

УДК 539.12, 539.1.074

НОВЫЕ МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ LHC

Л. Н. Смирнова

Дан краткий обзор методов детектирования, используемых на Большом адронном коллайдере LHC в установках ATLAS, CMS, ALICE, LHCb.

Ключевые слова: Большой адронный коллайдер, ЦЕРН (CERN), ATLAS, CMS, ALICE, LHCb, сэмплинговые калориметры, мюонный спектрометр, микростриповые кремниевые детекторы, времяпроекционная камера, черенковский детектор, идентификация частиц.

Проект LHC предназначен для поиска новых частиц в соударениях протонов при энергии 10–14 ТэВ. В сентябре 2008 г. при запуске Большого адронного коллайдера LHC все его детекторы продемонстрировали готовность к работе. Это означает, что детекторы LHC построены, и можно оценить достижения в методах детектирования частиц, реализованные при их создании. На кольце LHC расположены четыре основных экспериментальных установки: ATLAS, CMS, ALICE и LHCb. Две из них, ATLAS [1] и CMS [2], служат установками общего назначения и предназначены для поиска бозона Хиггса и суперсимметричных частиц. Эксперимент ALICE [3] ставит целью изучение соударений ускоренных ионов, а LHCb [4] выполнит прецизионное исследование распадов B -адронов.

Задачи ATLAS и CMS определили требования, которым должны удовлетворять эти детекторы: точность измерений при высоком быстродействии, эффективный отбор событий при значительном подавлении фоновых процессов, долговременную стабильность работы в условиях высоких радиационных нагрузок и идентификацию частиц. Основными объектами измерения служат лептоны (мюоны, электроны, τ -лептоны), фотоны и струи с энергиями до 1 ТэВ. В установках ATLAS и CMS достигнуты максимальные для физики коллайдеров размеры. Детектор ATLAS имеет диаметр 25 м и длину 46 м, а вес установки CMS составляет 12500 т. Особенности конструкции этих установок обусловлены в первую очередь выбором магнитных систем.

Научно-исследовательский институт ядерной физики, МГУ, Москва.

Магнитные системы установок ATLAS и CMS. Магнитная система установки ATLAS содержит две компоненты: сверхпроводящий тороид и соленоид. Сверхпроводящий тороид из восьми секций в центральной части и с двумя торцевыми частями создает поле с индукцией порядка 1 Т. Внутренний и внешний радиусы центрального тороида составляют 4.7 и 9.75 м, длина 26 м.

Радиус соленоида ATLAS составляет 1.25 м, длина 5.3 м, магнитное поле 2 Т. Количество вещества в стенках соленоида ATLAS, выраженное в относительных радиационных длинах X/X_0 , составляет 0.66, минимальное среди существующих установок [5], что существенно для эффективности регистрации фотонов и разрешения при измерении их энергии. Соленоид ATLAS содержит Внутренний детектор установки.

Компактный соленоид CMS создает поле с индукцией 4 Т. Радиус соленоида 6 м и длина 12.5 м. Уникальность соленоида определяется величиной поля и его размерами. Внутри соленоида помещены как трековые детекторы, так и калориметры. По этой причине для него не критичны ограничения на толщину стенок. Во внешнем поле обратного магнитного потока помещены камеры мюонного спектрометра.

Магнитная система ATLAS позволяет измерять импульсы мюонов в широком диапазоне углов даже без использования Внутреннего детектора. (Обычно трек мюона измеряется и в мюонном спектрометре, и во Внутреннем детекторе, и эти данные сшиваются в один трек. Но даже если Внутренний детектор, например, вышел из строя, то измерений в мюонном спектрометре достаточно для определения параметров трека.) Соленоид CMS обеспечивает высокое импульсное разрешение при совместном использовании с Внутренней трековой системой.

Калориметрия ATLAS и CMS. Для электромагнитного калориметра CMS условия регистрации фотонов представляются наиболее благоприятными. Более десяти лет велась разработка материала для этого калориметра. В результате удалось создать кристаллы PbWO_4 с уникальными свойствами: плотность вещества максимальна среди имеющихся кристаллов и составляет 8.3 г/см^3 , а радиационная длина минимальна, $X_0 = 0.89 \text{ см}$. Кристаллы калориметра имеют размеры $22 \times 22 \text{ мм}^2$ в основании и 230 мм в длину обладают высокой радиационной стойкостью. Основной световыход $\sim 80\%$ осуществляется за 25 нс, что соответствует интервалу между столкновениями протонных сгустков коллайдера, по величине составляет 30 фотонов/МэВ и имеет высокую температурную стабильность. Необходимое разрешение калориметра обеспечено при минимально возможной толщине, что важно из-за ограниченного внутреннего объема внутри соленоида CMS. Все разработки и производство 80 тысяч кристаллов для

калориметра выполнены в России. Очень небольшая доля произведена в г. Шанхай, КНР.

Необходимое разрешение электромагнитного калориметра ATLAS достигается за счет его структурированности и высокой гранулярности. Слои поглотителя и электроды выполнены в форме аккордеона и находятся в среде жидкого аргона, что обеспечивает необходимое быстродействие и радиационную стойкость. Этот калориметр уникален среди подобных по количеству каналов считывания электроники, составляющему 175 тысяч.

Адронные калориметры в торцевых частях и передние калориметры ATLAS также жидкоаргонные. Составной адронный калориметр центральной части ATLAS и Адронный калориметр CMS используют сцинтилляторы. Достижения составной калориметрии на LHC обусловлены технологическим прорывом в производстве сцинтилляторов (метод литья под давлением в пресс-формы), штамповки стальных листов радиатора для ATLAS, LHCb [6]. В ATLAS пластины сцинтиллятора расположены продольно (поперек направления пучка). При таком положении достигается однородность и механическая прочность конструкции, уменьшается толщина радиатора в поперечном направлении до величин $\sim X_0$, упрощается внедрение средств калибровки: стальных трубок, по которым перемещается радиоактивный источник вдоль всего калориметра без создания нечувствительных зон. Для сбора и передачи света используются оптические волокна.

Трековые системы ATLAS и CMS. Трековые системы ATLAS и CMS обеспечивают измерение импульсов заряженных частиц и координат первичных и вторичных вершин. Они используют пиксельные и микростриповые кремниевые детекторы, индустрия создания которых быстро развивалась в последние десятилетия.

Центральная часть трекера CMS содержит 14 цилиндров с детекторами. На торцах трекера расположены 13 дисков, поперечных пучку. На трех ближайших к области пересечения пучков дисках и цилиндрах расположены пиксельные детекторы, имеющие чувствительную область размером 100×150 мкм². На больших радиусах расположены кремниевые микростриповые детекторы как двусторонние, так и односторонние.

В структуре Внутреннего детектора ATLAS присутствуют три слоя пикселей, четыре слоя кремниевых микростриповых детекторов и Детектор переходного излучения, состоящий из тонких дрейфовых трубок.

Для измерения пробегов короткоживущих частиц со временем жизни порядка 10^{-12} с количества каналов электроники пиксельных детекторов достигли рекордных

величин 80 млн в ATLAS и 66 млн в CMS. Площадь кремниевых детекторов в CMS составляет 205 м² при 76 млн каналах электроники – это самый большой кремниевый детектор в мире.

Величины пространственного разрешения этих детекторов составляют 10–16 мкм. Важной характеристикой детекторов служит их радиационная стойкость. Детекторы вынуждены работать при потоках радиации до 10¹³ нейтронов на см² в год.

Необходимо отметить вершинный детектор VELO в эксперименте LHCb, обеспечивающий определение вершин распадов *B*-мезонов в особых условиях. Он состоит из 25 дисков с кремниевыми детекторами и должен обеспечить разрешение в определении первичной вершины 10 мкм в поперечной пучку плоскости и 42 мкм в продольном направлении.

Мюонные спектрометры. Мюонные спектрометры ATLAS и CMS состоят из дрейфовых камер. Точное определение импульсов мюонов осуществляется в основном с помощью газовых дрейфовых трубок в MDT камерах в ATLAS и в DT камерах в CMS. Под малыми углами к пучку используются радиационно стойкие CSC камеры, рассчитанные на большие загрузки. Количество MDT камер в ATLAS составляет 1150 штук, а CSC камер всего 32. Площадь, перекрываемая MDT камерами в ATLAS, составляет 5500 м². В условиях больших размеров ATLAS для обеспечения пространственного разрешения в 30–40 мкм создана уникальная система оптического контроля RASNIK. Она контролирует как сами камеры, так и их относительное положение.

Помимо прецизионных камер в спектрометры входят быстродействующие камеры, обеспечивающие запуск установок. В ATLAS эту функцию выполняют камеры с тонким зазором TGC и плоскостные камеры RPC. В CMS используются камеры RPC.

Разнообразие конструкций дрейфовых камер демонстрирует прогресс в развитии газовых детекторов. Они применяются для координатных измерений, идентификации частиц, в системах быстрого запуска в различных подсистемах детекторов LHC. Камеры RPC планируется использовать на будущих коллайдерах. Тонкие дрейфовые трубки детектора переходного излучения установки ATLAS обеспечивают идентификацию электронов. Наиболее значительными газовыми детекторами LHC служат время-проекционная камера в эксперименте ALICE и детекторы черенковского излучения в эксперименте LHCb.

TPC ALICE. Особенности эксперимента ALICE обусловлены предельно большой множественностью частиц, образующихся в соударениях релятивистских ядер с максимальной энергией 2.5 ТэВ/нуклон. Измерение множественности осуществляется с по-

мощью уникального по размерам детектора ТРС. Он расположен после кремниевого вершинного детектора и состоит из двух цилиндров с радиусами 85 и 250 см длиной 5 м, пространство между которыми заполнено газом; электроды расположены во внутреннем пространстве между цилиндрами. Задача ТРС состоит в измерении множественности заряженных частиц до 8000 на единицу быстроты, что соответствует их полному количеству около 20000 частиц. Объем детектора 88 м³. Разрешение детектора составляет от 800 до 1100 мкм по азимутальному углу и от 1250 до 1100 мкм по направлению пучка. Эффективность восстановления треков должна составить 97%. При плотности частиц 6000 на единицу быстроты в магнитном поле 0.5 Т разрешение по импульсу при 100 ГэВ/с ожидается ~4%.

RICH LHCb. В эксперименте LHCb при регистрации распадов *B*-мезонов и подобных частиц необходимо идентифицировать не только лептоны, но и адроны. Для этого в установке LHCb используются газовые черенковские детекторы RICH. В установке их два. Природа адрона будет определяться для диапазона импульсов от нескольких ГэВ/с до 150 ГэВ/с. Детекторы имеют специально разработанные системы регистрации колец черенковского излучения. Диапазон идентификации пионов и каонов на *B*-фабриках составляет лишь несколько ГэВ/с.

Детекторы LHC воплотили самые передовые технологии, развитые в мире в последние 10–15 лет. Российский вклад в создание детекторов значителен. Россия располагает многими технологиями, используемыми при создании детекторов частиц.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] ATLAS Collaboration (G. Aad et al.), JINST **3**, S08003 (2008).
- [2] CMS Physics TDR, 8.1, Preprint CERN/LHCC 2006-001, 2006-021 (IOP Publishing Ltd and SISSA, CERN, 2006).
- [3] ALICE Collaboration, J. Phys. G (Nucl. Part. Phys.) **32**, 1295 (2006).
- [4] LHCb Collaboration, LHCb TDR, Preprint CERN/LHCC/98-4 (IOP Publishing Ltd SISSA, CERN, 1998).
- [5] C. Amsler et al., Phys. Lett. B **667**, 1 (2008).
- [6] Р. Дзелядин, Новости и проблемы фундаментальной физики, N 3, 12 (2008).

По материалам “II Черенковских чтений: Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике элементарных частиц” (Москва, ФИАН, 14 апреля 2009 г.).

Поступила в редакцию 4 ноября 2009 г.

ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ СГУСТКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В КРУГЛОМ ДИАФРАГМИРОВАННОМ ВОЛНОВОДЕ

А. П. Кулаго, И. С. Щедрин

Рассмотрен круглый диафрагмированный волновод (КДВ), однородный по длине. Получены выражения для определения нагруженной добротности ячейки с потерями (Q_{H1}), без потерь (Q_{H1}^0) и нагруженной добротности Q_H секции длиной l . Получено выражение для определения электрической амплитуды поля излучения, создаваемое релятивистским сгустком с зарядом q , движущимся по оси КДВ с последовательным сопротивлением R_n . Проведен расчет энергии, мощности излучения пучка электронов и электронного КПД.

Ключевые слова: круглый диафрагмированный волновод, последовательное сопротивление КДВ, ускорение (РЭС) сгустков релятивистских электронов, электронный КПД.

1. Традиционно расчет линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) основан на уравнении распространения мощности в круглом диафрагмированном волноводе (КДВ). В предлагаемой работе расчет ЛУЭ впервые выполнен, исходя из уравнения суммы полей: ускоряющего поля СВЧ-генератора и суммарного поля излучения всех сгустков пучка.

Несколько слов о черенковском излучении в круглом диафрагмированном волноводе. В гладком круглом волноводе фазовая скорость электромагнитной волны всегда больше скорости света, $\nu_{\Phi} > c$. В КДВ фазовая скорость равна скорости ускоряемого электрона, и в релятивистском случае $\nu_{\Phi} = c$. Однако сдвиг фазы поля по длине КДВ