

Газовые детекторы для идентификации частиц при высоких энергиях (ОБЗОР)

О. В. Мешков* Л. Н. Смирнова†

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 23.06.2017; Подписана в печать 20.07.2017)

В работе кратко представлена эволюция газовых детекторов от счетчиков до современных микростриповых и пиксельных газовых детекторов. Показаны возможности идентификации частиц по ионизации и переходному излучению на примере трекового детектора переходного излучения ATLAS. Показан детектор переходного излучения установки ALICE с другой конструкцией. Приведены примеры использования микростриповых газовых детекторов для модернизации установок ATLAS и CMS.

PACS: 29.40.Cs УДК: 539.1.07

Ключевые слова: газовые детекторы, переходное излучение, коллайдер.

ВВЕДЕНИЕ

Газовые детекторы широко используются в физике высоких энергий. В каждой современной установке используются такие типы детекторов. Основные задачи этих детекторов — это измерение координат в рамках трековых систем. Во многих экспериментах они также используются для идентификации частиц. Идентификацию частиц можно осуществлять по измерению ионизационных потерь при малых импульсах (до 0.8–1.0 ГэВ/с). При высоких Лоренц-факторах наиболее эффективно использовать детекторы переходного излучения. Детекторы переходного излучения используются на экспериментах ATLAS и ALICE на Большом адронном коллайдере. В докладе представлены характеристики трекового детектора переходного излучения (ТДПИ, TRT) установки ATLAS и детекторе переходного излучения (TRD) установки ALICE.

Развитие газовых детекторов происходит в сторону увеличения их пространственного разрешения. Возникли новые типы газовых детекторов, где вместо проволоч используются стрипы. К таким детекторам относятся: Micromegas, GEM и т. д. Переход от стриповых детекторов к пиксельным детекторам реализован в проекте GasPixel. В этом детекторе используется газовая смесь, что позволяет идентифицировать электроны среди всех заряженных частиц. Другой особенностью детектора является то, что помимо координаты, величины ионизации он позволяет измерять направленные движения частицы.

1. ТИПЫ ГАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Газонаполненные детекторы (счетчики) благодаря хорошей чувствительности к излучениям разных ви-

дов, относительной простоте и дешевизне являются широко распространенными приборами регистрации излучений. Такой детектор представляет собой наполненную газом оболочку, в объем которой введены два или три электрода.

В газонаполненных детекторах для регистрации частиц используется ионизация газа. Под действием приложенного напряжения образовавшиеся в результате электроны (ионы) собираются на электродах. Основные типы газовых детекторов: ионизационные камеры, пропорциональные счётчики, счетчик Гейгера-Мюллера и искровой [1].

А. Ионизационная камера

Ионизационная камера представляет собой газовый детектор, с помощью которого измеряются или ионизационные потери заряженной частицы, или потери энергии фотоном. Измерение проводится посредством разделения рожденных пар носителей заряда в электрическом поле и их движения к аноду или катоду соответственно, где могут быть зарегистрированы соответствующие сигналы. Если в ионизационной камере частица полностью поглощается, то с помощью данного типа детекторов может быть измерена ее энергия.

В простейшем случае ионизационная камера состоит из системы параллельных электродов. Напряжение, подаваемое на электроды, создает однородное электрическое поле. Пара электродов устанавливается в объем, заполненный газовой смесью, в которой электроны и ионы могут совершать дрейфовое движение. Это означает, что электроотрицательные газы в таких счетчиках не используются совсем или только в очень малых количествах.

В. Пропорциональный счетчик(камера)

В ионизационных камерах газового усиления не происходит, т. е. число первоначально произведенных но-

*E-mail: ov.meshkov@physics.msu.ru

†E-mail: lms@physics.msu.ru

сителей заряда не увеличивается. Первичная ионизация, произведенная налетающей частицей, просто собирается с помощью прилагаемого электрического поля. Однако, если электроны смогут набрать в электрическом поле достаточное количество энергии за время между двумя столкновениями, то они сами будут вызывать ионизацию, в результате чего число носителей зарядов возрастет. Возникшие при этом новые электроны в свою очередь успевают приобрести энергию достаточную для ионизации ударом. Таким образом, к аноду будет двигаться нарастающая электронная лавина. Это «самоусиление» электронного тока (коэффициент газового усиления) может достигать 10^3 – 10^4 . Такой режим работы отвечает пропорциональному счётчику (камере). В названии отражено то, что в этом приборе амплитуда импульса тока (или полный собранный заряд) остаётся пропорциональной энергии, затраченной заряженной частицей на первичную ионизацию среды детектора. Таким образом, пропорциональный счётчик способен выполнять функции спектрометра, как и ионизационная камера. Энергетическое разрешение пропорциональных счетчиков лучше, чем у сцинтилляционных, но хуже, чем у полупроводниковых. Схема пропорциональной камеры изображена на рис. 1.

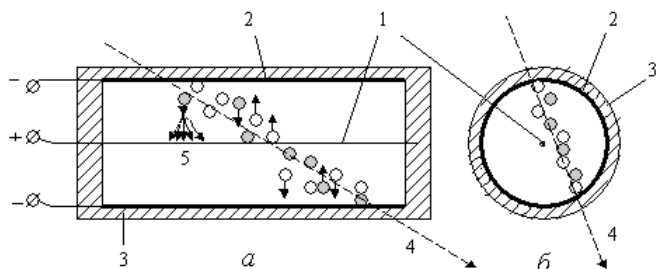


Рис. 1: Схема пропорционального счётчика а — в продольном и б — поперечном разрезах (аналогично устроен счётчик Гейгера и цилиндрическая ионизационная камера): 1 — нить-анод, 2 — цилиндрический катод, 3 — изолятор, 4 — траектория заряженной частицы, 5 — электронная лавина. Электроны и ионы, созданные частицей в результате первичной ионизации атомов инертного газа, показаны соответственно темными и белыми кружочками

С. Счетчик Гейгера–Мюллера

Увеличение напряженности поля в пропорциональной камере ведет к тому, что в период образования лавины будет рождаться огромное количество фотонов. Вследствие этого вероятность рождения все новых и новых электронов в результате фотоэлектрического эффекта возрастает. Фотоэлектрический эффект может также происходить в точках, расположенных и на большом расстоянии от места рождения первичной лавины. Электроны, высвобожденные в результате фотоэлектрического эффекта, инициируют образование но-

вых лавин, а разряд тем временем будет распространяться вдоль анодной проволоочки.

Вероятность для γ рождения фотоэлектрона в первоначальной лавине становится столь высокой, что общее число носителей зарядов, произведенных различными вторичными и третичными лавинами, стремительно возрастает. В результате этого пропорциональность между сигналом и первичной ионизацией утрачивается. Режим, при котором освободившееся количество заряда не зависит от первичной ионизации, называется режимом Гейгера.

Счетчик Гейгера изобретён в 1908 г. Х. Гейгером и Э. Резерфордом, позднее усовершенствован Гейгером и В. Мюллером. Конструктивно счётчик Гейгера устроен также как пропорциональный счётчик, т. е. представляет собой цилиндрический конденсатор, заполненный инертным газом. К внутреннему электроду (тонкой металлической нити) приложен положительный потенциал, к внешнему — отрицательный. Функционально счётчик Гейгера также в основном повторяет пропорциональный счётчик, но отличается от последнего тем, что за счёт более высокой разности потенциалов на электродах работает в таком режиме, когда достаточно появления в объёме детектора одного электрона, чтобы развился мощный лавинообразный процесс, обусловленный вторичной ионизацией (газовое усиление), который способен ионизовать всю область вблизи нити-анода. При этом импульс тока достигает предельного значения (насыщается) и не зависит от первичной ионизации. По существу, при попадании в счетчик Гейгера частицы в нём вспыхивает (зажигается) самостоятельный газовый разряд. При этом коэффициент газового усиления может достигать 10^{10} , а величина импульса — десятков вольт. Этот счётчик обладает практически стопроцентной вероятностью регистрации заряженной частицы, так как для возникновения разряда достаточно одной электрон-ионной пары.

Д. Искровой счетчик

Если разность потенциалов между анодом и катодом в газонаполненном счетчике превысит некоторое критическое значение, то появление в его объёме свободных носителей зарядов вызовет искровой пробой (разряд). При этом амплитуда электрического сигнала с такого счётчика (называемого *искровым*) может достигать сотен вольт. После разряда счётчику требуется время 10^{-3} – 10^{-4} с для восстановления (очистки рабочего газового объёма от положительных ионов), после чего он будет в состоянии зарегистрировать новую частицу. В простейшем варианте искровой счётчик представляет собой два плоскостепенных металлических электрода, к которым приложена разность потенциалов несколько кВ. Площадь электродов — десятки квадратных сантиметров. Пространство между электродами обычно заполнено

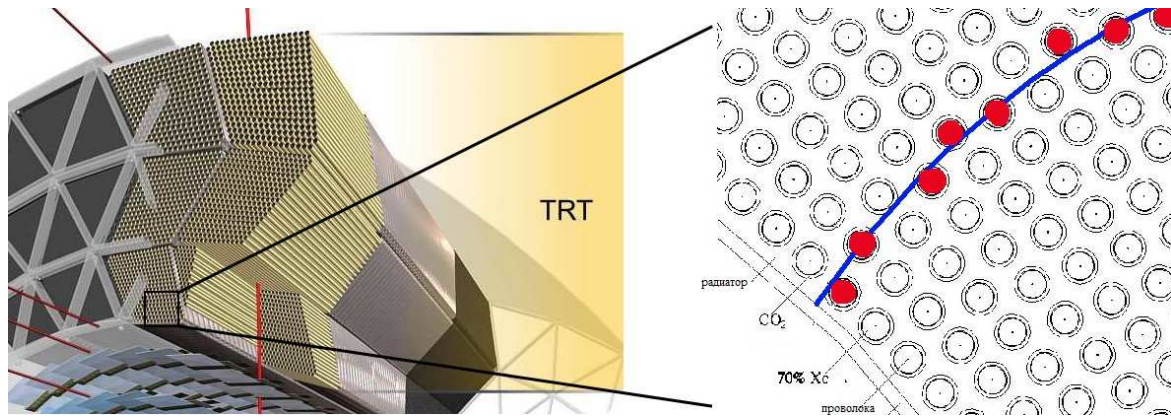


Рис. 2: На левой картинке, изображена центральная часть детектора TRT, а на правой — регистрация частицы при прохождении сквозь трубки

инертным газом. Зазор между электродами может варьироваться в пределах 0.1–10 мм. Разрядная искра строго локализована. Она возникает там, где появляются первичные электроны, и поэтому указывает место попадания частицы в счётчик.

Е. Идентификация частиц с помощью газовых детекторов

Идентификация частиц с помощью газовых детекторов возможно при использовании пропорционального режима работы газового детектора, то есть когда сигнал детектора пропорционален первичной ионизации. Измерение первичной ионизации позволяет идентифицировать тяжелые частицы с импульсами до 1 ГэВ/с. Пропорциональный режим позволяет регистрировать переходное излучение. Фотоны переходного излучения имеют большую энергию, чем энергвыделение за счет первичной ионизации заряженных частиц. Выделение сигналов переходного излучения позволяет идентифицировать электроны с импульсами 5–150 ГэВ/с от мюонов и пионов. Таким образом, обеспечивается идентификация легких частиц при высоких энергиях.

Эти принципы реализованы при создании детекторов переходного излучения в которых появляется возможность отличить сигнал ионизации от сигнала фотонов переходного излучения и проводить измерение первичной ионизации.

2. ТРЕКОВЫЙ ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ATLAS

Самый крупный детектор переходного излучения, работающий в настоящее время, — это трековый детектор переходного излучения (TRT) ATLAS [3]. TRT (Transition Radiation Tracker) является частью Внутреннего детектора установки ATLAS на Большом адронном коллайдере (LHC). Он расположен на рассто-

янии 50–100 см от оси пучка. На рис. 2 представлена центральная часть детектора TRT.

Рабочим элементом, или сенсором, TRT служит тонкостенная трубка диаметром 4 мм. Конструкция трубки была разработана с целью минимизации толщины стенок при хорошей механической прочности и электрической проводимости. Исходным материалом для стенок трубки служила полиимидная пленка (DuPont) толщиной 25 мкм. На пленку были нанесены три слоя покрытий. С одной стороны, это был слой алюминия толщиной 0,2 мкм и защитный слой графита, смешанного с полиимидом, толщиной 5–6 мкм. На другой стороне был нанесен слой полиуретана толщиной 5 мкм.

В центре трубки размещена анодная проволока толщиной 31 мкм, выполненная из вольфрама с золотым покрытием толщиной 0.5–0.7 мкм. Анодная проволока заземлена, и сигнал с неё подается непосредственно на электронику считывания.

Временной анализ электронного сигнала трубки обеспечивает измерение расстояния прохождения частицы от анода. Чем ближе к аноду проходит частица, тем меньше время прихода сигнала с трубки относительно начальной точки T_0 . При нормальных условиях время сбора заряда электронов составляет ~ 48 нс, что обеспечивает собственное пространственное разрешение внутри трубки 130 мкм. Сигнал ионизационных потерь частицы регистрируется при низком пороге 300 эВ. Для регистрации фотонов переходного излучения используется высокий порог 6 кэВ.

Трековый детектор переходного излучения содержит 96 продольных модулей в барреле и 112 модулей в торцевых областях с общим количеством дрейфовых трубок 298304. Общая длина детектора 5.5 м, внешний диаметр 2.2 м. Длина трубок в барреле составляет 144 см, на торцах — 37 см. Между слоями трубок размещен радиатор из слоев фольги полипропилена толщиной 15 мкм, разделенных полипропиленовой сеткой.

Фотоны переходного излучения испускаются под малым углом θ к направлению движения частицы $\theta = 1/\gamma$, где γ — Лоренц-фактор частицы. Фотоны пере-

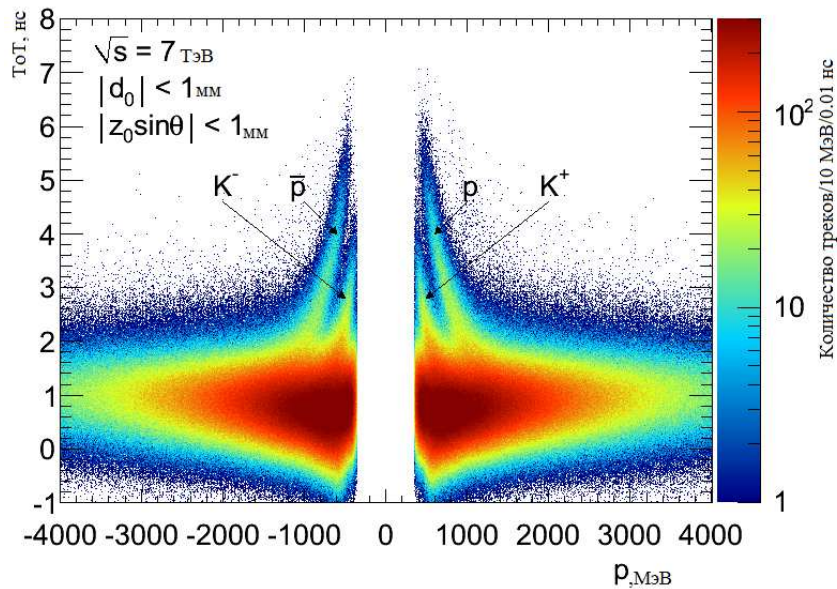


Рис. 3: Зависимость ToT от импульса для первичной вершины взаимодействия

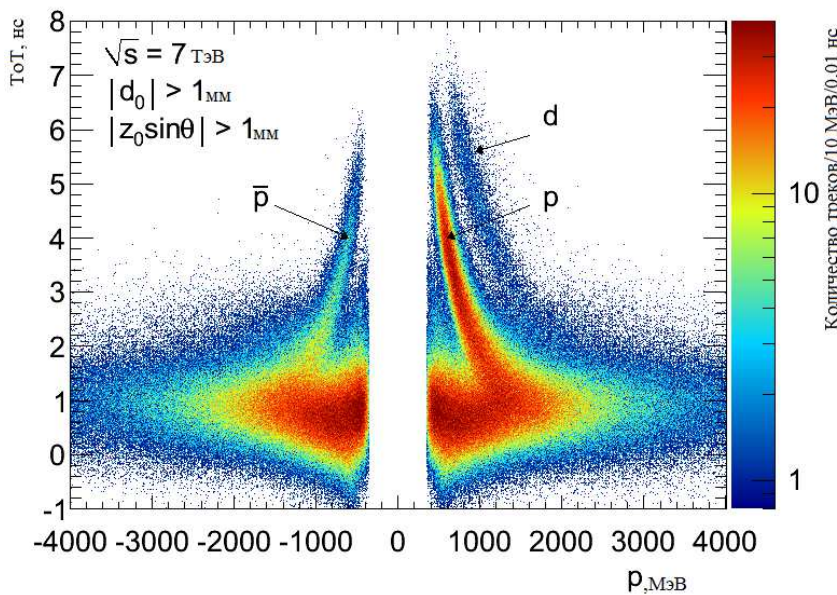


Рис. 4: Зависимость ToT от импульса для вторичного взаимодействия

ходного излучения обеспечивают значительно большее энерговыделение при регистрации, чем ионизационные потери релятивистских частиц. Поэтому они легко выделяются при использовании высокого порога регистрации сигнала. Эффективное поглощение фотонов переходного излучения низкой энергии осуществляется ксеноном. Для фотонов, способных поглощаться на К-оболочке сечение фотопоглощения пропорционально $\sim Z^5$, поэтому и выгодно использовать ксенон.

На рис. 3 и 4 показана оценка удельных потерь энергии на основе времени над порогом (Time over Threshold, ToT), измеренной в TRT. Этот способ ис-

пользуется для использования переменной ToT для идентификации сильно ионизирующих частиц с импульсами до 1–2 ГэВ. В частности, на рис. 3, показана первичная вершина взаимодействия, а на рис. 4 — все, что вне первичной вершины и видно, что уменьшается статистика и появляются более тяжелые частицы — дейтроны.

На рис. 5 показана зависимость получения частицами высокого порога в TRT, то есть вероятность регистрации фотонов переходного излучения, от Лоренц-факторов частиц. На графике видно, что у электронов Лоренц-фактор выше, чем у пионов и вероятность ис-

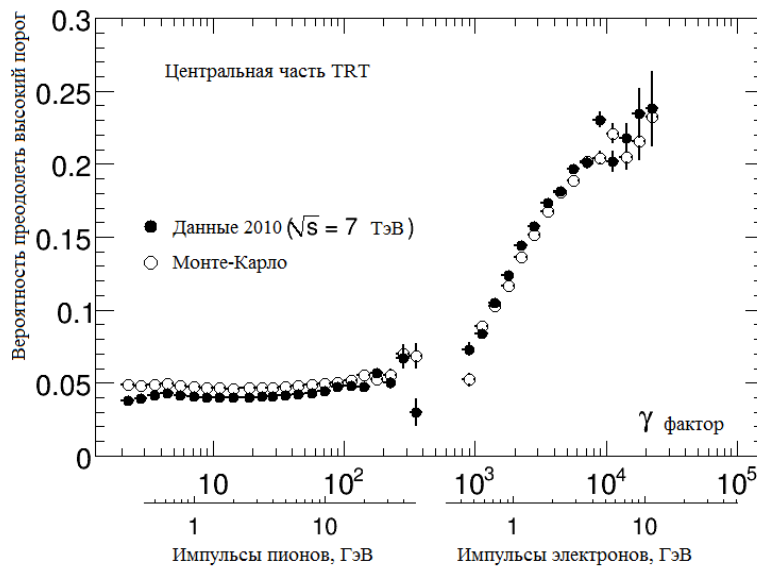


Рис. 5: Зависимость вероятности регистрации фотона переходного излучения от Лоренц-фактора частиц

пустить фотон переходного излучения тоже выше. Это используется для идентификации частиц с импульсами выше 2 ГэВ.

3. ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ALICE

Основная цель детектора переходного излучения (TRD) установки ALICE [2] обеспечить электронную идентификацию для импульсов выше 1 ГэВ/с. TRD был разработан для получения быстрого отбора заряженных частиц с большим импульсом. Детектор состоит из радиатора и дрейфовой камеры, заполненной смесью Xe/CO₂ в соотношении 85:15. Частицы проходят через радиатор, испуская в нем переходное излучение, а затем попадают в дрейфовую камеру. На рис. 6 показан чертеж TRD. На нем изображены 18 модулей, каждый из которых содержит 30 считывающих камер (красный цвет), расположенных в пяти пакетах по шесть слоев. Снаружи TRD окружен системой времяпролетной камеры (Time of flight, TOF). С внутренней стороны показан тепловой экран (желтый цвет).

Так как вероятность испускания фотона переходного излучения при однократном пересечении границы сред мала ($\approx 1/100$), то используют слоистые или пористые радиаторы с низким атомным номером и большим числом границ раздела.

Дрейфовая камера это заполненная газом (в данном случае — смесь Xe и CO₂) трубка, внутри которой натянута много тончайших проволочек. Все проволочки находятся под напряжением, а их расположение выбрано таким образом, чтобы в пространстве между двумя массивами проволочек возникало однородное элект-

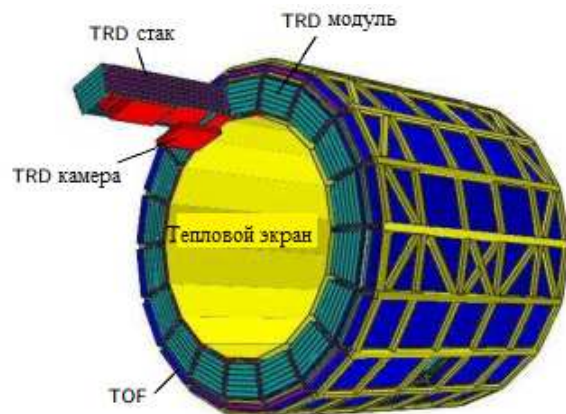


Рис. 6: Чертеж TRD [2]

рическое поле. Когда заряженная частица пролетает сквозь газовую камеру, она оставляет пространственный ионизационный след (рис. 7). Под действием электрического поля ионизация (прежде всего, электроны) движется с постоянной скоростью («дрейфует») вдоль линий поля по направлению к проволочкам-анодам. Достигнув края камеры, сигнал от ионизации считывается электроникой, которая передает на выход сигнальный импульс. Поскольку считывающих элементов очень много, по сигналам с них можно с хорошей точностью восстановить координаты пролетевшей частицы, а значит, и траекторию. Таким образом, дрейфовая камера позволяет определить траекторию частицы по времени пролета электронов.

Обычно количество ионизации, которое создает в газовой камере пролетающая частица, невелико. Для того чтобы увеличить надежность сбора и регистрации

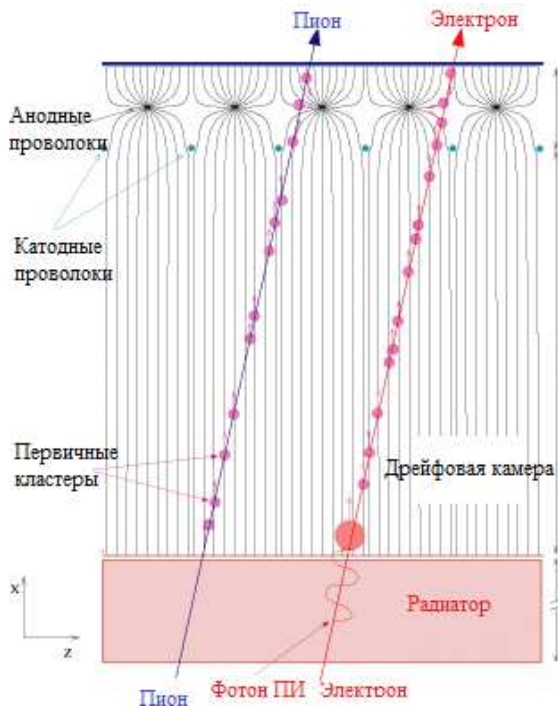


Рис. 7: Пролет частиц, через радиатор и дрейфовую камеру в TRD [2]

заряда и уменьшить погрешность его измерения, требуется усилить сигнал еще до регистрации его электроникой. Делается это с помощью специальной сети анодных и катодных проволочек, натянутых вблизи считывающей аппаратуры. Проходя вблизи анодной проволочки, облачко электронов порождает на ней лавину, в результате которой электронный сигнал многократно усиливается.

На рис. 8 показано распределение по дрейфовому времени средних значений, полученных с соседних пластинок для пионов и электронов. Для электронов заметно существенное увеличение показаний по сравнению с пионами.

4. ДЕТЕКТОР MICROMEGAS

Технология micromegas [5] была разработана в середине 1990-х годов. Она позволяет создавать тонкие беспроводные газовые детекторы частиц. Micromegas-детекторы состоят из дрейфового электрода, газового зазора толщиной в несколько миллиметров, действующего как область конверсии и дрейфа, и тонкой металлической сетки на расстоянии 100-150 мкм от считывающего электрода, создавая область усиления. Схема и принцип работы micromegas изображены на рис. 9. Заряженные частицы, пересекающие дрейфующее пространство, ионизируют газ. Электроны, освобожденные процессом ионизации, дрейфуют к сетке. С электрическим полем в области усиления

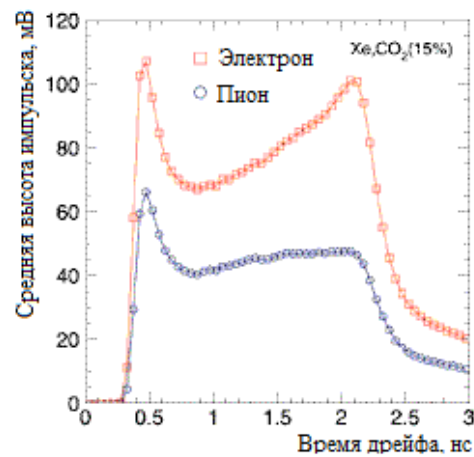


Рис. 8: Распределение показаний соседних пластинок по времени дрейфа

в 50-100 раз сильнее, чем поле дрейфа, сетка является прозрачной для более чем 95% электронов. Электронная лавина происходит в области тонкого усиления, непосредственно над электродом считывания.

Micromegas-детекторы были успешно использованы в экспериментах по физике частиц высоких энергий в последние годы, когда требуется хорошее пространственное разрешение с высокими скоростями. Micromegas также успешно использовались в качестве считывающих камер в детекторе TPC (временная камера) на детекторе ALICE. Сейчас детекторы micromegas используются для усовершенствования детектора ATLAS.

5. ДЕТЕКТОР GEM

Детектор GEM [4] представляет собой детектор микроскопического газового усиления на основе полиимидной фольги, расположенной между двумя проводящими слоями. Фольга действует как усилитель сигнала. При использовании тройного детектора GEM коэффициент усиления газа в каждой фольге GEM обычно составляет около 25, что обеспечивает общий коэффициент усиления 15000 при рабочем напряжении вдали от любого критического значения. Принцип работы и описание работы тройного GEM показаны на рис. 10. На левом электрические и эквипотенциальные поля, через фольгу. Внутри отверстий усиливающее поле варьируется от 50 до 80 кВ. На центральной моделирование размножение электронов в окрестности отверстия в фольге. На правом — расположение тройного детектора GEM с тремя фольгами, дрейфовым электродом сверху и считывающим электродом — снизу.

В рамках исследований и разработок CMS GEM продемонстрировано рентабельное производство больших площадей, а результаты пучковых испытаний продемонстрировали пространственное разрешение до



Рис. 9: Схема расположения и принцип работы детектора Micromegas [5]

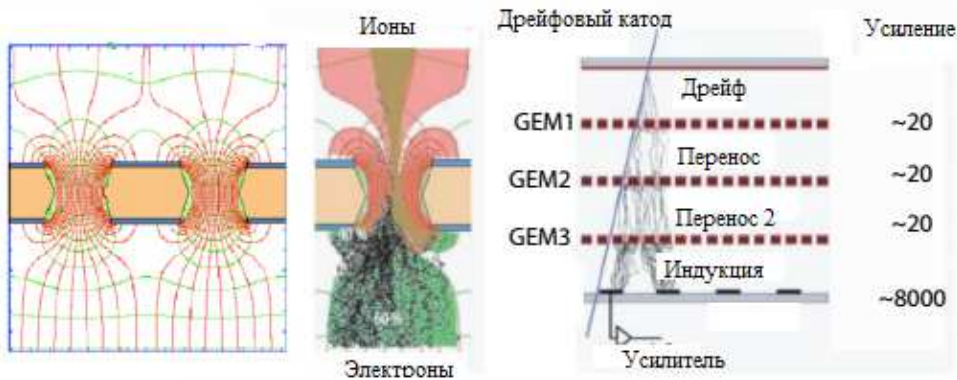


Рис. 10: Принцип работы и описание работы тройного GEM [4]

100 мкм и временное разрешение 5–8 нс. В CMS детектор GEM будет использоваться для улучшения мюонной системы.

6. ДЕТЕКТОР GASPIXEL

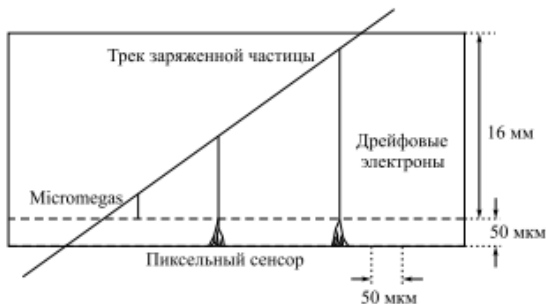


Рис. 11: Схема времяпроекционной камеры детектора GasPixel [6]

GasPixel [6] — газовый пиксельный детектор, в котором считывающий пиксельный сенсор помещен в объем, заполненный рабочим газом. Электрон-ионные пары образуются в рабочем газе вдоль трека заряженной частицы в дрейфовой области над специальной сеткой

«Micromegas». Под действием приложенного электрического поля электроны дрейфуют к сетке и фокусируются в ее отверстиях (рис. 11). К сетке приложено напряжение — 400 В по отношению к заземленному пиксельному сенсору, что создает сильное электрическое поле в зазоре 50 мкм над сенсором, где происходит размножение электронной лавины. В результате каждый электрон, пролетающий через отверстие сетки, создает лавину, сигнал от которой регистрируется пиксельным сенсором. Определение времени прихода сигнала от лавины позволяет восстановить первоначальное положение электрона над поверхностью сенсора. Таким образом, детектор GasPixel представляет собой времяпроекционную камеру, чувствительную к отдельным электронам. Объединяя данные, полученные по нескольким первичным электронам, можно восстановить в пространстве отрезок трека пролетевшей заряженной частицы (рис. 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время газовые детекторы широко используются для регистрации частиц при высоких энергиях. Газовые детекторы прошли большой путь от счетчиков и ионизационных камер к многопроволочным детекторам, пропорциональным дрейфовым детекторам и пришли к пиксельному съему информации. Развитие

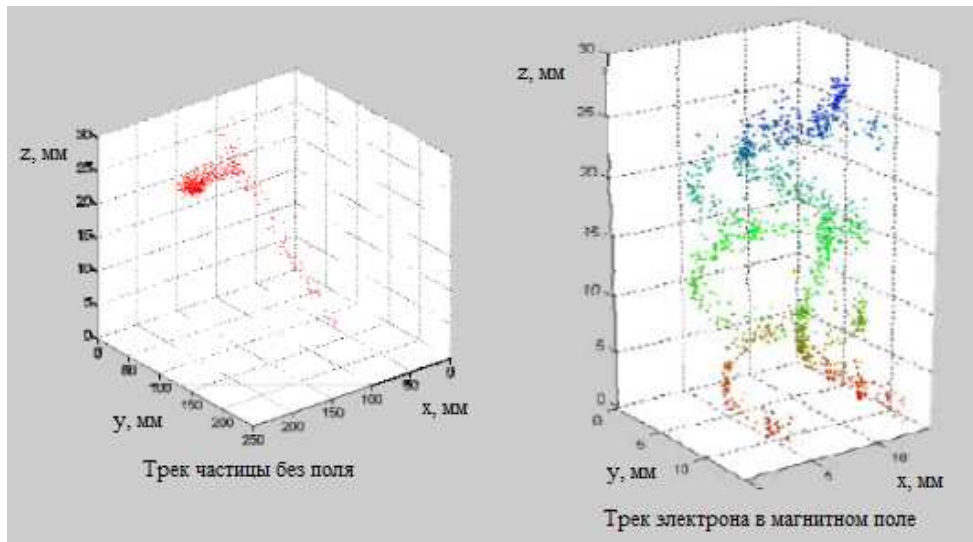


Рис. 12: Трек частицы без поля — слева, электрон в магнитном поле — справа

газовых детекторов привело к улучшению координатной точности, точному измерению ионизационных потерь и определению вектора движения частицы. В наше время газовые детекторы также обеспечивают вы-

сокую эффективность идентификации частиц для экспериментов Большого адронного коллайдера. Детекторы Micromegas и GEM будут использованы в процессе модификации детекторов ATLAS и CMS.

[1] Грυνен К. Детекторы Элементарных частиц. Сибирский хронограф. Новосибирск, 1999.
 [2] Aamodi K., Abrahantes Quintana A., Achenbach R., Acounis S., Adamova D., Adler C., Aggarwal M., Agnese F., Aglieri Rinella G., Ahammed Z. et al., ALICE Collaboration. *JINST*. 2008. **3**. S08002.
 [3] Aad G., Abat E., Abdallah J., Abdelalim A. A., Abdesselam A., Abidinov O., Abi B. A., Abolins M., Abramowicz H., Acerbi E. et al., ATLAS Collaboration. *JINST*. 2008. **3**. S08003.
 [4] Khachatryan Y., Sirunyan A. M., Tumasyan A., Adam W.,

Berauer T., Brandstetter J., Brondolin E., Dragicevic M., Ero J., Flechl M. et al., CMS Collaboration. CERN-LHCC-2015-10. 2015.
 [5] Gonzalez Silva M. L., Otero y Garson G., Piegaia R., Romeo G., Alconada Verzini M. J., Alonso F., Anduaga X. S., Dova M. T., Monticelli F., Tripiana M. F. et al., ATLAS Collaboration. CERN-LHCC-2013-006. 2013.
 [6] Болдырев А. С., Романюк А. С., Смирнов С. Ю., Тихомиров В. О. Письма в ЭЧАЯ. 2014. **11**, №1(185). С. 78.

Gas detectors for particle identification at high energy

O. V. Meshkov^a, L. N. Smirnova^b

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aov.meshkov@physics.msu.ru, ^blns@physics.msu.ru

The paper presents briefly the evolution of gas detectors from counters to modern microstrip and pixel gas detectors. The ability to identify particles by ionization and transition radiation is shown using the transition radiation tracker detector in ATLAS experiment. The transition radiation detector of the ALICE experiment is described with a different design. Examples of microstrip gas detectors for usage ATLAS and CMS upgrade are presented.

PACS: 29.40.Cs

Keywords: gas detectors, transition radiation, collider.

Received 23 June 2017.

Сведения об авторах

1. Мешков Олег Васильевич — студент магистратуры 2-ого года; e-mail: ov.meshkov@physics.msu.ru.
2. Смирнова Лидия Николаевна — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: lns@physics.msu.ru.