

НОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В МЕТОДИКЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ *)

Л. Ледерман

I. ВВЕДЕНИЕ

Быстрый прогресс в физике элементарных частиц непосредственно зависит от эволюции измерительной техники¹, так же как и от увеличения интенсивности и энергии ускорителей. С момента возрождения этой отрасли науки в конце 40-х годов в технике измерений произошло, по существу, четыре переворота: 1) сцинтилляционный счетчик — детектор с фотоумножителем, 2) пузырьковая камера, 3) транзисторная и интегральная электроника; 4) искровая камера.

Хотя появление электронно-вычислительных машин привело, возможно, к наиболее серьезным последствиям, эти машины играют вспомогательную роль, как выходные и управляющие устройства при всех перечисленных приборах.

Критерием ценности детектора частиц являются в основном два его качества: пространственное разрешение и временное разрешение. Под пространственным разрешением понимается способность локализовать положение частицы в пространстве. Это необходимо для того, чтобы сопоставить два или более треков с определенным «событием». Способность пузырьковой камеры (а также камеры Вильсона и фотоэмульсии) расшифровывать сложные события в вершине взаимодействия обуславливает, в сущности, успешное применение детекторов этого рода. Столь же важно хорошее пространственное разрешение для измерения углов и импульсов по отклонению в магнитном поле. Характерными факторами, определяющими пространственное разрешение, являются: размер пузырьков ($\sim 1/3$ мм), размер зерен в эмульсии (1 мкм), толщина искр (~ 1 мм) или размер сцинтилляционного счетчика (редко $\ll 1$ см).

Временным разрешением называется способность локализовать момент прохождения частицы. Кроме того, важной характеристикой является время восстановления, минимальный интервал между событиями, которые могут быть зарегистрированы по отдельности. В пузырьковой камере регистрируются треки всех частиц, проходящих во время ее чувствительности (порядка нескольких мсек). Ядерные эмульсии суммируют все излучение, проходящее вплоть до момента их проявления, т. е. от нескольких часов до месяцев. Импульс от сцинтилляционного счетчика определяется временем прохождения частицы и распадным временем фосфоресцирующего вещества, т. е. временем, равным нескольким наносекундам (10^{-9} сек).

*) Leon M. Lederman, New Revolution in Particle Detection, Comm. Nucl. Particle Phys. 3, 101 (1969). Перевод М. С. Маринова, под редакцией В. С. Кафтанова.

Для искровой камеры существенно время жизни и подвижности свободных электронов в газах; она запоминает события примерно на 1 *мксек*.

Время восстановления обычно влияет на темп набора данных, если только оно случайно не оказалось в соответствии с периодичностью циклов ускорителя. Например, мертвое время искровой камеры — несколько *мсек*, и оно хорошо подходит к ритму работы стэнфордского линейного ускорителя. Это мертвое время необходимо для очистки газа от большого количества ионов, образованных искровым разрядом. Пузырьковые камеры должны восстанавливать свои термодинамические условия путем перемещения массивной диафрагмы, и обычно это время согласуется с периодичностью циклов ускорителя (порядка одного цикла в секунду). Для работы на принстонском ускорителе была построена камера с укороченным циклом (предельная частота — 20 циклов в секунду).

Очень важно сочетание хороших пространственной и временной разрешающей способности. Этим и обусловлены преимущества методики, основанной на совместном использовании счетчиков и искровых камер. Прежде единственным способом сочетать хорошее временное разрешение сцинтилляторов с высокой точностью определения координат было использование годоскопов из счетчиков. При этом сцинтилляторы размещаются в определенном порядке, и каждый из них выделяет минимальный пространственный интервал.

В комбинации искровых камер со счетчиками сцинтилляторы используются для выделения «одновременных» (в пределах нескольких наносекунд) траекторий, удовлетворяющих некоторым заранее поставленным условиям, и для запуска искровых камер. Гораздо более высокое пространственное разрешение в этом случае позволяет точно измерять такие параметры, как угол рассеяния, импульс и корреляции в изучаемых событиях. Так как искровая камера суммирует всю информацию за 1 *мксек*, она может удовлетворительно выделить событие, регистрируемое счетчиками, если только поток существенно меньше 10^6 *треков/сек* (пиковая интенсивность в рабочем цикле ускорителя). Возможно, что самым замечательным свойством искровых камер является большое разнообразие их конструкций. Их размеры варьируются от стонных детекторов нейтрино до почти невесомых (алюминиевые пластинки толщиной 12 *мкм*) камер для измерения углов, от оптических камер до бесфильмовых камер с записью информации на ферритовых сердечниках и магнитоотриционных проволоках. Камеры с широким зазором и в стримерном режиме позволяют видеть траектории без промежуточных электродов. Искровые камеры использовались и на громадных расстояниях от водородных мишеней, и с водородными мишенями, встроенными внутрь камеры.

В последнее время поступили сообщения о таком развитии техники искровых камер, которое обещает улучшить как пространственные, так и временные качества аппаратуры до такой степени, что это вполне может явиться новой революцией в методике детектирования частиц. Цель настоящей статьи — описать эту технику, ее достижения, перспективы и значение.

II. ЧТО НУЖНО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

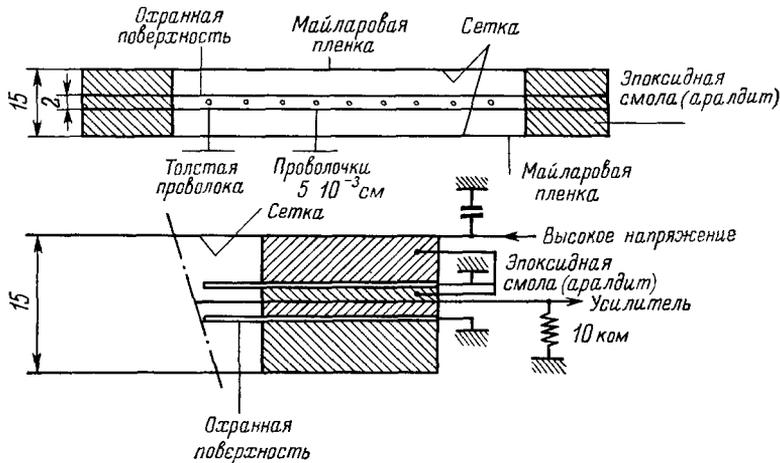
Предстоящий прогресс в физике высоких энергий связан с высокой интенсивностью и высокой энергией. Новые ускорители, как правило, будут давать пучки с интенсивностью 10^7 — 10^8 *частиц/сек* и импульсом 50—100 *Гэв/с*. Понадобятся детекторы, способные выдержать столь высо-

кие интенсивности и обеспечить надежное измерение импульсов вторичных частиц.

Исключительно важная роль будет отведена детекторам с повышенным пространственным разрешением. Во многих теперешних опытах улучшение пространственного разрешения детекторов раз в пять могло бы привести к уменьшению всей установки во столько же раз! Экономия средств и удобство работы повысились бы в гораздо большей степени — зависимость далеко не линейная, иными словами, та же самая аппаратура могла бы служить при примерно в пять раз больших энергиях. Пусть, например, среднее разрешение искровой камеры $\pm 0,5$ мм. Стандартный брукхейвенский магнит (апертура $3 \text{ м} \times 0,6 \text{ м}$) отклоняет частицу с импульсом 10 Гэв/с на 40 мрад . Чтобы измерять импульсы с процентной точностью, нужно измерять углы с точностью до $0,3 \text{ мрад}$. Для этого следует располагать искровые камеры на расстоянии $2,5 \text{ м}$ друг от друга. При этом необходимый телесный угол требует громадного размера апертуры ($3 \text{ м} \times 0,6 \text{ м}$). При разрешении в $0,1 \text{ мм}$ апертуру можно было бы уменьшить до размеров $60 \text{ см} \times 12 \text{ см}$, и соответственное увеличение поля привело бы к еще более высокому результату. При таких размерах можно было бы использовать криогенные магниты, что дало бы выигрыш в энергии примерно в три раза. Очевидно, выгода от повышения пространственного разрешения очень велика.

III. МНОГОПРОВОЛОЧНЫЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ СЧЕТЧИКИ

Шарпак и его сотрудники² применили старую технику пропорциональных счетчиков для решения этих проблем, используя преимущества современной интегральной электроники, что дало возможность поставить вопрос об отдельном усилителе и формирователе импульсов для каждой



Некоторые детали конструкции многопроволочных камер.

из проволочек в системе. Они поместили два ряда проволочек на расстояниях от $0,1 \text{ см}$ до $\sim 1 \text{ см}$ друг от друга между плоскостями двух сеточных электродов, как показано на рисунке. Камера наполнена аргоном при давлении 1 атм с примесью гасящих органических паров (n -пентан или спирт). К внешним электродам подведено постоянное отрицательное напряжение. Шарпак отмечает, что вблизи проволочки процесс протекает как в обычном пропорциональном счетчике с коэффициентом газового

усиления 10^4 — 10^5 . Экспериментально установлено, что соседние проволочки работают как отдельные независимые счетчики. Можно получить импульс в несколько *ме* в нагрузке, которая обычно составляет около 10 *пкф*. В статье показано: а) пропорциональность выделяемой энергии (разрешение 15% для рентгеновских лучей с энергией 5,9 *кэв*), б) независимость работы отдельных проволочек и, в связи с этим, пространственное разрешение порядка 1 *мм*, в) весьма высокая эффективность счета, г) способность *каждой* проволочки зарегистрировать около 10^5 частиц в секунду, д) возможность работы в сильных магнитных полях.

В последующей статье³ содержатся некоторые подробности о технике вывода данных. Еще позднее группа ЦЕРН опубликовала заметку⁴ о работе системы пропорциональных проволочных камер в связи с экспериментом по дифракционной диссоциации. Эта группа использовала семь камер для определения импульса, угла и положения входящих частиц пучка.

Была достигнута эффективность более 99% при временном разрешении порядка 85 *нсек*, причем передний фронт импульса составлял около 20 *нсек*. Наблюдались интервалы мертвого времени порядка 2—300 *нсек*, но не ясно, связаны ли эти времена с усилителем или с самой камерой. Во всяком случае, уже можно работать с потоком $3 \cdot 10^5$ *частиц* на проволочку (при потерях порядка 10%).

Эффективность для нескольких треков была очень велика — порядка 98% для четырех и более треков.

IV. ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Указанные статьи, а также исследования, ведущиеся во многих лабораториях⁵, приводят к следующему:

1. Скорость счета

Обычно искровые камеры могли работать только с пучками до 10^5 *частиц/сек* (пиковые интенсивности). Стандартный хорошо сфокусированный пучок может иметь линейный размер порядка 5 *см*, а при числе проволочек 50 и при числе отсчетов на проволочку более 10^5 новая камера может выдерживать пучки более $5 \cdot 10^6$ *частиц/сек*. Чтобы идентифицировать частицу, вызвавшую интересное событие, временные ворота должны обеспечивать малую вероятность попадания двух частиц сразу. Это приводит к рассмотрению временного разрешения.

2. Временное разрешение

Различные лаборатории, используя более «быстрые» газы (например, изобутан), добились временных разрешений ~ 20 *нсек*. Таким образом, в применении к электронной системе с проволочными камерами временные ворота шириной 20 *нсек* обеспечат 100%-ную эффективность выделения нужного импульсного сигнала. Передний фронт импульса при этом — несколько наносекунд. При указанных выше темпах счета получаем для вероятности одновременного появления двух треков величину $2 \cdot 10^{-8} \times 5 \cdot 10^6 = 0,1$, т. е. 10%.

Временное разрешение можно улучшить, используя сцинтилляционные счетчики, дающие 2 *нсек*. Это позволило бы использовать пучки с интенсивностью в 10 раз больше или понизить вероятность случайного совпадения до 1%.

3. Пространственное разрешение

В настоящее время, по-видимому, достигнута средняя величина $\pm 0,5$ мм, хотя имеются сообщения о лучших результатах при наличии специальных условий. Первоначальное предложение Шарпака использовать большое время дрейфа электронов для разбиения расстояния между соседними проволочками пока кажется весьма перспективным. Это — одно из наиболее интересных направлений дальнейшего развития методики.

Например, если бы время дрейфа было равно 100 нсек и измерялось с точностью ± 2 нсек, мы могли бы разделить длину дрейфа (скажем, около 3 мм) на множитель порядка 50 и довести ошибки до величины $\pm 0,06$ мм. Однако существуют такие проблемы, как статистика собирания электронов, дельта-электроны, наклонные треки и т. д., и необходима большая работа, чтобы реализовать эти возможности.

4. Ионизация

Возможность разделения частиц различной массы по ионизирующей силе при малых импульсах была уже продемонстрирована на камерах Шарпака². Другой интересной возможностью является использование этих камер для идентификации частиц с очень высокой энергией по релятивистскому росту ионизации. Для этого придется осуществить некоторое подавление флуктуаций Ландау в ионизационных потерях, но благодаря этому новому качеству камеры такого рода могут претендовать на будущих ускорителях на 200—400 Гэв на роль, которую сыграла в Брукхейвене пузырьковая камера.

В связи с этим следует указать на интересное замечание Альвареца⁶ о возможности изготовления искровых камер с жидкими аргонном и ксенонном. Альварец отмечает, что высокая плотность жидкости позволяет создать отдельные камеры с зазором всего в 50 мкм, что даст возможность для «точечной» локализации независимо от угла между треком и плоскостью детектора... Если удастся довести расстояние между соседними проволочками и толщину искры до таких же размеров и использовать электронное усиление, то таким образом действительно можно будет значительно улучшить современную технику. Разумеется, вопросы о временном разрешении и о временах восстановления пока остаются открытыми.

5. Выводы

Уже сейчас представляется очевидным, что пропорциональные проволочные камеры являются одним из самых многообещающих новых детекторов, которые появятся через некоторое время, возможно, наравне с пузырьковой камерой и сцинтилляционным счетчиком. Одна из основных проблем заключается в том, что затраты составляют от 10 до 20 долларов на одну проволочку в камере, поскольку каждая из проволок присоединена к своей собственной электронной аппаратуре. Однако с развитием технологии интегральных схем и гибридной техники стоимость аппаратуры определенно будет понижена. Уже сейчас можно считать практически возможной замену большинства фотоумножителей (средняя цена — 100—200 долларов за штуку) в больших экспериментах. Если будет реализована хотя бы часть намеченного, физика и техника наблюдений будут иметь еще один мощный и совершенный «микроскоп».

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Proceedings of the International Symposium on Nuclear Electronics, Versailles, France, 1968.
 2. G. Шарпак, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier, C. Zupancic, Nucl. Instrum. Methods 62, 262 (1968).
 3. G. Шарпак, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier, C. Zupancic, Nucl. Instrum. Methods 65, 217 (1968).
 4. Вемрогд, Бensch, Melissnos, Schuller, Nucl. Instrum. Methods (в печати).
 5. J. Fischer, Brookhaven National Laboratory; W. Ziprach, Nevis Laboratories (частные сообщения).
 6. L. Alvarez, Use of Liquid Noble Gases in Particle Detectors with a High Spatial Resolution over a Large Area, Lawrence Radiation Laboratory, Physics Notes (не опубликовано).
-