

Электромагнитный калориметр детектора CMS

Керим Гусейнов*

17 апреля 2020 г.

I. Введение

CMS – эксперимент общего назначения, располагающийся на CERN LHC. При проектировке и построении среди его основных задач присутствовали изучение природы нарушения электрослабой симметрии, поиск бозона Хиггса, проверка Стандартной модели на масштабах больше 1 ТэВ, поиск Суперсимметрии. Для достижения этих целей детектор CMS должен удовлетворять высоким требованиям. В частности, поддетектор, работающий с электромагнитными взаимодействиями должен иметь хорошее энергетическое разрешение, хорошее разрешение по инвариантной массе двух фотонов и двух электронов, широкое геометрическое покрытие, идентификацию и исключение π^0 и эффективную изоляцию фотонов и лептонов. Также было необходимо учесть особенности детектора CMS: общую компактность установки, сильное поле соленоида и выбор геометрии поля, продиктованный необходимостью точных измерений импульсов мюонов.

Качественная идентификация нейтральных пионов особенно важна, поскольку одной из мод распада бозона Хиггса является $H \rightarrow \gamma\gamma$, в которой образуются высокоэнергетичные фотоны. В свою очередь, нейтральный пион тоже распадается на два фотона, и если угол между ними достаточно мал, изначальная частица – пион – может быть неправильно определена как бозон Хиггса. Наибольшая вероятность такой ошибки возникает в близких к оси пучка областях.

Близкая к пучку область, помимо уже описанной проблемы с пионами, выделяется еще многими уникальными для нее явлениями, поэтому конструкция детектора в ней несколько отличается от конструкции в цилиндрической части.

II. Основа калориметра

Общий вид установки CMS представлен на Рис. 1. Электромагнитный калориметр целиком содержится внутри области, окруженной сверхпроводящим соленоидом, и покрывает область псевдобыстрот $|\eta| < 3.0$. Все части калориметра сделаны из вольфрамата свинца, но перед близкими к пучку частями находится предлавинный детектор, служащий как раз для более точной идентификации нейтральных пионов. Сцинтилляционный свет регистрируется кремниевыми лавинными фотодиодами в параллельной пучку (цилиндрической) области и вакуумными фототриодами в перпендикулярной пучку области.

Кристаллы вольфрамата свинца хорошо переносят радиацию, плотные и имеют маленькую радиационную длину, чуть меньше сантиметра, это позволило сделать компактный калориметр. Кроме того, их время испускания достаточно мало для использования на БАК: за 25 нс испускается порядка 80% света.

В цилиндрической части калориметра, содержащей 61 200 кристаллов, группы кристаллов помещаются в тонкостенные длинные подмодули, направленные к точке столкновения протонов. Группы подмодулей в зависимости от η объединяются в модули, в каждом из которых оказывается по 400–500 кристаллов, покрывающих 20° по ϕ . Четыре модуля объединяются в супермодуль. Такое объединение элементов детектора упрощает организацию считывающей электроники и охлаждения. В ближней к пучку части калориметра, содержащей по 7 300 кристаллов с каждой стороны, кристаллы объединяются в группы 5×5 , называемые суперкристаллами. Кристаллы направлены в точку, находящуюся за 1.3 м за точкой столкновения протонов. Описанная конфигурация сцинтиллятора показана на Рис. 2.

Детекторы сцинтилляционных фотонов должны быть быстрыми, устойчивыми к радиации и способными работать в сильном магнитном поле. Кро-

*guseynovkerim@gmail.com

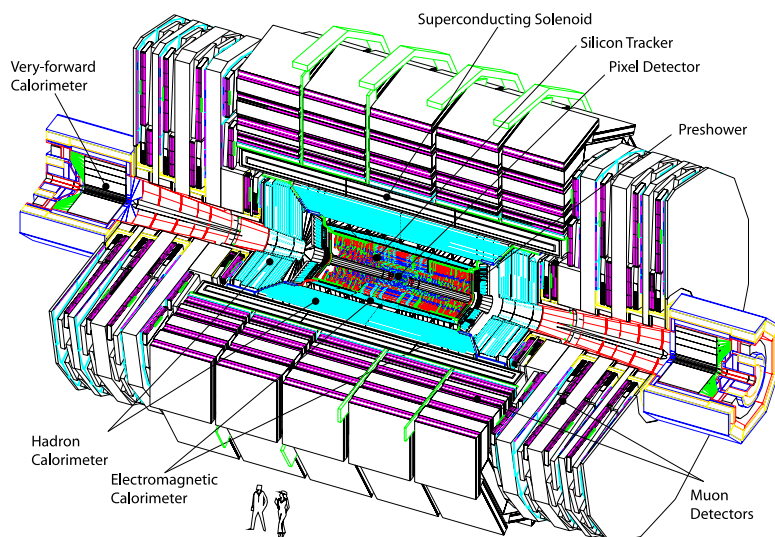


Рис. 1. Основные элементы детектора CMS.

ме того, поскольку в сцинтилляторе образуется мало фотонов, необходимо усиливать сигнал. В сравнении с лавинными фотодиодами, вакуумные фототриоды, используемые в ближних к пучку участках калориметра, хоть и менее эффективны и слабее усиливают, но выдерживают значительно большую радиацию и способны работать даже в поле сверхпроводящего магнита CMS 4 Тл благодаря сверхтонким медным сеткам. Меньшая эффективность частично компенсируется лучшим покрытием поверхности на выходе сцинтиллятора.

III. Предлавинный детектор

Предлавинный детектор занимает область псевдобыстрот $1.65 < |\eta| < 2.6$ и нацелен в основном на идентификацию нейтральных пионов, рождающихся под малыми углами к протонному пучку.

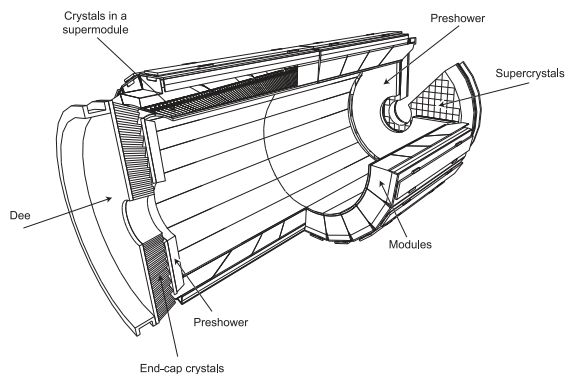


Рис. 2. Расположение и организация кристаллов в калориметре.

Предлавинный детектор состоит из четырех слоев: в свинцовых радиаторах образуются электромагнитные ливни от падающих фотонов и электронов, а в кремниевых полосчатых сенсорах, расположенных за каждым из двух радиаторов, измеряются вклад энергии и поперечный профиль ливня. Комбинации сенсора и считывающей электроники, называемые микромодулями, по 8 штук объединяются в лестницу. Лестницы образуют стандартную $x-y$ конфигурацию.

IV. Электроника

Считывающая электроника должна принимать маленькие сигналы фотодетекторов быстро и точно. Для качественной записи более широкого диапазона величин сигналов, предусилитель усиливает один и тот же сигнал параллельно в 1 раз, в 6 раз и в 12 раз, а затем выбирается самый наибольший сигнал, в котором еще не произошло насыщение. Для предотвращения влияния флуктуаций на выбор коэффициента усиления предусилитель переключается на более высокий коэффициент с задержкой.

В каждом событии на информацию из электромагнитного калориметра выделяется примерно 100 кБ, а для прочтения всей информации из калориметра потребовалось бы в 20 раз больше. Естественно, не все части детектора интересны в каждом столкновении. Для выделения и записи только важных его частей используется специальная

система выборочного считывания. Она учитывает вклады энергии, оставленные частицами в областях калориметра и вблизи них, и присваивает областям один из трех уровней интереса. Наиболее интересные области и их соседи записываются целиком, области среднего интереса записываются целиком без соседей, а области малого интереса – только если энергия в них превышает $3\sigma_{\text{шум}}$.

V. Наблюдение за калориметром

Система контроля за калориметром отслеживает множество параметров детектора и окружающей среды и может уведомлять обслуживающий персонал о неполадках, а в случае угроз оборудованию детектора автоматически проводить необходимые процедуры. Система следит за температурой воздуха, влажностью, напряжением, охлаждением элементов детектора.

Число испускаемых сцинтиллятором фотонов и усиление лавинными фотодиодами оба зависят от температуры, уменьшаясь при ее увеличении. Поэтому необходимо хорошо поддерживать температуру на постоянном уровне в пределах 0.05°C . Для стабилизации детектора система охлаждения использует воду, температура которой 18°C . Тесты показали, что построенная система охлаждения сохраняет температуру калориметра достаточно хорошо, чтобы температурные изменения в энергетическом разрешении были пренебрежимо малы.

Также при наблюдении проводится калибровка детектора. В общих чертах калибровка калориметра представляет собой абсолютную энергетическую шкалу и относительную шкалу для сравнения данных между участками. Основной источник различий откликов областей калориметра в цилиндрической части – изменения в сцинтилляционном свете от кристалла к кристаллу, имеющие дисперсию порядка 8%. В ближних к пучку частях наибольший вклад дают вакуумные триоды, для них дисперсия составляет аж 25%. Предварительное изучение используемой аппаратуры позволило уменьшить эти числа до 5% и 10% соответственно. Для дальнейшего улучшения этих показателей супермодули в собранном виде тестировались на космических лучах около недели, а затем 9 супермодулей – на пучках высокоэнергетичных

электронов. В результате относительная энергетическая погрешность внутри цилиндрической части калориметра составила 2%. В ходе работы эксперимента CMS калибровка проводится на основе p_T одиночных электронов (как в $W \rightarrow e\nu$) и масс π_0 и η (распады на $\gamma\gamma$).

Высокий уровень радиации и сильные потоки частиц приводят к образованию неоднородностей в веществе сцинтиллятора, а они, в свою очередь, частично поглощают волны некоторых длин. Такие повреждения приводят к установлению равновесия, зависящего от уровня радиации в текущий момент. Этот процесс можно отслеживать и учитывать с помощью лазерной системы наблюдения за оптической прозрачностью. Прозрачность вещества устанавливается, исходя из отношения зарегистрированного фотодетекторами света к импульсу лазера, причем необходимо учесть, что оптический путь в сцинтилляторе меняется и спектр лазера не идеально совпадает со спектром сцинтиллятора. С учетом этого прозрачность вещества зависит от названного отношения степенным законом.

VI. Энергетическое разрешение

Для энергий меньше 500 ГэВ, при которых утечка частей ливня в калориметре становится значительной, энергетическое разрешение σ можно разделить на три компоненты: стохастическую, шумовую и постоянную

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{S}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{N}{E}\right)^2 + C^2.$$

В стохастическую компоненту входят флуктуации от события к событию, статистические флуктуации из-за числа фотонов и флуктуации во вкладе энергии, оставленном в предлавиной системе, с учетом измеренного предлавиными силиконовыми детекторами. Наибольшие вклады в постоянную компоненту дают неоднородное в продольном направлении поглощение кристаллами света, ошибки в относительной калибровке и утечка энергии с задней поверхности кристалла (для поздно начавшихся ливней). Продольная неоднородность кристаллов частично компенсирует утечку энергии с задней поверхности. В шумовой компоненте тоже три вклада: шум электроники, шум, возникающий

при оцифровке данных, и шум от множественных взаимодействий в протонных пучках. Шумы электроники и оцифровки снижаются за счет того, что амплитуда в каждом канале вычисляется с учетом постоянного значения, которое выдавал этот канал в три предшествующих импульсу момента времени. Успех этой процедуры подтверждается зависимостью $\sigma_N^{\text{шум}} \approx \sqrt{N} \sigma_1^{\text{шум}}$ при считывании с N каналов.

Полученные в предварительном (до работы на БАК) исследовании значения оказались следующими (для E в ГэВ):

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{0.028}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0.12}{E}\right)^2 + 0.0030^2.$$

Постоянный член довольно мал, поэтому разрешение ухудшается практически линейно с энергией, как видно на Рис. 3.

Список литературы

- [1] S. Chatrchyan *et al.* (CMS Collaboration), *The CMS experiment at the CERN LHC*, [JINST](#) **3**, S08004 (2008).

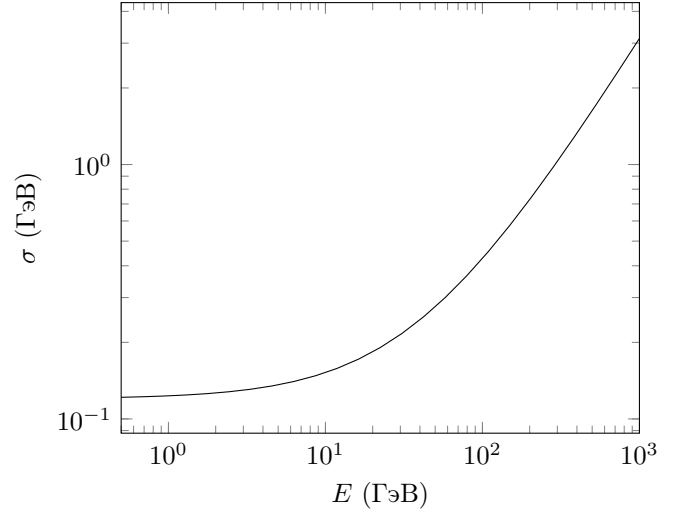


Рис. 3. Разрешение электромагнитного калориметра CMS.