

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1968 ГОДА *)**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ **)***Л. Альварес*

В 1932 г., когда я получил степень бакалавра, физикам были известны всего лишь две элементарные частицы. Тогда считалось, что каждая крупица материи во вселенной состоит только из протонов и электронов. Однако в этом же самом году количество элементарных частиц внезапно удвоилось. Этим мы обязаны двум превосходным экспериментам, одним из которых Чэдвик доказал¹, что существует нейтрон, а в другом Андерсону² удалось впервые сфотографировать след, несомненно, принадлежащий позитрону. Последующие годы ознаменовались открытиями большого числа новых частиц, которые, однако, происходили не постепенно, а периодически, скачкообразно.

Согласно установившейся традиции, моя задача сейчас состоит в том, чтобы охарактеризовать последний из этих периодов развития физики элементарных частиц и рассказать вам о тех достижениях приборостроения и техники, которые открыли возможность соответствующих исследований. Большинство из нас, людей, ставших физиками-экспериментаторами, выбирали свою профессию, исходя из того, что, во-первых, нам нравились методы физики, привлекавшие нас своей внутренней красотой, и, во-вторых, потому, что мы мечтали о раскрытии новых тайн природы, столь же важных и захватывающих, как те, которые были в свое время отняты у нее нашими научными кумирами. Но мы шли по узенькой дорожке, по обе стороны которой были расставлены ловушки. Если бы мы посвятили все свое время конструированию физической аппаратуры, мы рисковали бы снискать прозвище «водопроводчиков», и в то же время, если бы мы просто-напросто использовали приборы, созданные другими, мы могли бы подвергнуться осуждению наших товарищей за паразитический образ действий. В этой связи мои коллеги и я признательны Шведской Королевской академии наук за упоминание обоих аспектов нашей работы в Лоуренсовской радиационной лаборатории и Калифорнийском университете — наблюдения новых групп частиц и создания для этого соответствующей аппаратуры.

Я бы сказал, — но это только мое личное мнение, — что начало современной физики элементарных частиц следует отнести к последним

*) Copyright © The Nobel Foundation 1969.

**) Luis W. Alvarez, Recent Developments in Particle Physics. Nobel Lecture, December 11, 1968 (Les Prix Nobel en 1968). Preprint, Stockholm, 1969, 44p. Перевод И. И. Ройзена.

дням Второй мировой войны, когда группа молодых итальянцев в составе Конверзи, Панчини и Пиччони, скрывавшихся от немецких оккупационных властей, предприняла замечательный эксперимент. В 1946 г. они доказали ³, что так называемый «мезотрон», открытый в 1937 г. Неддермейером и Андерсоном ⁴ и Стритом и Стивенсоном ⁵, не имеет ничего общего с частицей, которая была предсказана Юкавой ⁶ как квант поля ядерных сил. Наоборот, оказалось, что «мезотрон» почти вовсе не участвует в ядерных взаимодействиях. Большинство физиков посвятили годы войны работе, связанной с военными нуждами, будучи уверены в том, что в их распоряжении имеется именно юкавский мезон и что к изучению его свойств можно будет вернуться по окончании военных действий. Однако они ошибались.

Около года научная общественность пребывала в создавшемся кошмарном тупике, пока, наконец, в 1957 г. Пауэлл совместно со своими сотрудниками ⁷ не обнаружил однократно заряженную частицу (называемую теперь пионом) со свойствами, соответствовавшими предсказаниям Юкавы, в результате распада которой и возникал «мезотрон», называемый теперь мюоном. В физике элементарных частиц был восстановлен порядок, и в 1948 г. Гарднеру и Лэттесу ⁸ удалось искусственно получить пионы на лоуренсовском 184-дюймовом ускорителе. Эксперименты с космическими лучами, осуществленные группой Пауэлла, оказались возможными благодаря изящной ядерной эмульсионной технике, разработанной ими в сотрудничестве с илфордскими лабораториями под руководством Уоллера.

В 1950 г. семейство пионов пополнилось нейтральной компонентой, которая была независимо обнаружена в трех экспериментах. В Беркли на 184-дюймовом циклотроне Мойер, Йорк и другие ⁹, изучая доплеровски смещенный спектр γ -лучей, пришли к выводу, что его можно объяснить, только если считать, что эти γ -кванты возникли в результате распада нейтральных пионов. В то же время Стейнбергер, Панофский и Стеллер ¹⁰ красивым экспериментом на тогда еще новом 300-Мэв'ном синхротроне еще более убедительно доказали существование этой частицы; наконец, независимо от них Бристол, Экспонг, Хоппер и Кинг (см. ¹¹) обнаружили в ядерной эмульсии распад π^0 -мезона на два γ -кванта и показали, что его время жизни меньше $5 \cdot 10^{-14}$ сек.

В 1952 г. Андерсон и Ферми совместно с сотрудниками ¹² приступили к своим классическим экспериментам по взаимодействию пионов с нуклонами при энергиях, которые теперь называются низкими. Они работали с выведенным пучком π -мезонов, которые получались на чикагском синхроциклотроне, и обнаружили то, что в течение длительного времени называлось пион-нуклонным резонансом. Изотопический формализм, который был в 1936 г. предложен Кассеном и Кондоном ¹³ и затем многие годы дискутировался физиками-теоретиками, внезапно отозвался ответным аккордом в умах физиков-экспериментаторов, которые находились под впечатлением того, что, опираясь на предложения об изотопической инвариантности, Бракнер ¹⁴ смог объяснить некоторые соотношения между сечениями, если считать, что резонанс, который был предсказан много ранее Паули и Данковым ¹⁵, имеет место в состоянии с изотопическим спином и угловым моментом, равными $3/2$.

Согласно всем тестам, которыми мы располагаем в настоящее время, «3,3-резонанс» Андерсона, Ферми и др. был первым из открытых «новых частиц». Однако в силу того, что в физике, в отличие от патентных бюро, никогда не существовало четкого определения того, что считать открытием, а что нет, представляется уместным упомянуть, что в те дни, когда свойства 3,3-резонанса имели первостепенное значение для ученых-физиков, занимавшихся проблемами взаимодействия при высоких энер-

гиях, не было принято рассматривать этот резонанс как «частицу». Действительно, в нейтронной спектроскопии известны сотни резонансов в системе нейтрон — ядро, однако их не рассматривают как самостоятельные объекты, хотя времена их жизни в миллиарды раз больше. Я не думаю, чтобы раннее и всеобщее понимание того, что 3,3-резонанс следует занести в таблицу элементарных частиц, могло бы в какой бы то ни было мере ускорить развитие физики высоких энергий.

Несмотря на то, что к концу 50-х годов изучение процессов генерации и взаимодействия пионов практически полностью перешло из области космических лучей на ускорители, физики, занимавшиеся космическими лучами, вскоре обнаружили два новых семейства «странных частиц» — K -мезоны и гипероны. Открытие странных частиц очень сильно повлияло на работу нашей группы в Беркли. Ирония судьбы состоит в том, что параметры бэватрона были установлены и решение строить его принято еще тогда, когда ни один из физиков, работавших в Беркли, не верил в существование странных частиц. Однако, если вспомнить теперь тогдашние аргументы, становится очевидным, что качество данных в экспериментах с космическими лучами было хорошим и вывод о существовании странных частиц был обоснованным. Даже если бы мы поверили в существование — или, пожалуй, более правильно было бы сказать, в важность — этих частиц, мы все равно не знали бы, какова должна быть энергия бэватрона, необходимая для их рождения: предложенный Пайсом механизм генерации странных частиц¹⁶ и его экспериментальное подтверждение Фаулером, Шуттом и др.¹⁷ были тогда еще делом будущего. Таким образом, то, что за небольшим числом известных исключений, бэватрон внес самый значительный вклад в физику странных частиц, было обусловлено стечением ряда весьма благоприятных случайностей.

Величина максимальной энергии протонов в бэватроне, равная 6,3 Гэв, выбиралась, исходя из того, чтобы могли рождаться антипротоны, если подобные процессы вообще возможны. Для того чтобы сделать таблицу элементарных частиц обозримой, мы теперь не перечисляем в ней все античастицы и члены изотопических мультиплетов по-отдельности. В результате, теперь стало привычным считать открытие антипротона тривиальным студенческим упражнением. (Если подойти с этими «новыми мерками» к классическим работам Чэдвика и Андерсона, то следовало бы сказать, что они вообще не открыли чего-либо нового, так как нейтрон — это просто другое изоспиновое состояние протона, а андерсоновский позитрон — это просто совершенно очевидный антиэлектрон!) В подтверждение нетривиальности открытия группой Сегре антипротона¹⁸ достаточно только напомнить, что один из наиболее выдающихся известных мне физиков, занимающихся высокими энергиями и не веривших в возможность рождения антипротонов, держал пари на 500 долларов со своим коллегой, который тогда отстаивал теперь уже общепринятую точку зрения, что каждой частице соответствует античастица.

Сейчас я весьма кратко упомянул об открытии ряда частиц, которые оказались существенными для нашей работы с пузырьковой камерой, и продолжу этот рассказ в дальнейшем. Мой рассказ не претендует на научную убедительность — в этой аудитории нет специалистов по данному кругу вопросов, — просто я хочу отметить то влияние, которое оказали некоторые экспериментальные работы на меня лично и моих сотрудников.

Теперь я вернусь к истории весьма важного открытия странных частиц. Не в пример открытию пиона, которое было сразу же признано почти всеми — об одном кажущемся исключении я скажу позднее, — открытие и окончательное признание существования странных частиц затянулось

на несколько лет. Впервые тяжелые нестабильные частицы были обнаружены Рочестером и Батлером ¹⁹ в 1947 г. Они сфотографировали и соответствующим образом интерпретировали две первые «V-частицы», применив для регистрации космических лучей камеру Вильсона. Одна из этих частиц оказалась заряженной и была, вероятно, K -мезоном, другая, нейтральная, по-видимому, была K^0 -мезоном. За эти эксперименты Рочестеру и Батлеру обычно приписывается открытие странных частиц. Прошло два томительных года, в течение которых Рочестер и Батлер продолжали поиски с помощью своей камеры, но больше V-частиц не обнаружили. Однако в 1950 г. Андерсон, Лейтон и др. ²⁰ подняли камеру Вильсона на гору и выяснили, что в этих условиях ежедневно регистрируется в среднем приблизительно одна V-частица. Они писали: «Интерпретация полученных нами фотографий неизбежно приводит к тому же замечательному выводу, который был сделан Рочестером и Батлером на основе их фотоснимков, т. е. к выводу о том, что наблюдаемые два типа событий представляют собой соответственно спонтанное деление нейтральной и заряженной нестабильной частицы нового типа».

Тогда Батлер с сотрудниками подняли свою камеру на Пик-дю-Миди и подтвердили данные о большой частоте событий интересующего типа, полученные группой Калифорнийского технологического института на Белой горе. В 1952 г. они сообщили о первом каскадном распаде ²¹, свидетельствовавшем о существовании новой частицы, называемой теперь Ξ -гипероном.

В то время как физики, работавшие с камерами Вильсона, медленно продвигались по пути изучения свойств странных частиц, параллельно попытки в том же направлении предпринимались лабораториями, которые пользовались ядерными эмульсиями. Хотя впервые K -мезон, несомненно, наблюдался в камере Вильсона Лепринс-Ринге ²² еще в 1944 г., Бете ²³ высказал такие сомнения в достоверности этого наблюдения, что оно не оказало влияния ни на научную общественность, ни на дальнейшие исследования. Первое общепризнанное обнаружение K -мезона в ядерной эмульсии относится к эксперименту, выполненному Брауном и большей частью бристольской группы ²⁴ в 1949 г. Это был так называемый τ^+ -мезон, который, находясь в покое, распадается на три компланарных пиона. Основываясь на данных о пробегах этих трех пионов, удалось очень точно определить массу τ -мезона, которая оказалась равной 493,6 Мэв. Снова потребовался более чем полугодовой период томительного ожидания, прежде чем был обнаружен еще один τ -мезон.

В 1951 г., через год после того как τ -мезон и V-частицы были, наконец, наблюдаемы вновь, О'Келли ²⁵ обнаружил в ядерной эмульсии свой первый κ -мезон. Каждое событие такого рода включало распад покоящегося тяжелого мезона с рождением мюона, причем для последнего был характерен большой разброс по энергии. Теперь мы знаем, что это были K^+ -мезоны, распадающиеся на $\mu^+ + \pi^0 + \nu$, и происхождение такого широкого мюонного спектра совершенно очевидно. Однако в начале 50-х годов, когда K -мезоны регистрировались поодиночке в разных лабораториях, потребовалось известное время для того, чтобы в этом разобраться. В 1953 г. Меноном и О'Келли ²⁶ был обнаружен первый K_{π^2} - или же θ -мезон, распадающийся на $\pi^+ + \pi^0$. Выяснение того, что θ - и τ -мезоны — это один и тот же, но по-разному распадающийся K -мезон, представляет собой одну из замечательных историй физики элементарных частиц, к которой я вернусь в своей лекции позднее.

Идентификация нейтральной Λ -частицы явилась плодом совместных усилий групп, занимавшихся изучением космических лучей с помощью камеры Вильсона, и я не хочу пытаться приписать себе честь этого откры-

тия. В то же время представляется несомненным, что Томпсон и др.²⁷ были первыми, кто обнаружил схему распада, которую теперь мы приписываем K^0 -мезону: $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Заряженные гипероны впервые наблюдались в эмульсионных экспериментах генуэзской и миланской группами²⁸ в 1953 г. После этого изучение странных частиц перешло большей частью с космических лучей на ускорители.

Таким образом, ко времени пуска бэватрона в 1954 г. значительное число странных частиц уже было идентифицировано. Это были несколько заряженных и нейтральных частиц с массами порядка $500 M_{\pi}$ и три типа частиц, более тяжелых, чем протон, которыми в порядке возрастания массы были нейтральная Λ -частица, две заряженные Σ -частицы, Σ^+ и Σ^- , и отрицательный каскадный гиперон Ξ^- , который распадался на Λ -частицу и отрицательный пион.

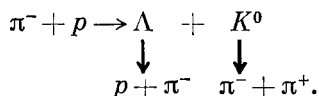
Времена жизни странных частиц оказались короче, чем у всех частиц, известных ранее, за исключением нейтрального пиона. Времена жизни всех гиперонов порядка 10^{-10} сек составляют менее одного процента времени жизни заряженных пионов. Я подозреваю, что услышав от меня сейчас причину, по которой эти частицы были названы странными, состоящую в том, что измеренное экспериментально время их жизни представляло загадку для физиков-теоретиков, присутствующие здесь неспециалисты думают: «Да, действительно, я не могу представить себе, каким образом какой-либо объект может развалиться столь быстро». Однако на самом деле загадка состояла не в том, почему странные частицы распадаются так быстро, а наоборот, в том, почему они живут в миллионы миллионов раз дольше, чем, казалось бы, им положено: физики были не в состоянии объяснить, почему они не разваливаются за времена порядка 10^{-21} сек.

Я не хочу вдаваться в детали, однако можно заметить, что физики оказались перед лицом аналогичной проблемы, когда выяснилось, что мюон не является ядерно-активной частицей. Догадка Маршака и Бете²⁹ о том, что он получается в результате распада другой, сильно взаимодействующей частицы, возникла почти одновременно с ее независимым экспериментальным подтверждением в эксперименте Пауэлла и др., о котором уже упоминалось ранее. И хотя было очень соблазнительно пойти по подобному же пути для наведения «порядка» в мире странных частиц, Пайс¹⁶ выдвинул идею о том, что странные частицы рождаются в сильных взаимодействиях только парами, в то время как по-отдельности каждая из них распадается «слабо».

Затем Гелл-Манн³⁰ (и независимо от него Нишиджима³¹) внес первый из своих значительных вкладов в физику элементарных частиц, верно угадав законы, по которым происходит рождение и распад всех странных частиц. Я употребил слово «угадав» с тем же благоговением, какое я испытываю, когда говорю, что Шампольон угадал значение иероглифов на Розетском камне... Гелл-Манн был первым, кто предположил, что K -мезон представляет собой не изоспиновый триплет, как это тогда, несомненно, казалось, а изоспиновый дублет плюс соответствующие античастицы, и, кроме того, он предположил, что существуют нейтральные Σ^- и Ξ^- -частицы. И, наконец, когда он предсказал для каждого семейства соответствующее значение нового квантового числа — странности, выведенные им правила стали успешно объяснять одну за другой наблюдавшиеся реакции с рождением странных частиц и в свою очередь предсказывали два десятка других. Работами моей группы были окончательно подтверждены все предсказания Гелл-Манна и Нишиджимы, причем многие из них впервые, и мы до сих пор не перестаем восхищаться их лаконичной элегантностью.

В 1954 г., когда Уильям Бробек вручил свое детище, бэватрон, в руки своих сотрудников по Радиационной лаборатории для использования его в качестве источника протонов высокой энергии, физика элементарных частиц походила более на искусство, нежели на науку. Я в то время работал в Беркли на линейном ускорителе протонов, изучая некоторые свойства короткоживущих радиоактивных изотопов, и был очень рад представившемуся случаю переключиться на новую тематику, казавшуюся мне более интересной. Свой первый эксперимент на бэватроне я поставил в сотрудничестве с Суламифью Голдхабер³². В результате этого эксперимента было впервые по-настоящему измерено время жизни τ -мезона. Следующий свой эксперимент я предпринял в сотрудничестве с тремя молодыми талантливыми физиками: Фрэнком Кроуфордом-младшим, Мироном Гудом и Линном Стивенсоном. Одна из первых загадок физики K -мезонов состояла в большом сходстве двух частиц (θ и τ), времена жизни и массы которых были, однако, в то время известны с явно недостаточной точностью. Это история уже рассказывалась в данной аудитории Ли³³ и Янгом³⁴, поэтому я не хочу ее повторять. Но мне хотелось бы думать, что доказанное нами³⁵ и одновременно и независимо Фитчем и Мотли³⁶ равенство в пределах экспериментальных ошибок времен жизни двух этих частиц, совместно с полученной Фризенем и др.³⁷ и Бирге и др.³⁸ очень малой величиной допустимой разности их масс в какой-то степени подтолкнуло Ли и Янга в направлении их революционного открытия в физике.

Наш опыт в том, что позднее вылилось в очень сложные скинтилляционные счетчики, привел меня и моих коллег к решению взяться за очень важные эксперименты по изучению основной, как нам тогда казалось, реакции в физике странных частиц



Здесь горизонтальной стрелкой показана реакция рождения странных частиц, а вертикальными — их последующий распад. На рис. 1 показана типичная фотография такой реакции, сделанная впоследствии в 10-дюймовой пузырьковой камере. Мы считали (точнее, — я полагал), что ни один из известных тогда методов непригоден для изучения этой реакции. Счетчики оказались совершенно не пригодными для такого эксперимента, искровые камеры еще не были изобретены. Группа, работавшая в Брукхейвене с диффузионной камерой¹⁷, сумела в течение двух лет сфотографировать всего лишь несколько событий, подобных показанному на рис. 1. Казалось бы, что здесь можно применять трековые детекторы, однако каждый из трех известных детекторов подобного рода страдал такими недостатками, которые исключали возможность привлечения его в качестве кандидата для осуществления преследовавшихся нами целей. Ядерные эмульсии, которые с таким поразительным успехом использовались группой Пауэлла, требовали непрерывности видимых последовательных треков, возникающих при рождении и распаде частиц. Присутствие нейтральных и, следовательно, не производящих ионизации частиц в промежуточном состоянии между начальными и конечными заряженными частицами, наряду с отсутствием хотя бы минимального разрешения по времени, совершенно исключало всякую попытку использовать ядерные эмульсии в этой новой области. Выяснилось также, что попытка использовать два известных типа камер Вильсона тоже сталкивается с одинаково непреодолимыми трудностями. Обычная камера Вильсона страдала двумя недостатками, которые делали ее непригодной для наших

целей: если работать при атмосферном давлении, то продолжительность цикла камеры измеряется минутами; если же давление в ней увеличивать, чтобы уменьшить средний пробег до ядерного взаимодействия, то продолжительность цикла растет по меньшей мере так же быстро, как и давление. Таким образом, число ежедневно наблюдаемых событий оказывалось

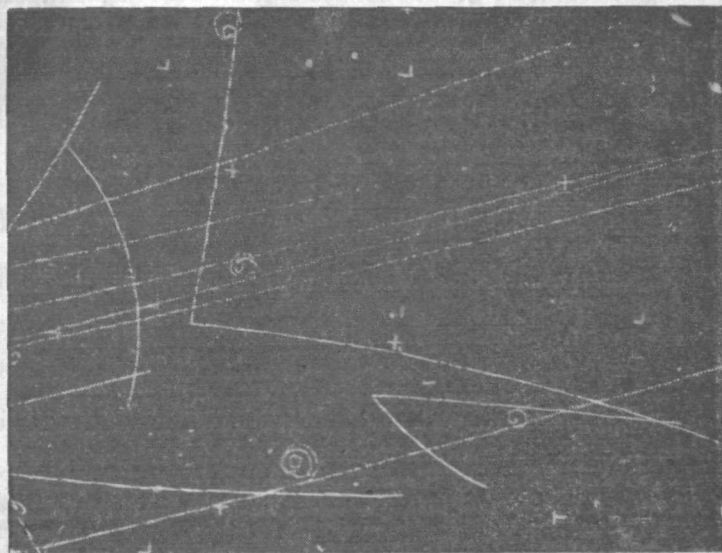


Рис. 1. Реакция $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$.

невероятно малым и даже упало, когда мы попытались ввести «усовершенствования». Бедой диффузионной камеры была «проблема фона», а также дополнительное неудобство, которое состояло в том, что ее рабочий объем в вертикальном направлении ограничен всего лишь восемью сантиметрами. Из всего этого мы просто-напросто сделали вывод, что физикам-экспериментаторам, изучающим элементарные частицы, нужен трековый прибор с жидким или твердым рабочим веществом (чтобы увеличить скорость счета на два порядка), с одинаковой чувствительностью по всему объему (чтобы избежать проблем, связанных с чувствительным слоем, как, например, в случае диффузионной камеры) и с короткой продолжительностью цикла (чтобы избежать недостатков камеры Вильсона). И, разумеется, любой циклический детектор должен был обеспечивать возможность взаимной привязки треков заряженных частиц, соединенных нейтральными, что исключалось при использовании ядерных эмульсий.

В конце апреля 1953 г. я совершил свою ежегодную поездку в Вашингтон, чтобы принять участие в съезде Американского физического общества. В первый же день во время ленча я оказался за огромным столом в саду нашей гостиницы. Все присутствовавшие, кроме одного, были старыми друзьями со времени Второй мировой войны, и мы предались воспоминаниям о нашей совместной работе в Массачусетском технологическом институте и в Лос-Аламосе. Слева от меня сидел молодой парень, который не пережил тех волнующих лет, и вскоре мы разговорились с ним об интересовавших нас физических проблемах. Он очень сожалел о том, что никто не услышит его десятиминутного сообщения, так как оно было поставлено последним на субботнем вечернем заседании, т. е. вообще являлось самым последним докладом на съезде. В то время, время тихих

ных самолетов, последний доклад на съезде слушало еще меньшее число людей, чем сейчас (если это только возможно). Я допускал, что, быть может, тоже не буду присутствовать на этом докладе и попросил его объяснить мне то, о чем он собирается рассказывать. Так я впервые услышал от Дональда Глазера об изобретении им пузырьковой камеры и о том, до какой стадии он довел ее разработку. В свое время он конечно, уже рассказывал здесь об этом ³⁹. Он показал мне фотографии пузырьковых треков в маленьком стеклянном баллоне около 1 см в диаметре и 2 см в длину, заполненном диэтиловым эфиром. Он подчеркнул необходимость абсолютной чистоты баллона и сказал, что он мог бы в течение многих секунд продержать в нем эфир в перегретом состоянии, прежде чем тот спонтанно закипит. Его работа оказала на меня сильнейшее впечатление, и я сразу же почувствовал, что это, возможно, как раз та спасительная идея, в которой так нуждалась физика элементарных частиц.

В эту же ночь мы обсуждали в моем номере то, что я узнал, с моим коллегой по работе в Беркли Фрэнком Кроуфордом. Я сказал ему, что, вероятно, мы могли бы сразу же по возвращении в Беркли приступить к созданию жидководородной камеры куда больших размеров, чем все, о чем мог мечтать Глазер. Он решил по дороге обратно в Беркли остановиться в Мичигане, чтобы ознакомиться, по возможности более детально, с глазеровской техникой.

Я возвратился в Беркли в воскресенье 1 мая, и на следующий же день Линн Стивенсон завел новую записную книжку для записей, касающихся пузырьковых камер. Недавно, застав меня пишущим эту лекцию, он показал мне эту старую записную книжку, первая запись в которой была датирована 2 мая 1953 г. и начиналась с уравнения Ван-дер-Ваальса и вычерченных от руки изотерм водорода. Фрэнк Кроуфорд приехал несколькими днями позднее, и они вместе с Линном отправились в студенческий зал здания синхротрона для того, чтобы приступить к созданию своей первой пузырьковой камеры. На их счастье, им удалось заручиться помощью Джона Вуда, техника по ускорителю, работавшего на синхротроне. Все вместе они сделали первые шаги по воспроизведению работы Глазера на углеводородах. После того как им удалось добиться чувствительности эфира к излучению, они поместили стеклянную камеру в сосуд Дьюара, чтобы попытаться проделать то же самое сначала с жидким азотом, а затем с жидким водородом. Помню, как несколько раз я обращался за консультациями по криогенной технике в Чикагский университет к покойному Эрлу Лонгу. Доктор Лонг активно помогал в предпринятом в ту пору Гильдебрандом и Наглем строительстве водородной пузырьковой камеры на базе Института имени Энрико Ферми в Чикаго. В августе 1953 г. Гильденбранд и Нагель ⁴⁰ обнаружили, что в присутствии γ -излучения перегретый водород закипает быстрее, чем при его устранении. Это обстоятельство является необходимым (хотя и недостаточным) условием успешного применения жидководородных пузырьковых камер, так что работы, выполненные в Чикаго, следует рассматривать как существенный шаг на пути создания подобных камер. Важный и нерешенный вопрос состоял в том, будет ли плотность пузырьков в водородной камере достаточна для того, чтобы прохождение через нее даже минимально ионизирующих частиц приводило к появлению видимых треков, или же жидкому водороду присущ тот же недостаток, что и жидкому азоту, в котором, как уже было к тому времени выяснено моими коллегами, в этом случае пузырьки хотя и появляются, однако видимых треков нет.

Первые треки в жидководородной пузырьковой камере диаметром полтора дюйма Джон Вуд обнаружил ⁴¹ в феврале 1954 г. Перестроив свою аппаратуру, чикагская группа, вероятно, могла бы сделать это

в то же время, однако она переключилась на углеводородные камеры и была вознаграждена тем, что смогла первой опубликовать экспериментальные результаты, полученные с использованием пузырьковых камер. На рис. 2 показаны фотографии первых треков, обнаруженных Вудом.

В Лоуренсовской радиационной лаборатории существовала давняя традиция тесного сотрудничества между физиками и техниками. В результате создалась очень благоприятная атмосфера для быстрого прогресса

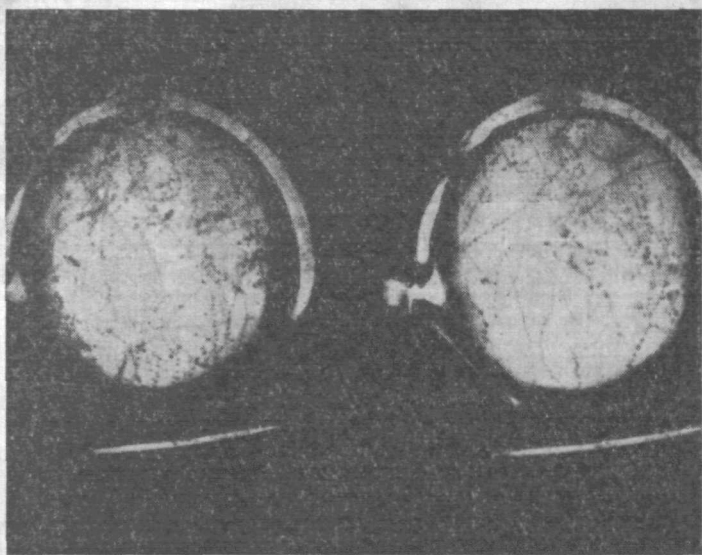


Рис. 2. Первые треки в водородной камере.

исследований по созданию жидководородной пузырьковой камеры, и возникла необычная ситуация, когда авторами всех без исключения научных статей по разработке моей группой техники пузырьковых камер оказались не те экспериментаторы, которые были физиками по образованию, или же должны были бы быть еще ранее знакомы с криогенной техникой — их авторами были те, кто в штатном расписании лаборатории числились техниками, хотя, разумеется, заинтересованные физики были в курсе дела и вносили множество предложений. Тем не менее ответственность за эти разработки лежала в основном на наших технических сотрудниках, и они публиковали результаты своих работ в научной литературе. Мне думается, что это очень здоровое начинание, в отличие от той системы, которая обычно практиковалась прежде. Все мы помним статьи, подписанные одним физиком, заключительный параграф которых гласил: «Я хотел бы поблагодарить такого-то за разработку аппаратуры и получение большей части результатов».

И, наконец, говоря о благодарностях, добавлю, что в первой своей публикации Джон Вуд в дополнение к благодарности за советы и помощь, которую он выражал Кроуфорду, Стивенсону и мне, писал: «Я признателен Э. Дж. Швимину за помощь при разработке электронных схем». Пит Швимин, самый разносторонний техник из всех когда-либо мною виденных, был так увлечен своим знакомством со стеклянной камерой диаметром полтора дюйма, разрабатываемой Джоном Вудом, что немедленно принялся за конструирование первой металлической пузырьковой

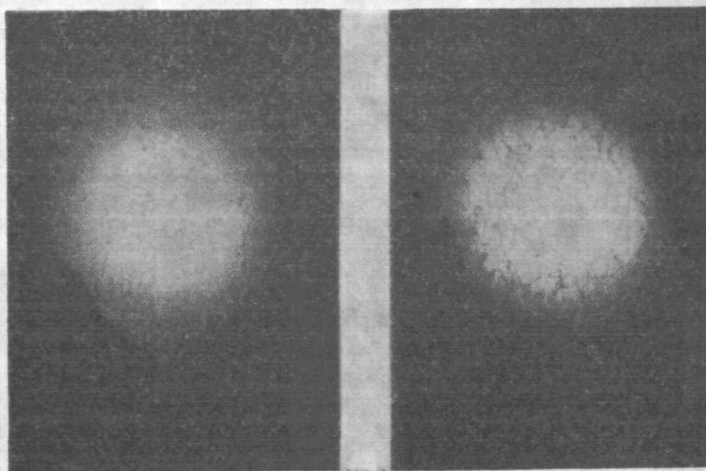


Рис. 3. Треки в 2,5-дюймовой камере.
Слева — протоны отдачи при взаимодействии в ней протона, справа — электроны, рожденные пучком γ -квантов.

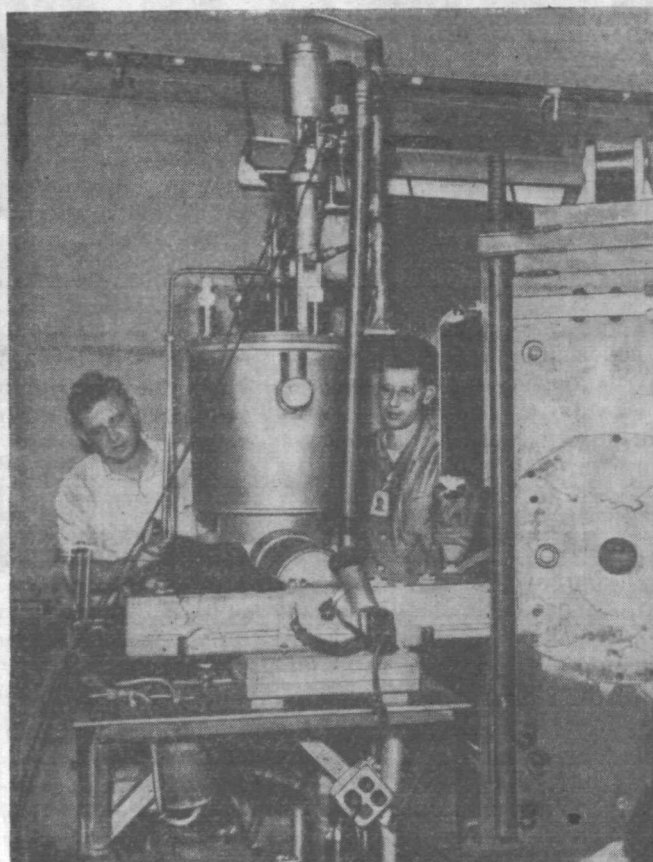


Рис. 4. Общий вид 4-дюймовой камеры. Д. Пармантье (слева) и Э. Дж. Швимин (справа).

камеры со стеклянными окнами. Прежде все камеры делались целиком из полированного стекла, без каких бы то ни было вставок, чтобы предотвратить возможное случайное закипание вблизи шероховатостей, поскольку оно, разумеется, вывело бы жидкость из состояния перегрева и сделало бы камеру нечувствительной к проходящему через нее излучению. И Глазер, и Гильдебранд особо подчеркивали длительность времени, в течение которого жидкость, заполняющая камеру, могла находиться в перегретом состоянии. У Гильдебранда и Нагля это время было равно в среднем 22 сек, а один раз оно даже достигло 70 сек. Джон Вуд писал ⁴¹: «Мы были подавлены тем, что нам не удавалось добиться длительного существования состояния перегрева до тех пор, пока полученные нами фотографии треков не показали, что для успешной работы больших пузырьковых камер это требование не является существенным». Я всегда считал, что после обнаружения Глазером треков это наблюдение является ключевым для всего дальнейшего развития техники пузырьковых камер. По мере того, как их размеры быстро увеличивались, пузырьки, образующиеся из-за кипения жидкости вблизи стенок, переставали нарушать состояние перегрева в подавляющей части всего объема камеры, так что заполняющая ее жидкость оставалась чувствительной (в смысле появления треков) к проходившему сквозь нее излучению.

Пит Швимин с помощью Дугласа Пармантье построил в рекордные сроки водородную камеру диаметром 2,5 дюйма, которая была первой в мире «грязной камерой». Мне никогда не нравилось это название, но им тем не менее пользовались для того, чтобы отличить камеры с окнами, вставленными в металлический корпус, от камер, которые состоят целиком из стекла. Ввиду «загрязненности» 2,5-дюймовой камеры жидкость вблизи ее стенок кипела, однако треки во всем ее объеме были хорошими. Теперь же, когда «чистые» камеры представляют лишь исторический интерес, мы можем, говоря о современных камерах, с удовольствием опустить эпитет «грязные».

В записной книжке Линна Стивенсона имеется схема камеры Джона Вуда, датированная 25 января 1954 г., с фотографиями треков в водороде, снятыми с помощью «поляроида». Месяцем позже он занес туда подробные характеристики 2,5-дюймовой камеры Швимина и вычертил ее полную схему, датированную 5 марта. (Это было на следующий день после получения журналом «Physical Review» письма Вуда, в котором сообщалось о наблюдении первых треков.) 29 апреля Швимин и Пармантье сняли свои первые треки, которые показаны на рис. 3. В то время все происходило настолько быстро, что 2,5-дюймовую камеру в рабочем состоянии целиком даже не успели сфотографировать ⁴².

В августе Швимин и Пармантье по-отдельности построили две различные камеры диаметром 4 дюйма. Первоначально в обеих в качестве расширительной системы применялись сильфоны. Первые треки в 4-дюймовой камере Пармантье наблюдались 6 октября. Камера Швимина заработала тремя неделями позже, и именно она сохранилась под названием 4-дюймовой камеры (рис. 4). Сильфонные системы расширения в обеих камерах были неудачными, однако камеру Швимина оказалось проще, чем камеру Пармантье, перевести на газовую систему расширения, которая применялась во всех наших камерах вплоть до 1962 г., когда в 25-дюймовой камере были применены « Ω -сильфоны», которые являются теперь общепринятыми для больших камер. На рис. 5 вы видите выставку всех наших камер, устроенную неделю тому назад по просьбе шведского телевидения. Глядя на него, вы можете убедиться, что всем нам было очень приятно снова встретиться со многими нашими «друзьями», которые впервые собрались все вместе.

На рис. 6 представлена одна из ранних фотографий множественного рождения мезонов в 4-дюймовой камере. Вскоре эта камера была помещена в импульсное магнитное поле, и в таком виде она стала первой из всех



Рис. 5. Выставка камер (ноябрь 1968 г.). Слева направо: 1,5-, 4,6-, 10-, 15- и 72-дюймовые камеры. Стоят: Эрнандес, Швимин, Ринта, Уотт, Альварец и Экман.

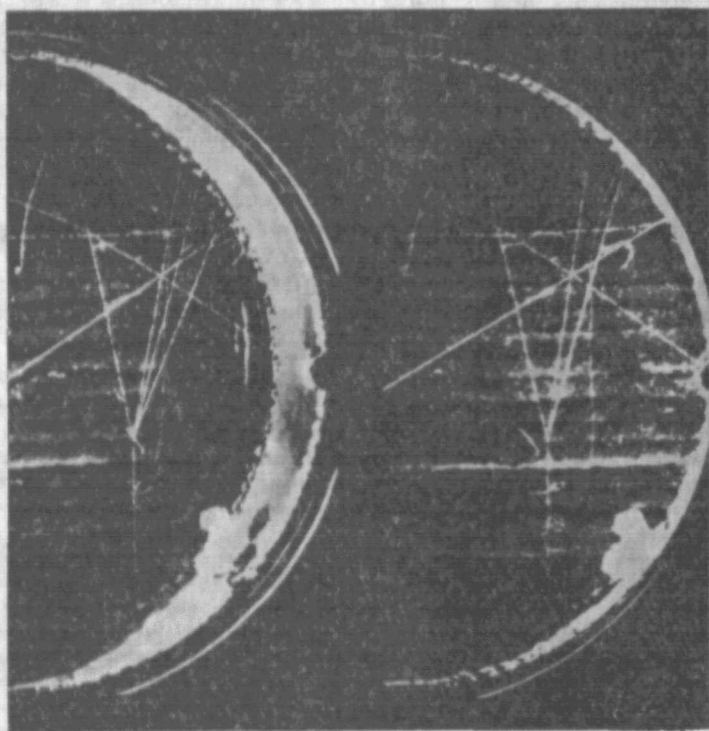


Рис. 6. Множественное рождение мезонов в 4-дюймовой камере.

пузырьковых камер, в которых можно было увидеть треки, искривленные под действием магнитного поля. В дальнейшем мы отказались от нее и перешли на камеры большего размера. Однако на этом ее служба не кончилась. Прежде чем «уйти в отставку», она еще славно потрудилась

на электронном синхротроне в Беркли, где Бобу Кенни и др.⁴³ удалось с ее помощью отснять почти два миллиона фотографий 30-Мэв'ного тор-мозного излучения.

Итак, в 1954 г., как я уже рассказывал, усилиями большого числа сотрудников моей группы было успешно завершено строительство четырех разных пузырьковых камер, начиная с диаметра 1,5 дюйма и кончая диаметром 4 дюйма. К концу этого богатого событиями года нам стало ясно, что создание камер большего размера, — а мы предвидели, что именно они необходимы для решения проблем физики элементарных частиц, — требует более согласованного и широкого применения инженерных методов. В этой связи я обратился за помощью к трем близким товарищам, Дж. Дональду Гоу, Роберту Уотту и Ричарду Бламбергу. Дон Гоу и Боб Уотт были в свое время целиком ответственны за создание и работу 32-Мэв'ного линейного ускорителя, который был в центре моего внимания с самого начала его строительства в конце 1945 г. и до ввода в строй в конце 1947 г. Никто из них не имел опыта в области криогенной техники, однако они очень быстро ее освоили и вскоре стали ведущими специалистами по новой технологии водородных пузырьковых камер. Дик Бламберг был по образованию инженером-механиком, и он конструировал оборудование, которое впоследствии было использовано Кроуфордом, Стивенсоном и мной в экспериментах по комптоновскому рассеянию γ -квантов на протонах⁴⁴.

Пауэлл построил два больших магнита и присовокупил их к своей камере Вильсона. В результате были получены снимки, которые могли бы украсить стены любой циклотронной лаборатории мира. Он очень великодушно предоставил в наше распоряжение один из этих магнитов, и Дик Бламберг незамедлительно приступил к проектированию механической части 10-дюймовой камеры — это был максимальный размер камеры, которая, по нашему мнению, могла уместиться между полюсами пауэлловского магнита. Чертежный стол Бламберга помещался в центре единственной комнаты, в которой находились также столы всех сотрудников моей группы. Не много найдется инженеров, которые согласились бы работать в подобных условиях, но Бламберг оказался в состоянии это сделать, и он создал проект, по которому в скором времени в главном машинном зале была построена камера. Все предыдущие камеры собирались непосредственно самими экспериментаторами, но строительство 10-дюймовой камеры оказалось куда более трудоемким, чем мы предполагали. Поэтому в нем приняли участие одиннадцать сотрудников лаборатории инженерно-механического отдела, включая Рода Бирна и Джона Марка. Инженерные проблемы электрического оснащения всех наших больших камер выглядели весьма устрашающе, и мы признательны Джиму Шанду за его многолетнее руководство этой работой.

Большие трудности нам пришлось испытать в начале работы с 10-дюймовой камерой: при каждом расширении испарялось слишком много водорода. Пит Швимин быстро установил причину неприятностей и сконструировал быстродействующий клапан, который позволил камере работать каждые 6 сек в соответствии с продолжительностью цикла бэватрона.

Возможно, что было бы уместно сейчас прервать историю развития пузырьковых камер, чтобы сказать о тех важных экспериментах, которые удалось осуществить в начале 1956 г. благодаря использованию 10-дюймовой камеры, однако я все-таки предпочитаю сохранить непрерывность изложения и продолжу свой рассказ о развитии техники. В декабре 1954 г., вскоре после того как 4-дюймовая камера впервые заработала в здании циклотрона, мне стало ясно, что 10-дюймовая камера, к конструированию которой мы как раз в то время приступили, заведомо недостаточно

велика для того, чтобы обеспечить возможность ответа на все интересовавшие нас вопросы физики странных частиц. Их треки были уже сфотографированы в Брукхейвене ¹⁷, и мы знали, что они рождаются на бэватроне в большом количестве.

Размеры по-настоящему «большой камеры» были установлены, исходя из ряда независимых требований, и, к счастью, всем им удалось удовлетворить в рамках одного проекта. (Я говорю об этом, потому, что часто проектировщик нового оборудования сталкивается с такой ситуацией, когда одному из существенных требований можно удовлетворить только с помощью аппаратуры большого габарита, в то время как другое, не менее важное требование выполняется только в том случае, когда ее размеры очень малы.) Все построенные к тому времени во всем мире «грязные» камеры имели цилиндрическую форму и характеризовались величиной их диаметра. Изучая релятивистскую кинематику странных частиц, рождавшихся бэватронным пучком, и в особенности распады этих частиц, я пришел к убеждению, что эта камера должна иметь прямоугольную форму с длиной минимум 30 дюймов. Затем эта цифра была увеличена до 50 дюймов для того, чтобы обеспечить достаточное количество водорода, в котором может происходить реакция рождения частиц до области распада. Позднее эта цифра возросла до 72 дюймов, что позволило, как и следовало, сделать ее глубину меньше ее ширины без изменения объема. Область рождения была порядка 10% характерной длины свободного пробега для пион-протонного взаимодействия, а размер области распада определялся длиной распада странных частиц и дополнительным требованием — иметь в распоряжении нужное количество треков, длина которых была бы достаточна для определения их кривизны в характерном магнитном поле порядка 15 000 гс. Наконец, ширина и глубина были выбраны просто исходя из рассмотрения формы эллипсов, соответствующих релятивистским преобразованиям при бэватронных энергиях, и с учетом того обстоятельства, что магнитное поле будет отклонять частицы вдоль ширины камеры и не будет влиять на их движение по высоте.

Результатом такого непосредственного анализа был довольно-таки пугающий ряд цифр; необходимая длина камеры оказалась равной 72 дюймам, ширина — 20 дюймам и глубина — 15 дюймам. Ее следовало поместить в магнитное поле напряженностью около 15 000 гс, для создания которого был необходим магнит весом не менее 100 т, поглощающий мощность порядка 2—3 Мвт.

Окно должно было иметь размеры: 75 дюймов длиной, 23 — шириной и 5 — толщиной. Последнее было необходимо, чтобы противостоять рабочему давлению (дейтерия), равному 8 атм, давящему на стекло с силой порядка 100 т. Ни у кого не было опыта работы со столь большими объемами жидкого водорода. Ракетные двигатели, работающие на смеси водорода с кислородом, которые теперь используются в качестве последней ступени системы «Сатурн», еще только мерещились их создателям — в то время не был еще запущен даже первый советский спутник. Внушали беспокойство также вопросы безопасности при работе со столь большой камерой. Низкотемпературные лаборатории всегда пользовались репутацией опасных, но и там тогда еще не работали с такими большими количествами жидкого водорода, и, кроме того, все вещества, с которым там имели дело, находились под атмосферным давлением.

В течение некоторого времени проблема стекла для окна казалась непреодолимой — никто никогда даже не отливал и не полировал таких огромных оптических стекол. К счастью, для окончательного успеха дела я сумел убедить себя в том, что корпус камеры можно сделать в виде про-

зрачного пластмассового цилиндра с металлическими крышками на концах. Эта идея была в дальнейшем развенчана моими коллегами-инженерами, но она сыграла важную роль в том, что я не отказался от всего проекта еще до того, как убедился, что необходимое для окна стекло можно сделать. Для того чтобы дать представление о состоянии криогенной техники в те времена, когда нас волновала проблема большого стекла, я расскажу вам следующий анекдот. Как-то, просматривая перечень названий докладов, представленных на недавнюю конференцию по криогенной технике, я обнаружил среди них одно, которое гласило: «Большое стеклянное окно для наблюдения за жидким водородом». Сжигаемый нетерпением, я бросился разыскивать сам доклад, но в нем описывался металлический сосуд Дьюара с окном диаметром... в один дюйм!

Теперь Дон Гоу посвящал все свое время водородным пузырьковым камерам, и в январе 1955 г. нам удалось заинтересовать этим делом Поля Эрнандеса, который обеспечил высококвалифицированное руководство инженерными работами по строительству и размещению 72-дюймовой пузырьковой камеры. Нам также чрезвычайно повезло в том, что мы сумели заинтересовать своим проектом инженеров криогенщиков из отдела Национального бюро стандартов в Баулдере (штат Колорадо). Дудли Челтон, Баском Бирмингам и Дуг Манн не пожалели своего времени на обучение нас основам техники обращения с большими количествами жидкого водорода и позднее сотрудничали с нами во время проектирования и начала работы на большой камере.

В апреле 1955 г., после нескольких месяцев обсуждения проекта большой камеры, я составил документ, озаглавленный «Программа строительства пузырьковой камеры в радиационной лаборатории Калифорнийского университета», в котором детально обосновывалась важность постройки большой камеры и обращалось внимание на совершенно новые возможности в физике высоких энергий, которые она открывает. Я подчеркивал также необходимость в полуавтоматическом измерительном устройстве (которое прежде не предлагалось) и обрисовал, как электронная вычислительная машина могла бы воспроизводить треки в пространстве, рассчитывать импульсы и решать проблемы релятивистской кинематики. Вся эта техника является теперь неотъемлемой частью стандартного комплекса пузырьковой камеры, но в апреле 1955 г. так еще никто не работал. Ни одна из написанных мною за всю жизнь статей не приносила мне при повторном прочтении такого удовлетворения, как этот неопубликованный проспект.

После того как Поль Эрнандес и Дон Гоу оценили стоимость большой камеры вместе с источником питания, которая оказалась порядка 2,5 миллиона долларов, стало ясно, что для ее постройки необходимо специальное одобрение Комиссии по атомной энергии: мы уже не могли больше строить наши камеры на деньги, которыми обычно располагала лаборатория. Фактически, составленный мною проспект был написан в качестве своего рода обращения к этой Комиссии за финансовой помощью. Я спросил Эрнеста Лоуренса, не согласится ли он помочь мне в получении у Комиссии дополнительных фондов. Он прочел мой проспект и выразил согласие с тем, о чем там говорилось. Затем он попросил меня напомнить ему, каков размер самой большой уже существующей водородной камеры в мире. Услышав мой ответ — 4 дюйма в диаметре, — он сказал, что опасается, не слишком ли далекую экстраполяцию — сразу до 72 дюймов — я пытаюсь предпринять одним махом. Я ответил, что сейчас мы заканчиваем строительство 10-дюймовой камеры и что если она заработает, то можно будет не сомневаться в том, что и 72-дюймовая камера тоже будет работать. (И еще, что если мы не сможем справиться с этой работой, то вернем

большую часть из запрашиваемых 2,5 миллионов.) Это не было очевидным, пока я не разъяснил принцип гидравлического устройства расширительной системы, которое было сконструировано таким образом, что камеру шириной 20 и длиной 72 дюйма можно было рассматривать как совокупность большого числа почти совершенно независимых квадратных 10-дюймовых камер. Он не был убежден в мудрости предлагаемой программы но, тем не менее в характерной для себя манере сказал: «Я не верю в вашу большую камеру, но я верю в вас и помогу вам получить деньги». Затем я сопровождал его в его последующей поездке в Вашингтон, и мы в течение одного дня поговорили с тремя членами комиссии, Льюсом Страусом, Уиллардом Либби (который позднее выступал с этой трибуны) и покойным Джоном фон Нейманом, величайшим из живших тогда специалистов в области математической физики. Тогда же, вечером, на коктейле в доме Джона фон Неймана мне сообщили, что сегодня после полудня Комиссия проголосовала за предоставление нашей лаборатории запрашиваемых 2,5 миллионов долларов. Все, что нам оставалось теперь сделать, — это построить камеру и заставить ее работать!

Разумеется, к этому времени разработки уже были в полном разгаре, но теперь их темпы резко ускорились. Дон Гоу взял на себя роль, несколько необычную в физических лабораториях, но зато широко распространенную в военных организациях: он стал моим «начальником штаба». Будучи в этой должности, он координировал усилия физиков и инженеров, нес полную ответственность за целесообразное расходование наших драгоценных 2,5 миллионов долларов и прилагал усилия для того, чтобы стать первоклассным специалистом во всех многочисленных направлениях проводимых разработок, начиная от низкотемпературной термодинамики и кончая техникой безопасности. Ему удалось справиться с этой труднейшей задачей, и лучше всего об этом свидетельствует успешное завершение всей программы, кульминационным пунктом которой является тот факт, что я сейчас выступаю с этой трибуны. Мне очень печально, что его здесь нет. Дон Гоу умер несколько лет назад, но я никогда не забываю о нем и в его память назвал своего трехлетнего сына Дональдом.

Инженерная группа под руководством Поля Эрнандеса быстро закончила разработку проекта, решив по ходу дела ряд сложных проблем с помощью методов, которые стали теперь общепринятыми. Типичная проблема такого рода была связана с большим отличием коэффициентов расширения корпуса камеры из нержавеющей стали и стеклянного окна. Решение ее в случае 10-дюймовой камеры могло оказаться непригодным для 72-дюймовой. Предложенная Джеком Фрэнком упругая прокладка позволяла вмонтировать стекло в корпус камеры только после того как и то и другое было охлаждено до водородных температур.

Как раз перед отъездом в Стокгольм я присутствовал на церемонии, где Полю Эрнандесу был вручен приз как «виртуозу проектирования» за его достижения в инженерных разработках 72-дюймовой камеры. Там мне представилась приятная возможность рассказать о его неоценимом вкладе в успешное завершение нашей программы более подробно, нежели я могу позволить себе это здесь.

Один из его сотрудников специально отметил его заслуги не только перед нашей группой, но и перед всеми теми, кто вслед за нами будет строить водородные пузырьковые камеры. Эрнандес совместно со своими сотрудниками составил отчет под названием «Инженерные записки», содержащий материалы, представляющие интерес для проектировщиков водородных пузырьковых камер, который состоял из серии книжек, занявших на книжной полке место шириною в три фута. Копии этих книжек разосланы всем

заинтересованным организациям по обе стороны Атлантического океана, и я не сомневаюсь, что они помогут всем строителям пузырьковых камер сэкономить в общей сложности сумму порядка нескольких миллионов долларов. Не располагая всей этой информацией, многим лабораториям пришлось бы продублировать контрольные опыты и расчеты, проведенные нашей инженерной группой, а это стоит больших денег и отнимает много времени. Наша программа осуществлялась столь быстрыми темпами, что не было времени, чтобы придать инженерным запискам законченную форму для опубликования их в периодической литературе. Поэтому читающий обзорные статьи по технологии пузырьковых камер теперь может даже и не подозревать о том вкладе, который внесла в их разработку наша лаборатория. Он не сможет найти ссылок на статьи сотрудников нашей группы, поскольку они вообще не были написаны — результаты, которые должны были бы составить их содержание, стали общедоступны для всех, кто был в них заинтересован, еще значительно раньше.

Чтобы показать, насколько вплотную я сам занимался конструированием камеры, я мог бы рассказать историю о том, как я умышленно сам себя «загнал в угол». Это произошло потому, что преимущества придуманного мною усовершенствования казались мне очень большими, а преодоление трудностей, которые ему сопутствовали, я считал только вопросом времени. Все предыдущие камеры имели по два окна со сквозным освещением. Такая конфигурация уменьшала максимально достижимую величину напряженности магнитного поля из-за того, что противоположный от фотокамеры полюс магнита и осветительная система мешали друг другу. Я решил, что 72-дюймовая камера будет иметь только одно верхнее окно. Это позволяло увеличить магнитное поле за счет нижнего полюса магнита и в то же время избавляло от расходов на второе стекло, а также способствовало безопасности работы, устраняя возможность просачивания жидкого водорода через разбитое нижнее окно. Единственная трудность состояла в том, что свыше года, пока проект «утраивался» и уже были изготовлены отдельные части, никто из нас не мог придумать, как умудриться освещать камеру и фотографировать пузырьковые треки, имея в распоряжении только одно окно. Дюан Норгрэн, на котором лежала ответственность за оснащение всех наших камер фотоаппаратурой, обсуждал со мной этот вопрос не реже одного раза в неделю на протяжении всего этого критического года, и мы испробовали десятки схем, ни одна из которых не оказалась удовлетворительной. Тем не менее умудренные этими неудачами, мы наконец пришли к полному пониманию всех стоящих перед нами проблем и, в конце концов, придумали обращающую систему, известную теперь под названием «вешалки». Это решение пришло далеко не сразу. Если бы оно запоздало на месяц или более, то и начало работы 72-дюймовой камеры пришлось бы тоже соответственно отложить. Нам пришлось пойти на определенный риск также и во многих других вопросах — если бы мы откладывали производство большей части металлической арматуры до решения всех проблем на бумаге, то наш проект, возможно, остался бы незавершенным и по сию пору. Инженеры являются консерваторами по природе — в их понимании допустить взрыв котла или разрушение моста, значит, быть навсегда опозоренным. Поэтому нам очень повезло в том отношении, что главным инженером у нас был Поль Эрнандес. Он серьезно рассматривал любое предложение, которое вносилось его коллегами-физиками, каким бы диким оно ни выглядело на первый взгляд, и решительно отвергал его только в том случае, если оно было несовместимо с соображениями безопасности, но прежде чем сделать это, он прилагал все свое инженерное искусство, чтобы сделать безопасной предлагаемую идею.

Мы понимали, что нуждаемся в учебной камере, чтобы приобрести опыт работы с системой, имеющей одно-единственное окно, и научиться обращению с водородным рефрижератором. Во всех наших прежних камерах жидкий водород использовался в качестве охладителя. Поэтому мы построили и поместили в пауэлловский магнит 15-дюймовую камеру вместо 10-дюймовой, которая уже сослужила нам такую хорошую службу.

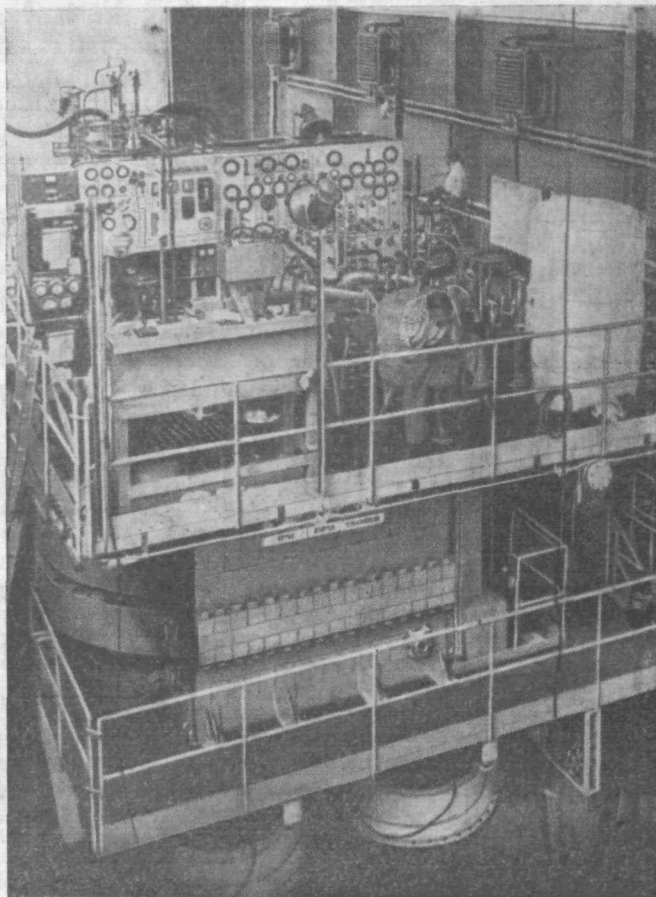


Рис. 7. 72-дюймовая камера в процессе сборки.

Впервые 72-дюймовая камера заработала 24 марта 1959 г., почти через четыре года после того как было всерьез задумано ее строительство. На рис. 7 представлена ее фотография в то время. Ее «пусковая группа» состояла из Дона Гоу, Поля Эрнандеса и Боба Уотта, каждый из которых играл ключевые роли во время пуска 15-дюймовой камеры. Боб Уотт и Гленн Экман были ответственны за работу всех наших камер со времени пуска 10-дюймовой камеры, и часто от них зависел успех программы в целом. В условиях постоянного и разнообразного риска они установили абсолютный рекорд безаварийной работы и предоставили в распоряжение своих коллег-физиков около десяти миллионов высококачественных стереофотоснимков. И наконец, совсем недавно они доказали, что могут конструировать камеры не хуже, чем работать на них: опираясь во многом

на конструктивные соображения Уотта и Экмана, мы недавно увеличили 72-дюймовую камеру до 82-дюймовой.

Хотя я еще не отдал должного тому вкладу, который внесли многие мои близкие друзья и сотрудники, принимавшие участие в создании наших пузырьковых камер, мне придется теперь перейти к другому важному аспекту нашей деятельности — системе обработки экспериментальных данных. Вскоре по окончании мною в 1955 г. подготовки программы создания большой пузырьковой камеры Хью Брэднер направил свои усилия на разработку предложения о полуавтоматическом устройстве для обработки данных. Прежде всего он исчерпывающим образом изучил

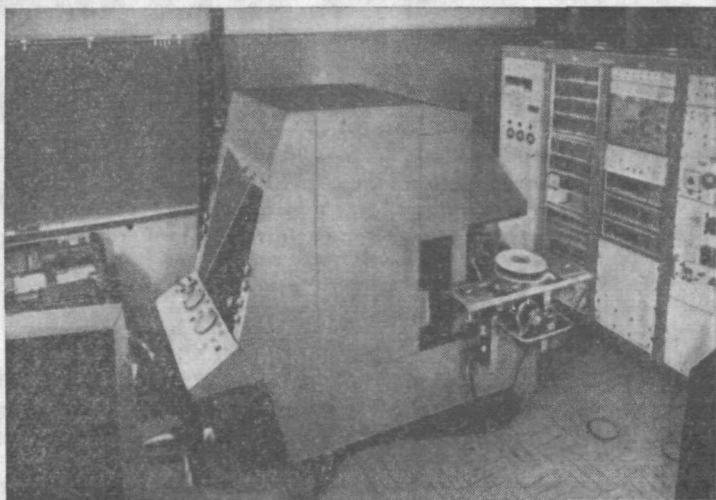


Рис. 8. «Франкенштейн».

имевшиеся в продаже измерительные устройства, технику программирования и т. п. и затем совместно с Джеком Франком сконструировал первый «Франкенштейн». Это революционизирующее изобретение стало впоследствии настолько распространенным, что машины подобного типа известны теперь как «общепринятые» измерительные устройства (рис. 8). Наш первый «Франкенштейн» надежно заработал в 1957 г., а летом 1958 г. его копия экспонировалась в Женеве на устроенной США выставке «Атом для мира». Она вызвала огромный интерес среди физиков, работающих в области высоких энергий, и многие лаборатории принялись за создание основанных на том же принципе аналогичных машин. Вначале почти все считали, что наша ориентация на автоматическое слежение за треками является ненужной и бесполезной тратой денег, однако прошли годы, и этот метод работы также стал общепринятым.

Тем временем Джек Франк приступил к конструированию «Франкенштейна-2» для обработки пленок, снятых на 72-дюймовой камере. Первая такая машина была готова как раз ко времени пуска большой камеры. Впоследствии он построил еще три «Франкенштейна-2». Параллельно другие сотрудники нашей группы конструировали и совершенствовали более быстродействующую и менее дорогостоящую систему SMP, которая значительно увеличила наши измерительные возможности. Инициаторами этих разработок были Пит Швимин, Бот Хулзицер, Питер Дэви, Рон Росс и Билл Хэмфри⁴⁵. Последний и самый большой шаг на пути наращивания измерительных мощностей завершился несколько лет назад

созданием нашего первого спирального измерителя. Одна только эта машина обработала уже полтора миллиона столкновений частиц высокой энергии, а вместе с почти точной своей копией — один миллион с четвертью событий за один лишь последний год.

История спирального измерителя весьма своеобразна: одно время в силу ряда случайных обстоятельств большинство наших сотрудников, занимавшихся его разработкой, полагало даже, что ее следует прекратить. Основной принцип спирального сканирования был предложен в 1956 г. Мак-Кормиком. Наши попытки воплотить принцип в жизнь потерпели неудачу, и вскоре после этого Мак-Кормик уехал в Иллинойс, где стал заниматься вычислительными машинами. После того как в последующие годы резко понизилась стоимость транзисторных схем, мы вторично попытались реализовать идею спирального измерителя, используя на этот раз цифровое устройство взамен аналогового, которое применялось ранее. Это устройство казалось многообещающим, однако «запамятная логика» делала его слишком негибким, а ненадежность его электроники приводила к тому, что большую часть времени оно проводило в ремонте. Зато механическая и оптическая части второго спирального измерителя были превосходны, и мы не решились все бросить просто из-за того, что электрические контуры еще не достигли такого же совершенства. В 1963 г. Джек Ллойд предложил нам использовать в спиральном измерителе логику и контуры одного из новых типов небольших быстродействующих и недорогих электронных вычислительных машин. Затем, проявив незаурядные организаторские способности, он приобрел для нашей группы такую машину, которая, как выяснилось, оказалась даже лучше, чем он нам сулил. В дополнение к своей успешной деятельности по приобретению оборудования, он придумал РООН, фильтрующую программу для спирального измерителя, которая затем была доведена до высокого совершенства Джимом Бакхардом. Плановому и быстрому превращению спирального измерителя из исследовательской разработки в рабочий инструмент физики мы обязаны, в частности, нескольким годам напряженного труда Джерри Линча и Фрэнка Солмитца. На рис. 9, взятом из моего сообщения, сделанного два с половиной года назад ⁴⁶, показано, как с течением времени возрастали наши измерительные возможности при очень скромном увеличении числа сотрудников.

Основываясь на простой экстраполяции экспоненциальной кривой, которая описывала этот рост с 1957 по 1966 г., мы могли надеяться, что в 1969 г. будем в состоянии обрабатывать ежегодно полтора миллиона событий. Однако мы достигли этого уровня уже сейчас и вскоре перестали его повышать, так как приостановили наши исследования в этом направлении.

Третьим ключевым направлением в программе наших исследований было непрерывное возрастание степени использования вычислительных машин по мере того, как увеличивалась их скорость и объем памяти. Если о конструировании пузырьковых камер и измерительных устройств, как и о занимавшихся этими вопросами физиках, я мог говорить как человек, принимавший непосредственное участие во всех этих разработках, то в деле использования для решения наших задач электронно-вычислительной техники мое участие сводилось к роли изумленного наблюдателя. Нам очень повезло, что в 1956 г. к нашей группе решил присоединиться Фрэнк Солмитц. В то время как остальные сотрудники группы считали себя экспериментаторами, Солмитц был по образованию теоретик и проявил незаурядные способности в развитии статистических методов обработки экспериментальных данных. Обнаружив, что наш первый «Франкенштейн» уже накануне пуска, а никакой программы

машинной обработки данных, которые будут с него поступать, нет и в помине, он сразу же принялся исправлять ситуацию. Он составил HYDRO — нашу первую стандартную программу для вычислительной машины IBM-650. В последующие двенадцать лет он бесценно нес тяжелую ответственность за все наши работы по программированию. Большинство прорывов в обработке событий, снятых в пузырьковой камере,

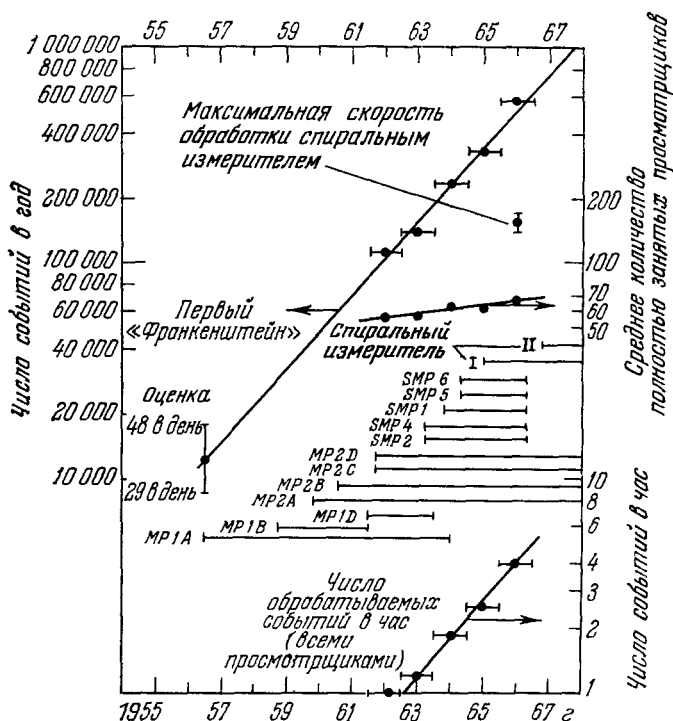


Рис. 9. Скорость обработки экспериментальных данных.

приходится на период с 1957 по 1959 г. В это время Солмитц и Арт Розенфельд, совместно с Горацием Тафтом из Йельского университета и Джимом Снайдером из Иллинойса, составили первую программу «стандартной подгонки» GUTS, которая стала основой нашей первой «кинематической программы» KICK. Чтобы понять, что сделала эта программа, проще всего описать, что должен был проделывать физик до того, как она была составлена. С помощью программы HYDRO и ее преемника — программы PANG — в каждой вершине определялись импульсы и пространственные углы, соответствовавшие трекам частиц, входивших и выходивших из данной вершины, и одновременно вычислялись возможные ошибки этих измерений. Физика предстояло нанести полученные таким образом угловые координаты на стереографическую проекцию единичной сферы, известную под названием плоскости Вольфа. Если он имел дело с трехлучевой вершиной, — а только с такими вершинами мы были тогда в состоянии справиться, — он должен был перемещать точки по сфере, в пределах допустимых ошибок, чтобы по возможности сделать векторы компланарными. И, разумеется, ему приходилось (тоже в пределах ошибок) одновременно изменять величины импульсов, чтобы их векторы образовывали треугольник, т. е. чтобы обеспечить сохранение энергии. Поскольку импульс является векторной величиной, все необходимые условия удавалось удовлетворить одновременно только в результате своего рода

итерационной процедуры, т. е. путем постепенного многоступенчатого подбора углов и длин векторов. В итоге получался наиболее оправданный набор импульсов и углов, связанных требованиями сохранения энергии и импульса. Обычно опытный физик мог в течение дня справиться только с небольшим числом подобных задач. (Линн Стивенсон составил для решения одного частного интересовавшего его вопроса специальную программу, *COPLAN*, которая впоследствии была заменена более универсальной программой *GUTS*.)

Программа *GUTS* была составлена как раз в то время, когда один весьма уважаемый посетитель заметил, что большое количество данных, полученных с помощью программы *PANG*, остались непроанализированными, так как многие наши сотрудники были заняты написанием *GUTS*-программы, которая была предназначена для того, чтобы выполнить эту работу автоматически. Наш посетитель был очень недоволен и назвал это «неразумным использованием наших сил». Он сказал: «Если бы вы сняли всех этих людей с разработки их программы и посадили бы их за решение задач на плоскости Вольфа, то через один или два месяца мы получили бы ответы на ряд действительно важных вопросов физики». Я ответил, что не сомневаюсь в том, что если мои коллеги продолжат работу над составлением программ *GUTS* и *KICK*, то в следующем году мы получим несравненно большее количество физической информации. Я уверен, что те, кто составлял эти совершенно новые подгоночные и кинематические программы, подверглись подобному же давлению. Все физики, работающие в области физики высоких энергий, будут всегда благодарны этим прозорливым людям, так как те знали, что находятся на правильном пути. Вскоре программа была доведена до такого уровня, что могла обеспечить полную обработку сразу нескольких взаимосвязанных *V*-событий одновременно с проверкой различных гипотез о принадлежности треков, которые возникали в процессе подгонки. Так как соотношение между энергией и импульсом зависит от массы, подобная подгонка, сильно ограниченная многими связями, возможна только при условии, что каждому треку поставлена в соответствие именно та частица, которая в действительности его оставила. Когда же количество связей не так велико, подгонка возможна при различных «гипотезах» (некоторые треки могут приписываться различным частицам) и для их отождествления физик у необходимо привлечь на помощь свой здравый смысл.

В качестве другого примера я хотел бы упомянуть в своем очень кратком повествовании о вычислительной стороне нашей деятельности об одной весьма важной программе, составленной Артом Розенфельдом и Роном Россом, которая избавила физиков, работающих с пузырьковыми камерами, от значительной доли еще оставшейся нудной работы. Я имею в виду программу *SUMX*, которая позволила быстро ориентироваться в большом количестве данных, поставляемых кинематической программой, отпечатывать сводки и таблицы интересующих данных (как и все наши первоначальные программы *SUMX* впоследствии уступила место улучшенной и более универсальной программе *KIOWA*, однако я буду продолжать рассказ так, как если бы мы и по сей день пользовались программой *SUMX*). Типичным выходом программы *SUMX* является отпечатанный на печатном устройстве вычислительной машины отчет толщиной 3 дюйма, содержащий сотни гистограмм, диаграмм реакций и т. п.

Аналогичным образом печатаются сотни гистограмм, описывающих множество различных событий с указанием эффективных масс всевозможных комбинаций частиц, величин передаваемого ими импульса и т. п. Все это означает, что теперь физик больше не приходится решать, какую именно гистограмму он должен утомительно вычерчивать и затем анали-

зировать. Он просто приказывает вычислительной машине вычертить все гистограммы, имеющие самый различный смысл, а затем перелистывает страницы, чтобы увидеть, какие из них характеризуются интересующими его свойствами.

Одна из моих немногочисленных попыток принять участие в работе по программированию состояла в том, что я навел Джерри Линча на мысль о целесообразности составления одной специальной программы, которая и была им разработана и известна под названием GAME. Еще до Второй мировой войны, в то время, когда я занимался вопросами ядерной физики, я часто высказывал скептицизм по поводу той интерпретации «горбов» на гистограммах, которой придерживались обнаружившие их авторы. Я выработал свой собственный критерий оценки их статической обеспеченности, который основывался на построении искусственной гистограммы в предположении, что истинные кривые являются плавными. Используя таблицу случайных чисел, я построил с помощью метода Монте-Карло ряд примеров. Как правило, я убеждался, что имел для своего скептицизма все основания, поскольку оказывалось, что такая «поддельная» гистограмма обладала столь же богатой структурой, что и приведенная в соответствующей публикации. Разумеется, разработано множество статистических методов, помогающих установить истинную природу «горбов» на гистограммах, однако по своему опыту я знаю, что среди них нет более надежного, чем анализ ряда искусственных гистограмм, полученных в предположении, что истинное распределение является плавным.

Программа GAME как раз и позволила с помощью нескольких контрольных карт строить сотни гистограмм, аналогичных той, которая была получена в данном конкретном эксперименте. Все они строятся на основе того же числа событий, что и в реальном эксперименте, но базируются на предположении, что через экспериментальные точки можно провести плавную кривую. Обычный способ состоит в следующем: нужно попросить нескольких физиков просмотреть 100 гистограмм, среди которых есть, в частности, и экспериментальная, и решить голосованием вопрос о статистическом смысле присутствующих в них флуктуаций. В первый раз, когда испытывался этот способ, экспериментатор, уверенный в реальном существовании обнаруженного им «горба», не знал, что среди тестовых гистограмм имеется и его собственная, и не выбрал ее в качестве наиболее правдоподобной — вместо этого он выбрал в качестве отражающих истинную структуру две искусственные гистограммы, а остальные, включая свою собственную, отнес к разряду случайных! Этот пример показывает, скольких отречений от необоснованных утверждений нам удалось избежать, имея в своем распоряжении программу GAME.

Последнее, о чем я хотел бы упомянуть, говоря о нашей коллекции программ, — это программа FAKE, которая подобно SUMX широко используется лабораториями всего мира, работающими с пузырьковыми камерами. Программа FAKE, составленная Джерри Линчем, вырабатывает искусственные данные о процессах, происходящих в пузырьковой камере, с тем, чтобы осуществлять контроль за анализирующими программами и выяснить, какова вероятность получения с их помощью ошибочного ответа.

Теперь, познаколив вас с осуществленными нами параллельно разработками измерительной аппаратуры и вычислительной техники (программ для вычислительной машины), я могу перейти к рассказу о том, как мы, физики, были вознаграждены за этот труд. Наши работы на 184-дюймовом циклотроне и на бэватроне с 4-дюймовой камерой вряд ли можно всерьез называть экспериментом, хотя в результате и были продемонстрированы примеры π — μ — e -распадов, а также распады нейтральной

странной частицы. Опыт, который мы приобрели при изучении пленки, отснятой на 4-дюймовой камере, только разжег наше воображение о перспективах той захватывающей физики, с которой мы непременно надеялись встретиться при работе с помещенной в большой пауэлловский магнит 10-дюймовой камерой.

В 1955 г. в нашу группу пришел Роберт Трипп. Его первым вкладом в наши исследования была разработка метода получения сепарированного пучка отрицательных K^- -мезонов, которые затем тормозились в 10-дюймовой камере. Начиная свою программу исследований с использованием пузырьковых камер с изучения свойств K^- -мезонов при их торможении в водороде, мы руководствовались двумя соображениями. Первое из них было физического характера: Панофским и его сотрудниками ⁴⁷ было продемонстрировано, что изучение торможения π^- -мезонов в водороде является наиболее плодотворным методом получения фундаментальной информации о свойствах элементарных частиц. Второе основывалось на инженерных соображениях: физики могли использовать для своих экспериментов только одну «прямолинейную» секцию бэватрона, и поэтому он всегда был занят. Для того чтобы не мешать другим, мы решили установить свою 10-дюймовую камеру вблизи изогнутого сектора бэватрона и использовать вторичные частицы, которые получают в результате взаимодействия пучка с внутренней мишенью и вылетают через стенку вакуумной камеры, а затем проходят между соседними железными блоками ярма бэватронного магнита. Условия были таковы, что мы могли иметь в своем распоряжении низкоэнергетические отрицательные частицы (K^- - и π^- -мезоны) со строго определенным импульсом. Ставя на пути пучка поглотитель, мы добивались того, что K^- -мезоны почти полностью останавливались, между тем как π^- -мезоны сохраняли значительную часть своего первоначального импульса. С помощью пауэлловского магнита K^- -мезоны направлялись в камеру, в то время как π^- -мезоны проходили мимо. Таким образом, теоретически перед попаданием в пузырьковую камеру они должны были разделиться, однако на практике камера оказалась заполненной треками пионов и мюонов; в конечном счете, в каждой катушке из 400 стереофотоснимков мы увидели всего лишь одну остановку K^- -мезона. Теперь экспериментаторы в каждом эксперименте наблюдают обычно миллион остановок K^- -мезонов в водороде, однако те 137 событий, которые мы сумели зарегистрировать в 1958 г. ⁴⁸, были замечательным прологом к позднейшим несравненно более обширным исследованиям. Мы измерили отношение сечений реакций

$$K^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-, \quad K^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-, \quad K^- + p \rightarrow \Sigma^0 + \pi^0, \quad K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^0.$$

Кроме того, по ходу дела мы измерили с хорошей точностью массу Σ^0 -частицы. Мы получили также первые кривые распада Σ^- -гиперонов и впервые наблюдали взаимодействие остановившихся гиперонов Σ^- с протонами. Мы чувствовали себя полностью вознагражденными за годы конструирования и строительства пузырьковых камер, получив привилегию осуществить эти интереснейшие наблюдения.

В то время мы приобрели также весьма интересные навыки, которые явились результатом двух обстоятельств, больше уже не повторявшихся в экспериментах с пузырьковыми камерами. Прежде всего все мы сами просматривали наши фотопленки. Теперь эту работу выполняют профессиональные просмотрщики, которых специально тщательно обучают распознавать и регистрировать «интересные» события. В то время профессиональных просмотрщиков еще не было, хотя бы уже просто потому, что до отснятия первых пленок неизвестно было, как их обучать. Но даже если бы они и были, мы не доверили бы им просмотр пленки — мы нашли

ее до такой степени затемненной, что позади каждого из немногих просматривавших пленку стоял кто-либо, готовый заменить его, когда глаза первого устанут. Второе обстоятельство, которому мы обязаны приобретением этих случайных навыков, состояло в том, что по современным стандартам пучок K^- -мезонов был отсепарирован от других частиц очень плохо. Большинство из зарегистрированных нами треков принадлежало отрицательным пионам и мюонам. Кроме того, мы видели также и много положительно заряженных частиц — протонов, пионов и мюонов.

Вначале мы анализировали только те события, в которых принимали участие странные частицы: мы торопливо просматривали кадры пленки и откладывали в сторону все те, на которых «интересных» реакций не было. В процессе просмотра мы часто видели распады $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^+$, причем обычно пион покоился, и вскоре выяснили, что длина всех μ^+ -мезонных треков около одного сантиметра. Я просматривал пленку с помощью стереоскопа и поэтому, вероятно, лучше мог оценивать длины треков μ^+ -мезонов в пространстве, чем мои коллеги, которые рассматривали последовательно две проекции пространственной картины. Дон Гоу, Хью Брэднер и я часто работали одновременно, и мы показывали друг другу кадры, на которых в поле зрения попадали интересные события. Каждый из нас показывал другим случаи казавшегося нам необычным распада $\pi^- \rightarrow \mu^- + e^-$. На основе ранних экспериментов, выполненных Конверзи и др.³, можно было ожидать, что это распад в водороде покоящегося π^- -мезона с образованием электрона, однако Панофский⁴⁷ показал, что покоящийся в водороде π^- -мезон распадаться не может. Первое объяснение, которое пришло нам на ум, состояло просто в том, что π^- -мезон распадается непосредственно перед остановкой. Однако постепенно мы приходили к убеждению, что такое объяснение ошибочно: наблюдалось слишком много μ -мезонных треков одинаковой длины, а существенно более длинные и более короткие треки вообще отсутствовали. Это, разумеется, противоречило гипотезе о том, что π^- -мезон распадается еще до остановки. Тогда мы начали отбирать эти, как мы их тогда называли, «аномальные распады». Среди них оказались и такие, в которых мюон летел в камере горизонтально, так что длину его пробега можно было измерить точно. (Мы тогда еще не умели восстанавливать треки по двум проекциям.) Сравнивая измеренную таким образом длину трека отрицательного мюона с длиной соответствующего μ^+ -мезонного трека, нам удалось определить его энергию, которая оказалась равной $5,4 \text{ Мэв}$, в отличие от хорошо известной энергии положительных мюонов (рождающихся при распаде покоящихся положительных пионов), равной $4,1 \text{ Мэв}$. Это укрепило нас в возникшем уже ранее подозрении, что первый длинный трек соответствовал не пиону, а какой-то другой отрицательной частице, однако мы оставались в неведении относительно того, что это за частица.

Когда наблюдения были завершены, я провел семинар, на котором описал сложившуюся ситуацию, и высказал предположение, что, быть может, первичная частица принадлежит к числу еще не известных слабо взаимодействующих частиц и что, будучи тяжелее пиона, она распадается с образованием мюона и нейтральной частицы, каковой может быть нейтрино либо фотон.

Как раз в это время мы обнаружили одно интересное обстоятельство, которое иллюстрируется рис. 10 и состоит в том, что между концом трека первичной частицы и началом трека вторичной часто существует зазор, величина которого измеряется миллиметрами. Это означало, что какая-то долгоживущая отрицательная частица, диффундируя через водород, садится на орбиту какого-либо протона, в результате чего образуется

нейтральная система. Выяснилось, что мы проглядели множество треков с подобными зазорами. Это объяснялось тем, что никто из нас не сталкивался раньше с подобным явлением и поэтому мы просто не придавали значения таким конфигурациям треков, подсознательно полагая, что это не что иное, как пары не связанных друг с другом событий в очень засоренной пузырьковой камере.

Как-то вечером один из сотрудников нашей группы, Гарольд Тичо, обедал с Джеком Кроуфордом, астрономом из Беркли, которого он знал

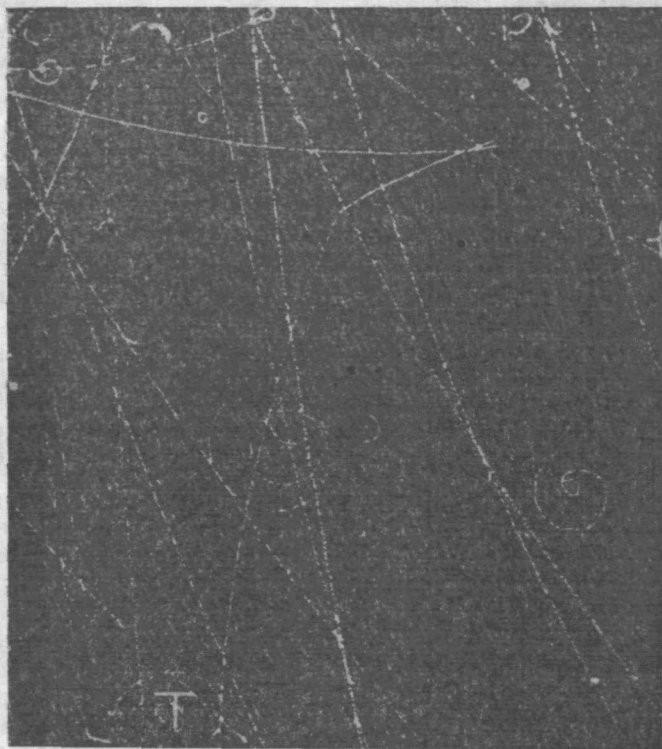


Рис. 10. Мюонный катализ (с зазором)

по совместной учебе в университете. Они довольно подробно обсуждали наши наблюдения, и Кроуфорд высказал предположение, что, возможно, они объясняются тем, что происходит какая-то реакция ядерного синтеза. Они подсчитали энергию, которая освобождается в ряде подобных реакций, и обнаружили, что ее величина согласуется с экспериментальными данными, если допустить, что остановившийся мюон вместе с протоном и дейтоном объединяются в μ -мезомолекулу μD . В такой «молекуле» протон и дейтон находятся в непосредственной близости в течение времени, достаточно продолжительного для того, чтобы превратиться в атом ^3He , а освобождающуюся при этом энергию передать посредством внутренней конверсии мюону. Однако они никак не могли придумать какой-либо механизм, который объяснял бы весьма большую вероятность подобной реакции, так как примесь дейтонов в заполнявшем камеру жидком водороде была всего лишь 0,05%. Тем не менее они все же правильно установили реакцию, хотя ключевой пункт в теоретическом объяснении всего происходящего все еще не был найден.

На следующий день, когда мы уверовали в идею, что остановившиеся мюоны являются катализаторами синтеза протонов с дейтонами, вся наша группа отправилась с визитом к Эдварду Теллеру, который принял нас в своем доме. Вскоре после знакомства с экспериментальной ситуацией и предполагаемым ее объяснением с помощью соответствующей реакции синтеза, он следующим образом объяснил большую вероятность этой реакции. Остановившийся мюон садится на нижнюю боровскую орбиту протона. При этом многие свойства получающегося в результате μ -мезоатома водорода роднят его с нейтроном, так что он легко может диффундировать в жидком водороде. Когда в образующейся затем молекуле HD он подходит близко к дейтону, мюон переходит на дейтонную орбиту, так как из-за эффекта приведенной массы основное состояние μ -D-мезомолекулы ниже, чем основное состояние μ -p-мезоатома. Получающийся при этом тяжелый нейтрон μ -p может вследствие реакции обмена испытать отдачу, чем и объясняется наблюдаемый зазор между треками. Окончательный захват протона с образованием μ -мезомолекулы $pD\mu^-$ также энергетически выгоден, поэтому теперь уже протон и дейтон, будучи связаны общим тяжелым отрицательным мюоном, могут сближаться настолько, чтобы превратиться в ядро ^3He , передав посредством внутренней конверсии освобождающуюся при этом энергию мюону.

Мы пережили короткий, но радостный период, в течение которого нам казалось, что мы навсегда решили энергетические проблемы, стоящие перед человечеством. Результаты нескольких успешных прикидок свидетельствовали в пользу того, что в жидком состоянии HD каждый отрицательный мюон мог бы за время своей жизни катализировать последовательность ядерных реакций синтеза, достаточную для того, чтобы обеспечить энергию, необходимую для генерации дополнительных мюонов и производства жидкого HD из морской воды. В то время как все пытаются решить эту проблему, нагревая водородную плазму до миллионов градусов, мы, казалось бы, вместо этого натолкнулись на ее решение в условиях очень низких температур. Однако вскоре более надежные оценки показали, что в действительности нам не достает нескольких порядков — очень «небольшой просчет» в подобного рода физике! ⁴⁸.

Как раз перед опубликованием своих результатов ⁴⁹ мы обнаружили, что возможность мюонного катализа была предложена Франком ⁵⁰ еще в 1947 г. в качестве альтернативного объяснения того, что Пауэлл и др. считали (и правильно) распадом π^+ -мезона с образованием положительного мюона. Франк предполагал, что это могла бы быть как раз та реакция, которую мы обнаружили в жидком водороде, но только с участием положительного пиона, а не отрицательного мюона. Впоследствии эти идеи Франка были развиты Зельдовичем ⁵¹, однако в Беркли их работы никому не были известны и мы успели испытать гордость первооткрывателей, чего были бы лишены в противном случае.

Заканчивая историю этого эпизода, я только скажу еще, что мы немедленно увеличили примесь дейтерия в жидком водороде и обнаружили ожидаемое увеличение числа реакций синтеза, причем наблюдали даже два случая последовательного катализа одним и тем же мюоном (рис. 11). Мы обнаружили также, что в чистом жидком дейтерии мюоны выступают в качестве катализатора реакции $D + D \rightarrow ^3\text{H} + ^1\text{H}$.

Через несколько месяцев после того, как мы сообщили о наших результатах по мюонному катализу, физики, занимающиеся элементарными частицами, были потрясены открытием несохранения четности при β -распаде. Проверяя теоретические предложения Ли и Янга ⁵², мадам Ву совместно со своими сотрудниками ⁵³ показала, что β -лучи, образующиеся при распаде поляризованных ядер ^{60}Co , преимущественно излучаются

в направлении, противоположном направлению спина. Ли и Янг предсказывали, что несохранение четности может наблюдаться также при слабом распаде Λ -гиперона на протон и отрицательный пион. Ф. Кроуфорд совместно с еще несколькими нашими сотрудниками поместили 10-дюймовую камеру на пути пучка отрицательных пионов и проанализировали

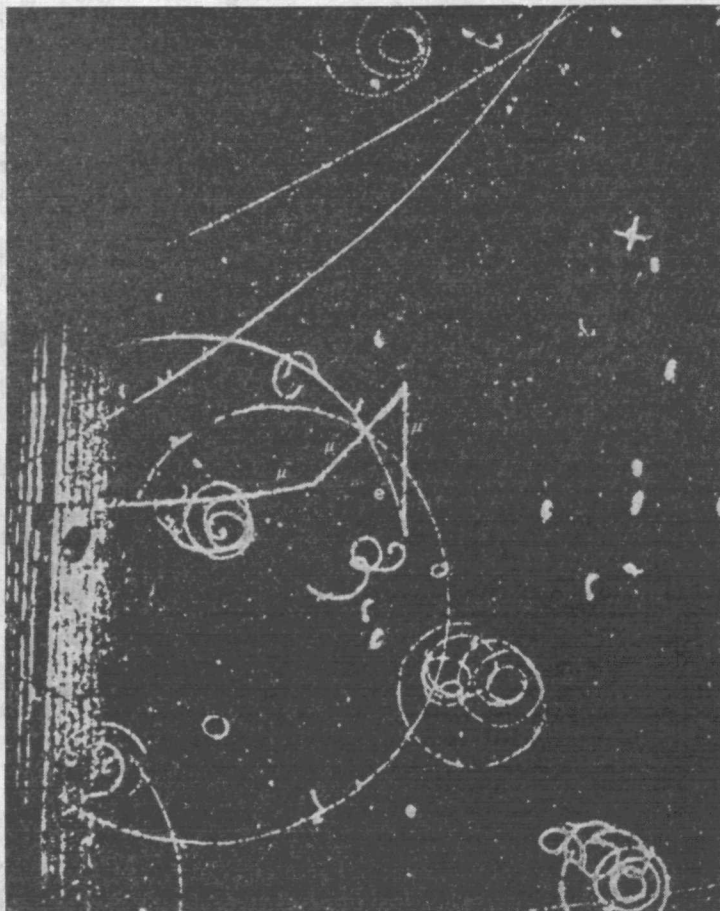


Рис. 11. Двукратный мюонный катализ.

большое число распадов Λ -частиц, которые рождались в результате соответствующих реакций в жидком водороде; как и предсказывали Ли и Янг, они обнаружили асимметрию «вверх — вниз» пионов, возникавших в результате распада Λ -частиц, относительно нормали к плоскости реакции рождения. Таким образом, им принадлежит честь первенства в наблюдении несохранения четности при распадах гиперонов ⁵⁴.

Зимой 1958 г. 15-дюймовая камера выполнила свою роль инженерного макета для 72-дюймовой камеры и впервые начала использоваться как прибор для экспериментальных наблюдений. Гарольд Тичо, Бад Гуд и Филипп Эбергарт ⁵⁵ разработали методику и получили первый сепарированный пучок отрицательных K -мезонов с импульсом больше 1 Гэв/с . На рис. 12 показан общий вид пузырьковой камеры, когда через нее проходит этот пучок, и в тех случаях, когда выключены один или оба электростатических сепаратора. Трудно даже представить себе ту изобрета-

тельность, которая была вложена, в основном Тичо и Мюрреем, в решение проблемы выделения пучка K -мезонов, но трудно переоценить также и ту роль, которую пучок сыграл в успешном осуществлении намеченной нами программы⁵⁵. Недавно Джо Мюррей перешел работать на Стэнфордский линейный ускоритель, где в течение короткого времени построил

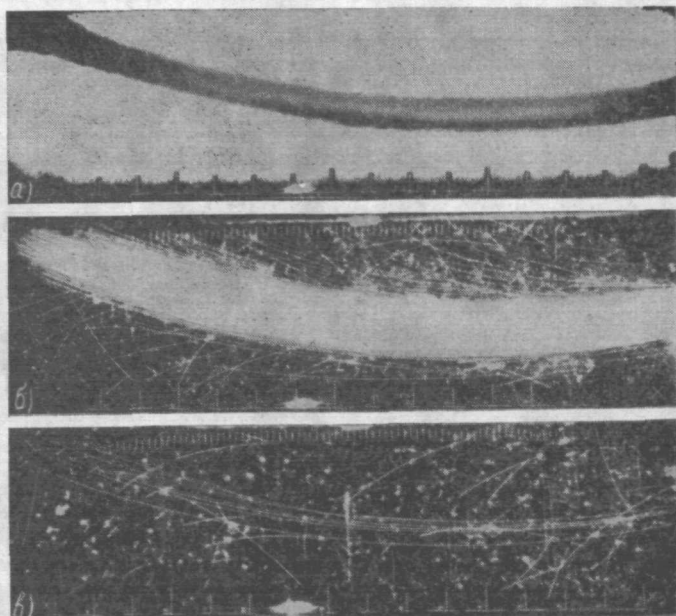


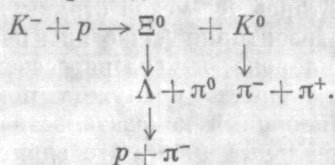
Рис. 12. Пучок отрицательных K -мезонов в 72-дюймовой пузырьковой камере.

а) Оба спектрометра выключены; б) включен один спектрометр; в) включены оба спектрометра.

очень хорошую радиочастотную систему выделения сепарированного пучка K -мезонов и рассеянного назад лазерного пучка.

Первое, на что мы нацелились, получив в руки 15-дюймовую камеру, была проблема Ξ^0 -гиперона. Согласно предсказанию Гелл-Манна Ξ^- -гиперон должен был быть членом изоспинового дублета со странностью, равной -2 . Его ожидаемым партнером должен был явиться нейтральный гиперон, распадающийся на Λ -гиперон и π^0 -мезон — оба нейтральные и, следовательно, как и сам гиперон Ξ^0 , не оставляющие следов в пузырьковой камере. Несколькими годами раньше Виктор Вайскопф, выступавший на вечернем заседании во время одной из конференций, вызвал в аудитории взрыв громового смеха, показав абсолютно чистую фотографию, сделанную в камере Вильсона, и сказав, что она является доказательством распада новой нейтральной частицы на две другие, тоже нейтральные частицы! А теперь мы всерьез планировали сделать то, что всего лишь несколько лет назад казалось совершенно абсурдным.

Согласно предложенным Гелл-Манном и Нишиджимой правилам отбора по странности, Ξ^0 -гиперон должен был наблюдаться в реакции



В одном зарегистрированном нами случае этой реакции, показанном на рис. 13, для ее идентификации мы поступили следующим образом. Заряженные пионы, образовавшиеся в результате распада нейтрального K -мезона, послужили для определения его энергии и направления его импульса, хотя сам он и оставался ненаблюдаемым. Используя законы

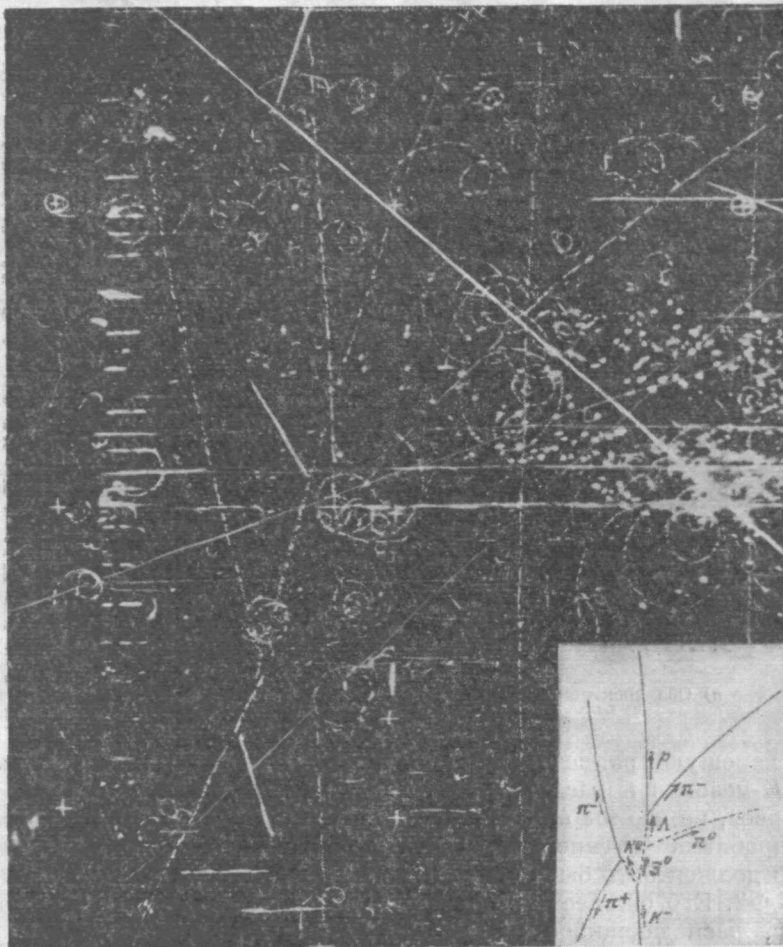


Рис. 13. Рождение и распад нейтрального каскадного гиперона.

сохранения энергии и импульса (совместно с данными об импульсе первичного K^- -мезона), мы смогли вычислить массу родившегося в паре с K^0 -мезоном Ξ^0 -гиперона, а также его скорость и направление движения. Аналогично этому, измерение кинематических характеристик π^- -мезона и протона позволило определить энергию и направление движения ненаблюдаемой Λ -частицы и доказать, что она не вылетает непосредственно из той же точки, в которой K^- -мезон столкнулся с протоном. Рассчитанная на основе этого траектория Λ -частицы пересекалась с рассчитанной же траекторией Ξ^0 -гиперона, и угол пересечения двух этих ненаблюдаемых, но вычисленных треков послужил подтверждением полученного значения массы Ξ^0 -гиперона и доказательством того, что он распадается на Λ^- -частицу и нейтральный пион. Это единственное, но надежно уста-

новленное событие послужило своего рода примером, ясно продемонстрировавшим возможности водородной пузырьковой камеры совместно с разработанной для нее техникой обработки экспериментальных данных.

Хотя за то короткое время, в течение которого через 15-дюймовую камеру проходил пучок отрицательных K -мезонов, удалось наблюдать только один Ξ^0 -гиперон, попутно было накоплено для изучения множество

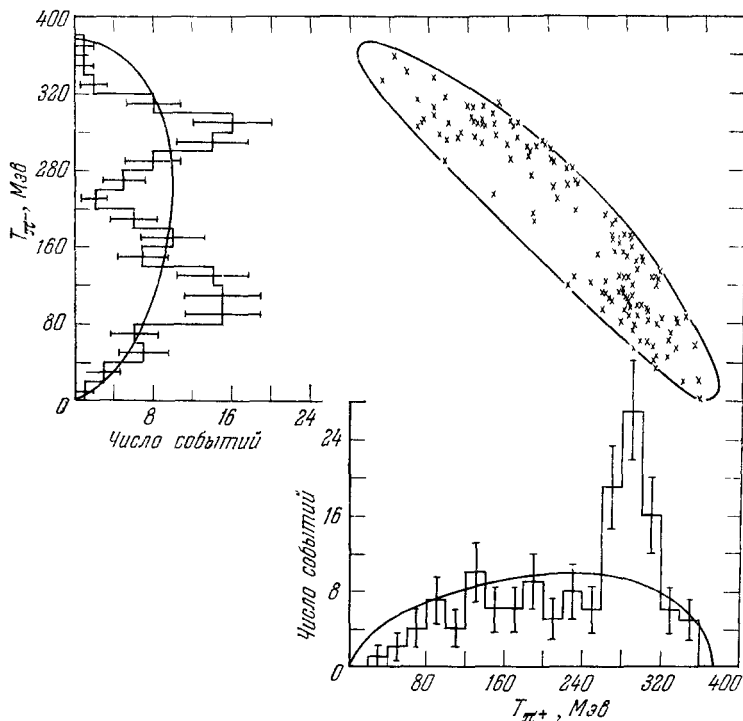
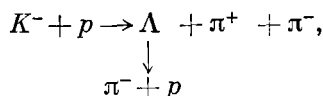
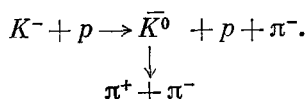


Рис. 14. Открытие резонанса Y_1^* (1385).

событий, в которых рождались странные частицы. «Франкенштейны» были круглосуточно загружены их обработкой, и те из нас, кто помогал получать и затем удерживать пучок отрицательных K -мезонов, сосредоточили теперь наше внимание на анализе этих реакций. На большинстве топологически простых снимков, возникавших в результате взаимодействия отрицательного K -мезона с протоном, были видны два трека и одна нейтральная V -частица. В соответствии с правилами отбора по странности, такая топология могла соответствовать либо реакции



либо реакции



Для выбора между этими двумя реакциями у нас уже имелась программа KICK. Она же позволяла исключать те случаи, когда при той же топологии в первой вершине рождался ненаблюдаемый нейтральный пион. Программа SUMX тогда еще не была составлена, и работу по состав-

лению гистограмм взяли на себя два очень способных аспиранта, принимавших участие в получении пучка отрицательных K -мезонов и его фотографировании в 15-дюймовой камере с самого начала этой работы. Ими были Стенли Войкики и Билл Грациано. Они первые обратили внимание на величину энергии заряженных пионов, рождающихся вместе с Λ -гипероном в первой из двух выписанных выше реакций. Поскольку в этой вершине рождались три частицы — два противоположно заряженных пиона и Λ -гиперон, — ожидалось, что энергетический спектр каждой из них должен быть плавным во всей кинематически допустимой области

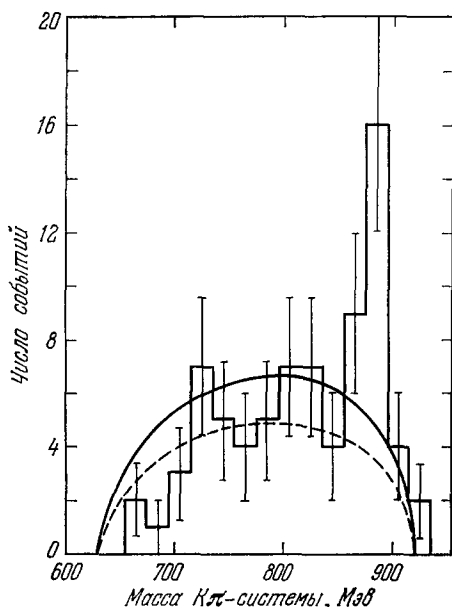
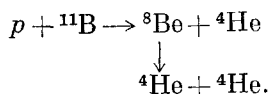


Рис. 15. Открытие резонанса K^* (890).

и должен определяться фазовым объемом. Распад τ -мезона на три заряженных пиона был хорошо известным примером трехчастичной реакции, в которой фазовый объем очень хорошо описывал спектр вторичных частиц.

Однако когда Войкики и Грациано перенесли результаты, полученные с помощью программы KICK, на гистограммы, обнаружилось, что энергетическое распределение в соответствии с фазовым объемом плохо описывает экспериментальные данные. На рис. 14 показаны энергетические спектры положительного и отрицательного мюонов совместно с соответствующей диаграммой Далица⁵⁶, которая была им впервые предложена для решения « π — θ -проблемы» и которая впоследствии навела Ли и Янга на мысль о несохранении четности.

До этого случая отклонение от распределения, соответствующего фазовому объему, наблюдалось в физике элементарных частиц лишь однажды, когда оно позволило отличить реакцию $p + p \rightarrow \pi^+ + D$ от трехчастичной реакции $p + p \rightarrow \pi^+ + p + n$. (Хотя при изучении этих реакций и не было открыто новых частиц, они послужили в свое время информацией о спине пиона⁵⁷.) В то же время подобное «пикообразование» наблюдалось с самого начала экспериментов по искусственному делению ядер, и тогда же ему было дано соответствующее теоретическое объяснение. Еще Олифант и Резерфорд⁵⁸ изучали реакцию $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow {}^3\text{He}$. Она являет собой типичный пример трехчастичной реакции, и энергетический спектр α -частиц в конечном состоянии описывался фазовым объемом, за исключением острого пика вблизи максимально допустимой энергии. Это сразу же удалось объяснить, приняв во внимание возможность реакции



Другими словами, часть трехчастичных реакций протекала через промежуточное двухчастичное состояние, в котором присутствовала одна из α -частиц, обладавшая фиксированной энергией и квазистабильное ядро ${}^8\text{Be}$. Будучи нестабильным, оно существовало в течение времени

10^{-16} сек, а затем распадалось на две α -частицы с малой энергией относительного движения. Пик вблизи верхней границы энергетического спектра частиц как раз и был доказательством кратковременного существования ядра ${}^8\text{Be}$: он свидетельствовал о том, что вначале образовались только две частицы — ${}^8\text{Be}$ и ${}^4\text{He}$.

По той же самой причине пики в распределениях на рис. 14 указывают на то, что вначале рождается один $\pi^\pm$ -мезон и специфическая комбинация частиц ($\Lambda + \pi^\pm$), обладающая фиксированной массой, а конечная ширина распределения по массам системы ($\Lambda + \pi^\pm$) продиктована принципом неопределенности. Вычисление массы системы ($\Lambda + \pi$) не представляло труда. Она оказалась равной 1385 Мэв. Изоспин этой системы, разумеется, равен единице, так как изоспин Λ -частицы равен нулю, а изоспин пиона — единице. Так был открыт первый «странный резонанс», обозначаемый теперь Y_1^* (1385). Хотя в то время знаменитый 3,3-резонанс Ферми уже давно был известен и хотя уже был найден еще целый ряд резонансов в выполненных в Брукхейвене, Беркли, Корнелле и Калифорнийском технологическом институте ⁵⁹ экспериментах по измерению полного сечения в $(\pi + N)$ -системе (N — нуклон), резонанс Y_1^* оказал совершенно необычное воздействие на умы физиков, работающих с элементарными частицами, поскольку он сразу же выступил не просто как резонанс в полном сечении, а как действительно новая частица.

Об этом открытии мы сообщили ⁶⁰ на Рочестерской конференции по физике высоких энергий 1960 г., и с тех пор начались серьезные поиски других короткоживущих частиц. До конца 1960 г. та же группа наших сотрудников, которая обнаружила частицу Y_1^* (1385), нашла еще два странных резонанса K^* (890) ⁶¹ и Y_0^* (1405) ⁶².

Так как в течение многих лет авторы трех этих работ всегда цитировались как «Алстон и др.», мне кажется уместным использовать представившийся мне сейчас случай для того, чтобы перечислить их всех. Кроме Маргарет Алстон (теперь Маргарет Гарнкост) и Луиса В. Альвареца, авторами упомянутых статей были (в алфавитном порядке): Филипп Эберхард, Мирон Л. Гуд, Уильям Грациано, Гарольд К. Тичо и Стенли Войкики.

На рис. 15 и 16 показаны гистограммы, взятые из статей, в которых сообщалось об открытии двух последних частиц, причем резонанс K^* был вообще первым когда-либо обнаруженным бозонным резонансом. Вместо того, чтобы откладывать на гистограмме число событий в зависимости от энергии одной частицы, мы ввели теперь уже общепринятый график, на котором оно откладывается в зависимости от массы составной системы — в данном случае $(\Sigma + \pi)$ для Y_0^* (1405) и $(K + \pi)$ для K^* (890).

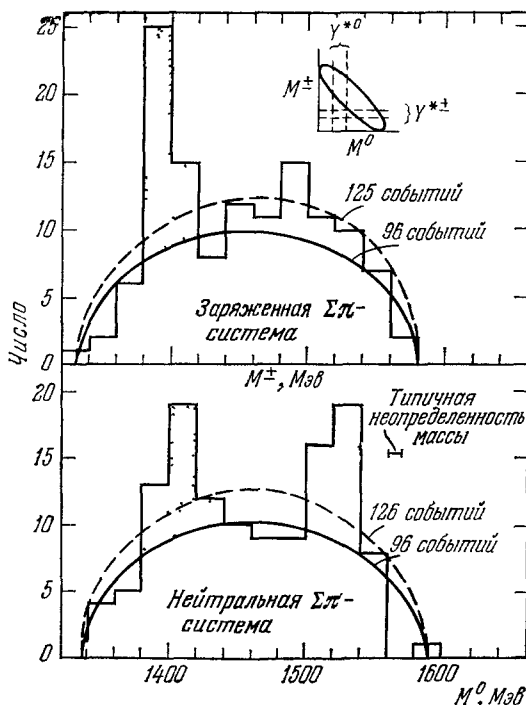


Рис. 16. Открытие резонанса Y_0^* (1405)

На рис. 17 представлена гистограмма, характеризующая современную экспериментальную информацию о резонансе $K^*(890)$. Фон от фазового пространства на ней практически вообще отсутствовал, что позволило без труда определить ширину резонанса и, следовательно, время его жизни в соответствии с соотношением неопределенности.

Все три первых странных резонанса имеют время жизни порядка 10^{-23} сек, так что каждая из этих частиц распадается, пройдя путь длиной всего в несколько ядерных радиусов. Никто не думал, что пузырьковую камеру можно будет использовать для измерения столь короткоживущих

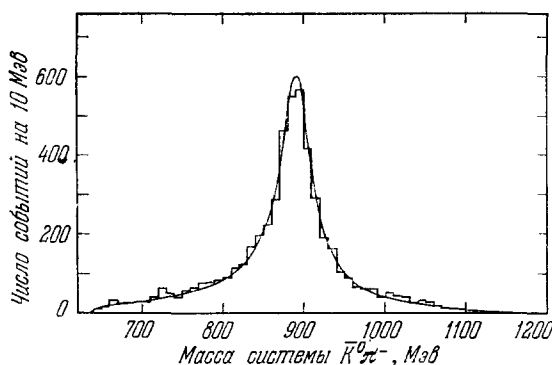
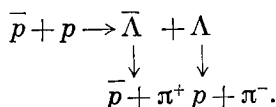


Рис. 17. Современные данные о резонансе $K^*(890)$.

частиц; наша камера предназначалась для работы со странными частицами, живущими в течение времени порядка 10^{-16} — 10^{-13} сек.

Первый запланированный нами эксперимент с использованием 72-дюймовой камеры был выполнен летом 1959 г. Линн Стивенсон и Филипп Эберхард разработали соответствующую методику и получили сепарированный пучок антипротонов с энергией 1,6 Гэв/с и сразу же обнаружили теперь уже ставшие классическими фотоснимки первой реакции, в которой рождалось антиламбда-частица ($\bar{\Lambda}$):



Типичная фотография такого события представлена на рис. 18. Здесь антипротон, родившийся при распаде $\bar{\Lambda}$ -частицы, аннигилирует, рождая четыре пиона. Мне кажется, что каждый, кто присутствовал в 1959 г. на конференции по физике высоких энергий в Киеве, запомнит демонстрацию этой фотографии — фотографии первого интересного события, зарегистрированного на только-что запущенной 72-дюймовой камере.

Хофштадтер в своих классических экспериментах по рассеянию электронов высокой энергии на протонах и нейтронах ⁶³ впервые получил количественную информацию о распределении электрического заряда внутри нуклонов. Теоретическая интерпретация полученных им результатов ⁶⁴ приводила к выводу о существовании двух новых частиц — векторных мезонов, называемых теперь ω - и ρ -мезонами. Название «векторные» просто означает, что, в отличие от π - и K -мезонов, спин которых равен нулю, эти в то время еще гипотетические мезоны должны были обладать спином, равным единице. Кроме того, предсказывалось, что изоспин ω -мезона должен быть равен нулю, а изоспин ρ -мезона — единице. Это означало, что первый из них может быть только нейтральным,

а второй наряду с этим также и однократно заряженным положительным или отрицательным.

В этой связи многие экспериментаторы, пользуясь разнообразной техникой, предприняли поиски этих важных частиц. Первым успеха добился временно работавший тогда в нашей группе Богдан Маглич, изучавший пленку, отснятую при прохождении антипротонов через

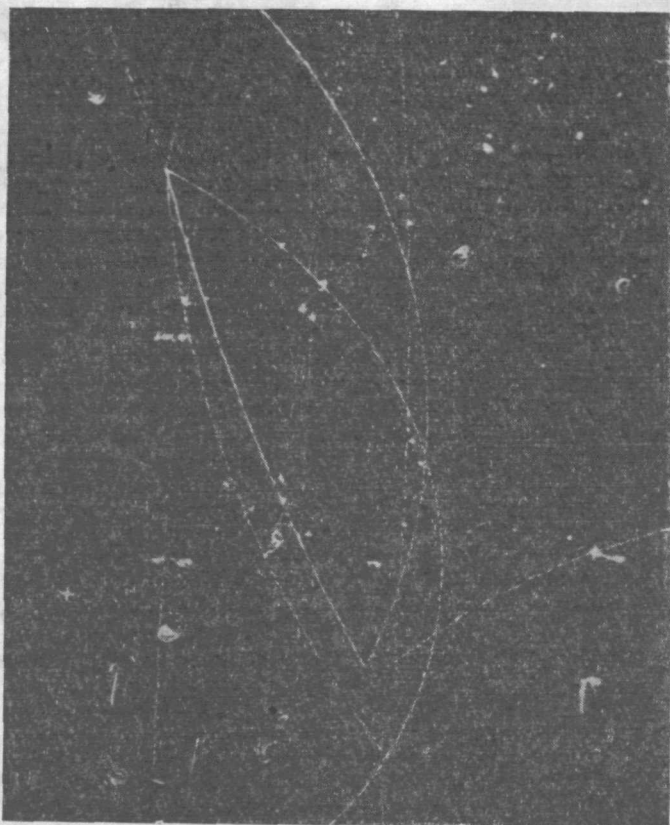


Рис. 18. Регистрация первой антиламбда-частицы $\bar{\Lambda}$.

72-дюймовую камеру. Он очень правильно решил сконцентрировать свое внимание на аннигиляции протона с антипротоном с образованием пяти пионов — двух положительных, двух отрицательных и одного нейтрального. Программа KICK позволила ему отобрать такие события. Нейтральный пион, разумеется, не оставляет видимого трека, однако закон сохранения обеспечивает определение его энергии и направления движения. Затем Маглич построил гистограмму для эффективной массы всех нейтральных комбинаций из трех пионов. В каждом событии были четыре такие нейтральные комбинации: нейтральный пион можно было взять в сочетании с четырьмя возможными парами, составленными из двух противоположно заряженных.

Программа SUMX тогда только начинала работать и еще страдала изъятиями. Поэтому построение гистограмм было весьма утомительным и продолжительным занятием, однако постепенно выяснилось, что Маглич обнаружил долгожданный пик на фоне плавного распределения,

обусловленного фазовым объемом. На рис. 19 показана небольшая часть всего распределения с пиком, указывавшим на открытие очень важной новой частицы — ω -мезона.

Хотя идея этой работы принадлежала Магличу и он же сам проделал все необходимые измерения, он великодушно настоял на том, чтобы

соавторами статьи, сообщавшей об его открытии⁶⁵, были также трое из нас — те, кто создавал камеру, получал пучок и составлял программу — атрибуты, позволившие осуществить эту работу.

В этот замечательный период развития физики элементарных частиц ρ -мезон оставался единственной частицей, чье существование еще не было общепризнанным. В нашей группе два «Франкенштейна» были целиком загружены работой над проблемами, которые, по мнению руководства группы, имели более первостепенное значение. Тем временем несколько молодых физиков и аспирантов, Андерсон и др.⁶⁶, выяснили, что используя непосредственно информацию, содержащуюся в таблицах, где были сведены результаты просмотра пленок, они могут получить данные, достаточно точные для осуществления экстраполяции Чу — Лоу — так называлась предложенная последними весьма сложная процедура обнаружения пред-

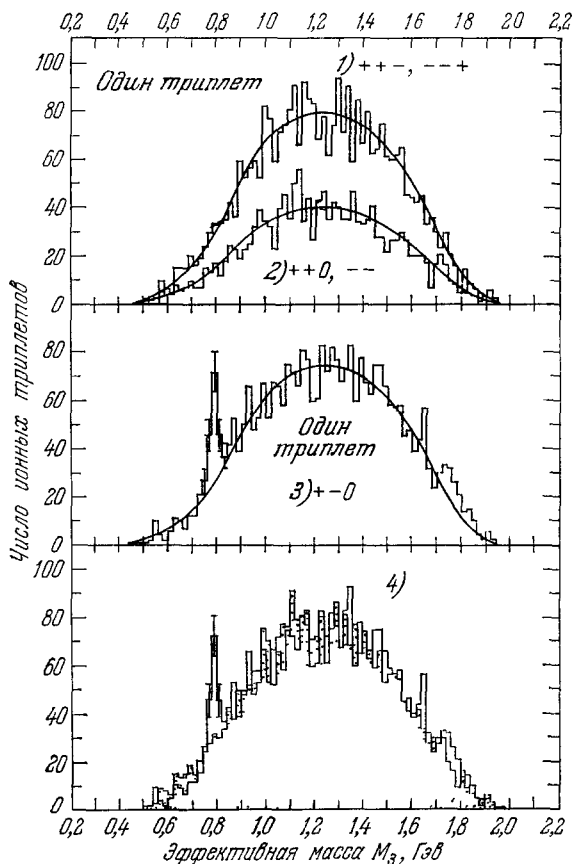


Рис. 19. Открытие ω -мезона.

сказанного двухпионного резонанса, называемого теперь ρ -мезоном. Результаты этой работы представлены на рис. 20. Они убедили меня в том, что ρ -мезон действительно существует и что в соответствии с предсказанием, его спин равен единице. Масса ρ -мезона получалась равной 650 Мэв , в отличие от общепринятого теперь значения 765 Мэв . (Как теперь выяснилось, эта заниженная величина была связана с чрезвычайно большой шириной ρ -резонанса.) Аргументы в пользу этого казались мне даже более убедительными, чем те, которые в свое время приводились Ферми и его сотрудниками в подтверждение существования знаменитого $3,3$ -резонанса в пион-нуклонной системе.

Однако один из неписанных законов физики состоит в том, что нельзя по-настоящему сделать открытия, не убедив в нем своих коллег. Мы же как раз убедили физиков, занимающихся вопросами высоких энергий, что о существовании новых частиц свидетельствуют пики на гистограммах для эффективных масс, и потому многие из них отнеслись сдержанно к выводу о существовании мезона, опиравшемуся на экстраполяцию Чу —

Лоу. К счастью, вскоре в Висконсине Уокер и его сотрудники ⁶⁷ получили идеограмму для эффективной массы с убедительным пиком при 765 Мэв, и поэтому их наиболее часто цитируют как первооткрывателей ρ -мезона

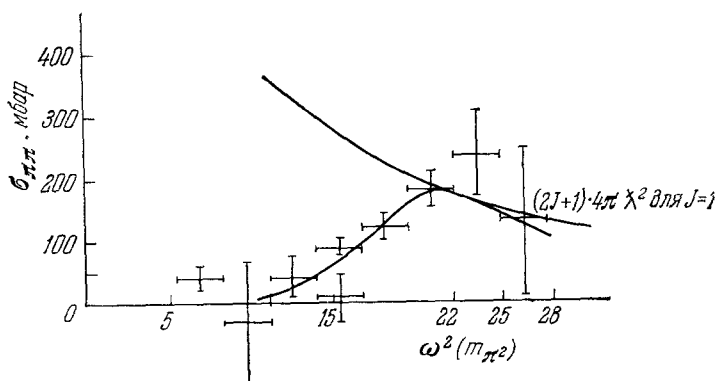


Рис. 20. Первая информация о существовании ρ -мезона.

Еще очень давно Эрнест Лоуренс положил в своей лаборатории начало традиции делиться имеющимися в распоряжении материалами с физиками всего мира. Он поставлял короткоживущие радиоактивные вещества всем заинтересованным ученым в Беркли, а долгоживущие рассылал по всем лабораториям земного шара. Первый полученный искусственно элемент, технеций, был обнаружен Перье и Сегре ⁶⁸, которые, работая в сицилийском городе Палермо, изучали радиоактивные свойства ку-сочка молибденового дефлектора от 28-дюймового циклотрона из Беркли, который в течение многих месяцев облучался дейтонами с энергией 6 Мэв. Мы следовали примеру Лоуренса и, таким образом, косвенно оказались причастными к ряду важных открытий новых частиц. Первым из них был η -мезон с массой 550 Мэв, распадающийся на положительный, отрицательный и нейтральный пионы, который был обнаружен Джоном Гопкинсом под руководством Айгуда Певзнера ⁶⁹, изучавшим пленку, снятую на 72-дюймовой камере. Спустя несколько недель после этого в Беркли Розенфельд совместно со своими сотрудниками ⁷⁰, наблюдавшие η -мезон независимо, совершенно неожиданно выяснили, что при его распаде не сохраняется изотопический спин. На рис. 21 представлены современные данные об ω - и η -мезонах.

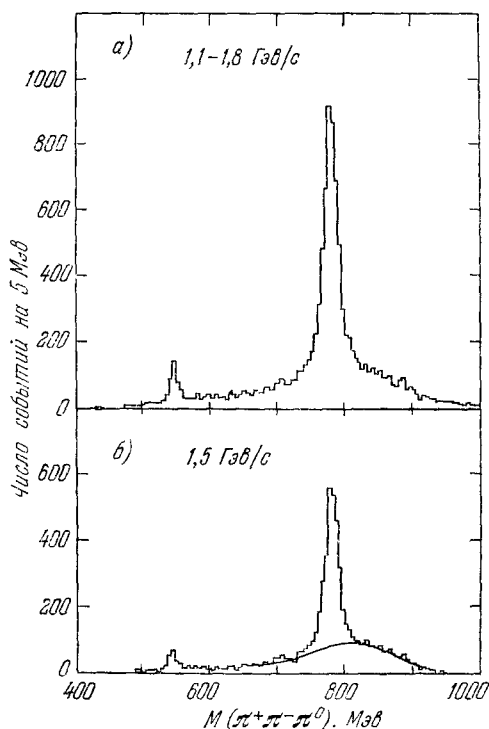


Рис. 21. Современная гистограмма с присутствием ω - и η -мезонов.

Четкость, с которой они проявляются на этой единственной гистограмме, очень сильно отличается от той, с которой они впервые проявились в экспериментах с использованием 72-дюймовой камеры.

В короткий промежуток времени между первой и второй публикациями об η -мезоне появилось сообщение Ферро-Люцци, Триппа и Уотсона⁷¹, которые, используя новый изящный метод, обнаружили резонанс Y_0^* (1520). Боб Трипп продолжал играть ведущую роль в приложении новых эффективных методов анализа к изучению новых частиц.

Открытие Ξ^* (1530)-гиперона пришлось на долю Тичо с сотрудниками⁷², которые в Лос-Анджелесе изучали пленку, отснятую на 72-дюймовой камере. Гарольд Тичо в течение нескольких лет проводил большую часть своего времени у нас, в Беркли. Работая не покладая рук, он принимал активное участие во всех сторонах нашей деятельности, и многие из его коллег помогали подготовить пучок отрицательных K -мезонов высокой энергии для эксперимента, известного под названием K72. Лос-Анджелесская группа (UCLA) анализировала две серии фотоснимков взаимодействий K -мезонов высокой энергии в 72-дюймовой камере и обнаружила резонанс Ξ^* (1530) как раз своевременно, чтобы успеть доложить результаты этой работы в Женеве на конференции по физике высоких энергий 1962 г. (Существование этого резонанса вскоре было подтверждено данными брукхейвенской группы⁷³.)

Незадолго перед этим Мюррей Гелл-Манн высказал важную идею, известную под названием «восьмеричного пути»⁷⁴; однако тогда его статья не вызвала значительного интереса, какого она в действительности заслуживала. Вскоре то же самое утверждение было независимо высказано в статье Неемана⁷⁵. Найденные экспериментально параметры резонанса Ξ^* (1530) в точности совпали с теми, которые были предсказаны в этих работах. Одно из этих предсказаний состояло в том, что четыре изоспиновых мультиплетов, обладающие одинаковыми спином и четностью, можно объединить в один декаплет с эквидистантным спектром масс. Членом декаплета с минимальной массой должен был быть 3,3-резонанс Ферми, масса которого равна 1238 Мэв. Следующим был резонанс Y_1^* (1385), так что масса третьего члена должна была равняться $[1385 + (1385 - 1238)] \text{ Гэв} = 1532 \text{ Гэв}$. Предсказывалось также, что при переходе от каждого члена мультиплета к следующему число компонент и странность должны уменьшаться на единицу. Таким образом, резонанс Ξ^* (1530) полностью соответствовал предсказаниям.

Вычислить массу и странность последнего члена декаплета — частицы Ω^- — было теперь делом простой арифметики. Признание факта существования рабочей теории в физике элементарных частиц было, вероятно, самым знаменательным событием Международной конференции по физике высоких энергий 1962 г.

Поскольку второй и третий члены декаплета, позволившие предсказать свойства тогда еще гипотетического Ω -резонанса, были обнаружены в нашей пузырьковой камере, мы были очень разочарованы тем, что для образования этого резонанса энергия бэатрона оказалось недостаточной. Это всеми ожидаемое открытие⁷⁶ пришлось отложить до входа в строй 80-дюймовой камеры в Брукхейвене.

Раз уж мы добрались до частицы, обозначаемой буквой Ω , то логически оправдано завершить мою лекцию упоминанием об ее открытии. Я делаю это не потому, что ее открытие знаменует собой конец процесса, который иногда называют «взрывом рождаемости» в физике элементарных частиц: в последней таблице⁷⁷ содержится от 70 до 100 мультиплетов частиц (это число колеблется в зависимости от того, какую степень достоверности считать необходимой для признания существования части-

цы). Причина состоит просто в том, что я уже рассказал о большинстве элементарных частиц, открытых к концу 1962 г., т. е. тех частиц, которые послужили Гелл-Манну и Нееману основой при формулировке их $SU(3)$ -теорий. После этого выяснилось, что ситуация является куда более сложной. «Ловлей пиков» стало заниматься столько различных групп, что большинство новых резонансов одновременно обнаруживалось двумя и более лабораториями.

Я приношу извинения за то, что не имел ни времени, ни возможности рассказать вам о красоте и мощи методов, которыми обогатили физику элементарных частиц наши друзья — теоретики. Однако я надеюсь, что вскоре вы сможете услышать об этом от них самих.

В заключение я хотел бы поблагодарить тех моих сотрудников и друзей из других лабораторий, чьи важные работы я не смог упомянуть из-за недостатка времени. Я постарался восполнить эти пробелы, расширив предназначенный для печати вариант своей лекции по сравнению с устным, но, к сожалению, не смог полностью устранить всех упущений.

Радиационная лаборатория им. Э. Лоуренса,
Беркли, Калифорния, США

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. Chadwick, Proc. Roy. Soc. (London) **136A**, 692 (1932).
2. C. D. Anderson, Science **76**, 238 (1932).
3. M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni, Phys. Rev. **71**, 209 (1947).
4. S. N. Neddermeyer, C. D. Anderson, Phys. Rev. **51**, 884 (1937).
5. J. C. Street, E. C. Stevenson, Phys. Rev. **51**, 1005 (1937).
6. H. Yukawa, Proc. Phys. Math. Soc. Japan **17**, 48 (1935).
7. C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell, Nature **159**, 694 (1947).
8. E. Gardner, C. M. G. Lattes, Science **107**, 270 (1948).
9. R. Bjorklund, W. E. Crandall, B. J. Moyer, H. F. York, Phys. Rev. **77**, 213 (1950).
10. J. Steinberger, W. K. H. Panofsky, J. Steller, Phys. Rev. **78**, 802 (1950).
11. A. G. Carlson (теперь A. G. Ekspong), J. E. Hopper, D. T. King, Phil. Mag. **41**, 701 (1950).
12. H. L. Anderson, E. Fermi, E. A. Long, R. Martin, D. E. Nagle, Phys. Rev. **85**, 934 (1952).
13. B. Cassen, E. U. Condon, Phys. Rev. **50**, 846 (1936).
14. K. A. Bruckner, Phys. Rev. **86**, 106 (1952).
15. W. Pauli, S. N. Dancoff, Phys. Rev. **62**, 85 (1942).
16. A. Pais, Phys. Rev. **86**, 663 (1952).
17. W. B. Fowler, R. P. Shutt, A. M. Thordnike, W. L. Whittemore, Phys. Rev. **91**, 1287 (1953); **93**, 861 (1954); **98**, 121 (1955).
18. O. Chamberlain, E. Segré, C. Wiegand, T. Ypsilantis, Phys. Rev. **100**, 947 (1955).
19. G. D. Rochester, C. C. Butler, Nature **160**, 855 (1947).
20. A. J. Seriff, R. B. Leighton, C. Hsiao, E. D. Cowan, C. D. Anderson, Phys. Rev. **78**, 290 (1950).
21. R. Armenteros, K. H. Barker, C. C. Butler, A. Cachon, C. M. York, Phil. Mag. **43**, 597 (1952).
22. L. Leprince-Ringuet, M. L'Héritier, Compt. rend. **219**, 618 (1944).
23. H. A. Bethe, Phys. Rev. **70**, 821 (1946).
24. R. M. Brown, U. Camerini, P. H. Fowler, H. Muirhead, C. F. Powell, D. M. Ritson, Nature **163**, 47 (1949).
25. C. O'Ceallaigh, Phil. Mag. **42**, 1032 (1951).
26. M. G. K. Menon, C. O'Ceallaigh, Proc. Roy. Soc. (London) **221A**, 292 (1954).
27. R. W. Thompson, A. V. Buskirk, L. R. Etter, C. J. Karzmark, R. H. Rediker, Phys. Rev. **90**, 329 (1953).
28. A. Bonetti, R. Levi Setti, M. Panetti, G. Tomasini, Nuovo Cimento **10**, 345 (1953).
29. R. Marshak, H. Bethe, Phys. Rev. **72**, 506 (1947).

30. M. Gell-Mann, Phys. Rev. 92, 833 (1953).
31. K. Nishijima, Prog. Theor. Phys. (Kyoto) 12, 107 (1954).
32. L. W. Alvarez, S. Goldhaber, Nuovo Cimento 2, 344 (1955).
33. T. O. Lee, Les Prix Nobel en 1957 (см. перевод: УФН 66 (1), 89, (1957)).
34. C. N. Yang, Les Prix Nobel en 1957 (см. перевод: УФН 66 (1), 79 (1958)).
35. L. W. Alvarez, F. S. Crawford, Jr., M. L. Good, M. L. Stevenson, Phys. Rev. 101, 303 (1956).
36. V. Fitch, R. Motley, Phys. Rev. 101, 496 (1956).
37. S. von Friesen, Ark. Fys. 8, 309 (1954); 10, 460 (1956).
38. R. W. Birge, D. H. Perkins, J. R. Peterson, D. H. Stork, M. N. Whitehead, Nuovo Cimento 4, 834 (1956).
39. D. Glaser, Les Prix Nobel en 1950.
40. R. H. Hildebrand, D. E. Nagle, Phys. Rev. 92, 517 (1953).
41. J. G. Wood, Phys. Rev. 94, 731 (1954).
42. D. P. Parmentier, J. Schwemin, Rev. Sci. Instr. 26, 958 (1955).
43. D. C. Gates, R. W. Kenney, W. P. Swanson, Phys. Rev. 125, 1310 (1962).
44. L. W. Alvarez, F. S. Crawford, Jr., M. L. Stevenson, Phys. Rev. 112, 1267 (1958).
45. L. W. Alvarez, P. Davey, R. Hulsizer, J. Snyder, A. J. Schwemin, R. Zane, UCRL-10109, 1962 (неопубликовано); P. G. Davey, R. I. Hulsizer, W. E. Humphrey, J. H. Munson, R. R. Ross, A. J. Schwemin, Rev. Sci. Instr. 35, 1134 (1964).
46. L. W. Alvarez, Proceedings of the 1966 International Conference on Instrumentation for High Energy Physics, Stanford, California, стр. 271.
47. W. K. H. Panofsky, L. Aamodt, H. F. York, Phys. Rev. 78, 825 (1950).
48. L. W. Alvarez, H. Bradner, P. Falk-Vairant, J. D. Gow, A. H. Rosenfeld, F. T. Solmitz, R. D. Tripp, Nuovo Cimento 5, 1026 (1957).
49. L. W. Alvarez, H. Bradner, F. S. Crawford, Jr., J. A. Crawford, P. Falk-Vairant, M. L. Good, J. D. Gow, A. H. Rosenfeld, F. T. Solmitz, M. L. Stevenson, H. K. Ticho, R. D. Tripp, Phys. Rev. 105, 1127 (1957).
50. F. G. Frank, Nature, 160, 525 (1947).
51. Я. Б. Зелдович, ДАН СССР 95, 493 (1954).
52. T. D. Lee, C. N. Yang, Phys. Rev. 104, 254, 822 (1956).
53. C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, R. P. Hudson, Phys. Rev. 105, 1413 (1957).
54. F. S. Crawford, Jr., M. Cresti, M. L. Good, K. Gottstein, E. M. Lyman, F. T. Solmitz, M. L. Stevenson, H. K. Ticho, Phys. Rev. 108, 1102 (1957).
55. P. Eberhard, M. L. Good, H. Ticho, UCRL-8878, Aug. 1959 (неопубликовано); J. J. Murray, UCRL-3492, May 1957 (неопубликовано), UCRL-9506, Sept. 1960 (неопубликовано).
56. R. H. Dalitz, Phil. Mag. 44, 1068 (1953).
57. W. F. Cartwright, C. Richman, M. N. Whitehead, H. A. Wilcox, Phys. Rev. 78, 823 (1950); D. L. Clark, A. Roberts, R. Wilson, Phys. Rev. 83, 646 (1951). R. Durbin, H. Loar, J. Steinberger, Phys. Rev. 83, 646 (1951).
58. M. E. L. Oliphant, E. Rutherford, Proc. Roy. Soc. (London) 141, 259 (1933); M. E. L. Oliphant, A. E. Kempton, E. Rutherford, Proc. Roy. Soc. (London) 150, 241 (1935).
59. R. L. Cool, L. Madansky, O. Picconi, Phys. Rev. 93, 637 (1954); см. также литературу R. F. Peierls, Phys. Rev. 118, 325 (1959).
60. M. Alston, L. W. Alvarez, P. Eberhard, M. L. Good, W. Graziano, H. K. Ticho, S. G. Woycicki, Phys. Rev. Lett. 5, 520 (1960).
61. M. H. Alston, L. W. Alvarez, P. Eberhard, M. L. Good, W. Graziano, H. K. Ticho, S. G. Woycicki, Phys. Lett. 6, 300 (1961).
62. M. H. Alston, L. W. Alvarez, P. Eberhard, M. L. Good, W. Graziano, H. K. Ticho, S. G. Woycicki, Phys. Rev. Lett. 6, 698 (1961).
63. R. Hofstadter, Rev. Mod. Phys. 28, 214 (1956).
64. W. Holladay, Phys. Rev. 101, 1198 (1956); Y. Nambu, Phys. Rev. 106, 1366 (1957); C. F. Chew, Phys. Rev. Lett. 4, 142 (1960); W. R. Frazer, J. R. Fulco, Phys. Rev. 117, 1609 (1960); F. J. Bowcock, W. N. Cottingham, D. Lurie, Phys. Rev. Lett. 5, 386 (1960).
65. B. C. Maglič, L. W. Alvarez, A. H. Rosenfeld, M. L. Stevenson, Phys. Rev. Lett. 7, 178 (1961).
66. J. A. Anderson, V. X. Bang, P. G. Burke, D. D. Carmony, N. Schmitz, Phys. Rev. Lett. 6, 365 (1961).
67. A. R. Erwin, R. March, W. D. Walker, E. West, Phys. Rev. Lett. 6, 628 (1961).

68. C. Perrier, E. Segrè, *Accad. Naz. Lincei, Rend. Classe Sci. Fis. Mat. e Nat.* 25, 723 (1937).
 69. A. Pevsner, R. Kraemer, M. Nussbaum, C. Richardson, P. Schlelein, R. Strand, T. Toohig, M. Block, A. Engler, R. Gessari, C. Meltzer, *Phys. Rev. Lett.* 7, 421 (1961).
 70. P. L. Bastien, J. P. Berge, O. L. Dahl, M. Ferro-Luzzi, D. H. Miller, J. J. Murray, A. N. Rosenfeld, M. B. Watson, *Phys. Rev. Lett.* 8, 114 (1962).
 71. M. Ferro-Luzzi, R. D. Tripp, M. B. Watson, *Phys. Rev. Lett.* 8, 28 (1962).
 72. G. M. Pjerrou, D. J. Prowse, P. Schlelein, W. E. Slater, D. H. Stork, H. K. Ticho, *Phys. Rev. Lett.* 9, 114 (1962).
 73. L. Bertanza, V. Brisson, P. L. Connolly, E. L. Hart, I. S. Mitra, G. C. Moneti, R. R. Rau, N. P. Samios, I. O. Skillicorn, S. S. Yamamoto, M. Goldberg, L. Gray, J. Leitner, S. Lictman, J. Westgard, *Phys. Rev. Lett.* 9, 180 (1962).
 74. M. Gell-Mann, California Institute of Technology Synchrotron Laboratory Report CTSL-20, 1961 (неопубликовано).
 75. Y. Ne'eman, *Nucl. Phys.* 26, 222 (1961).
 76. V. E. Barnes, P. L. Connolly, D. J. Crennell, B. B. Culwick, W. G. Delaney, W. B. Fowler, P. E. Hagerty, E. L. Hart, N. Horwitz, P. V. C. Hough, J. E. Jensen, J. K. Kopp, K. W. Lai, J. Leitner, J. L. Lloyd, G. W. London, T. W. Morris, Y. Oren, R. B. Palmer, A. G. Prodell, D. Radojičić, D. C. Rahm, C. R. Richardson, N. P. Samios, J. R. Stanford, R. P. Shutt, J. R. Smith, D. L. Stonehill, R. C. Strand, A. M. Thorndike, M. S. Webster, W. J. Willis, S. S. Yamamoto, *Phys. Rev. Lett.* 12, 204 (1964).
 77. A. H. Rosenfeld, A. Barbaro-Caltieri, W. J. Podolsky, L. R. Price, P. Söding, C. G. Wohl, M. Roos, W. J. Willis, *Rev. Mod. Phys.* 39, 1 (1967).
-