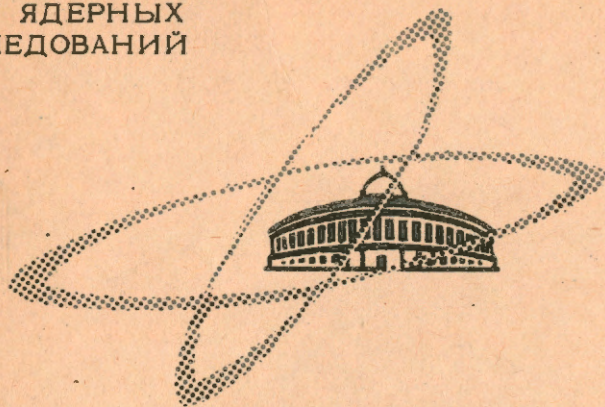


ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2745



А.Ф. Писарев

ИСКРОВЫЕ И СТРИМЕРНЫЕ КАМЕРЫ
И МЕТОДЫ ВЫВОДА ДАННЫХ С НИХ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1966

P-2745

А.Ф. Пясарев

ИСКРОВЫЕ И СТРИМЕРНЫЕ КАМЕРЫ
И МЕТОДЫ ВЫВОДА ДАННЫХ С НИХ

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

С о д е р ж а н и е

В в е д е н и е	3
Искровые камеры	5
Разрядные камеры	9
Стримерные изотропные камеры	10
Пузырьковая искровая камера	11
Бесфильмовые методы вывода данных с камер	12
Устройство с видиконным способом вывода данных	12
Устройство с электрофотографическим способом вывода данных	13
Система локации искры световыми датчиками	13
Система локации искры ультразвуковыми датчиками	14
Искровая камера с токораспределительными электродами	14
Искровые проволочные камеры с магнитострикционными линиями	15
Искровые проволочные камеры с ферритовыми кольцами	16
З а к л ю ч е н и е	17
Л и т е р а т у р а	17

В в е д е н и е

Все ускоряющийся прогресс экспериментального исследования свойств элементарных частиц в значительной степени обязан постоянному обновлению и развитию методов обнаружения частиц и их регистрации. Свидетельством тому является вся история развития физики, начиная от использования в опытах лепестковых потенциометров игрушечных размеров и кончая современными установками с гигантскими магнитами, камерами и спектрометрами различного типа, вес которых исчислялся сотнями и тысячами тонн, а стоимость — миллионами и десятками миллионов рублей. Из года в год арсенал инструментов физиков-ядерщиков пополняется все новыми и новыми разработками различного типа и назначения. Но если проанализировать тенденцию развития методов экспериментальной физики, то без труда можно заметить, что усилия многих физиков в течение уже продолжительного времени нацелены на изобретение и создание все более чувствительных способов детектирования одиночных частиц и отдельных актов их взаимодействия. Такая направленность в поисках новых способов "поштучной" регистрации частиц становится понятной, если учесть, что наибольший объем качественной и количественной информации о свойствах и природе элементарных частиц черпается из анализа индивидуальных актов их рождения, распада или взаимодействия. Только в таких случаях удается наиболее просто вскрывать закономерности в свойствах частиц.

Ценная информация также получается и при изучении ряда очень редких процессов спонтанного распада или при обнаружении новых частиц. Такие маловероятные события, как правило, теоретически хорошо интерпретируются и дают прямые ответы на некоторые вопросы о фундаментальных основах и структуре частиц. По этим причинам баланс полезного времени работы ускорителей с каждым годом сдвигается в пользу постановки сложных и "тонких" опытов по изучению редких событий взаимодействия или случаев проявления особых, необычных свойств частиц. Для их изучения экспериментаторы стремятся использовать в своих опытах детектирующую аппаратуру с максимальной чувствительностью к избранному физическому процессу и хорошим временным и пространственным разрешением, позволяющим надежно и четко выделять отдельные акты исследуемого процесса.

В последние 10 лет в экспериментальной физике высоких энергий наблюдается быстрое развитие различных методов детектирования частиц. Но особенно бурно развивается методика различных трековых камер. Особое внимание к этим приборам вызвано их исключительно ценными качествами. Трековые приборы обладают, как правило, большим рабочим объемом для детектирования частиц, хорошим пространственным, а в некоторых случаях и временным разрешением и позволяют с максимальной чувствительностью и документальностью регистрировать события. Физическое явление, порожденное в объеме камеры, может наблюдаться визуально или, как это обычно и делается, фотографироваться. Последнее обстоятельство в ряде случаев имеет решающее значение, например, при фотографировании новых частиц, редких распадов и т.д. Фотодокументальность получаемых в опыте результатов особенно важна при проведении исследований на современных больших ускорителях, где стоимость каждого проводимого эксперимента чрезвычайно высока. Повторные исследования в таких случаях с целью перепроверки полученных результатов являются подчас недопустимой роскошью.

Из трековых приборов наибольшее распространение в физических лабораториях по изучению элементарных частиц получили камеры Вильсона, диффузионные камеры, жидкостные пузырьковые камеры, искровые камеры и системы, построенные на их основе. Конечно, каждый из этих приборов имеет свои "плюсы" и "минусы". Так, первые три типа камер хороши изотропностью и большой ливневой (многочастичной) эффективностью регистрации частиц и высоким качеством треков. Пузырьковые камеры к тому же ценны еще и тем, что в них можно использовать практически любую жидкость, представляющую интерес для исследуемого взаимодействия. Но все эти камеры обладают общим недостатком - большой инерционностью работы, а диффузионные и жидкостные - еще и неуправляемостью предварительной селекцией частиц. В камерах регистрируются все частицы, проходящие через чувствительный объем, независимо от того, есть в этом необходимость или нет. Отбор же полезных событий от общего числа зарегистрированных случаев производится позднее, лишь на стадии просмотра фотопленки с рабочими кадрами, содержащими треки.

Искровые камеры и их различные модификации в настоящее время получают значительно более широкое применение в экспериментах, нежели диффузионные и пузырьковые камеры. Искровые камеры, обладая многими положительными качествами диффузионных и жидкостных камер, имеют и ряд дополнительных достоинств. Так, например, искровые камеры имеют короткие времена срабатывания и восстановления и легко управляются системами предварительного отбора частиц. Ниже подробно рассматривается этот тип трекового прибора, его характеристики и методы снятия информации.

Искровые камеры

В отличие от многих детекторов заряженных частиц, появившихся в результате творческих усилий отдельных изобретателей и ученых, современные искровые камеры являются продуктом большой интернациональной работы многих физиков-экспериментаторов и целых авторских коллективов различных национальных лабораторий мира.

В основе работы искровой камеры лежит механизм электрического разряда в газе. Иницируется этот разряд начальными электронами, образующимися в газе по следу заряженной частицы.

Впервые идея использования разряда в газе для получения светящегося трека была высказана Кейфелем^{/1/} в 1949 г. Он обратил внимание на тот факт, что в плоско-параллельном счетчике с постоянным электрическим питанием иногда образуются искры вблизи траектории заряженных частиц. Спустя четыре года Белла и Францетти^{/2/} повторили опыты Кейфеля и получили первые фотографии искрового разряда в плоских счетчиках. Дальнейший успех был достигнут в работе Хеннинга^{/3/} в 1955 г., в которой использовалась группа счетчиков с параллельными электродами. В этой "камере" Хеннинг получил стереофотографии треков космических частиц. Треки состояли из совокупности искр и имели ступенчатую структуру. Однако как в работах Кейфеля, Белла и Францетти, так и Хеннинга, плоские счетчики питались постоянным высоким напряжением и имели непрерывную чувствительность. В таком режиме работы счетчики обладали плохим временным разрешением и не могли быть эффективно использованы в условиях большого фона излучения (например, на пучках частиц от ускорителя). Применение схем внешнего гашения или гасящих примесей не намного улучшало разрешающее время этих приборов.

Существенный прогресс в этом направлении был достигнут лишь после того, как Крэншоу и Де-Бира^{/4/} в 1957 году применили высоковольтное импульсное питание искровых счетчиков, а в паузах между импульсами - небольшое очищающее поле, которое убирало из объема счетчиков ионы и электроны от старых следов и треков.

Таким образом, в данном варианте питания счетчиков их разрешающее время определялось временем дрейфа зарядов на электроды и могло быть доведено до десятых долей микросекунды. Время восстановления чувствительности после регистрации частицы определялось временем убирания электронов и ионов, образовавшихся в искре, и не превышало нескольких миллисекунд.

Следует отметить, что идея импульсного питания разрядных детекторов частиц была выдвинута значительно раньше, чем она была использована в работе Крэншоу и Де-Бира, а именно - в 1956 г. Тяпкин^{/5/} разработал метод импульсного питания счетчиков Гейгера, а Кошверси^{/6/} и др. - питание годоскопа из стеклянных трубок с неоном.

Таким образом, применение импульсного питания сделало искровые счетчики и камеры управляемыми и способными работать при больших фоновых нагрузках. Это обстоятельство привлекло к себе особое внимание физиков, работающих на ускорителях, где интенсивность фоновой загрузки приборов обычно бывает велика.

Крэншоу и Де-Бира^{/4/} в своих исследованиях использовали искровую камеру с воздушным наполнением. Они нашли, что в такой камере разрешающее время может быть сделано меньше одной микросекунды, однако для эффективной регистрации частиц градиент электрического поля должен был быть больше 3 мв/м. Они обнаружили также, что в камере с воздушным наполнением эффективно регистрируются лишь одиночные частицы и плохо образуются треки двух и более частиц, одновременно проходящих через камеру. Поэтому дальнейшие усилия физиков были направлены на создание в камерах таких условий, при которых возможно было бы использовать сравнительно небольшие импульсные электрические поля и регистрировать одновременно несколько частиц.

Определенные успехи в решении этой проблемы были достигнуты в вышеупомянутой работе^{/6/} Конверси и др., в которой использовался годоскоп из стеклянных трубок, наполненных неонам. При прохождении заряженной частицы через этот прибор на его электроды, между которыми располагались ряды стеклянных трубок, подавался короткий импульс высокого напряжения. Импульс вызывал локальное свечение неона в тех трубках, через которые проходила частица. В годоскопе эффективно регистрировались одновременно несколько частиц, а градиент электрического поля был значительно меньше, чем в случае камеры с воздушным наполнением. Однако в годоскопе невозможно было получать хорошее пространственное разрешение, так как оно ограничивалось диаметром используемых трубок. Вместе с тем конструкция годоскопа принципиально не допускала возможности применения очищающего поля и поэтому время памяти прибора было большим.

Следующий решающий шаг на пути создания современных разрядных и искровых камер был сделан Фукуи и Миямото^{/7/}. Они предложили изготавливать камеры в виде коробок с плоскими стеклянными стенками и внешними электродами и наполнять их газовой смесью из 99,5% неона и 0,5% аргона (так называемой смесью Пеннинга). Эта смесь, как известно, обладает низким потенциалом зажигания благодаря непрямому механизму рождения электронов в момент соударения атомов неона, возбужденных в метастабильное состояние (уровень возбуждения 16,6 эв), с атомами аргона, находящимися в основном состоянии (энергия ионизации 15,7 эв). Если на свободный одиночный электрон в такой смеси подействовать электрическим полем умеренной напряженности, то электрон вызовет быстрое лавинообразное нарастание числа вторичных электронов и приведет к пробое газа. Поэтому наполнение смесью Пеннинга камеры должно было благоприятствовать получению в ней треков при относительно низких полях. Это

обстоятельство и учли Фукуи и Миямото. Первые же их работы, выполненные с камерами, дали хороший результат. В камерах эффективно возникали четкие треки при импульсных полях, не превышающих 7-10 кв/см.

Фукуи и Миямото в своих исследованиях обнаружили интересное явление — образование наклонного к полю разряда вдоль следа ионизирующей частицы. Светящиеся треки имели ширину около 2 мм и совпадали со следом частицы до тех пор, пока угол наклона, образуемый следами частиц с направлением силовых линий поля, не достигал некоторого предельного значения, равного приблизительно 18° .

Сущность механизма образования наклонного трека в камере была вскрыта самими же авторами первого исследования камер — Фукуи и Миямото^{/8/} и подробно проанализирована Тяпкин^{/9/} вскоре после получения первых результатов работы с разрядными камерами на космических частицах. По мнению этих авторов возникновение трека вдоль следа частицы происходит по следующей схеме: в момент приложения к электродам камеры импульса высокого напряжения каждый начальный электрон в следе частицы начинает создавать отдельную электронную лавину в направлении к положительному электроду. В первый момент на лавину действует поле только внешнего источника напряжения, но по мере развития разряда к нему добавляется также внутреннее поле, возникающее от взаимодействия электронных лавин друг с другом. В каждый момент времени результирующий вектор этих полей определяет направление движения лавины и темп ее нарастания. Такой характер развития разряда приводит к тому, что голова одной электронной лавины вливается в хвост другой и вся лавинка лавин в следе объединяется в единый плазменный шнур — трек, стримерно перекрывающий междуэлектродный промежуток камеры.

Первоначально казалось, что наклонные к полю треки могут образовываться только в тех камерах, у которых электроды отделены от рабочего газа диэлектрической прослойкой (например, стеклом, как в камере Фукуи и Миямото). Считалось, что диэлектрический слой ограничивает разряд в газе и тем самым способствует образованию наклонного трека. Это обстоятельство явилось даже причиной того, что камеры с диэлектрическими прослойками были выделены в особый класс камер, так называемых "разрядных камер", в противоположность "искровым камерам", у которых электроды не изолируются от рабочего газа. Однако позже Тяпкин и др.^{/10/} и Борисов и др.^{/11/} показали, что при использовании коротких импульсов с крутым фронтом в искровой камере также образуются наклонные треки. Казалось бы, что для деления камер на разрядные и искровые не оставалось больше оснований, но тем не менее, желая подчеркнуть ограниченность разряда в первом типе камер, в литературе оставили оба термина.

После работ Фукуи и Миямото началось успешное развитие метода визуальной регистрации заряженных частиц с помощью разрядных и искровых камер. Особенно бурно стали исследоваться и применяться в физических экспериментах многослойные искровые камеры с небольшими междуэлектродными промежутками (около 1 см). В этих камерах можно легко управлять временем памяти и мертвым временем с помощью подбора соответствующей величины очищающего поля, подаваемого на электроды. Так, время памяти по желанию можно варьировать в пределах от долей микросекунды до десяти и более микросекунд, а мертвое время — от десятых до тысячных долей секунды. Это позволяет выборочно фотографировать только те треки и интересные события, которые порождаются частицей в течение последних долей микросекунды перед подачей высокого напряжения на камеру^{х)}.

Отбор событий, подлежащих фотографированию, осуществляется обычно специальными системами логики, которые работают от быстрых счетчиков-цинтилляционных, черенковских и др. Время логического "размышления" над вопросом — фотографировать или не фотографировать след частицы, в современных электронных схемах не превышает нескольких десятков наносекунд.

В настоящее время изготавливаются искровые камеры самых различных конструкций и размеров. Но наибольшее распространение получили камеры с плоскими электродами, собираемые в виде этажерки. Такие камеры просты в изготовлении и поэтому "универсальными" их обычно не делают. Каждая камера, как правило, предназначается для выполнения лишь небольшого числа определенных экспериментов. Часто изготавливаются камеры также и цилиндрической формы для изучения процессов, возникающих в мишенях, размещаемых по оси камер.

Электроды камеры могут служить любые вещества с проводящими поверхностями. В ряде случаев их выбор определяется физикой изучаемого процесса, если использовать электроды в качестве мишени. Толщина электродов выбирается самой различной.

^{х)} Здесь, по-видимому, будет полезно дать более полное определение терминам "время памяти" и "мертвое время". Под терминами "время памяти", "время очистки", "время чувствительности" и "разрешающее время" понимается одно и то же, а именно — интервал времени между моментами прохождения частицы через объем камеры и подачей импульса высокого напряжения на ее электроды, в течение которого вероятность возникновения трека по следу частицы не падает ниже некоторой заданной величины. Этой величиной может служить любое число, заключенное между единицей и нулем. В литературе в качестве такого параметра чаще всего используются величины $1/2$ и $1/e$. Под термином "мертвое время" или "время восстановления" камеры понимается интервал времени, отсчитываемый от момента регистрации частицы, по истечении которого камера вновь готова к регистрации следующей частицы. То есть этот интервал времени определяется как то время, по прошествии которого повторная подача импульса на камеру не приводит к пробое по старому треку.

При исследовании медленных частиц электроды выполняются из тонких фольг или пленок, а при изучении быстрых и релятивистских частиц — толстых металлических пластин. Так, в эксперименте по обнаружению нейтрино электроды изготавливались из железа толщиной в несколько сантиметров, что позволяло поднять суммарную вероятность столкновения нейтрино с ядрами до наблюдаемого значения.

В настоящее время искровые камеры с небольшими междуэлектродными зазорами получили исключительно широкое распространение во всех физических лабораториях мира благодаря удачному сочетанию в этих приборах характеристик быстрой электроники и методов визуальной регистрации частиц.

Искровые камеры стали стандартными инструментами в руках физиков-экспериментаторов. На основе этих камер теперь создаются большие установки с полезным объемом регистрации частиц, достигающим нескольких кубических метров. Такие устройства, помещенные в магнитные поля, позволяют быстро и эффективно изучать различные характеристики ядерных взаимодействий быстрых частиц и процессы их превращения.

Разрядные камеры

Камеры, у которых рабочий газ отделен от электродов диэлектрической прослойкой, были названы, как указывалось выше, газоразрядными. Предельный угол развития искры по следу частицы в таких камерах велик и достигает $60^{\circ}/12'$. При больших значениях угла треки частиц становятся прерывистыми и состоят из множества отдельных искр, которые пересекают весь промежуток камеры. Со стороны электродов эти искры наблюдаются в виде светящихся точек.

Газоразрядные и искровые камеры с большими промежутками (несколько сантиметров и десятки сантиметров) получили значительно меньшее распространение в экспериментальной физике, чем искровые камеры с небольшими промежутками. Это связано с тем, что время памяти у камер с большими междуэлектродными промежутками велико. Обычный способ удаления электронов из объема таких камер с помощью постоянного очищающего поля применим вообще лишь к искровым камерам и не применим к газоразрядным. Но и в случае искровых камер с большими промежутками метод очищающего поля становится тоже малоэффективным, так как скорость дрейфа электронов в газе под действием очищающего поля невелика и убрать все электроны из объема камеры за сравнительно короткое время не удается. В начале могло показаться, что эту задачу можно решить простым лишь увеличением напряженности электрического поля в зазоре до такого значения, при котором получалась бы требуемая величина скорости дрейфа электронов и время очистки камеры. Однако

этот путь в действительности оказался неприемлемым. Увеличение напряженности поля до величины, обычно используемой в искровых камерах с небольшими зазорами, приводит к значительному возрастанию абсолютной разности потенциалов на электродах камеры за счет большой величины промежутка. В результате этого в газе возникает слабая ионизация и возбуждение метастабильных уровней атомов, что, в конечном счете, ухудшает временные характеристики камеры.

Проблема уменьшения времени памяти у камер с большими зазорами до конца пока не решена. Было сделано несколько попыток разрешить эту трудность путем введения в камеру электроотрицательных добавок типа кислорода, паров йода и четыреххлористого углерода. Эти добавки эффективно перехватывают начальные электроны и быстро обедняют след частицы. Однако опыты с добавками показали, что хотя время памяти при этом действительно заметно сокращается, но добавки резко ухудшают разрядные характеристики камер^{/13/}. Вместе с тем точное дозирование ничтожного количества добавок, которое обычно требуется для нормальной работы камер, дело весьма трудное. Эта проблема ждет своего решения.

Потенциальные возможности применения камер с большими зазорами в физических экспериментах велики. Они могли бы быть использованы в магнитных полях для опытов по определению заряда и импульса частицы. Так, простые эксперименты такого характера, выполненные Алиханяном и др.^{/14/} дали обнадеживающие результаты – треки имели кривизну, величина которой хорошо согласовалась с расчетной. В камерах с большими зазорами высока эффективность регистрации одновременно нескольких частиц. Эта эффективность практически такая же, как у жидкостных и диффузионных камер. Наконец, Любимов и др.^{/15/} показали, что при подборе определенных параметров питающего импульса в камерах с большими промежутками можно получить зависимость яркости свечения трека от энергии частицы. При дополнительных исследованиях этого явления откроется возможность идентифицировать частицы по их ионизирующей способности.

Таким образом, положительных качеств у камер с большими зазорами много, но реализация их пока сдерживается отсутствием удобного способа управления временем памяти.

Стримерные изотропные камеры

Исследования механизма газового разряда под действием высоковольтного импульса в камерах с большими междуэлектродными промежутками позволили Чиковани и др.^{/16/} и Долгошеву и др.^{/17/} создать новый тип искровых камер – стримерные изотропные камеры. Принцип их работы основывается на том, что под действием высоковольтного импульса очень малой длительности начальные электроны в следе

частицы развивают кратковременные, но интенсивные стримерные разряды вдоль электрического поля. За время действия импульса разрядные ливни от отдельных начальных электронов успевают пробежать в камере всего лишь несколько миллиметров. Совокупность таких оборванных, коротких искровых разрядов составляет трек частицы. Треки одинаково хорошо образуются под всеми углами, то есть стримерные камеры обладают свойством изотропного регистрирования следов частиц. У стримерных камер высокая ливневая эффективность детектирования частиц. Камеры чрезвычайно просты в изготовлении и доступны каждой лаборатории.

Изотропность стримерных камер является одним из самых ценных качеств трековых приборов, так как она позволяет получать такие снимки треков, по которым можно легко проследить всю историю частицы от входа в камеру до остановки и взаимодействия или распада. Стримерные камеры могут работать с повышенным давлением газа^{/18/}, что бывает важно при использовании его в качестве вещества, в котором исследуются взаимодействия. В этом отношении стримерные камеры сходны с диффузионными камерами и камерами Вильсона, но превосходят их управляемостью и быстротой работы. Однако стримерным камерам, к сожалению, присущи и определенные недостатки: заметное время памяти, слабая светимость искр в треке и ее сильная зависимость от угла наклона трека к направлению поля. Вместе с тем в такой камере пространственная локализация трека частицы весьма чувствительна к параметрам высоковольтного импульса. По этим причинам стримерные камеры пока не нашли широкого применения в экспериментальной физике.

Интересные исследования по созданию изотропной камеры были выполнены Бутсловым и др.^{/19/} в 1964 году. Они осуществили режим форсированного питания камеры с большим промежутком низковольтным импульсным напряжением, при котором происходит обрыв разряда на лавинной стадии. Слабое свечение таких лавин регистрировалось электронно-оптическим преобразователем. Исследования дали обнадеживающие результаты. Камера, как ожидалось, оказалась изотропной по регистрации частиц и свечению трека.

Пузырьковая искровая камера

В 1962 г. Шарпах^{/20/} предложил (и исследовал) управляемую искровую жидкостную камеру. Камера имела два электрода и наполнялась вазелиновым маслом, через которое непрерывно продувался неон или гелий в виде мелких газовых пузырьков. Заряженные частицы, проходя систему пузырьки-жидкость, образовали в ней электроны. Последние под действием высоковольтного импульса вызвали в пузырьках и жидкости электрический видимый разряд по следу частицы. Предполагается, что начальный

разряд зарождается в пузырьках газа, оказавшихся на пути движения регистрируемой частицы. Опыты показали, что свечение трека в такой камере сильно экранируется большой плотностью газовых пузырьков, находящихся в жидкости. По этой причине достигнутая глубина видимости трека не превышает 1,5 см.

Идея Шарпака ценна конкретной постановкой вопроса о создании быстрого жидкостного трекового прибора, управляемого с помощью электрических полей.

Бесфильмовые методы вывода данных с камер

Первые же физические исследования, выполненные на ускорителях с помощью искровых камер, следы частиц в которых фотографировались на пленку, вскрыли негативную сторону такого метода съема информации. Высокое быстродействие искровых камер привело к тому, что даже при использовании хороших схем предварительной селекции частиц физики стали получать за короткие рабочие экспозиции на ускорителях большое количество экспонированной фотопленки. Длина пленок, получаемых в каждом опыте, стала исчисляться десятками тысяч метров. Просмотр этой пленки и отбор и обмер полезных событий потребовал большого труда и времени. Поэтому возникла необходимость найти новые беспленочные способы вывода данных с искровых камер. Такие поиски велись и к настоящему времени удалось разработать несколько систем автоматического съема информации. Эти системы базируются на использовании различных явлений, сопровождающих электрический разряд в газе после прохождения частицы.

Ниже рассматриваются наиболее оригинальные и перспективные системы по беспленочному выводу данных с искровых и стримерных камер.

Устройство с видеоконным способом вывода данных

Это одна из первых систем ^{/21/}, предложенная для автоматического снятия информации с камер. Основным ее элементом является видеокон. Система работает по принципу телевизионной аппаратуры. Треки частиц, возникающие в искровой или стримерной камере, проектируются на экран видеокона, запоминаются им и затем считываются внутренним электронным лучом. Сигналы с видеокона записываются в блоке специальной "памяти" или подаются прямо на вычислительную машину, где они расшифровываются и обрабатываются по заданной программе.

Простота идеи видеоконной системы очевидна, однако, в силу отсутствия высококачественных видеоконов, при работе с устройствами на их основе велики ошибки при

измерениях координат треков частиц. По этой причине видеоконные системы пока не нашли практического применения в экспериментальной физике.

Устройство с электрографическим способом вывода данных

Известно, что тонкие электрофотографические слои, заряженные до некоторого потенциала, способны сохранять его в темноте продолжительное время и быстро терять при освещении. Очевидно, что если на такую заряженную поверхность спроецировать искры, образующие трек частицы в камере, то проекция каждой искры оставит на этой поверхности свой "автограф" в виде потенциальной ямы. Степень спада потенциала в месте освещения зависит от длительности экспозиции и интенсивности светового потока от искры. Последующим зондированием потенциала поверхности тем или иным способом можно установить координаты потенциальных ям, образованных искрами, и, в конечном счете, восстановить пространственную картину трека частицы в камере.

В настоящее время предложена установка ^{/22/}, в основе которой используется рассматриваемый электрофотографический эффект. Основным элементом этой установки является полый металлический цилиндр, покрытый снаружи тонким слоем электрофотографического материала. Устройство промоделировано на космических частицах и получены хорошие результаты. Экспериментальная модель состояла из селеновых и селен-теллурических электрофотографических слоев, зарядного устройства и датчиков для измерения потенциала. В опыте было установлено, что селеновые и селен-теллурические слои обладают высокой чувствительностью для регистрации искр, возникающих в камере, и ошибка измерения положения трека не превышает нескольких долей миллиметра.

В техническом отношении электрофотографическое устройство отличается особой простотой. Поэтому следует ожидать, что в ближайшем времени такие установки найдут применение в ряде экспериментов.

Система локация искры световыми датчиками

Идея этой системы предложена Акимовым и др. ^{/23/} и базируется на следующем принципе. Если на некотором расстоянии от края камеры установить световой датчик, то в нем под действием света от искры будет возникать электрический сигнал. Его амплитуда будет обратно пропорциональна квадрату расстояния от искры до датчика.

Размещая вокруг каждого промежутка камеры два и более датчика, можно, измеряя их сигналы, однозначно установить координаты всех искр в камере.

Принцип действия установки со световыми датчиками прост, однако осуществить такое устройство на практике пока не удалось. Трудно подобрать датчики, которые

обладали бы высокой и стабильной во времени чувствительностью и имели характеристики с идентичной зависимостью от температуры и величины светового потока.

Можно ожидать, что разработка чувствительных световых датчиков с устойчивыми параметрами откроет возможность для создания простых систем автоматического вывода данных с искровых камер.

Система локации искры ультразвуковыми датчиками

Хорошо известно, что в момент проскакивания искр в камере, в ее зазорах рождаются ультразвуковые волны. Эти волны можно зарегистрировать чувствительными датчиками, размещенными по краям камеры. Измеряя времена распространения ультразвукового импульса от искры до датчиков и зная их относительное расположение, можно полностью восстановить всю пространственную картину трека в камере.

Акустические системы в настоящее время построены и применяются в ряде физических экспериментов (см., например, /24/). В качестве ультразвуковых датчиков используются пьезоэлектрические кристаллы или микрофоны конденсаторного типа. Ошибка измерения координат искр не превышает 0,5 мм.

Устройства с ультразвуковыми приемниками применяются, как правило, в единой системе с вычислительными машинами, что автоматизирует эксперимент и значительно ускоряет получение физической информации об изучаемых процессах. Однако системы данного типа обладают и определенными недостатками. Главными из них являются: необходимость использования большого числа датчиков (3-4 датчика на каждый искровой промежуток камеры) и сложная логика однозначного определения координат нескольких искр, одновременно возникающих в промежутке. Вместе с тем использование ультразвуковых датчиков предопределяет конструкцию боковых стенок камер.

Искровая камера с токораспределительными электродами

В 1963 году Шарпак и др. /25/ предложили интересный и очень простой способ определения положения искр в зазорах камеры путем сопоставления токов, текущих через противоположные края каждого электрода. В этом методе электроды выполняются в виде длинных проводящих полосок и монтируются в камере перпендикулярно друг другу. В момент возникновения в промежутке камеры искры к концам каждого электрода, как в реохорде, потечет ток, по величине обратно пропорциональный удалению искры от краев электрода. Сопоставление токов, текущих через два конца

одного электрода, дает информацию об одной координате места возникновения искры в зазоре. Вторая координата в плоскости электронов определяется аналогично с помощью второго, соседнего по промежутку, электрода.

Предложенная Шарпаком и др. система в настоящее время разработана и успешно используется в экспериментах. Информация о токах, протекающих в электродах, непосредственно подается для обработки на вычислительные машины. Точность определения координат искр в камере составляет около 0,5 мм. Основным недостатком этой системы является особая конструкция электродов (длинные однородные полоски), которая приводит к тому, что в камере эффективно работает лишь ее центральный объем, составляющий всего лишь около десяти процентов от полного объема. Кроме того рассматриваемая система весьма чувствительна к качеству монтажа и экранировки токоведущей проводки.

Искровые проволочные камеры с магнестрикционными линиями

Искровые проволочные камеры в настоящее время все более широко используются в опытах на ускорителях. Причинами тому являются простота конструкции камер, высокая надежность их в работе и простой способ вывода с них информации посредством систем с различными ферритовыми элементами.

Электроды камер рассматриваемого типа выполняются из параллельно натянутых в одной плоскости тонких (0,1 мм) проволочек длиной до метра и более. Расстояние между ними обычно составляет около 1 мм. На одном конце все проволочки, образующие электрод, изолируются друг от друга (как правило, эпоксидной смолой), а на другом - объединяются в общую точку, на которую подается высоковольтный импульс в момент прохождения частицы. Со стороны общей клеммы на рамку электрода под проволочками накладывается полоска из магнестрикционного материала. Концы полоски-линии выносятся за пределы электрода. Если по одной из проволочек электрода пропустить импульс тока, то он породит в полоске магнестрикционную волну, которая будет распространяться в оба конца линии со скоростью звука. Эту волну, благодаря обратимости магнестрикционного эффекта, можно зарегистрировать специальными катушками, размещенными на концах линии. Измеряя таким путем времена распространения волны до приемных катушек, можно однозначно установить координаты проволоки, по которой пропускаться токовый импульс. В реальной камере токовый импульс в проволочках возникает под действием импульсного напряжения в момент проскакивания искры между электродами. Искра электрически "замыкает" цепь из двух проволочек, принадлежащих двум соседним электродам, которые образуют искровой промежуток камеры.

Рассмотренный принцип в настоящее время используется во многих физических установках. Последние komponуются обычно из отдельных модулей, количество которых может быть различно и определяется в каждом конкретном случае задачей физического исследования.

Методические исследования опытных образцов магнестрикционных систем /28/ показали их высокую надежность в работе и большую точность измерения координат треков частиц, достигающую 0,5 мм и лучше. Система обладает большим быстродействием и может работать в непосредственной связи с вычислительной машиной. Однако камеры с магнестрикционными линиями нельзя использовать в сильном магнитном поле, так как оно уничтожает эффект магнестрикции.

Искровые проволочные камеры с ферритовыми кольцами

Искровые проволочные камеры с выводом информации на ферритовые кольца устроены так же, как и камеры с магнестрикционными линиями. Их отличие состоит в том, что в камерах рассматриваемого типа /27,28/ вместо линии используются ферритовые кольца, наизанные по одному на каждую проволочку электрода. Импульс тока, проходящий по проволочке и участвующий в образовании разряда в камере, вызывает перемагничивание кольца, надетого на данную проволочку. Последующим опросом всех колец камеры с помощью специальной логической системы устанавливаются номера проволочек, по которым протекал ток. Этой информации, как и в камере с магнестрикционной линией, достаточно для восстановления пространственной картины трека частицы.

В установках подобного типа обычно используется большое количество колец, достигающее сотен и тысяч штук. Мониторируются они, как правило, в виде матричных плат на специальных основах. Принципы опроса и считывания информации с системы колец всецело заимствованы из области счетно-решающей техники. Это одно из обстоятельств, приведшее к успешному применению вычислительных машин для обработки данных, непосредственно поступающих с проволочных камер.

Проволочные системы с ферритовыми кольцами в настоящее время являются наиболее разработанными и совершенными устройствами и широко используются в экспериментах на ускорителях. Перспективы дальнейшего применения проволочных камер велики.

З а к л ю ч е н и е

Искровая камера - настоящая находка для физиков-экспериментаторов, ведущих исследования на ускорителях. Появление быстрых управляемых трековых приборов перевело на автоматические основы методы вывода и обработки экспериментальной информации, получаемой в опытах с элементарными частицами.

Область применения искровых камер - физика высоких энергий. Однако в настоящее время прилагаются большие усилия к модернизации камер и распространению их в экспериментальную физику низких энергий.

Современное состояние развития и использования искровых камер можно охарактеризовать следующим образом. Камеры с небольшими зазорами прошли основной этап своего развития и становятся "стандартными" приборами. Камеры с большими промежутками - стримерные и другие - исследуются и постепенно входят в практику физического эксперимента.

Фотографический метод съема информации пока сохраняется в тех случаях, когда изучаются редкие процессы и фотодокументальность их регистрации имеет первостепенное значение. Во всех остальных случаях внедряются методы автоматического вывода данных и быстрой обработки их на вычислительных машинах.

С каждым днем число экспериментальных исследований, успешно выполняемых с помощью искровых камер, стремительно возрастает и это является лучшей аттестацией нового метода трековой регистрации частиц.

Л и т е р а т у р а

1. I.W. Keufel. Rev. Sci. Instr. 20, 202 (1949).
2. F. Bella, C. Franzinetti. Nuovo Cimento, 10, 1335, 1461 (1953).
3. P.G. Henning. Atomkern Energie, 2, 81 (1957).
4. T.E. Cranshaw, I.T. De Beer. Nuovo Cimento, 5, 1107 (1957).
5. A.A. Тяпкин. ПТЭ, 3, 51, (1956).
6. M.M. Conversi, S. Focardi, C. Franzinetti, A. Cozzini, P. Murtas. Nuovo Cimento, 4, 234 (1956).
7. S. Fukui, S. Miyamoto. No Nuovo Cimento, 11, 113 (1959).
8. S. Fukui, S. Miyamoto. Physical Institute Ngoya University, Japan, Preprint, 1959.
9. A.A. Тяпкин. Intern. Conf. on Instr. for High-Energy Phys., Sept., 1960, p.270

10. А.А. Тяжкин, Цзоу Чжу-линь. Труды 5-ой конференции по ядерной электронике, 1961, Атомиздат; ПТЭ, 5, 84, 1962.
11. А.А. Борисов, Б.А. Долгошенин, Б.И. Лучков, Л.В. Решетия, В.И. Ушаков. ПТЭ, 1, 49 (1962).
12. А.М. Говоров, В.И. Никаноров, Г. Петер, А.Ф. Писарев, Х. Позе, ПТЭ, 6, 549 (1961).
13. И.И. Громова, В.И. Никаноров, Г. Петер, А.Ф. Писарев. ПТЭ, 1, 64 (1965).
14. А.И. Алиханян, Т.Л. Асаткани, Э.М. Матевосян. ЖЭТФ, 44, 773 (1963).
15. В.А. Любимов, Ф.А. Павловский. ЖЭТФ, 46, 1142 (1964).
16. Г.Е. Чиковани, В.Н. Ройнишвили, В.А. Михайлов. ЖЭТФ, 46, 1228 (1964).
17. Б.А. Долгошенин, Б.И. Лучков. ЖЭТФ, 46, 392 (1964).
18. М.М. Кулюкин, Д.Б. Поптекорво, И.В. Фаломкин, Ю.А. Шербаков. ПТЭ, 6, 70 (1965).
19. М.М. Бутслов, В.И. Комаров, О.В. Савченко. ЖЭТФ, 46, 2245 (1964).
20. G. Charpak, C. r. Acad. Sci., 254, N18, 3181 (1962).
21. W. Verdon. Proc. Int. Meeting on Film-less Spark Chamber Techn., p.57, 1964.
22. В.А. Бирюков, И.И. Громова, А.Ф. Писарев. Препринт ОИЯИ, P-2594, Дубна 1966.
23. Ю.К. Акимов, А.И. Калинин, А.И. Сидоров. Препринт ОИЯИ P-1526, Дубна 1964.
24. W.A. Wenzel, Annual PRev. of Nucl. Science, 14, 205 (1964).
25. G. Charpak, J. Favier and L. Massonet, Nucl. Instr. Methods, 24, 501 (1963).
26. А.С. Гаврилов, И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский, С.С. Кириллов, Ю.Т. Кирюшин, Б.А. Кулаков, Т.С. Нигманов, В.П. Пугачева, П.И. Филиппов, Э.М. Цыганов. Препринт ОИЯИ № 2398, Дубна 1965.
27. F. Kriene. Nucl. Instr. Meth., 16, 262, (1962); 20, 168 (1963).
28. И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский, Б.А. Кулаков, П.И. Филиппов, Э.Н. Цыганов. Препринт ОИЯИ E-2388, Дубна 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 мая 1966 г.