

УДК 539.12, 539.1.07

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОЖДЕНИЯ БОЗОНА ХИГГСА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СЕГМЕНТАЦИИ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА

В. Ю. Алексахин¹, В. Ф. Андреев², В. Б. Гаврилов³,
И. А. Голутвин¹, А. Тумасян⁴

В статье рассматривается новый подход к определению оптимальной поперечной сегментации адронного калориметра с использованием процесса рождения бозона Хиггса через механизм слияния векторных бозонов. Приводятся результаты Монте-Карло моделирования для адронного калориметра, который будет установлен после модернизации 2023 года в коллаборации Компактный Мюонный Супердетектор на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе.

Ключевые слова: адронный калориметр, Монте-Карло моделирование, адронные струи, бозон Хиггса.

Планируемая в 2021–2023 годах модернизация Большого адронного коллайдера (БАК) в ЦЕРНе ставит целью достижение величин светимости ускорителя $5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (High-Luminosity LHC), что позволит накопить $\sim 3000 \text{ фб}^{-1}$ интегральной светимости за последующие годы работы БАК. В этот же период времени предусматривается модернизация различных детекторов установки Компактный Мюонный Супердетектор (КМС), включающая и модернизацию электромагнитного и адронного калориметров [1]. После модернизации в торцевой части детектора КМС (область псевдобыстроты $1.5 < |\eta| < 3.0$) будет установлен калориметр с мелкой сегментацией активных элементов (HGCal – high granularity calorimeter). Первые две части HGCal

¹ Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), 141980 Россия, Московская обл., Дубна, улица Жолио-Кюри.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: andreevv@mail.cern.ch.

³ Институт экспериментальной и теоретической физики (ИТЭФ), 117218 Россия, Москва, Большая Черемушкинская ул., 25, с. 2.

⁴ Ереванский физический институт (ЕрФИ), AM-375 036 Армения, Ереван, ул. Братьев Алиханян, 2.

калориметра, если рассматривать в направлении от точки взаимодействия, представляют собой электромагнитный калориметр толщиной $\sim 26X_0$ (радиационных длин) и адронный калориметр толщиной в $\sim 3.5\lambda_0$ (ядерных длин) взаимодействия. Активными элементами этих частей HGCal калориметра будут кремниевые детекторы различной толщины и имеющие минимальный поперечный размер $\sim 1.0 \text{ см}^2$. Третья часть HGCal калориметра – адронный ВН калориметр, состоит из 11 слоев медного поглотителя и имеет толщину в $\sim 5.5\lambda_0$ ядерных длин взаимодействия. Так как уровень радиационной загрузки в области ВН калориметра будет уже приемлемым, то в качестве активных элементов данной части HGCal калориметра планируется использовать пластиковый сцинтиллятор. Определение оптимальных поперечных размеров для активных элементов ВН калориметра, а также возможное влияние этих размеров на характеристики измеряемых физических величин является важной задачей для планируемой модернизации детектора КМС. В данной статье предлагается новый подход для оптимизации поперечной сегментации адронного калориметра.

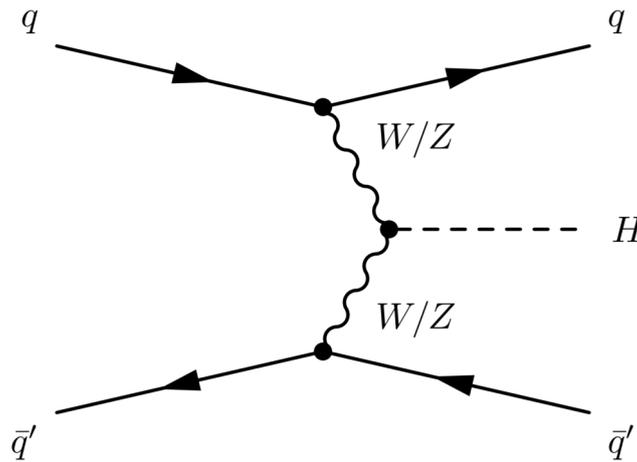


Рис. 1: Диаграмма Фейнмана рождения бозона Хиггса $qq' \rightarrow qq'H$ через механизм слияния векторных бозонов (VBF-процесс).

Основными характеристиками адронного калориметра, улучшения которых добиваются при его проектировании, являются энергетическое и угловое разрешение адронов и адронных струй. В данной работе для оптимизации адронного калориметра предлагается использовать такую характеристику как эффективность выделения определенного физического процесса. В качестве такого физического процесса будем использовать процесс рождения бозона Хиггса через механизм слияния векторных бозонов (VBF-процесс, рис. 1) с последующим распадом на тау-лептоны. Этот процесс является важ-

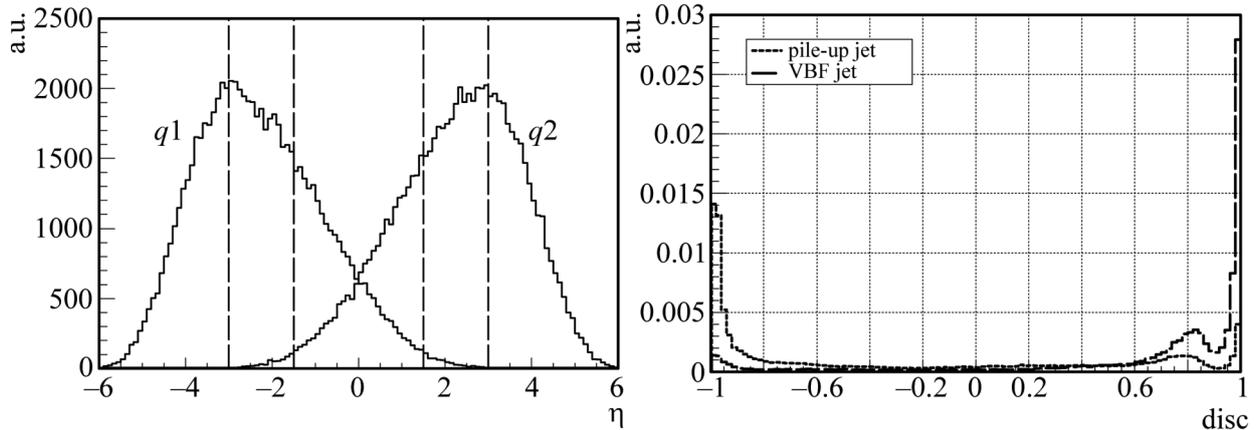


Рис. 2: Распределение по псевдобыстроте для «меченых» струй, образованных в VBF-процессе с поперечным импульсом $P_T > 20$ ГэВ. Выделенная область псевдобыстрот $1.5 < |\eta| < 3.0$ показывает рабочую область торцевого адронного калориметра коллаборации КМС.

Рис. 3: Распределение «меченных» струй из VBF-процесса и аналогичное распределение для pile-up струй по MVA дискриминатору.

ным для определения характеристик бозона Хиггса, изучение которых будет являться одной из приоритетных задач коллаборации КМС при работе на большой светимости БАК после модернизации 2023 года [2–4]. В конечном состоянии в данном процессе образуются так называемые «меченые» адронные струи, инициированные рассеянными кварками. Распределение по псевдобыстроте «меченых» струй, приведенное на рис. 2, показывает, что максимальное количество «меченых» струй наблюдается в области торцевого и переднего адронных калориметров коллаборации КМС, находящихся в области псевдобыстрот $1.5 < |\eta| < 5.0$.

Одной из проблем при идентификация «меченых» струй из VBF-процесса является наличие большого числа так называемых pile-up струй. Эти pile-up струи с поперечными импульсами $P_T > 20$ ГэВ образуются в результате пространственного перекрытия большого количества струй с малыми поперечными импульсами, образующихся в других процессах, которые происходят в одном и том же столкновении банчей протонов. Для планируемой после модернизации коллайдера БАК светимости $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ число таких фоновых столкновений может достигать ~ 200 в одном столкновении банчей протонов. Для выделения «меченых» струй из большого количества фоновых pile-up струй был использован мультивариантный анализ (MVA analysis) [5]. Данный тип ана-

лиза основан на учете внутренней структуры адронной струи и широко используется в КМС коллаборации при анализе экспериментальных данных. В результате применения MVA анализа определяется только одна величина – дискриминатор, или вероятность того, что данная струя или образовалась в “жестких” процессах, или она является фоновой. Этот дискриминатор в идеальном случае равен единице для “меченых” струй и равен единице с отрицательным знаком для фоновых pile-up струй. На рис. 3 приведен пример распределения MVA дискриминатора для “меченых” струй из VBF-процесса и аналогичное распределение для pile-up струй.

Для оптимизации поперечной сегментации адронного ВН калориметра были смоделированы события рождения бозона Хиггса через механизм слияния векторных бозонов с последующим распадом на два тау-лептона. Каждое событие при этом моделировалось в сопровождении ~ 140 фоновых событий. Две различные поперечные геометрии сцинтилляционных элементов ВН калориметра были рассмотрены – ячейки квадратной формы с размером 2×2 см и 4×4 см. Для каждой поперечной сегментации калориметра

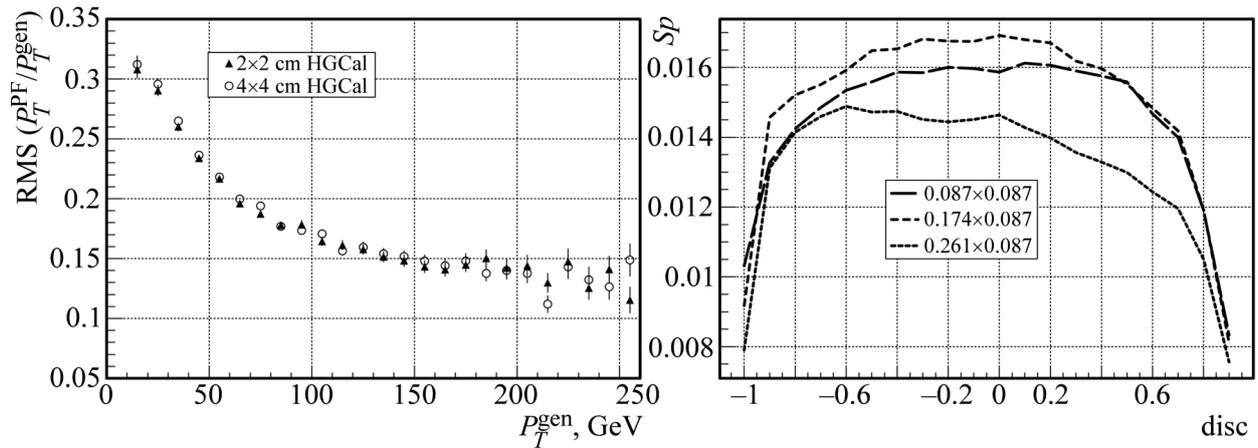


Рис. 4: Зависимость разрешения $RMS(P_T^{PF}/P_T^{gen})$ реконструированного поперечного импульса P_T^{PF} “меченых” струй как функция поперечного импульса генераторной струи P_T^{gen} . Разрешение приведено для двух различных размеров ячеек ВН калориметра: 2×2 см и 4×4 см.

Рис. 5: Зависимость Sp параметра отбора “меченых” струй от величины порога дискриминатора, применяемого при отборе струй. Параметр Sp приведен для струй с поперечным импульсом $P_T > 25$ ГэВ и для 3-х различных поперечных сегментаций адронного калориметра по переменной псевдобыстроте.

ра было смоделировано и проанализировано ~ 85000 событий рождения бозона Хиггса. Для реконструкции адронных струй использовался CHS PF анти-кт алгоритм (charge subtraction particle flow algorithm) с конусом струи, равным 0.4 [6]. Целью данного CHS PF алгоритма является реконструкция и идентификация всех стабильных частиц в событии (электронов, мюонов, заряженных и нейтральных адронов) посредством топологической комбинации информации с трековых и калориметрических детекторов КМС. Реконструированные таким образом индивидуальные частицы используются впоследствии для восстановления струй и определения их характеристик.

На рис. 4 приведено разрешение RMS ($P_T^{\text{PF}}/P_T^{\text{gen}}$) (среднеквадратичное отклонение) реконструированного поперечного импульса P_T^{PF} “меченых” струй в зависимости от поперечного импульса генераторной струи P_T^{gen} . Разрешение приведено для двух рассмотренных размеров ячеек адронного ВН калориметра: 2×2 см и 4×4 см. Результаты моделирования показывают слабое влияние поперечной сегментации ВН калориметра на разрешение по поперечному импульсу струи. Это можно объяснить тем, что при использовании CHS PF алгоритма для реконструкции струй существенный вклад в энергетическое разрешение струй вносят разрешение треков по поперечному импульсу и энергетическое разрешение электромагнитного калориметра, а энергетическое разрешение самого адронного ВН калориметра дает существенно меньший вклад в общее энергетическое разрешение струй. Таким образом, использование только энергетического разрешения струй для оптимизации поперечной сегментации ВН калориметра не позволяет однозначно определить оптимальную сегментацию.

Для определения оптимальной поперечной сегментации адронного ВН калориметра предлагается использовать следующую процедуру. В событиях рождения бозона Хиггса через механизм слияния векторных бозонов отбираются две струи с максимальными поперечными импульсами, которые находятся в области торцевого адронного ВН калориметра (область псевдобыстроты $1.5 < |\eta| < 3.0$). Дополнительным условием является требование вылета струй в направлении вперед-назад, то есть произведение $\eta^{\text{струя1}} \cdot \eta^{\text{струя2}} < 0$. Для подавления фоновых pile-up струй будем требовать, чтобы MVA-дискриминатор для отбираемых струй был выше определенного порогового значения. Событие будет рассматриваться как сигнальное или связанное с VBF-процессом если обе отобранные таким образом струи будут идентифицироваться с двумя “мечеными” струями, инициированными кварками из VBF-процесса. При данном отборе будем вычислять такие характеристики как эффективность и “чистота” (purity) отбора “меченых” струй, которые определяются следующим образом:

эффективность = $N_S/N_{\text{ТОТ}}$, где N_S – число отобранных сигнальных событий, $N_{\text{ТОТ}}$ – полное число смоделированных VBF-событий;

“чистота” = N_S/N_{S+B} , где N_S – число отобранных сигнальных событий, N_{S+B} – полное число отобранных по трём вышеописанным признакам событий, в которые входят как сигнальные, так и фоновые события.

Произведение эффективности отбора “меченых” струй на “чистоту” отбора струй или параметр отбора Sp (selection parameter) будем использовать как новый критерий для определения оптимальной поперечной сегментации ВН калориметра. Варьирование величины порога MVA-дискриминатора и поперечного импульса P_T , применяемых для отбора “меченых” струй, позволяет найти максимальное значение данного Sp параметра для каждой поперечной сегментации торцевого адронного ВН калориметра. Сегментация адронного калориметра, при которой значение Sp параметра принимает максимальное значение, будет считаться оптимальной для выделения VBF-процесса.

Предлагаемая процедура определения оптимальной сегментации калориметра была предварительно опробована для первой версии торцевого адронного калориметра [7]. Предполагалось, что данный калориметр будет состоять только из двух частей: электромагнитного калориметра толщиной в $\sim 1.0\lambda_0$ взаимодействия и адронного калориметра, который имел бы толщину в $\sim 9.0\lambda_0$ взаимодействия. На рис. 5 приведено поведение параметра отбора “меченых” струй Sp в зависимости от величины порога MVA-дискриминатора, применяемого при отборе реконструированных струй. Дополнительным условием было требование, чтобы поперечный импульс обеих отбираемых в событии струй был выше определенного порога, который на представленном рисунке равен 25 ГэВ. Все три сегментации адронного калориметра на рис. 5 отличаются друг от друга только размером ячейки по переменной псевдобыстроте, а размер ячейки калориметра по азимутальному углу оставался постоянным: 0.087×0.087 , 0.174×0.087 и 0.261×0.087 . Представленные распределения ясно показывают, что данный параметр отбора VBF-событий существенно зависит от поперечной сегментации калориметра и, таким образом, может быть использован для определения оптимальной поперечной сегментации торцевого адронного калориметра.

На рис. 6 приведена зависимость предлагаемого Sp параметра отбора “меченых” струй от величины порога дискриминатора для HGCAL калориметра, который будет установлен после модернизации детектора КМС. Данный Sp параметр был определен для струй с поперечным импульсом $P_T > 25$ ГэВ и двух различных поперечных сегментаций адронного ВН калориметра (2×2 см и 4×4 см). Представленные результаты

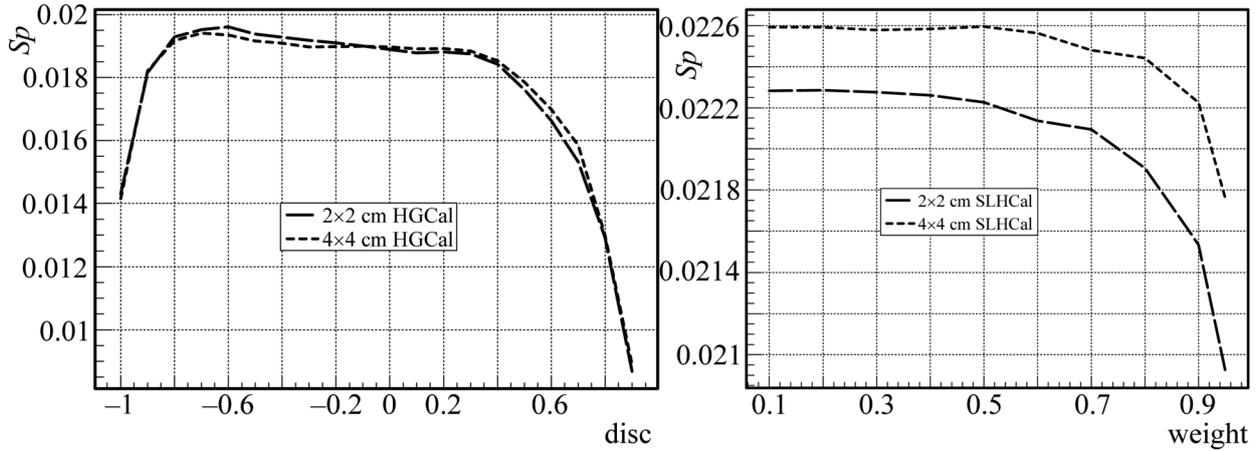


Рис. 6: Зависимость S_p параметра отбора “меченых” струй от величины порога дискриминатора, применяемого при отборе струй. Параметр S_p приведен для струй с поперечным импульсом $P_T > 25$ ГэВ и для 2-х различных поперечных сегментаций торцевого адронного ВН калориметра.

Рис. 7: Зависимость S_p параметра отбора “меченых” струй от величины порогового значения веса частицы, применяемого при реконструкции струй PUPPI методом. Параметр S_p приведен для струй с поперечным импульсом $P_T > 25$ ГэВ и для двух различных поперечных сегментаций торцевого адронного ВН калориметра.

моделирования не показывают существенного преимущества детальной 2×2 см сегментации адронного ВН калориметра перед более грубой 4×4 см сегментацией. Такая, более слабая зависимость параметра отбора “меченых” струй от поперечной сегментации для случая HGCal калориметра объясняется тем, что в этом случае оптимизируется только часть HGCal калориметра, а именно ВН калориметр толщиной всего в $\sim 5.5\lambda_0$ ядерных длин взаимодействия. В первом же рассмотренном случае толщина оптимизируемого адронного калориметра составляла $\sim 9.0\lambda_0$ ядерных длин взаимодействия и, поэтому, влияние поперечных размеров калориметра на параметр отбора S_p “меченых” струй было более заметным.

Так как характеристики реконструированных струй и эффективность выделения “меченых” струй из множества фоновых pile-up струй зависят от алгоритма реконструкции самих адронных струй, то предлагаемый подход к оптимизации поперечной сегментации адронного ВН калориметра был проверен и на другом методе реконструкции струй – PUPPI методе (Pileup Per Particle Identification) [8]. Данный PUPPI метод ре-

конструкции струй также использует отличие внутренней структуры фоновых струй от струй, инициированных в жестких процессах. При PUPPI методе реконструкции струй каждой частице внутри выбранного конуса присваивается определенный вес, характеризующий вероятность того, что данная частица произошла или из фоновых струй, или из струй, связанных с основной вершиной взаимодействия. В идеальном случае частице из фоновой струи присваивается вес, равный нулю, а частице, связанной с основной вершиной взаимодействия, присваивается вес, равный единице. Если вес, присваиваемый частице, оказывается меньше определенного порогового значения, то эта частица исключается из процесса реконструкции струи.

Струи из того же набора Монте-Карло данных были проанализированы с использованием PUPPI метода реконструкции струй, то есть также были определены эффективность и “чистота” отбора “меченых” струй из VBF-процесса. Зависимость предлагаемого S_p параметра отбора струй как функция минимального порогового веса частицы, используемого при реконструкции струй, показана на рис. 7. Как и для случая CHS PF алгоритма реконструкции струй, результаты Монте-Карло моделирования приведены для двух различных поперечных сегментаций адронного ВН калориметра – ячеек квадратной формы с размером 2×2 см и 4×4 см. Дополнительно также требовалось, чтобы поперечный импульс отбираемых струй был выше порога в 25 ГэВ. Из приведенных на рис. 7 распределений можно сделать вывод, что при использовании PUPPI метода реконструкции струй наблюдается небольшое преимущество более грубой 4×4 см поперечной сегментации торцевого адронного ВН калориметра.

Предложен новый подход для оптимизации поперечной сегментации торцевого адронного ВН калориметра, который будет установлен после модернизации установки КМС на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. Эффективное выделение VBF-процесса с двумя “мечеными” струями в конечном состоянии из большого количества фоновых pile-up струй рассматривается как основной критерий, используемый для оптимизации поперечной сегментации калориметра.

Дальнейшее исследование будет основано на более реалистической геометрии торцевого адронного ВН калориметра и с учетом влияния других физических процессов, которые являются фоновыми к выбранному VBF-процессу. Это процессы рождения бозона Хиггса через механизм глюон-глюонного слияния ($g + g \rightarrow g + g + H$) или рождение пар W или Z -бозонов в двойных партонных взаимодействиях, каждое происходящее по схеме $q + g \rightarrow Z + q'$. В конечном состоянии в этих процессах также наблюдаются две

адронные струи, которые могут находиться в области торцевого адронного ВН калориметра и, таким образом, затруднить выделение VBF-процесса.

Авторы приносят благодарность С.П. Баранову и М.В. Завертяеву за полезные замечания при обсуждении данной статьи.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения от 14 октября 2014 г. № 14.610.21.0004, идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0004.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] CMS Collaboration, “The Compact Muon Solenoid. Phase II Upgrade. Technical proposal”, CERN-LHCC-2015-010, 1 June 2015, <https://cds.cern.ch/record/2020886>.
- [2] D. Zeppenfeld, R. Kinnunen, A. Nikitenko and E. Richer-Was, Phys. Rev. D **62**, 013009 (2000).
- [3] M. Dührssen, S. Heinemeyer, H. Logan, et al., Phys. Rev. D **70**, 113009 (2004).
- [4] CMS Collaboration, “Projected Performance of an Upgraded CMS Detector at the LHC and HL-LHC: Contribution to the Snowmass Process”, arXiv:1307.7135, 27 Sep 2013.
- [5] CMS Collaboration, “Pileup Jet Identification”, CMS-PAS-JME-13-005, 17 October 2013, <https://cds.cern.ch/record/1581583/files/JME-13-005-pas.pdf>.
- [6] F. Beaudette (the CMS Collaboration), “The CMS Particle Flow Algorithm”, arXiv:1401.8155, 31 Jan 2014.
- [7] V. Andreev et al., “Optimization of HE calorimeter segmentation for stage 2 CMS upgrade”, 18th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, 24-29 August, 2015, Varna, Bulgaria. <http://rdms2015.jinr.ru/>
- [8] D. Bertolini, P. Harris, M. Low and N. Tran, “Pileup Per Particle Identification”, JHEP **10**, 59 (2014).

Поступила в редакцию 8 июня 2016 г.