

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ - 1992

ЭЛЕКТРОННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ОГРАНИЧЕННОГО ЛАВИННОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ

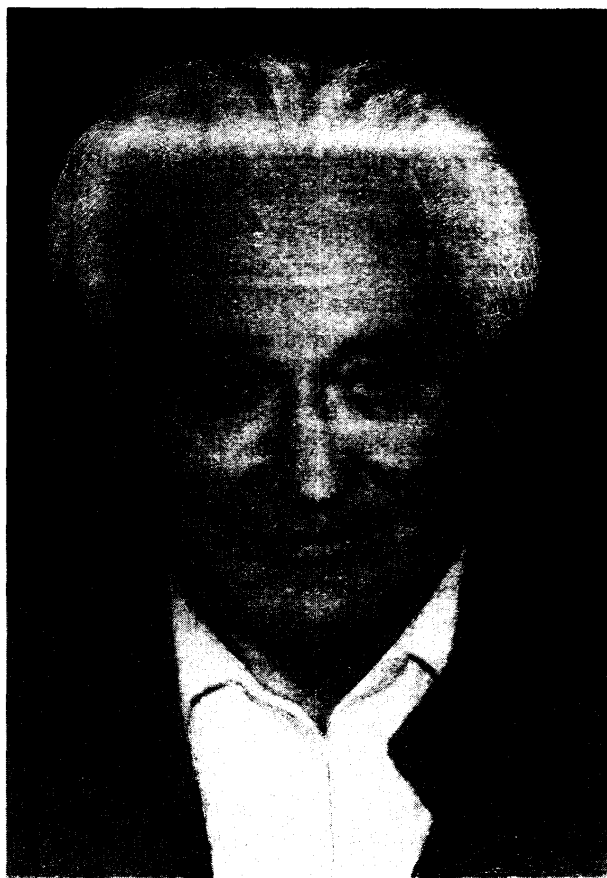
Ж. Шарпак

(ЦЕРН, Женева, Швейцария)

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 10 декабря 1992 г.)

Регистрация и пространственная локализация излучений различной природы являются основным делом экспериментаторов во многих областях физики — прежде всего в ядерной и субъядерной физике.

Применение экспериментальных методов регистрации частиц сыграло выдающуюся роль в понимании некоторых фундаментальных явлений и оказалось крайне существенным для становления новейших физических теорий. Перечень этих методов весьма обширен. Он включает ионизационные камеры, камеры Вильсона, счетчики Гейгера-Мюллера, пропорциональные и сцинтилляционные счетчики, полупроводниковые детекторы, ядерные фотоэмульсии, пузырьковые камеры, искровые и стримерные камеры, а также многопроволочные пропорциональные и дрейфовые камеры. Сюда же следует добавить калориметры, или спектрометры полного поглощения, предназначенные для измерения энергии частиц; черепковские счетчики и детекторы рентгеновского переходного излучения, позволяющие идентифицировать или разделять частицы различной природы, а также некоторые другие детекторы. Многие из этих методов продолжают развиваться и совершенствоваться и по сей день, другие же вышли из употребления, поскольку не соответствуют жестким требованиям современных экспериментов. Следует подчеркнуть, что пропорциональные многопроволочные и дрейфовые камеры, появившиеся в 1968 г., оказались на уровне требований времени, тогда как другие наиболее продуктивные детекторы, например камера Вильсона и пузырьковая камера, оказались не в состоянии удовлетворить этим жестким условиям.



Жорж Шарпак (род. в 1924 г.)

Многопроволочные камеры дали толчок дальнейшему развитию методов регистрации частиц и способствовали появлению совершенно новых детекторов. Эти методы не только используются сейчас в большинстве экспериментов по физике высоких энергий, но и нашли применение в таких далеких от физики областях науки, как, например, биология, медицина, промышленная радиология.

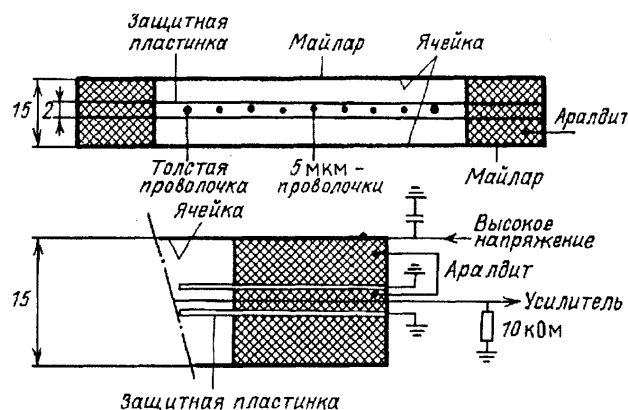


Рис. 1. Некоторые детали конструкции многопроволочных пропорциональных камер. Чувствительные (сигнальные) анодные проволочки диаметром 20 мкм находятся на расстоянии 2 мм друг от друга. Они натянута между двумя катодными сетками в газе, находящемся под атмосферным давлением. Края плоскостей камер залиты аралдитом, оставлены только каналы для подвода высокого напряжения и съема сигналов, идущих на усилитель с входным сопротивлением 10 кОм

Наши исследования методики многопроволочных пропорциональных камер, начатые в 1967 г., были стимулированы проблемами, с которыми мы столкнулись, работая с искровыми камерами. Эти камеры, предложенные в 1959 г. Фукуи и Миямото, явились прекрасным дополнением к пузырьковым камерам. В то время как последние по-прежнему поставляли информацию высочайшего качества, когда одна-единственная фотография могла привести к важному открытию, искровая камера обладала способностью работать более чем в 100 раз чаще. Более того, поскольку время памяти искровой камеры составляет почти 1 мкс, ее работой можно было управлять с помощью быстрых триггерных счетчиков, регистрируя только нужные события. Таким образом, оказалось возможным изучать чрезвычайно редкие последствия взаимодействия частиц очень высокой энергии. Тем не менее оставалось одно узкое место - необходимость регистрировать информацию фильмовым способом, т.е. на фотографической пленке. Поэтому при количестве фотоснимков более нескольких миллионов в год (или несколько миллионов на эксперимент) нагрузка на устройства, применяемые для просмотра и анализа событий, оказывалась запредельной.

Таким образом, перед физиками встала задача разработать бесфильмовые методы считывания информации с искровых камер. Два таких новых способа было предложено нами. Первый из них заключался в измерении временного запаздывания прихода сигналов от искры на противоположные края электрода камеры. Второй метод основывался на делении токов, образуемых искрой в плоских или

проволочных электродах и измеряемых на их противоположных краях. Оба они позволяли определять координаты искры, а следовательно, и самой частицы чисто электронным способом. Последний метод был развит в ряде лабораторий и применялся для измерений в фокальной плоскости спектрометров. Мы сами также провели подобным образом эксперименты по изучению ядерных реакций под действием пионов.

Одновременно были разработаны и другие подходы, и среди них — даже более совершенные, чем наш. Так, например, были предложены искровые камеры с акустическим сбором информации, а также проволочные искровые камеры, что привело в дальнейшем к чрезвычайно важным последствиям. В то же время невозможность управлять искровой камерой чаще, чем 100 раз в 1 с, серьезно сдерживала ее применение. В связи с этим у некоторых физиков созрела идея пространственного ограничения электрического разряда, возникающего благодаря электронам, которые образуются в газе ионизирующей частицей, до значительно более низкого уровня, чем характерен для искры, с тем, чтобы избежать разряда емкости, образуемой электродами. Требуемого при этом дополнительного усиления сигнала можно добиться с помощью внешних электронных устройств.

В 1967 г. я взял на себя смелость осуществить этот шаг, опираясь на опыт, который был получен в Коллеж де Франс, где я проработал около 10 лет, начиная с 1948 г., до прихода в ЦЕРН. Там мне удалось создать однопроволочные цилиндрические искровые камеры, а также продемонстрировать возможность использования света, испускаемого электронной лавиной в газе. Этот подход, который не привел тогда к результатам, пригодным для практического применения, был впоследствии значительно усовершенствован в работах Э. Поликарпо, выполненных в Университете Коимбры в Португалии. Однако эта работа, которой я в то время отдавался с неизменным вдохновением, оказалась в большой мере поучительной для понимания физических явлений, ответственных за размножение электронов в газе. Она же подтолкнула меня к попытке создания искровых камер, в которых, применяя короткие управляющие электрические импульсы, можно получить видимые глазом лавины. В результате в 1956 г. был создан первый детектор, где искры следовали вдоль траектории частицы. Однако он не оказал сколько-нибудь заметного влияния на применение искровых камер в исследованиях по физике частиц.

На рис. 1 приведена конструкция, которую мы

использовали в 1967 г. для исследования многопроволочных структур пропорциональных детекторов.

Изучение конфигурации электрических полей показывает, что в области вблизи положительно заряженных проволочек, где должна появиться лавина ограниченных размеров, электрическое поле эквивалентно тому, которое существует около проволочки, натянутой вдоль оси цилиндрической трубки, как показано на рис. 2 и 3. При выбранных нами параметрах газов, обычно применяемых для наполнения пропорциональных счетчиков, средний свободный пробег до ионизирующего столкновения составляет около 1 мкм (рис. 4). Следовательно, для лавины, вырастающей до размера, сравнимого с диаметром проволочек, т.е. около 20 мкм, мы могли бы ожидать усиления порядка 10^5 .

При этом, однако, еще оставалась существенная и неприятная проблема емкостной связи между проволочками. Чем ближе они расположены друг к другу, тем легче сигналу, индуцированному на одной из проволочек, распространиться на соседние. Оказалось, что последнее утверждение, полностью справедливое для электрических импульсов, индуцированных каким-либо внешним устройством, не отвечает действительности при внутренней генерации сигналов, которые образованы положительными и отрицательными зарядами, разделенными под действием электрического поля. Примеры применения проволочных счетчиков можно найти и в прошлом прежде всего в экспериментах по исследованию космических лучей, где для предотвращения подобной емкостной связи анодные проволочки отделяли друг от друга перегородками или промежуточными проволочками большего диаметра. Мы же, занимаясь исследованиями механизма генерации импульсов в пропорциональном счетчике, смогли увидеть, что, каково бы ни было расстояние между проволочками, та из них, на которой развивается лавина, будет источником отрицательного сигнала, тогда как на соседних проволочках (или на всех соседних электродах) возникает положительный сигнал, который, следовательно, легко отличить от основного.

Большинство электронов, образованных на расстоянии нескольких микронов от поверхности проволочки, проходят на своей траектории очень небольшую долю ΔV разности потенциалов V между анодной проволочкой и катодом. Заряд ΔQ , выделенный на проволочке, находящейся под положительным потенциалом V , создает импульс, несущий заряд ΔQ , так что $\Delta Q \cdot V = Q \Delta V$. При выбранных нами параметрах счетчика (см. рис. 4)

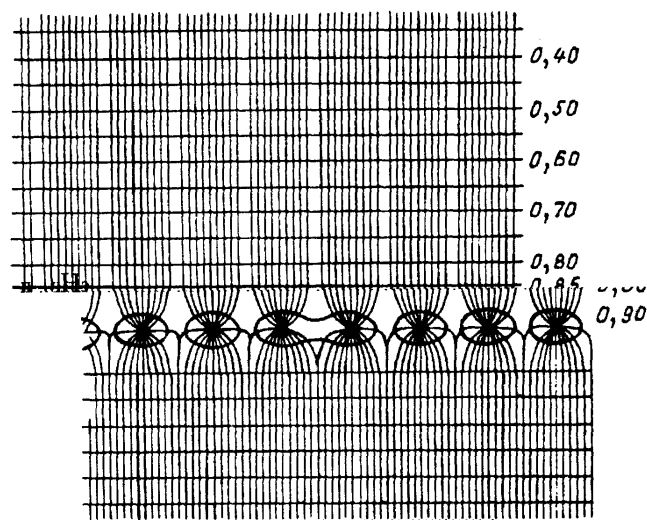


Рис. 2. Эквипотенциали и силовые линии электрического поля в многопроволочной пропорциональной камере. Показан эффект небольшого смещения одной из анодных проволочек. Однако оно не оказывает влияния на конфигурацию поля непосредственно вблизи проволочки

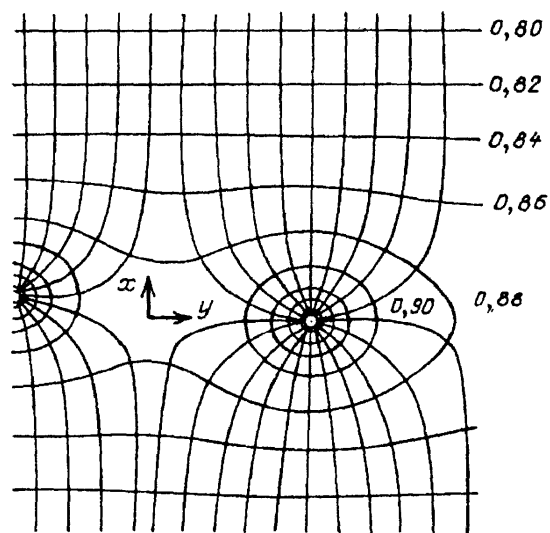


Рис. 3. Детализация рис. 2, изображающая электрическое поле вокруг анодной проволочки. (Расстояние между проволочками 2 мм, диаметр проволочки 20 мкм)

время, необходимое для собирания электронного заряда, составило бы доли наносекунды. Однако положительные ионы должны пройти всю разность потенциалов V . Тем самым они индуцируют почти весь импульсный заряд, который развивается во времени, следуя закону, учитывающему высокую напряженность поля около проволочки и ее падение по мере удаления от нее. Первоначальное очень быстрое нарастание сигнала создавало у многих иллюзию, что передний фронт наблюдаемого импульса отвечает собиранию электронов, которые образуются в лавине. На самом деле в пропорцио-

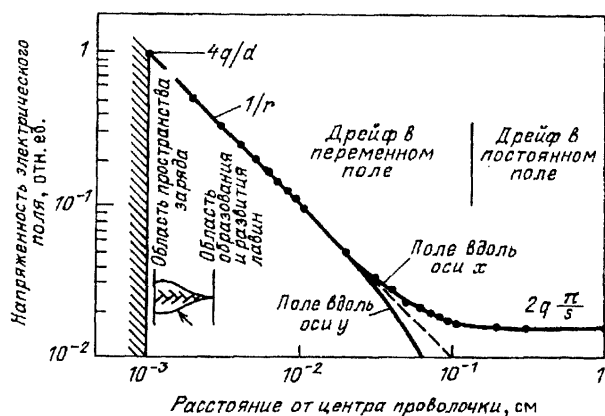


Рис. 4. Изменение напряженности электрического поля в пропорциональной камере вдоль оси x , перпендикулярной к плоскости проволочек и проходящей через центр проволоочки, и вдоль оси y , параллельной этой плоскости. Показаны различные области поля (область образования и развития лавины, область дрейфа электронов в спадающем и затем постоянном электрическом поле)

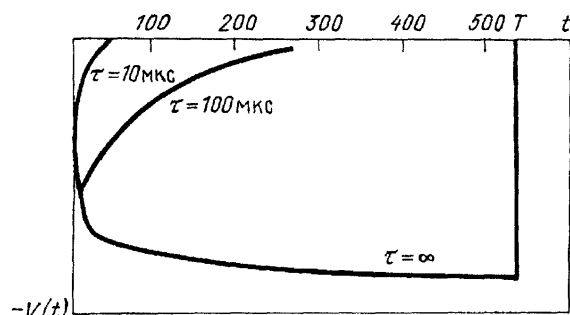


Рис. 5. Развитие во времени (t) импульса в пропорциональной камере. T - полное время дрейфа положительных ионов между анодом и катодом. Заметен эффект от уменьшения дифференцирования сигнала с увеличением постоянной времени τ . Движение положительных ионов вблизи проволочек вызывает появление импульсов с очень круто растущим фронтом

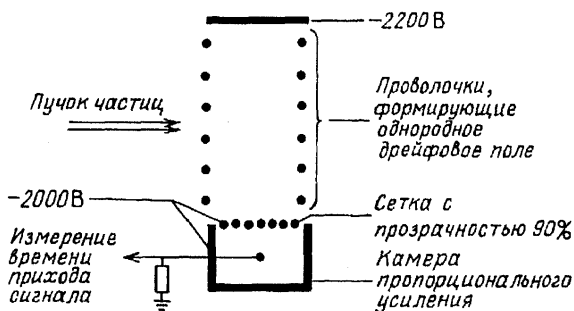


Рис. 6. Принцип действия детектора, основанного на измерении времени дрейфа электронов в постоянном электрическом поле (1968 г.)

нальном счетчике с радиусом 1 см и проволокой диаметром 20 мкм вклад электронов составляет всего 1 %. Рис. 5 демонстрирует характерную форму импульса, обусловленную движением ионов в пропорциональной камере. Хотя в выбранном нами примере полное время собирания ионов близко к 500 мкс, сигнал возрастает почти до половины своей

амплитуды за время, близкое к тысячной доле этого значения, что весьма существенно с точки зрения быстрой регистрации частиц.

Ключевым обстоятельством здесь является то, что, в то время как сигнал, индуцированный на проволочке, от которой удаляются положительные ионы, имеет отрицательную полярность, сигналы на соседних проволочках или электродах - положительные.

Это приводит к двум важным следствиям:

- задача определения проволочки, где возникает лавина, решается чрезвычайно просто вне зависимости от расстояния между проволочками;

- можно определить продольную координату этой лавины, если катод изготовлен из проволочек (или узких полосок — стрипов, нанесенных на плоском диэлектрике), перпендикулярных анодной проволочке. Центр распределения амплитуд индуцированных положительных сигналов также приходится на проволочку, где возникает лавина. Как показал опыт, это обстоятельство оказалось критичным для получения изображений потоков излучений, состоящих из нейтральных частиц, например фотонов или нейтронов.

Временное разрешение многопроволочного детектора зависит от расстояния между проволочками. От применения цилиндрических пропорциональных камер в экспериментах по физике частиц пришлось отказаться именно по причине их плохого временного разрешения: время, требуемое для того, чтобы возникшие в газе электроны достигли области лавинного размножения вблизи проволочки, непостоянно. С другой стороны, в многопроволочной камере его нетрудно измерить, что позволяет точно определить расстояние от траектории ионизирующей частицы до проволочки.

Подобные соображения дали толчок развитию нового класса детекторов, близких к обычным проволочным пропорциональным камерам, где сигнальные проволочки разнесены далеко друг от друга и где координаты траектории частицы определяются путем измерения времени дрейфа, созданных ею в газе электронов. В наших работах, начиная с 1968 г., было показано, что в геометрии, подобной изображенной на рис. 6, где на большом протяжении создано однородное электрическое поле, можно достигнуть пространственного разрешения порядка 100 мкм. В 1969 г. группа, работавшая в Сакле, приступила к созданию дрейфовых камер с длиной дрейфа 20 см. В Гейдельберге занялись изучением свойств камер, сходных по конструкции с обычными проволочными камерами, содержащими между

анодными проволочками дополнительные проволочки, на которые подан отрицательный потенциал, отталкивающий электроны. Дрейфовая камера оказалась идеальным прибором для использования в крупномасштабных детекторах. Появилось множество научных групп, которые начали создавать дрейфовые камеры большой площади, например 5×5 м, обеспечивая при этом координатную точность порядка долей миллиметра и с ограниченным числом каналов электроники.

Еще в 1969 г. мы подчеркивали, что применение электронного дрейфа в больших газовых объемах вместе с измерением положения "центра тяжести" амплитуд сигналов от лавин, образованных в проволочной камере, прокладывает путь к трехмерным детекторам. Однако именно Д. Нигрен был первым, кто, комбинируя параллельные электрическое и магнитное поля и преодолев серьезные проблемы, связанные со сбором информации, преуспел в создании прибора, обеспечившего наглядное изображение сложнейших картин взаимодействия в экспериментах на коллайдерах. Учитывая длительный дрейф электронов на большие расстояния, частота появления событий (загрузка детектора) в этих условиях должна быть, конечно, не слишком велика.

Подобные физические требования, сильно различаясь в зависимости от характера эксперимента и возможностей ускорителей, фактически определяют структуру газовых детекторов на основе их свойств, продемонстрированных нами в 1968 г.

Преимуществом обычных проволочных пропорциональных камер по сравнению с дрейфовыми оставалась их высокая загрузочная способность. В то же время развитие транзисторной электроники позволило создавать системы с десятками тысяч каналов. Достигнутое разрешающее время около 30 нс и скорость счета до 10^5 импульсов в 1 с дали возможность вплотную заняться изучением редких явлений, которые оставались за чертой возможностей искровых камер, поскольку требовали исключительно высокой скорости регистрации событий.

Разработка проекта гигантского детектора-магнита с расщепленным полем (SFM) была начата в ЦЕРН в 1970 г. под руководством А. Минтена для эксперимента на встречных накопительных кольцах (ISR). Этот детектор содержал 70 000 проволочек, причем многие из них достигали двухметровой длины. Другая группа исследователей во главе с Дж. Штейнбергером построила детектор, нацеленный на регистрацию большого числа событий с нарушением зарядовой четности в распадах каонов.

Пришлось решить большое число труднейших проблем, прежде чем перейти от проволочной камеры размером $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$ к детекторам значительно большей площади. Амплитуда импульсного заряда, собранного на проволочках, пропорциональна энергосодержанию в объеме газа, ограниченном силовыми линиями электрического поля, оканчивающимися на проволочке. Как показывает простейший анализ, логарифм коэффициента усиления сигнала в цилиндрическом счетчике пропорционален фактору $f = V^{1/2}[(V^{1/2}/V_t^{1/2}) - 1]$, где V - напряжение, приложенное к аноду счетчика, а V_t - пороговое напряжение. Таким образом, свойства пропорциональной камеры во всем подобны свойствам цилиндрического счетчика.

Тем временем группа, которую я возглавлял, была усилена появлением Ф. Саули, который вместе с другими коллегами присоединился ко многим начатым нами проектам и вложил много труда для успешной разработки ряда новых детекторов. Были проведены систематические исследования факторов, ответственных за пространственную точность дрейфовых камер. Мы изучили предельную точность, которая достигается в многопроволочных камерах, если измерять сигналы, наведенные на катодных проволочках. Нами было показано, что лавины распространяются лишь на весьма ограниченное расстояние около проволочки и что путем измерения "центра тяжести" индуцированных сигналов можно определить азимутальное положение лавины. Полученные нами данные, как и результаты некоторых других исследователей, положили начало систематическому изучению многопроволочных структур. В конечном счете оно привело к повсеместному использованию многопроволочных и дрейфовых камер при широком разнообразии структуры детекторов, отвечавших самым различным условиям, которые встречаются в экспериментах по физике частиц.

Были предложены газовые смеси, вплоть до четырехкомпонентных, что позволило снизить стоимость электроники и получить практически однородные сигналы, независимо от энергосодержания частицы в газе. Здесь пригодилась менее чувствительная, более дешевая электроника, чем при использовании обычных пропорциональных камер, а детекторы оказались мало подвержены старению.

Было показано, что эти стандартные по амплитуде импульсы образуются целой серией лавин, развитие которых завершается в слабом однородном поле вдали от проволочки.

Систематическое изучение камер с очень низким давлением газа, предпринятое А. Брескином в Израиле, показало, что диапазон применения проволочных камер весьма широк: камеры, работающие под давлением 1 торр, обладали поразительно высоким временным разрешением.

Проволочные и дрейфовые камеры заняли важное место в экспериментах по физике частиц, быстро вытеснив камеры. В некоторых случаях они применялись совместно с пузырьковыми камерами в качестве внешнего устройства, обеспечивающего нужный триггер и целеуказание. В то же время многие научные группы воспользовались появившимися возможностями для визуализации различных типов ионизирующей радиации. Наиболее существенные приложения относятся к области рентгеновского излучения с энергией около 10 кэВ. По настоянию В. Перес-Мендеса были созданы камеры, предназначенные для изучения структуры белков путем визуализации рентгеновских лучей, дифрагированных на кристаллах протеинов. Газовым детекторам присущ тот недостаток, что они практически прозрачны для рентгеновского излучения. Поэтому методы его визуализации основаны на применении сжатого ксенона.

Мы со своей стороны попытались решить эту проблему с помощью сферической дрейфовой камеры, в центре которой находится макромолекулярный кристалл. Радиальная геометрия электрического поля полностью устраняет параллакс, и электроны, дрейфующие на длине 15 см, попадают в многопроволочную камеру размером 50 см × 50 см, в которой координаты лавин измеряются с точностью 0,5 мм. Был также зафиксирован непрерывный отклик детектора по обоим направлениям, поскольку благодаря диффузии в газе облако электронов ионизации расплывается и покрывает две соседние проволочки, что позволяет интерполировать положение лавин между ними.

Такой метод значительно превосходит обычное фотографирование с точки зрения как увеличения скорости сбора данных, так и улучшения отношения сигнал/шум. Его повседневное использование в работе с пучками рентгеновских фотонов в канале синхротронного излучения электронного накопителя в Орсе дало возможность получить много важных результатов.

Изобретательность, проявленная различными исследовательскими группами, позволила расширить область приложения проволочных камер, включая регистрацию рентгеновских лучей более высоких энергий, а также гамма-квантов.

Так, например, в Новосибирске была разработана камера, применение которой позволило снизить дозу облучения человеческого тела при медицинских исследованиях по крайней мере в 10 раз по сравнению с той, что удается достигнуть с помощью самого совершенного обычного оборудования.

Используя рентгеновские лучи с энергией вплоть до 5 МэВ, группа исследователей фирмы "Шлумбергер" создала систему для радиографии гигантских грузовых контейнеров. А. Джевонс создал позитронные камеры, способные детектировать гамма-кванты с энергией 0,511 МэВ с координатной точностью около 1 мм. Эти камеры, которые недостаточно эффективны для использования в ядерной медицине, позволили достигнуть небывалых успехов при исследованиях в области физики твердого тела. Наконец, одна из фирм выпустила недавно на рынок камеру для регистрации гамма-лучей, которая успешно конкурирует с камерой Ангера, предназначенной специально для просвечивания детей. Этот новый прибор содержит проволочную камеру, наполненную сжатым ксеноном. Он значительно сокращает назначенные дозы облучения и имеет при этом повышенную точность.

Несколько этих примеров достаточно для демонстрации того, что мы, по-видимому, находимся на пороге широкого использования радиационных детекторов, созданных первоначально для целей физики элементарных частиц. Их применение будет еще более расширяться по мере развития техники эксперимента в научных лабораториях, занятых исследованиями по физике высоких энергий.

Важной ступенью в расширении области приложения газовых детекторов явилось использование Дж. Сегинотом и Т. Ипсилантисом фоточувствительных паров. Это сделало возможным локализовать фотоны далекой ультрафиолетовой области с энергией выше 5,3 эВ с точностью лучше 1 мм. Во многих гигантских экспериментальных установках, используемых на коллайдерах, применяются детекторы-идентификаторы частиц, основанные на регистрации черепковского излучения. Д. Андерсон продемонстрировал также возможность регистрации фотонов, испущенных сцинтилляторами. На рис. 7 показан измеренный спектр энерговыделения ливней, генерированных частицами с энергией 9 ГэВ в сцинтилляторе BaF_2 . Этот спектр получен путем измерения числа фотонов от ливней в камере, содержащей пары тетракис (диметиламино) этилена (ТМЭ). Дальнейшие исследования показали также, что для подобных целей пригодны и фото-

катоды из конденсированного вещества, если они позволяют использовать газовое усиление.

Поскольку интенсивности пучков ускорителей постоянно растут, трудно ожидать, что проволочные камеры сами по себе справятся с ожидаемыми нагрузками. При потоках частиц выше 10^4 – 10^5 в 1 с на 1 мм проволочки пространственный заряд, образованный положительными ионами, экранирует приложенное электрическое поле и сводит газовое усиление на нет.

Чтобы обойти эту проблему, мы вместе с Ф. Саули решили разделить газовое усиление на две стадии: предварительное усиление, которое завершается частичным впрыскиванием электронов в дрейфовую область, оснащенную управляющей сеткой, и их последующее проникновение в основную проволочную камеру, которая используется только для размножения электронов, прошедших через сетку (рис. 8). Такой метод позволяет регистрировать или отбрасывать события с временным разрешением около 30 нс и запаздыванием, определяемым временем дрейфа электронов. Вместе с С. Мажевским мы сумели подобрать сеточные структуры, пригодные для решения такой задачи. Это позволило с легкостью размножить отдельные фотоэлектроны, образованные ультрафиолетовыми фотонами в фоточувствительном газе. Применение дрейфового промежутка в сильной степени подавляет влияние излучения, испускаемого возбужденными атомами, которые образуются в лавине и ответственны за вторичные эффекты; благодаря эмиссии фоновых электронов вблизи точки испускания фотоэлектронов. В коллаборации с Ядерным центром Сакле мы разработали

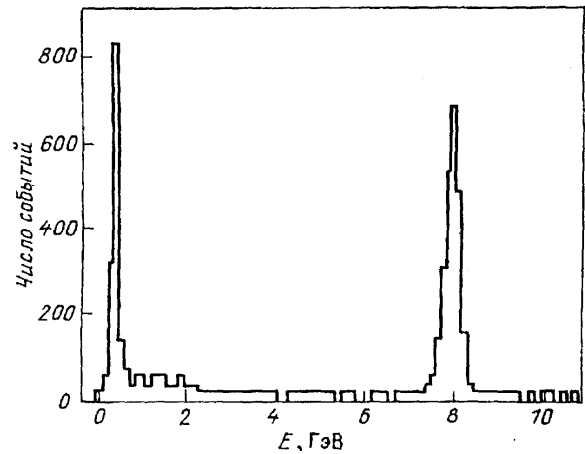


Рис. 7. Измеренные спектры энергосодержания ливней, образованных в кристалле BaF_2 смешанным пучком электронов (справа) и пионов (слева) с энергией 9 ГэВ. Спектры получены методом измерения числа ультрафиолетовых фотонов, излучаемых сцинтиллятором при развитии ливня. Фотоны регистрируются в проволочной камере, наполненной фоточувствительным газом (ТМАЕ; см. текст)

большие детекторы такого типа с целью зарегистрировать кольца черенковского излучения в эксперименте на Тэватроне Лаборатории им. Э. Ферми в США. Однако наиболее удачное применение эта разработка нашла в совсем иной области, а именно, в биологии. Действительно, существует несколько областей исследования, где необходимо получать изображения молекул, меченых радиоактивными элементами. Несколько коммерческих фирм попытались использовать для подобных целей проволочные камеры. Наибольшие трудности здесь связаны со значительным расстоянием, которое, двигаясь в газе, должен пройти электрон, испущенный радиоактивным

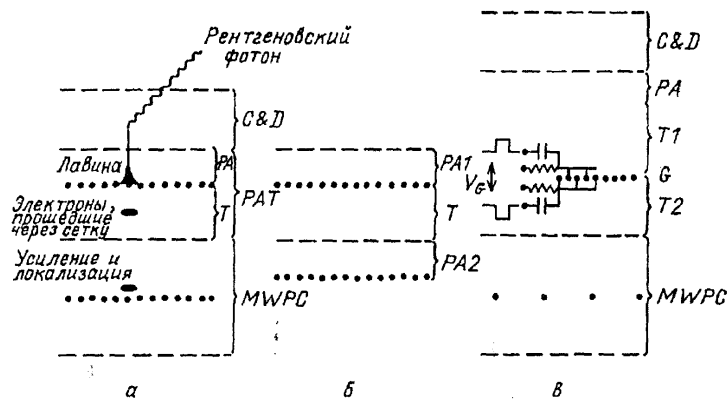


Рис. 8. Различные многосекционные структуры. *а* - Многопроволочная пропорциональная камера (MWPC) предваряется секциями переноса (*T*) и предусиления (*PA*). Наличие областей конверсии фотона и дрейфа (*C* и *D*) дает возможность вводить постоянный заряд (от рентгеновского и др. излучений) в область усиления. *б* - Две плоскопараллельные секции с переносом заряда от *PA1* к *PA2*. Для этой конфигурации было получено наилучшее временное разрешение. *в* - Многосекционная камера с "воротами". Соседние проволочки сетки *G* находятся под взаимно противоположным потенциалом (± 70 В). Электроны проходят из секций *PA* + *T*₁ в MWPC. Их перенос осуществляется только тогда, когда короткими импульсами длительностью 30 нс на проволочки подается одинаковый потенциал, что позволяет отбирать редкие события на фоне больших посторонних нагрузок

образом. Мы обнаружили, однако, что усиливающая структура, основанная на применении параллельных проволочных сеток, не имеет подобного дефекта. Близкое к экспоненциальному размножение электрона в таунсендовской лавине заметно помогает электронам ионизации, высвобожденным в газе вблизи катода, который является входным окном прибора. К примеру, таким путем для β -электронов, испущенных изотопом фосфор-32, были достигнуты точности порядка 0,3 мм.

Мы сделали и следующий шаг, соединив область размножения электронов и метод считывания координат лавин, используя излучаемый ими свет. Это имело целью наблюдать крайне редкие физические процессы такие, например, как двойной β -распад или столкновения атомов газа с некоторыми видами темной материи. Мы были уверены, что лишь с помощью наглядных фотографических методов можно однозначно идентифицировать подобные редкие события. Одновременно и независимо от нас одна британская группа энергично развивала такой подход для визуализации фотонов черепковского излучения. Эта группа также применила предложенные нами многоступенчатые про-

волочные камеры и пришла к аналогичным выводам: используя пары некоторых органических веществ, можно добиться столь интенсивной эмиссии фотонов, что с помощью простейшей оптики удастся регистрировать свет, излучаемый лавинами.

Огромное преимущество описываемого метода состоит в том, что он легко позволяет считывать информацию с сотен и тысяч каналов, применяя приборы с зарядовой связью — твердотельные светочувствительные матрицы (ПЗС-матрицы), которыми ныне комплектуются телевизионные видеокамеры. Более того, то обстоятельство, что изображение светового пятна от лавины накрывает несколько ячеек ПЗС-матрицы, дает возможность интерполировать положение центра лавины и увеличить реальное количество каналов почти на порядок. Таким образом, мы получили в свое распоряжение прибор, который способен, к примеру, визуализовать распределение электронов, испускаемых срезом крысиной почки, меченой тритием, что позволило различить детали изображения размером около 100 мкм. Тот факт, что одинаковые результаты были получены за один день вместо трех месяцев (рис. 9), как это было ранее при

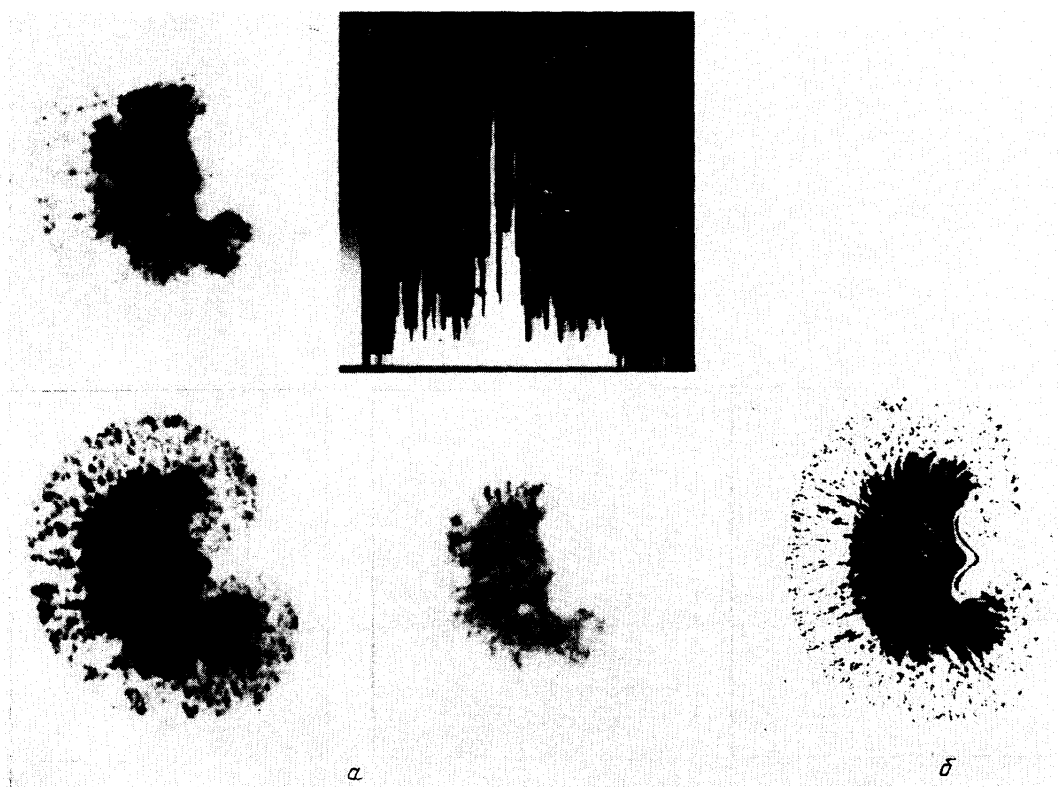


Рис. 9. Изображения срезов крысиной почки, меченой тритием. Все четыре изображения на рис. а были получены с применением газового детектора: окно, расположенное на трех различных уровнях, имеет шкалу контрастности 256. Спектр интенсивности излучения трития измерен вдоль наклонной линии, обозначенной на первой картинке, с использованием ячейки 40 мкм в плоскости образца. В качестве газовой смеси использован ксенон с 2,5 % триэтиламина. Видны детали почечных каналов масштаба 50 мкм. Такое изображение можно получить за время 20 ч. б - Радиографическое изображение соседнего среза крысиной почки, к которому прикладывалась фотографическая эмульсия. Время экспозиции - 3 месяца

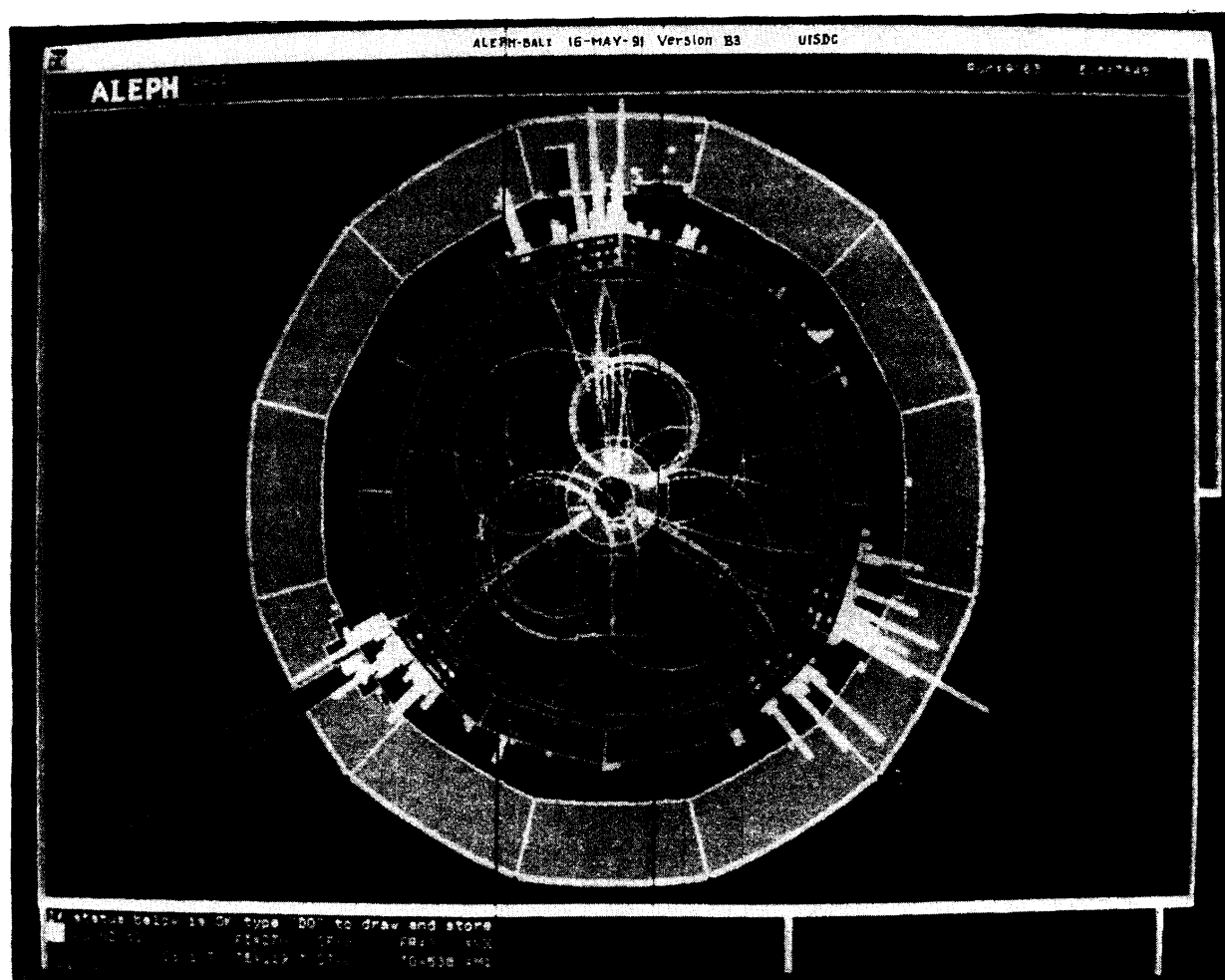


Рис. 10, Компьютерное изображение картины столкновения электрона и позитрона, полученное в эксперименте ALEPH на коллайдере LEP с помощью прибора, в котором измеряется время дрейфа в большом газовом объеме и считываются проекции координат на плоскость проволоочной камеры. Вспомогательные внешние детекторы дают дополнительную информацию об энергии частиц, траектории которых изображены на рисунке

использовании обычного фотографического метода, возбудило жгучий интерес среди биологов и дало толчок к дальнейшему совершенствованию метода, которое продолжается и в настоящее время.

Наш последний по времени эксперимент с газовыми детекторами, содержащими набор параллельных плоских сеток, убедил нас в том, что идея управления размножением электронов в лавине с помощью таких дискретных структур, как отдельные проволоочки или параллельные плоские проволоочные сетки, при одновременном выборе фотокатодов, выдерживающих газовое усиление, и сейчас остается источником плодотворного развития. Метод размножения электронов оказывается прогрессивным для любых полей, где можно визуализировать излучение, начиная от ультрафиолетовых фотонов и вплоть до гамма-лучей и частиц самых высоких энергий. Однако на нынешнем этапе развития этой области физики простое использова-

ние локализации свободных электронов около проволоочки пропорциональной камеры и измерение времени дрейфа электронов обеспечивают столь высокое качество изображения сложной картины взаимодействия частиц, что оно вполне конкурирует с тем, которое получают в пузырьковых камерах. Последнее утверждение иллюстрируется на рис. 10, где изображено событие, полученное в детекторе АЛЕФ, который установлен в одном из пересечений пучков гигантского коллайдера ЛЭП, построенного в ЦЕРН.

(Перевод с англ. Г.И. Мерзона)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Исчерпывающее историческое исследование с большим количеством ссылок, отвечающих периоду, о котором рассказывается в этой лекции, можно найти в статье:

Gambara I. The development of electron detectors at CERN (1966-late 1970's). CERN History Study No. CHS-39. January 1992.

Наша первая публикация, в которой описывались свойства многопроволочных структур:

Charpak G., Bouclier R., Bressani T., Favier J., Zupancic C. The use of multiwire proportional chambers to select and localize charged particles, *Nucl. Instr. and Meth.* 1968, **62**, 202-226.

За ней последовали несколько других статей. В одной из них дается описание прогресса, который был достигнут в течение первого года изучения свойств проволочных пропорциональных и дрейфовых камер:

Charpak G., Rahm D., Steiner H. Some developments in the operation of multiwire proportional chambers. *Nucl. Instr. and Meth.* 1970, **80**, 13-35.

Мы также отсылаем читателя к весьма подробным публикациям:

Sauli B. Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers. CERN 77-09. 1977,

Rice-Evans P. Spark, Streamer, Proportional and Drift Chambers, London, Richelieu, 1974,

Ferbel T. Techniques and Concepts of High-energy Physics. New-York, Plenum Press, 1987,

и к книге, дающей исчерпывающий анализ развития детекторов параллельно с эволюцией физики элементарных частиц:

Close F., Marten M., Sutton C. The Particle Explosion. Oxford University Press, 1987.