a^2/d^2$); для $n = 1/a$ $a = [d^2/(N\epsilon)]^{1/3}$. (б) Схема люминесцентной камеры, используемой в настоящее время. Просматривающая камеру оптика и сцинтилляционные счетчики, определяющие положение пучка, упрощены и обобщены на диаграмме. 1 — сцинтилляционный счетчик, 2 — кристалл NaI, 3–6 — система линз, 7 — регистрирующая фотоаппаратура, 8 — цепь совпадений, 9, 10 — "ворота", 11 — линия задержки, 12 — автоматическая подача фотопленки.

Я работал в физике сильных взаимодействий. Джонс и я, используя искровые камеры, провели на Беватроне (Bevatron) ряд аккуратных измерений упругого рассеяния пионов на протонах [3, 4]. Позже, когда я уже покинул Мичиганский университет и работал в Стенфордском университете, Лонго и я вместе с моим студентом Михаэлем Крайслером (Michael Kreisler) применили новый метод для измерения упругого рассеяния нейтронов на протонах [5].

Эти эксперименты по упругому рассеянию приятны мне по многим причинам. Оборудование было механическим и состояло из больших сверкающих искровых камер и фотокамеры со специальным устройством для быстрого продвижения пленки. Система считывания данных работала быстро, и окончательные результаты легко объединялись в нескольких графиках. Тем не менее постепенно я становился все более недоволен теорией, объяснявшей наши измерения. Я компетентен в математике, но не люблю громоздких математических объяснений и теорий, а в 1950-х и 1960-х гг. теория сильных взаимодействий была сложной, запутанной и ни к чему не приводящей наукой. Я начал думать об электроне и мюоне — элементарных частицах, которые не участвуют в сильных взаимодействиях.

Электрон был открыт в конце девятнадцатого столетия. Полное описание его природы было выполнено Дж. Дж. Томсоном (J. J. Thomson) в 1890-х гг. Он получил Нобелевскую премию в 1906 г. за исследование электронной проводимости в газах. Мюон был обнаружен в космических лучах в 1930-х гг. В таблице 1 приведены свойства электрона и мюона в том виде, как они были известны в 1960-х гг. Эта таблица остается правильной и сейчас.

Таблица 1. Свойства электрона и мюона. Электрический заряд дан в единицах $1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Масса дана в единицах массы электрона, $9,1 \times 10^{-31}$ кг

Частица	Электрон	Мюон
Обозначение	e	μ
Электрический заряд	+1 или -1	+1 или -1
Масса	1	206,8
Участвует частица в электромагнитных взаимодействиях?	да	да
Участвует частица в слабых взаимодействиях?	да	да
Участвует частица в сильных взаимодействиях?	нет	нет
Соответствующее нейтрино	ν_e	ν_μ
Соответствующее антинейтрино	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$
Время жизни	стабилен	$2,2 \times 10^{-6}$ с

Существовало две загадки, связанные с электроном и мюоном. Первая загадка: как показано в таблице, свойства этих частиц по отношению к взаимодействиям одинаковы, но мюон в 206,8 раз тяжелее. Почему? Вторая загадка была связана с тем, что мюон был не стабилен и распадался за время $2,2 \times 10^{-6}$ с. Можно было ожидать, что он будет распадаться следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu^- &\rightarrow e^- + \gamma, \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \gamma. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь γ обозначает фотон, который уносит избыток энергии, образовавшийся из-за разницы масс мюона и электрона.

На самом деле мюон распадается в результате сложного процесса

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,\end{aligned}\quad (3)$$

в котором рождаются нейтрино и антинейтрино. Существует в природе мюона нечто такое, что отличает его от электрона. До конца 1950-х гг. электрон-мюонная проблема ($e-\mu$ проблема) состояла из двух частей:

1) почему мюон в 206,8 раз тяжелее электрона;

2) почему мюон не распадается путем $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$.

В то время, когда я работал в Мичиганском университете, меня заинтересовали точные опыты по измерению ($g-2$) мюона, выполненные в ЦЕРНе [6], и по измерению ($g-2$) электрона, проведенные в Мичигане [7]. Меня интересовали также прецизионные исследования позитрония и мюония, находившиеся тогда в процессе выполнения, а также другие прецизионные измерения в атомной физике. Эти измерения при низкой энергии заряженных лептонов находились в надежных руках, и я не видел, какой вклад в эту область мог бы внести я.

Я знал о пионерском нейтринном эксперименте в области малых энергий, выполненном Фредериком Райнесом (Frederick Reines) и Клайдом Коуэном-младшим (Clyde Cowan, Jr.). Я должен прервать свой рассказ, чтобы процитировать два важных предложения из работы Райнеса и Коуэна [8]: "Эксперимент был выполнен для того, чтобы зарегистрировать свободное нейтрино. Вероятно, мы достигли цели, хотя дальнейшая работа по подтверждению нашего результата продолжается".

Это были чрезвычайно трудные эксперименты, и снова я не видел, какой вклад я могу внести в эти измерения.

Я горд тем, что мне вручили Нобелевскую премию по физике за этот год вместе с Фредериком Райнесом, и я огорчен, что Клайда Коуэна-младшего нет в живых, и он не может разделить с нами эту честь.

Над нейтринными экспериментами в области высоких энергий уже работали нобелевские лауреаты Леон Ледерман, Мелвин Шварц и Джек Штайнбергер [9].

Я подумал, что наиболее полезно для меня было бы сосредоточиться на экспериментах по исследованию заряженных лептонов в области высоких энергий — экспериментах, которые могли бы прояснить природу лептона или решить электрон-мюонную проблему. Этой исследовательской стратегии я следовал несколько раз в моей жизни. Я оставался вдали от направлений исследований, где работало много людей, и в частности, я оставался вдали от направлений исследований, где работали очень умелые и компетентные люди. Я нахожу более удобным работать в ненаселенных областях физики.

Я предостерегаю молодых ученых от слепого следования этой стратегии. Почти всегда лучшие экспериментаторы (и большинство экспериментаторов) работают в наиболее плодотворной области науки. Если над проблемой работают только несколько человек, или вообще никто не работает, то скорее всего эта проблема бесплодна. В конце концов, это вопрос темперамента и удобства.

SLAC, лептоны и тяжелые лептоны

В 1962 г., когда Вольфганг К.Х. Пановски (Wolfgang K.H. Panofsky) и Джозеф Белем (Joseph Ballam) предложили мне должность в Стенфордском центре линейных ускорителей (SLAC), который тогда еще только собирались строить, у меня появилась возможность всерьез задуматься об эксперименте с заряженными лептонами при высоких энергиях. Здесь была лаборатория, которая могла быть оснащена первичными пучками электронов; лаборатория, в которой можно было оборудовать хороший мюонный пучок; лаборатория, в которой можно было легко получить хороший пучок фотонов для образования лептонных пар. В Стенфордском комплексе, в лаборатории Физики высоких энергий работало принстон-стенфордское e^+e^- накопительное кольцо [10, 11].

Когда я прибыл в 1963 г. в SLAC, то начал разрабатывать разнообразные планы наступления на электрон-мюонную проблему. Хотя линейный ускоритель мог начать работу не раньше 1966 г., я и мои коллеги приступили к проектированию и созданию экспериментального оборудования. Предполагаемые исследования были двух типов. К первому типу относились исследования, в которых я планировал искать неизвестное различие между электроном и мюоном, в то время как единственные известные различия состояли в разнице масс и отсутствии распада $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$. Второй тип исследований основывался на моих размышлениях о том, что должны существовать лептоны, подобные электрону и мюону — неизвестные тяжелые заряженные лептоны. Я предполагал, что если удастся найти новый лептон, то его свойства помогут нам раскрыть секреты электрон-мюонной загадки.

В моем первом наступлении на проблему я использовал очевидную идею. Интенсивный пучок фотонов (γ) можно было сделать в SLACe, используя реакцию

$$e^- + \text{ядро} \rightarrow \gamma \dots \quad (4)$$

Образованные таким образом фотоны могли бы взаимодействовать с другим ядром, образуя пару заряженных частиц x^+ и x^- :

$$\gamma + \text{ядро} \rightarrow x^+ + x^- + \dots \quad (5)$$

Любая пара заряженных частиц может образоваться в этом процессе, если γ обладает достаточной энергией. Для молодого экспериментатора я замечу, что нет ничего плохого в очевидной экспериментальной идее до тех пор, пока вы первый, кто использует эту идею.

Я надеялся на то, что мы сможем найти новую частицу x , возможно, новый заряженный лептон, как-то связанный с электроном и мюоном. Это была сомнительная надежда, если судить с позиции наших сегодняшних знаний по физике элементарных частиц. Мы определенно были наивны в 1960-х гг.

Мы не нашли новый лептон или какую-либо другую новую частицу [12]. Как мы знаем сейчас, не существовало новых частиц, которые можно было найти в этом поисковом эксперименте при существовавших экспериментальных ограничениях. В процессе поиска мы использовали вычисления Тсаея (Tsai) и Витиса (Whitis) по рождению пар [13]. Этот эксперимент положил начало долгому и очень плодотворному сотрудничеству с моим коллегой Ю.-С. (Паулем) Тсаем.

Исследования мюон-протонного неупругого рассеяния

Хотя наша первая попытка проникновения в тайны мюона и электрона провалилась, мы уже готовились к изучению мюон-протонного неупругого рассеяния

$$\mu^- + p \rightarrow \mu^- + \text{адроны},$$

для того чтобы сравнить его с электрон-протонным неупругим рассеянием

$$e^- + p \rightarrow e^- + \text{адроны}.$$

В SLACe планировались широкомасштабные исследования е-р неупругого рассеяния. Действительно, некоторые из этих исследований привели к Нобелевской премии, которая была вручена в 1990 г. Джерому Фридману (Jerome Friedman), Генри Кендаллу (Henry Kendall) и Ричарду Тейлору (Richard Teaylor). Я надеялся на то, что мы сможем найти отличие между μ и e другое, чем разницы в массе и лептонном числе. В частности, я надеялся, что мы могли бы найти отличие в передачах больших импульсов — еще одна наивная надежда, если рассматривать с позиции наших современных знаний физики частиц. Например, я полагал [14], что мюон мог бы иметь особое взаимодействие с адронами, которым не обладает электрон (рис. 3).

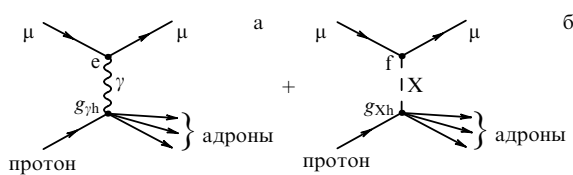


Рис. 3. Взаимодействие мюона с адроном через обмен частицей X. Пример рассмотрения модели, в которой у мюона есть специальное взаимодействие с адронами, отсутствующее у электрона (из [14]): (а) однофотонный обмен, (б) одночастичный обмен.

Для размышляющего экспериментатора всегда хорошо иметь два действующих эксперимента или по крайней мере один действующий эксперимент и один в процессе подготовки. Конечно, это было легче выполнить в 1960 г., чем сейчас, так как большинство современных экспериментов в физике высоких энергий очень велики и сложны. Но тем не менее это еще можно осуществить и сейчас. В настоящее время вместе с коллаборацией CLEO, которая проводит эксперимент на электрон-позитронном коллайдере CESR в Корнельском университете (10 ГэВ), я занимаюсь исследованиями в области τ -физики. Но существует также небольшая неускорительный эксперимент в SLACe, в котором выпускники университета (Эрик Ли (Eric Lee), Нэнси Мэр (Nancy Mar), Мануэль Ортега (Manuel Ortega)), несколько моих коллег и я занимаемся поиском свободных кварков.

Вернемся к концу 1960-х гг., когда я и мои коллеги измеряли дифференциальное сечение неупругого рассеяния мюонов на протонах, и затем сравнивали μ -р сечение с соответствующим е-р сечением [15, 16]. Мы искали разницу в величине или разницу в поведении сечений. Как обсуждалось в [17], эта разница могла возникнуть в результате существования нового неэлектромагнитного

взаимодействия между μ и адронами или из-за того, что μ не является точечной частицей. Однако мы не нашли значимых отклонений, что и отражено в [15].

Другие экспериментаторы изучали дифференциальное сечение упругого μ -р рассеяния и сравнивали его с дифференциальным сечением упругого е-р рассеяния [18 – 20], но статистически значимая разница между μ -р и е-р сечениями не могла быть найдена как в случае упругого рассеяния, так и в случае неупругого рассеяния. Более того, в сравнении μ -р и е-р сечений, из-за использования различных техник измерения существовали систематические погрешности порядка 5 – 10 %.

Экспериментальная наука — это ловкость и искусство, и частично искусство состоит в том, чтобы знать, когда необходимо закончить бесплодный эксперимент. Существует опасность стать одержимым экспериментом, даже если он ведет в никуда. Я избежал этого и отказался от эксперимента. Это оказалось правильным решением, потому что из современных исследований известно, что эксперимент по рассеянию не выявлял никакой разницы между электроном и мюоном кроме разницы в массах.

Тяжелый лептон в 1960-х гг.

Во время подготовки нашего мюон-протонного эксперимента и в первые дни набора данных я размышлял о другом пути поиска нового заряженного лептона, L, с использованием реакции

$$e^+ + e^- \rightarrow L^+ + L^-.$$

Прежде, чем приступить к третьей атаке на электрон-мюонную проблему, я описал основные представления 1960-х гг. о возможности существования и типах новых лептонов. К началу 1960-х гг. появились публикации о возможности существования заряженных лептонов более массивных, чем e и μ — тяжелых лептонов. Я прочел в 1963 – 1964 гг. статьи Зельдовича [21], Липманова [22] и Окуня [23]. Так как понятие поколения частиц в то время не стало еще общепринятым в нашей области, использовались более старые модели взаимосвязи частиц. Например, если предположить [24], что существует электромагнитно возбужденное состояние электрона e^* , то соответствующая реакция выглядела бы следующим образом:

$$\begin{aligned} e^- + \text{ядро} &\rightarrow e^{*-} + \dots, \\ e^{*-} &\rightarrow e^- + \gamma. \end{aligned} \quad (6)$$

Если предположить [22], что существует μ' , принадлежащий к семейству μ, ν_μ, μ' , то соответствующая реакция выглядела бы следующим образом:

$$\nu_\mu + \text{ядро} \rightarrow \mu'^- + \dots \quad (7)$$

Интересно отметить в свете поиска десятью годами позже распада $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$, что Липманов [22] вычислил относительную вероятность этого канала распада.

Во второй половине 1960-х гг. была развита концепция тяжелого лептона L и его нейтрино ν_L , образующих пару L, ν_L . Так в статье, написанной в 1968 г., Розе и Вольский [25] обсуждали нижний предел на массу такого лептона, полученный на основании того, что этот лептон не был найден в распадах K-мезонов. Они также рас-

сматривали следующие каналы распада такого лептона:

$$L \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_L, \quad \mu\bar{\nu}_\mu\nu_L, \quad \pi\nu_L.$$

Пучки сталкивающихся электронов и позитронов и последующие лептоны

Строительство и эксплуатация электрон-позитронных коллайдеров начались в 1960-х гг. [26]. В сентябре 1967 г. на Шестой международной конференции по ускорителям высоких энергий Ховард [27] мог назвать только несколько электрон-позитронных коллайдеров. Существовал первый (500 МэВ) коллайдер ADA, который работал во Фраскати (Frascati) уже с начала 1960-х гг., и там же во Фраскати строился ADONE. Работали: 1 ГэВ — ACO в Орсе (Orsay) и 1,4 ГэВ — ВЭПП-2 в Новосибирске. В Кембридже проходили испытания коллайдер CEA на 6 ГэВ и были предложения построить коллайдеры в DESY и SLACe [28].

В предложении SLAC [28] (рис. 4) уже обсуждалась реакция

$$e^+ + e^- \rightarrow x^+ + x^-. \quad (8)$$

PROPOSAL FOR A HIGH-ENERGY
ELECTRON-POSITRON COLLIDING BEAM STORAGE RING
AT THE
STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER

March 1964

It is proposed that the Atomic Energy Commission support the construction at Stanford University of a Colliding-Beam Facility (storage ring) for high-energy electrons and positrons. This facility would be located at the Stanford Linear Accelerator Center, and would make use of the SLAC accelerator as an injector.

This proposal was prepared by the following persons:

Stanford Physical Department
D. Ritson

Stanford Linear Accelerator Center
S. Berman
A. Boyarski
F. Bulos
E. L. Garvin
W. Kirk
B. Richter
M. Bands

Рис. 4. Обложка предложения SLAC от 1964 г. о построении электрон-позитронного коллайдера [28]: "Предлагается, чтобы Комиссия по атомной энергии поддержала создание в Стенфордском университете сталкивающихся пучков (накопительного кольца) электронов и позитронов. Это накопительное кольцо будет расположено в SLACe и будет, возможно, использовать ускоритель SLACa как инжектор".

Конечно, x мог быть заряженным лептоном. Это предложение не привело непосредственно к построению e^+e^- коллайдера в SLACe, потому что мы не получили денег. Через пять лет при твердой поддержке директора SLAC Вольфганга Панофски и при участии команды проектировщиков и конструкторов под руководством Бартон Рихтера (Burton Richter) в SLACe началась конструкция e^+e^- коллайдера SPEAR.

Именно это предложение 1964 г. и плодотворная статья Кабиббо и Гатто [29], озаглавленная "Эксперименты по столкновению пучков электронов и позитронов", помогли мне сконцентрировать свои усилия на поисках нового заряженного лептона на e^+e^- коллайдерах. После выполнения экспериментов, описанных ранее, я был занят поиском модели новых лептонов, модели, которая бы определенно приводила к исследованиям на сталкивающихся пучках, оставаясь в то же время достаточно общей. В результате обсуждений с моими коллегами Паулем Тсаем и Гари Фельдманом (Gary Feldman) я пришел к тому, что позже назвал моделью последующего лептона. Я думал о последовательности пар:

$$\begin{array}{ll} e^- & \nu_e \\ \mu^- & \nu_\mu \\ L^- & \nu_L \\ L'^- & \nu_{L'} \end{array} \quad (9)$$

причем каждая пара имела уникальное лептонное число. Я обычно рассматривал лептон как точечную дираковскую частицу. Конечно, предположения об уникальном лептонном числе и точечной природе частиц не являлись необходимыми, но я любил простоту. В конце концов, я ведь обратился к физике лептонов в начале 1960-х гг. в поисках простой физики. Идея состояла в поиске реакций

$$e^+ + e^- \rightarrow L^+ + L^- \quad (10a)$$

с последующими распадами,

$$\begin{array}{l} L^+ \rightarrow e^+ + \text{незарегистрированные нейтрино, уносящие энергию,} \\ L^- \rightarrow \mu^- + \text{незарегистрированные нейтрино, уносящие энергию} \end{array} \quad (10б)$$

или

$$\begin{array}{l} L^+ \rightarrow \mu^+ + \text{незарегистрированные нейтрино, уносящие энергию,} \\ L^- \rightarrow e^- + \text{незарегистрированные нейтрино, уносящие энергию.} \end{array} \quad (10в)$$

У такого метода исследований было много привлекательных свойств.

1) Если L является точечной частицей, то можно было искать L с массой вплоть до энергии пучка при условии, что мы обладаем достаточной светимостью.

2) Появление $e^+\mu^-$ или $e^-\mu^+$ событий с потерей энергии имело бы драматические последствия.

3) Установка, которую мы предлагали использовать для регистрации реакций (10) могла бы слабо различать типы заряженных частиц (конечно, по современным стандартам), но идентифицировать e и μ было легче всего.

4) Практически не нужно было теоретических предсказаний о слабых распадах L :

$$\begin{array}{l} L^- \rightarrow \nu_L + e^- + \bar{\nu}_e, \\ L^- \rightarrow \nu_L + \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \end{array}$$

с соответствующими распадами L^+ . Можно было просто утверждать это по аналогии с известным распадом

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

Я включил метод поиска, обобщенный в (10), в наше предложение эксперимента Mark I в 1971 г. на еще не построенных накопительных e^+e^- кольцах SPEAR.

Моим идеям о последовательных лептонах и об использовании реакций (10) для их поиска сильно способствовали две плодотворные работы Пауля Тсяя. В 1965 г. он опубликовал вместе с Энтони Херном (Antony Hearn)

статью "Дифференциальное сечение для $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \mu^+ + \nu_\mu$ " [30]. В этой работе обсуждается поиск пары векторных бозонов W^+W^- по их распаду на $e\mu$. Таким образом, идея этой статьи была тесно связана с моей идеей поиска пары L^+L^- по распаду на $e\mu$, описанной выше. Опубликованная в 1971 г. статья Тсяя, озаглавленная "Корреляции в распадах тяжелого лептона в реакции $e^+ + e^- \rightarrow L^+ + L^-$ ", детально развила теорию, позволившую применить модель последовательного лептона в наших исследованиях [31]. Такер и Сакураи [32] также опубликовали статью с теорией распадов последовательного лептона, но она не была столь исчерпывающей, как работа Тсяя. Также важной для меня стала основная статья "Спонтанные нарушения калибровочных теорий слабых взаимодействий и тяжелый лептон" Джеймса Бьеркена и Криса Левеллина-Смита [33].

Предложение SLAC–LBL

После многочисленных задержек с выделением средств группа под руководством Бартон Рихтера (Burton Richter) и Джона Рииса (John Rees) из группы С в SLACe приступила к строительству e^+e^- коллайдера SPEAR в конце 1960-х гг. Гари Фельдман и я, а также наша группа Е присоединились к группе С и группе из лаборатории Беркли под руководством Вильяма Чиновски (William Chinowsky), Джерсона Гольдхабера (Gerson Goldhaber) и Джорджа Триллинга (George Trilling) для того, чтобы построить детектор Mark I. В 1971 г. мы выпустили предложение SLAC–LBL [34] по использованию детектора Mark I на SPEAR. (Первое время детектор назывался SLAC–LBL и только тогда, когда мы начали создавать детектор Mark II, он был переименован в Mark I. Для простоты я ссылаюсь на него, как на детектор Mark I.) Предложение (рис. 5) включало в себя пять разделов: А. Введение; Б. Формфакторы бозона; В. Формфакторы бариона; Г. Неупругие реакции; Д. Поиски тяжелого лептона" и дополнение.

A.	Introduction	Page 1
B.	Boson Form Factors	Page 2
C.	Baryon Form Factors	Page 6
D.	Inelastic Reactions	Page 12
E.	Search for Heavy Leptons	Page 16
	Figure Captions	Page 19
	References	Page 20
	Supplement	

Рис. 5.

Поиски тяжелого лептона были описаны в конце предложения и на них было отведено только три страницы, потому что многим эта идея казалась отдаленной мечтой. Но эти три страницы содержали основную идею поиска тяжелых лептонов с помощью $e\mu$ -событий (см. (10)).

Мне хотелось написать значительно больше о тяжелых лептонах и $e\mu$ проблеме, но мои коллеги посчитали,

что это могло привести к несбалансированности предложения. Мы сошлись на включении 10-страничного дополнения, которое называлось "Дополнение к предложению SP-2 по поиску тяжелых лептонов и аномальных взаимодействий лептонов с адронами". Дополнение начиналось следующими словами: "В то время, как детектор будет использоваться для изучения процессов рождения адронов, одновременно возможно набирать данные для ответа на следующие вопросы:

1. Существуют ли лептоны с массой большей, чем масса мюона?

Мы обычно подразумеваем, что заряженные тяжелые лептоны обладают спином 1/2, но предложенный метод поиска не чувствителен к спине частицы. Поиск заряженных тяжелых лептонов таким способом автоматически подразумевает и поиск промежуточного векторного бозона, введенного в теорию, чтобы объяснить слабые взаимодействия.

2. Существуют ли аномальные взаимодействия между заряженными лептонами и адронами?

В этой части предложения мы покажем, что с помощью детектора мы можем собрать определенную информацию для ответа на первый вопрос в диапазоне масс, перекрываемом экспериментом. Мы можем получить предварительную информацию по второму вопросу — информацию, которая будет очень полезна при проектировании последующих экспериментов, ориентированных на решение этого вопроса. Мы можем собирать эту информацию в то время, как детектор будет использоваться для изучения процессов рождения адронов. Дополнительный сеанс набора статистики потребуется только для того, чтобы подтвердить существование тяжелого лептона, если это будет необходимо".

Мой основной интерес состоял в поиске тяжелых лептонов, но у меня оставался еще мой давний интерес к поиску аномальных лептонных взаимодействий. Это и привело меня к изучению мюон-протонного рассеяния.

Поиски лептона на ADONE

В то время как SPEAR и детектор Mark I строились, поиски лептона в процессе аннигиляции электрона и позитрона были выполнены на накопительных e^+e^- кольцах ADONE двумя группами экспериментаторов. Первая группа опубликовала результаты в 1970 и 1973 гг. [35, 36]. В работе [36] они сообщали о поисках стандартного тяжелого лептона с массой до 1 ГэВ и тяжелого лептона с массой до 1,4 ГэВ. Вторая группа экспериментаторов работала под руководством Шуи Орито (Shuji Orito) и Марселло Конверси (Marcello Conversi). Диапазон их поиска [37] также ограничивался массами до 1 ГэВ.

Открытие τ в эксперименте Mark I: 1974–1976 гг.

SPEAR и детектор Mark I. SPEAR e^+e^- коллайдер начал работу в 1973 г. В окончательном варианте, SPEAR работал при полной энергии около 8 ГэВ, но в первые несколько лет максимальная энергия, при которой еще достигалась необходимая светимость, была 4,8 ГэВ. Когда мы начали эксперимент Mark I, установка выглядела так, как показано на рис. 6. Mark I был одним из первых детекторов, построенных для работы на столк-

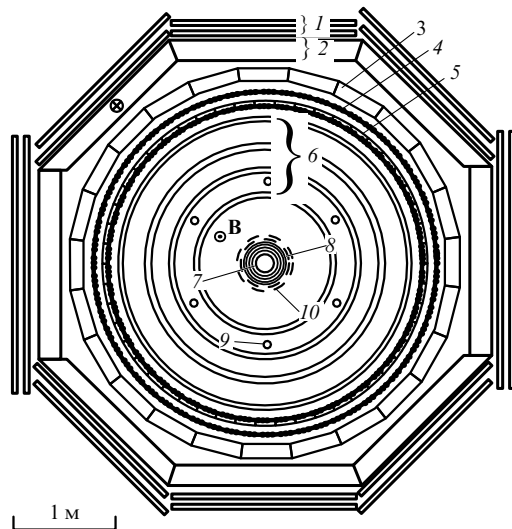


Рис. 6. Первоначальная форма детектора Mark I: 1 — мюонные проволочные камеры, 2 — железо (20 см), 3 — ливневые счетчики (24 шт.), 4 — обмотка магнита, 5, 8 — триггерные счетчики (48 и 4 шт. соответственно), 6 — цилиндрические проволочные камеры, 7 — пучок, 9 — опорная стойка (6 шт.), 10 — пропорциональные камеры (2 шт.).

вающихся пучках частиц, перекрывающих большой телесный угол и предназначенных для исследований общего характера. Использование трековой системы для регистрации частиц и системы идентификации частиц, перекрывающих большой телесный угол, кажется естественным в наше время, но не было очевидным двадцать лет назад. Система регистрации электронов состояла из счетчиков, представляющих из себя сэндвичи из свинца и сцинтиллятора, и была построена нашими коллегами из Беркли. Система регистрации мюонов была грубой и использовала железное ядро магнита, составляющее по толщине всего 1,7 ядерных длин поглощения.

Доклады в Канаде в 1975 г. В июне 1975 г. я выступил с первым международным докладом по $e\mu$ -событиям [38] на летней школе 1975 г. Канадского института физики частиц. Это была последняя из двух моих лекций по аннигиляции электрона и позитрона на школе. Приведу содержание доклада (рис. 7): "1. Введение: А. Тяжелый лептон; Б. Тяжелый мезон; В. Промежуточный бозон; Г. Другие элементарные бозоны; Д. Другие интерпретации. 2. Экспериментальный метод. 3. Метод поиска и отбор событий: А. Образец событий с энергией 4,8 ГэВ; Б. Отбор событий. 4. Фоны: А. Внешнее определение; Б. Внутреннее определение. 5. Свойства $e\mu$ -событий. 6. Сечение $e\mu$ -событий. 7. Проверка гипотез и замечания: А. Импульсный спектр, Б. θ_{coll} распределение; В. Сечение и отношение вероятностей распада. 8. Согласованность e^+e^- - и $\mu^+\mu^-$ -событий. 9. Заключение".

Этот доклад преследовал две цели. Первая заключалась в обсуждении возможных источников $e\mu$ -событий: тяжелый лептон, тяжелый мезон или промежуточный бозон; вторая — в демонстрации того, что у нас есть хорошие свидетельства существования $e\mu$ -событий. Образец с наибольшим числом событий при фиксированной энергии (табл. 2) был набран при 4,8 ГэВ, самой

Contents of the 1975 Summer School talk

1. Introduction
 - A. Heavy Leptons
 - B. Heavy Mesons
 - C. Intermediate Boson
 - D. Other Elementary Bosons
 - E. Other Interpretations
2. Experimental Method
3. Search Method and Event Selection
 - A. The 4.8 GeV Sample
 - B. Event Selection
4. Backgrounds
 - A. External Determination
 - A. Internal Determination
5. Properties of $e\mu$ Events
6. Cross Section of $e\mu$ Events
7. Hypothesis Tests and Remarks
 - A. Momentum Spectra
 - B. q_{coll} Distribution
 - C. Cross Section and Decay Ratios
8. Compatibility of e^+e^- and $\mu^+\mu^-$ Events
9. Conclusions

Рис. 7.

Таблица 2. (Взята из [38].) События с двумя заряженными частицами, зарегистрированные при энергии 4,8 ГэВ с помощью детектора Mark I 24 $e\mu$ -события с полным зарядом равным нулю и при отсутствии фотонов, являлись самым сильным доказательством существования τ в то время. Подпись в [38] гласит: "Распределение 513 двулучевых событий при энергии 4,8 ГэВ, которые отвечают критериям отбора: $p_e > 0,65$ ГэВ c^{-1} , $p_\mu > 0,65$ ГэВ c^{-1} , $\phi_{\text{coll}} > 20^\circ$ ".

Число фотонов =	Полный заряд = 0			Полный заряд = ± 2		
	0	1	> 1	0	1	> 1
ee	40	111	55	0	0	0
$e\mu$	24	8	8	0	0	3
$\mu\mu$	16	15	6	0	0	0
eh	18	23	32	2	3	3
μh	15	16	31	4	0	5
hh	13	11	30	10	4	6
Сумма	126	184	162	16	8	17

высокой энергии, при которой тогда работал SPEAR. Двадцать четыре $e\mu$ -события (в колонке, где полный заряд = 0, число фотонов = 0) служили нашим самым сильным доказательством.

Одним из краеугольных камней этого доказательства являлся неофициальный анализ, выполненный Джаспером Киркби (Jasper Kirkby), работавшим тогда в Стенфордском университете. Он показал мне, что, используя только числа из колонок "Полный заряд = 0" и "Число фотонов = 0" в табл. 2, можно вычислить вероятность неправильной идентификации адрона для этого класса событий. У нас недостаточно eh -, μh - и hh -событий для того, чтобы объяснить возникновение 24-х $e\mu$ -событий только ложной идентификацией адрона, как электрона или мюона.

Вероятности неправильной идентификации, определенные для адронных событий с числом заряженных частиц не менее трех, а также полученные из других соображений вероятности представлены в табл. 3. В

Таблица 3. Вероятность ложной идентификации для образца событий с энергией 4,8 ГэВ (взята из [38])

Диапазон импульсов ГэВ c^{-1}	$P_{h \rightarrow e}$	$P_{h \rightarrow \mu}$	$P_{h \rightarrow h}$
0,6–0,9	$0,130 \pm 0,005$	$0,161 \pm 0,006$	$0,709 \pm 0,012$
0,9–1,2	$0,160 \pm 0,009$	$0,213 \pm 0,011$	$0,627 \pm 0,020$
1,2–1,6	$0,206 \pm 0,016$	$0,216 \pm 0,017$	$0,578 \pm 0,029$
1,6–2,4	$0,269 \pm 0,031$	$0,211 \pm 0,027$	$0,520 \pm 0,043$
Средневзвешенное значение: hh-, μh - и $e\mu$ -события	$0,183 \pm 0,007$	$0,198 \pm 0,007$	$0,619 \pm 0,012$

сравнении с современной экспериментальной техникой вероятности неправильной идентификации адрона как электрона или мюона, $P_{h \rightarrow e}$, $P_{h \rightarrow \mu} \sim 0,2$, кажутся огромными, но я, тем не менее, могу показать, что возникновение 24-х $e\mu$ -событий нельзя объяснить только этим.

Поэтому указание на существование нового явления было достаточно сильным — не бесспорным, но, тем не менее, сильным. Новое явление состояло в том, что существовал последовательный тяжелый лептон, новый тяжелый лептон с распадом

$$M^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e,$$

$$M^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

Моя канадская лекция заканчивалась следующими выводами:

1) Не найдено обычного объяснения для зарегистрированных $e\mu$ -событий.

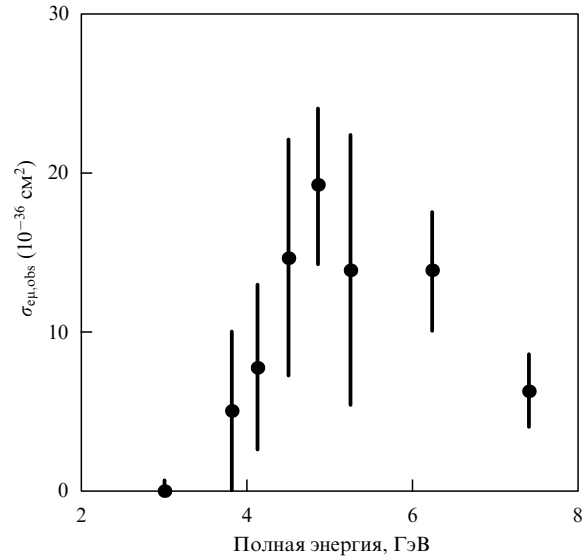
2) Гипотеза о том, что зарегистрированные $e\mu$ -события являются результатом образования пары новых частиц, каждая массой около 2 ГэВ, согласуется почти со всеми данными. Только распределение по θ_{coll} выглядит несколько загадочно.

3) Предположение о том, что мы также зарегистрировали $e\mu$ - и $\mu\mu$ -события от распада этих новых частиц, еще проверяется.

Я еще не мог определить точно источник $e\mu$ -событий: лептоны, мезоны или бозоны. Но я, помню, сильно подозревал, что источником являлись тяжелые лептоны. На доказательство этого ушло еще два года.

Первая публикация: " У нас нет обычного объяснения для этих событий". В течение 1974 г. мы набирали данные по e^+e^- аннигиляции при все большем количестве различных энергий, и при каждой энергии наблюдался сигнал аномальных $e\mu$ -событий (рис. 8). Таким образом, я и мои коллеги по эксперименту Mark I все более и более убеждались в реальности $e\mu$ -событий и в отсутствии стандартного объяснения. Наша уверенность еще возросла после добавления к детектору специальной системы регистрации мюонов (рис. 9а), названной "мюонная башня". Мюонная башня была задумана и построена Гарри Фельдманом. Хотя мы не использовали события типа, представленного на рис. 9б в нашей первой публикации, регистрация нескольких событий подобных этому действовала чрезвычайно успокаивающе.

Наконец, в декабре 1975 г., экспериментаторы Mark I опубликовали статью [39], озаглавленную "Свидетельство в пользу аномального рождения лептонов в e^+e^- аннигиляции".

**Рис. 8.** Сечение для $e\mu$ -событий, полученное с помощью детектора Mark I на SPEAR. Величина сечения не поправлена на акцептанс. Получено 86 событий при вычисленном фоне в 22 события (из [39]).

Последний параграф гласил: " Мы пришли к заключению, что зарегистрированные $e\mu$ -события нельзя объяснить ни образованием, ни распадом любой известной в настоящее время частицы, ни результатом действия любого из хорошо понятых взаимодействий, которые бы стандартным образом приводили к присутствию e и μ в конечном состоянии. Такие события можно объяснить образованием и распадом пары новых частиц, каждая из которых имеет массу между 1,6 и 2,0 ГэВ/ c^2 ".

Мы еще не были готовы утверждать, что мы обнаружили новый заряженный лептон, но были готовы заявить, что нашли что-то новое. Чтобы подчеркнуть эту неопределенность, в некоторых наших статьях 1975–1977 гг. я обозначал новую частицу буквой "u" от слова *unknown* (неизвестная). Имя τ было предложено мне Петросом Рапидисом (Petros Rapidis), который тогда был аспирантом и работал со мной в начале 1970-х гг. над $e\mu$ проблемой [17]. Буква τ — от греческого *triton* (третий) — третий заряженный лептон.

Таким образом, в 1975 г. через двенадцать лет после начала наших исследований физики лептонов в SLACе эти исследования принесли плоды. Но мы еще должны были доказать миру, что сигнал от $e\mu$ -событий статистически значим и мы должны были убедить себя, что $e\mu$ -события появились от распада пары тяжелых лептонов.

Размышления над открытием

Представляется уместным поразмышлять здесь над элементами исследования, которые привели к открытию τ . Первое, я выбрал область, где работали всего несколько исследователей. Второе, при изучении электрон-мюонной проблемы мы вели исследования широким фронтом: попытка рождения новых лептонов с помощью фотонов, экспериментальное сравнение мюон-протонного неупругого рассеяния с электрон-протонным неупругим рассеянием и использование реакции $e^+ + e^- \rightarrow L^+ + L^-$ для образования тяжелого лептона. Третье, для рождения L^+L^- мы использовали

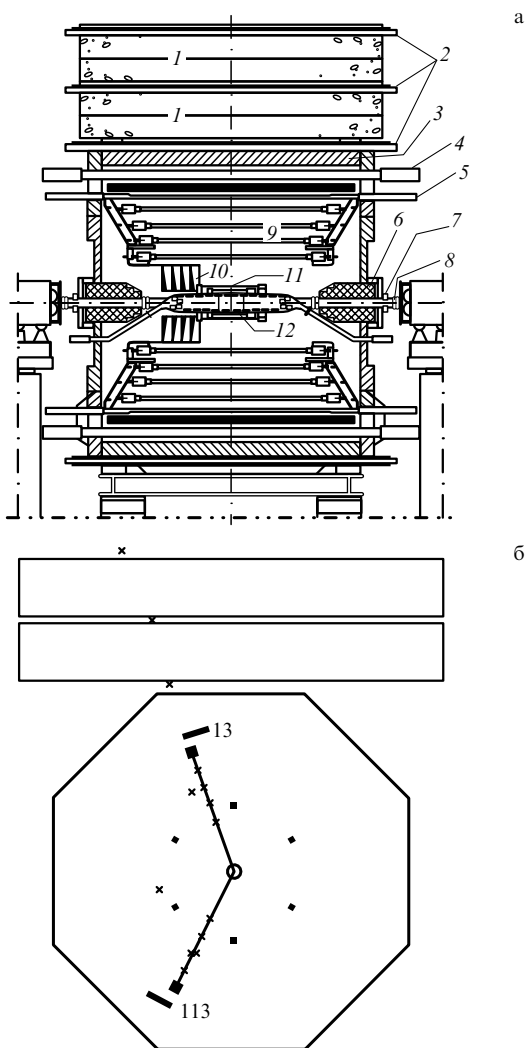


Рис. 9. (а) Детектор Mark I с мюонной башней: 1 — мюонный фильтр, 2 — мюонные искровые камеры, 3 — ярмо магнита, 4 — ливневые счетчики, 5 — триггерные счетчики, 6 — компенсирующий соленоид, 7 — монитор светимости, 8 — пучок, 9 — проволочные искровые камеры, 10 — торцевые камеры, 11 — пропорциональные камеры, 12 — пучковый счетчик. (б) Одно из первых $e\mu$ -событий, полученных с использованием мюонной башни. Мюон движется вверх через мюонный детектор, а электрон — вниз. Числа 13 и 113 дают относительное количество энергии электромагнитного ливня, выделенной мюоном и электроном. Шесть квадратных точек показывают положение продольных поддержек магнитоостриктной искровой камеры, применяемой для регистрации треков.

новую технику — электрон-позитронный коллайдер. Четвертое, у нас был хороший метод регистрации L^+L^- рождения, а именно, поиск $e\mu$ -событий без фотонов. Пятое, у меня были умелые, находчивые и терпеливые коллеги. Я считаю, что эти слагаемые должны присутствовать в экспериментальной работе: широкий фронт и специальные методы исследований, новые технологии и первоклассные коллеги. Конечно, в конце концов, все будет зависеть от элемента удачи. Удача сопутствовала мне дважды. Во-первых, тяжелый лептон существовал в диапазоне энергий коллайдера SPEAR. Во-вторых, детектор Mark I был достаточно хорош для идентификации $e\mu$ -событий и доказательства их существования.

Это лептон? 1976–1978 гг.

За нашей первой публикацией последовали несколько лет замешательства и сомнений в правильности наших данных и их толковании. Тяжело объяснить это сейчас, через десять лет, когда мы знаем, что рождение t -пар составляет 20 % от сечения e^+e^- аннигиляции при энергии ниже энергии Z^0 , и что события с $t\bar{t}$ -парами так чисто выделяются в распадах Z^0 .

Существовало несколько причин для сомнений в тот период. Было тяжело поверить в то, что и новый кварк (c) и новый лептон (τ) могли быть найдены в одном и том же узком интервале энергий. Более того, существование четвертого кварка было необходимо теории, в то время как для третьего заряженного лептона такая необходимость отсутствовала. Поэтому возникли претензии, что не найдены другие предсказанные моды распада t -пар такие, как e -адронные и μ -адронные события. Действительно, обнаружение таких событий находилось на пределе возможностей идентификации частиц детекторами середины 1970-х гг.

Возможно, наибольшим препятствием на пути восприятия τ , как третьего заряженного лептона, было отсутствие других свидетельств существования частиц третьего поколения. Существование двух наборов частиц — u, d, e^-, ν_e и c, s, μ^-, ν_μ — казалось приемлемым и являлось неким дублированием частиц. Но почему три набора? — Вопрос, на который нет ответа и в наши дни.

Это было трудное время. Слухи поддерживались появлением определенных свидетельств против τ : $e\mu$ -события не обнаружены, распад $\tau \rightarrow \nu\bar{\nu}$ не зарегистрирован, существовали теоретические проблемы с импульсным спектром или угловым распределением. Мы с Гари Фельдманом снова раз за разом перепроверяли наши результаты. Не ошиблись ли мы где-нибудь в нашем анализе?

Ясно, что необходимо было найти другие распады τ -пар. В предположении, что τ является заряженным лептоном, распадающимся в соответствии со стандартной теорией слабых взаимодействий, простые вычисления очень общего характера приводят к следующим относительным вероятностям распадов:

$$\begin{aligned} B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e) &\approx 20\%, \\ B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \mu^- + \bar{\nu}_\mu) &\approx 20\%, \\ B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \text{адроны}) &\approx 60\%. \end{aligned} \quad (12)$$

Следовательно, экспериментаторы должны найти последовательности распадов:

$$\begin{aligned} e^+ + e^- &\rightarrow \tau^+ + \tau^-, \\ \tau^+ &\rightarrow \bar{\nu}_\tau + \mu^+ + \nu_\mu, \\ \tau^- &\rightarrow \nu_\tau + \text{адроны} \end{aligned} \quad (13)$$

и

$$\begin{aligned} e^+ + e^- &\rightarrow \tau^+ + \tau^-, \\ \tau^+ &\rightarrow \bar{\nu}_\tau + e^+ + \nu_e, \\ \tau^- &\rightarrow \nu_\tau + \text{адроны}. \end{aligned} \quad (14)$$

Последовательность (13) должна приводить к аномальным мюонным событиям:

$$e^+ + e^- \rightarrow \mu^\pm + \text{адроны} + \text{потерянная энергия}, \quad (15)$$

а последовательность (14) — к аномальным электронным событиям:

$$e^+ + e^- \rightarrow e^\pm + \text{адроны} + \text{потерянная энергия}. \quad (16)$$

Аномальные мюонные события

Первым свидетельством в пользу τ , не связанным с e -событиями, стала демонстрация существования аномальных μ -адронных событий:

$$e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \text{адроны} + \text{потерянная энергия}$$

в трех различных экспериментах. Первое и очень желанное подтверждение существования аномальных мюонных событий пришло извне в 1976 г. от другого эксперимента на SPEAR [40]. Статья была озаглавлена "Аномальное рождение мюонов высокой энергии в e^+e^- взаимодействиях при 4,8 ГэВ". У меня в картотеке есть материал по эксперименту Mark I от 3 июня 1976 г., подготовленный Гари Фельдманом, в котором обсуждаются μ -события, полученные с помощью идентифицирующей башни детектора Mark I (рис. 9а). Для данных, набранных при энергии больше 5,8 ГэВ, он обнаружил следующее: "После поправки на неправильную идентификацию частиц этот образец данных содержит 8 e -событий и 17 μ -адронных событий. Таким образом, если акцептанс для адронов приблизительно такой же, как для электронов, и оба аномальных сигнала происходят из одного и того же источника, тогда с большими ошибками относительная вероятность распада в один заряженный адрон приблизительно в два раза больше относительной вероятности распада в электрон. Это практически совпадает с тем, что можно ожидать для распада тяжелого лептона". Это заключение было опубликовано в статье "Инклюзивное образование аномальных мюонов в e^+e^- аннигиляции" [41].

Наиболее приятное подтверждение пришло из эксперимента PLUTO, потому что оно было получено в эксперименте на e^+e^- накопительном кольце DORIS. В 1977 г. коллаборация PLUTO опубликовала статью "Образование аномальных мюонов в e^+e^- аннигиляции как свидетельство в пользу тяжелых лептонов" [42]. Рисунок 10 взят из этой статьи. Детектор PLUTO также относился к детекторам, перекрывающим большой телесный угол, и поэтому впервые мы могли всесторонне обсудить искусство и технологию поиска τ с независимыми экспериментаторами, нашими друзьями Гинричем Мейером (Hinrich Meyer) и Эриком Лорманом (Eric Lohrman) из коллаборации PLUTO.

После обнаружения μ -адронных событий я приобрел уверенность в своей правоте и в том, что τ является последовательным тяжелым лептоном. Однако оставались вопросы, которые необходимо было распутать: все еще трудно было продемонстрировать существование аномальных e -адронных событий, необходимо было зарегистрировать основные адронные каналы распада

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^-, \tag{17}$$

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \rho^-. \tag{18}$$

Аномальные электронные события

Для демонстрации существования аномальных электронных событий

$$e^+ + e^- \rightarrow e^+ + \text{адроны} + \text{потерянная энергия}$$

было необходимо улучшить электронную идентификацию детекторов. Существенное продвижение в этом направлении было достигнуто в новом детекторе DELCO [43, 44]. В докладе "Измерение прямого рождения электронов детектором DELCO на SPEAR" на Гамбургской лептон-фотонной конференции в 1977 г.

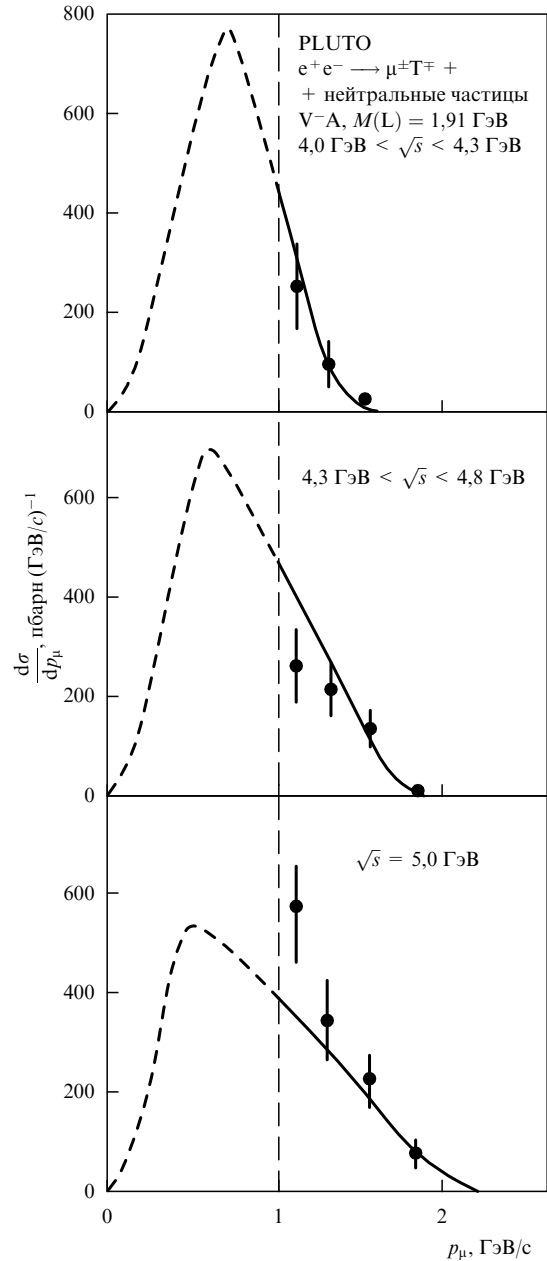


Рис. 10. Импульсный спектр мюонов из аномальных событий, найденных экспериментаторами PLUTO на e^+e^- накопительном кольце DORIS [43].

Киркби сказал: "Сравнение событий, имеющих только два наблюдаемых трека (из которых только один является электроном), с гипотезой тяжелого лептона не приводит к противоречию. Альтернативные гипотезы еще не исследованы".

Детектор Mark I также был усовершенствован силами сотрудников группы E из SLACa и группы Берклевской лаборатории под руководством Анжелы Барбаро-Галтиери (Angela Barbaro-Galtri). Некоторые экспериментаторы из группы Mark I занялись построением детектора Mark II. Мы оборудовали Mark I стеной из детекторов электромагнитных ливней, сделанных из свинцового стекла (рис. 11). Это привело к появлению важной статьи, озаглавленной "Электрон-мюонное и электрон-адронное рождение в e^+e^- столкновениях" [45]. В аннотации было написано: "Мы зарегистриро-

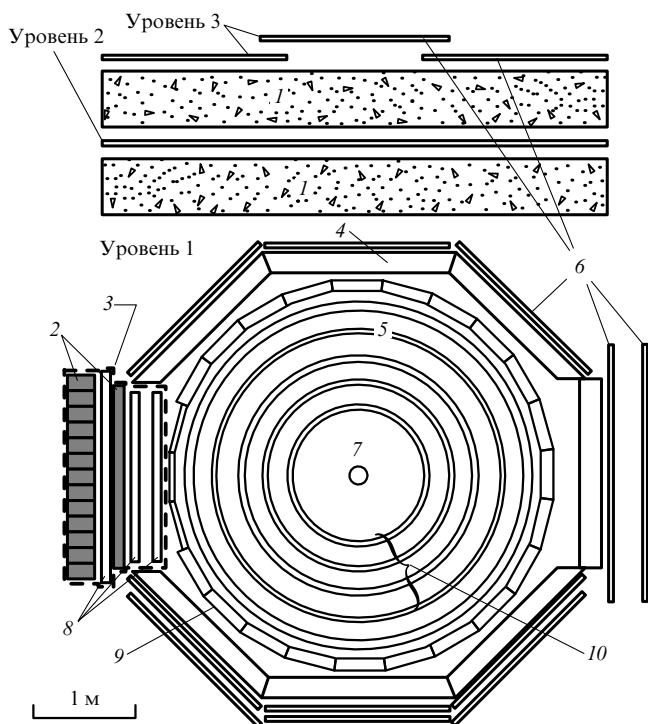


Рис. 11. Используемый на SPEAR детектор Mark I, усовершенствованный добавлением "стены из свинцового стекла" для обнаружения аномальных электронных событий: 1 — бетонный поглотитель, 2 — свинцовое стекло, 3 — система свинцовых стекол, 4 — ярмо магнита, 5 — катушка, 6 — мюонные искровые камеры, 7 — пучок, 8 — искровые камеры, 9 — ливневые счетчики, 10 — цилиндрические искровые камеры.

вали аномальные $e\mu$ - и e -адронные события в $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ с последующим распадом τ^\pm в лептоны и адроны. В предположении, что существует только один источник этих событий, мы измерили относительную вероятность этих распадов: $B(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau) = (22,4 \pm 5,5) \%$ и $B(\tau \rightarrow h^+ + \text{нейтральные частицы}) = (45 \pm 19) \%$.

Полулептонные моды распада и поиск $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$ и $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \rho^-$

К лептон-фотонной конференции 1977 г. в Гамбурге я мог сообщить в "Обзоре рождения тяжелых лептонов в e^+e^- аннигиляции" [46], что: а) все аномальные $e\mu$ -, $e\pi$ -, $e\pi$ - и $\mu\pi$ -события, полученные в e^+e^- аннигиляции, согласуются с гипотезой существования заряженного лептона, τ , с массой $1,9 \pm 0,1$ ГэВ c^{-2} ; б) эти данные нельзя объяснить распадами очарованных частиц; в) многие ожидаемые моды распада τ зарегистрированы; очень важный вопрос — существование распада $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$.

Изучение аномальных мюонных и аномальных электронных событий показало, что для полной суммарной вероятности распада τ в адроны, т.е. для полной вероятности полулептонного распада, получается приблизительно правильное значение. Но если τ действительно последовательный тяжелый лептон, тогда должны существовать две основные моды полулептонного распада: $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$ и $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \rho^-$.

Относительную вероятность распада
$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^- \tag{19a}$$

можно вычислить из скорости распада

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \tag{19б}$$

Она оказалась равной

$$B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-) \approx 10 \%. \tag{19в}$$

Относительную вероятность распада

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \rho^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^- + \pi^0 \rightarrow \nu_\tau + \pi^- + \gamma + \gamma \tag{20a}$$

можно определить из сечения

$$e^+ + e^- \rightarrow \rho^0. \tag{20б}$$

Она оказалась равной

$$B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \rho^-) \approx 20 \%. \tag{20в}$$

Одной из проблем на пути к обнаружению мод распада из (19а) и (20а) в 1977–1979 гг. являлась низкая эффективность регистрации фотонов в первых детекторах. Если в (20а) фотоны не регистрируются, то можно перепутать распады с π и ρ . Вероятно, первое разделение этих распадов было достигнуто с помощью стены детекторов из свинцового стекла Mark I. На Гамбургской конференции Анжелена Барбаро-Галтиери показала [47], что

$$\frac{B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-)}{B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \rho^-)} = 0,44 \pm 0,37.$$

Постепенно экспериментаторы разобрались с эффективностью регистрации фотонов в своих экспериментах. Кроме того, в строй вступили новые детекторы (такие, как Mark II) с улучшенной эффективностью регистрации фотонов. В нашей коллаборации Гейл Хенсон (Gail Hanson) в материале для внутреннего пользования от 7 марта 1978 г. первым показал, что $B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-)$ велика.

В течение года распад $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$ был зарегистрирован, и измерена его относительная вероятность на детекторах PLUTO, DELCO, стене из свинцового стекла Mark I и на новом детекторе Mark II. Гари Фельдман объединил результаты этих измерений (табл. 4) в обзоре по физике e^+e^- аннигиляции на XIX Международной конференции по физике высоких энергий [48]. Хотя среднее значение по результатам из табл. 4 на два стандартных отклонения ниже, чем современное значение относительной вероятности распада $(11,1 \pm 0,2) \%$, распад $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$ был обнаружен.

В 1979 г. появилась первая публикация по $B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \rho^-)$. Коллаборация DASP на e^+e^- накопительном кольце DORIS получила $(24 \pm 9) \%$ [49], а коллаборация Mark II получила $(20,5 \pm 4,1) \%$ [50]. Измерения были довольно грубыми, но результаты с точностью 20 % совпадали с оценкой (20в). Современное значение равно $(24,8 \pm 0,2) \%$.

Таблица 4. Различные измерения относительной вероятности B (в %) для распада $\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$ в конце 1978 г. (из [48])

Эксперимент	Мода распада	Число событий	Фон	$B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-)$
SLAC-LBL	$\pi\mu$	≈ 200	≈ 70	$9,3 \pm 1,0 \pm 3,8$
PLUTO	$\pi\mu$	32	9	$9,0 \pm 2,9 \pm 2,5$
DELCO	$e\mu$	18	7	$8,0 \pm 3,2 \pm 1,3$
Mark II	$\pi\mu$	142	46	$8,0 \pm 1,1 \pm 1,5$
	$e\mu$	27	10	$8,2 \pm 2,0 \pm 1,5$
Среднее				$8,3 \pm 1,4$

К концу 1979 г. результаты всех подтвержденных измерений находились в согласии с гипотезой, что τ является лептоном, образованным с помощью известного электромагнитного взаимодействия, и по крайней мере в своих основных каналах распадается в согласии со стандартной теорией слабых взаимодействий. На этом шестнадцатилетняя история 1963–1979 гг. открытия τ -лептона и подтверждения этого открытия заканчивается.

Размышления о настоящем и будущем τ -физики

С 1979 г. было проведено огромное количество экспериментальных и теоретических исследований в области τ -физики. Существуют недавние обзоры Вайнштейна и Строяновского [51], Монтане [52] и мой [53]. Материалы третьего рабочего совещания по физике τ -лептонов [54] представляют из себя сокровищницу информации и размышлений на тему τ и его нейтрино. Существуют обширные программы по исследованиям τ на электрон-позитронном коллайдере CESR в Корнелле (Cornell), электрон-позитронном коллайдере LEP в ЦЕРНе, электрон-позитронном коллайдере SLC в SLACe и электрон-позитронном коллайдере BEPC в Институте физики высоких энергий в Бейджине (IHEP in Beijing). В этих экспериментальных исследованиях зарегистрировано в 1000–10000 раз больше распадов τ , чем было получено в годы открытия. Кроме того, действующие эксперименты в ЦЕРНе и готовящийся эксперимент в лаборатории Ферми (Fermilab) направлены на то, чтобы зарегистрировать τ -нейтрино и осуществить поиск осцилляций между τ -нейтрино и другими сортами нейтрино.

Существует две крупные цели в исследованиях τ . Первая цель — узнать так много, как мы сможем об ожидаемом поведении τ -лептона и τ -нейтрино. Вторая цель, которая скорее похожа на мечту, состоит в том, чтобы найти что-то неожиданное в поведении τ -лептона, что-то такое, что приведет нас к более глубокому пониманию элементарных частиц и основных сил взаимодействия. τ является прекрасным кандидатом для таких рискованных исследований, потому что τ и τ -нейтрино — единственные частицы третьего поколения, которые могут быть исследованы в чистом, изолированном состоянии. Напомним, что электрон-мюонная загадка, приведшая все это в движение, еще не разрешена. Электрон-мюонная загадка превратилась в e - μ -загадку. Мы до сих пор не знаем, почему существует три заряженных лептона и не понимаем соотношения между их массами.

В будущем количество зарегистрированных τ -распадов возрастет еще в 10–100 раз. Этот рост будет достигнут с помощью фабрик В-мезонов высокой светимости, которые сейчас строятся в SLACe и KEКе, и с помощью дальнейшего увеличения светимости на электрон-позитронном коллайдере CESR. Существует еще надежда на то, что в Институте физики высоких энергий в Бейджине будет построена τ -чарм фабрика. Я счастлив, что недавно я и некоторые мои коллеги из SLACa присоединились к коллаборации CLEO, работающей на коллайдере CESR, и поэтому я продолжаю работать в физике τ -лептона. У меня нет каких-либо оригинальных идей исследования τ , но я уверен, что единственный путь обогатиться идеями заключается в экспериментальной работе над проблемой.

Мой последний совет девушкам и юношам, собирающимся работать в экспериментальной науке, состоит в

том, чтобы они обращали меньше внимания на теоретические физические идеи моего поколения. В конце концов, если у моего поколения есть действительно хорошие теоретические идеи, они будут реализованы нами же.

(Перевод с англ. С.В. Семенова)

Список литературы

1. Perl M L, Rabi I I, Senitzky B *Phys Rev.* **97** 838 (1955)
2. Lai K W, Jones L W, Perl M L *Proc. of the 1960 Int. Conf. on Instrumentation in High-Energy Phys.* (Eds C E Mauk, A N Rosenfeld, R K Wakerling) (New York: Interscience, 1961) p. 186
3. Damouth D E, Jones L W, Perl M L *Phys. Rev. Lett.* **11** 287 (1963)
4. Perl M L, Jones L W, Ting C C *Phys. Rev.* **132** 1252 (1963)
5. Kreisler M N et al. *Phys. Rev. Lett.* **16** 1217 (1966)
6. Charpak G et al. *Phys. Lett.* **1** 16 (1962)
7. Wilkinson D I, Crane H R *Phys. Rev.* **130** 852 (1963)
8. Reines F, Cowan C L *Phys. Rev.* **92** 830 (1953)
9. Danby G et al. *Phys. Rev. Lett.* **9** 36 (1962)
10. O'Neil G K et al. *HEPL Report RX-1486* (1958)
11. Barber W C et al. *Phys. Rev. Lett.* **16** 1127 (1966)
12. Barna A et al. *Phys. Rev.* **173** 1391 (1968)
13. Tsai Y-S, Whitis V *Phys. Rev.* **149** 1248 (1966)
14. Perl M L *Phys. Today* (July) 34 (1971)
15. Toner W T et al. *Phys. Lett. B* **36** 251 (1971)
16. Braunstein T J et al. *Phys. Rev. D* **6** 106 (1972)
17. Perl M L, Rapidis P *SLAC-PUB-1496* (1974)
18. Ellsworth R W et al. *Phys. Rev.* **165** 1449 (1960)
19. Camilleri L et al. *Phys. Rev. Lett.* **23** 153 (1969)
20. Kostoulas I et al. *Phys. Rev. Lett.* **32** 489 (1974)
21. Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **5** 931 (1963)
22. Lipmanov É M *JETP* **19** 1291 (1964)
23. Okun L B *Sov. Phys. JETP* **20** 1197 (1965)
24. Low F E *Phys. Rev. Lett.* **14** 238 (1965)
25. Rothe K W, Wolsky A M *Nucl. Phys. B* **10** 241 (1969)
26. Voss G, in *Proc. Int. Conf. "History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Phys."* (Ed. H Newman) (Sicily, 1994)
27. Howard F T, in *Proc. of the Sixth Int. Conf. on High Energy Accelerators* (Ed. R A Mack) (Cambridge, 1967) p. B43
28. Ritson D et al. Proposal for a High-Energy Electron-Positron Colliding-Beam Storage Ring at the Stanford Linear Accelerator Center (1964)
29. Cabibbo N, Gatto R. *Phys. Rev.* **124** 1577 (1961)
30. Tsai Y-S, Hearn A C *Phys. Rev. B* **140** 721 (1965)
31. Tsai Y-S *Phys. Rev. D* **4** 2821 (1971)
32. Thacker H B, Sakurai J J *Phys. Lett. B* **36** 103 (1971)
33. Bjorken J D, Llewellyn Smith C H *Phys. Rev. D* **7** 887 (1973)
34. Larsen R M et al. *SLAC Proposal SP-2* (1971)
35. Alles-Borelli V et al. *Lett. Nuovo Cimento* **IV** 1156 (1970)
36. Bernardini M et al. *Nuovo Cimento A* **17** 383 (1973)
37. Orito S et al. *Phys. Lett. B* **48** 165 (1974)
38. Perl M L *Proc. Canadian Inst. Particle Phys. Summer School* (Eds R Heinzl, B Margolis) (Montreal: McGill Univ., 1975)
39. Perl M L et al. *Phys. Rev. Lett.* **35** 1489 (1975)
40. Cavalli-Sforza M et al. *Phys. Rev. Lett.* **36** 558 (1976)
41. Feldman G J et al. *Phys. Rev. Lett.* **38** 117 (1977)
42. Burmester J et al. *Phys. Lett. B* **68** 297 (1977)
43. Kirkby J *Proc. of the 1977 Int. Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies* (Ed. F Gutbrod) (Hamburg, 1977) p. 3
44. Bacino W et al. *Phys. Rev. Lett.* **41** 13 (1978)
45. Barbaro-Galtieri A et al. *Phys. Rev. Lett.* **39** 1058 (1977)
46. Perl M L *Proc. of the 1977 Int. Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies* (Ed. F Gutbrod) (Hamburg, 1977) p. 145
47. Barbaro-Galtieri A et al. *Proc. of the 1977 Int. Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies* (Ed. F Gutbrod) (Hamburg, 1977) p. 21
48. Feldman G J *Proc. of the XIX Int. Conf. on High Energy Phys.* (Eds S Hounma, M Kawaguchi, H Miyazawa) (Tokyo, 1978)
49. Brandelik R et al. *Z. Physik C* **1** 233 (1979)
50. Abrams G S et al. *Phys. Rev. Lett.* **43** 1555 (1979)
51. Weinstein A J, Stroyonowski R *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **43** 457 (1993)
52. Montanet L *Phys. Rev. D* **50** 1173 (1994)
53. Perl M L *Reflections on Experimental Science* (Singapore: World Scientific, 1996)
54. *Proc. of the 3rd Workshop on Tau Lepton Phys.* (Ed. L Rolandi) (Montreux, 1994); *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **40** (1995)