

УДК 539.1

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ЗАДНЕГО АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА ДЕТЕКТОРА CMS (LHC) НА ИДЕНТИФИКАЦИЮ МЕЧЕННЫХ СТРУЙ В ПРОЦЕССЕ $VBF H \rightarrow \tau^- \tau^+$

А.М. СИРУНЯН*, А.Р. ТУМАСЯН, В.А. ХАЧАТРЯН,
А.Г. ПЕТРОСЯН, В.А. АЛОЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

*e-mail: sirunian@yerphi.am

(Поступила в редакцию 19 июля 2017 г.)

Приведены результаты расчетов идентификации меченых струй в процессе рождения бозона Хиггса через механизм слияния векторных бозонов с последующим распадом на τ -лептоны ($VBF H \rightarrow \tau^- \tau^+$) при различных поперечных сегментациях торцевой части модернизированного адронного калориметра компактного мюонного соленоида на большом адронном коллайдере (БАК). Расчеты проводились в условиях большого количества (140) дополнительно накладываемых pp -взаимодействий, соответствующих режиму работы БАК при высоких светимостях.

1. Введение

Компактный мюонный соленоид (CMS) [1] на Большом адронном коллайдере (БАК) [2] – детектор общего назначения, разработанный как для проверки и уточнения известных компонент стандартной модели, так и для поиска новых явлений в физике высоких энергий и элементарных частиц. Для достижения поставленных целей планируются несколько этапов модернизации БАК и его детекторов. К 2023 г. планируется второй этап модернизации детектора CMS, который будет самым крупномасштабным в проекте CMS [3], во время которого будут модернизированы все подсистемы CMS, а торцевые части калориметрической системы (электромагнитная и адронная) будут заменены калориметром с высокой гранулярностью (HGCal) и задним адронным калориметром (BH).

Для ВН остается открытым вопрос о поперечной сегментации (поперечных размерах ячеек). Оптимальную поперечную сегментацию для ВН можно оценить из зависимости качества проводимого физического анализа от поперечной конструкции ВН. В частности, очень важной задачей является выделение адронных струй из основной вершины взаимодействия от множества фоновых

струй [4].

В эксперименте CMS особое внимание уделяется исследованиям свойств бозона Хиггса – спина, четности, связи с другими частицами и т. д. Рождение хиггсовской частицы через механизм слияния векторных бозонов (VBF) является одним из основных процессов для исследования связей бозона Хиггса с другими элементарными частицами, в частности, с фермионами. Наиболее перспективным является процесс VBF рождения бозона Хиггса с последующим его распадом на два τ -лептона, при исследовании которого (в частности, для отбора таких событий) широко используются так называемые меченые адронные струи, «сопровождающие» бозон Хиггса. Идентификация меченых струй в условиях большого количества дополнительно накладываемых (фоновых) pp -взаимодействий представляет собой очень важную задачу, которая может быть решена с использованием алгоритма многомерного анализа PileUpJetId [4, 5].

К вопросу оценки оптимальной поперечной сегментации ВН можно подойти, используя идентификацию меченых струй в процессе VBF $H \rightarrow \tau^- \tau^+$, с учетом зависимости эффективности отбора этих струй от поперечной сегментации заднего адронного калориметра.

Настоящая работа посвящена идентификации меченых струй в процессе VBF $H \rightarrow \tau^- \tau^+$ при различных поперечных сегментациях ВН. Для расчетов использовались данные процесса VBF $H \rightarrow \tau^- \tau^+$, смоделированные с помощью генераторов Монте-Карло процессов Powheg и Pythia_6. Моделирование и реконструкция событий при различных поперечных сегментациях ВН, а также анализ выполнялись с помощью программного пакета CMSSW. Расчеты были выполнены для трех различных поперечных сегментаций ВН с размерами ячеек 2×2 , 4×4 и 8×8 см². Необходимо, однако, отметить, что такие размеры ячеек ВН не вполне соответствуют реальной геометрии, и данная работа посвящена разработке метода и грубой оценке оптимальной поперечной сегментации ВН.

2. Торцевая калориметрическая система модернизированного детектора CMS

После второго этапа модернизации детектора CMS БАК будет работать в режиме максимальной проектной светимости ($5\text{--}10 \times 10^{34}$ см⁻²с⁻¹) с энергией столкновения протонов 13–14 ТэВ. Ввиду ожидаемой большой дозы облучения, особенно в области псевдобыстрот, покрываемой торцевой калориметрической системой ($1.5 < |\eta| < 3$), учет радиационной стойкости подсистем является наиболее приоритетной задачей.

Торцевой калориметр будет состоять из двух частей – калориметр с высокой гранулярностью (HGCal) и следующий за ним задний адронный калориметр (ВН) (рис.1).

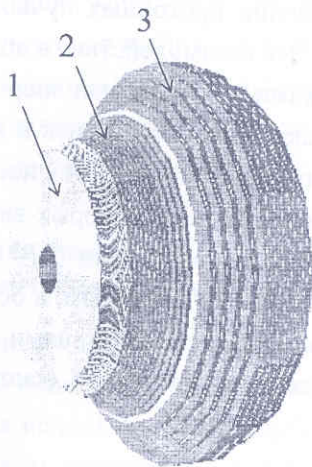


Рис.1. Торцевой калориметр: 1 – электромагнитный, 2 – передний адронный, 3 – задний адронный.

HGCal будет изготовлен из двух частей – вольфрам/медь–силиконовый электромагнитный калориметр с глубиной $26X_0$ (X_0 – радиационная длина) и 1.5λ (λ – длина поглощения) и латунь–силиконовый передний адронный калориметр с глубиной поглощения 3.5λ [3]. Эти два калориметра будут иметь гексагональную поперечную сегментацию с размерами ячеек 1.05 см^2 (более мелкие ячейки ближе к направлению пучка). В качестве активного материала в обоих калориметрах силикон выбран из соображений радиационной стойкости.

Задний адронный калориметр будет спроектирован по примеру нынешнего торцевого адронного калориметра CMS, где в качестве поглотителя будут служить латунные слои, а активного материала – слои пластического сцинтиллятора, общая глубина поглощения 5λ . В отличие от HGCal задний адронный калориметр будет иметь проективную геометрию (т.е. размеры ячеек будут заданы угловыми координатами η и ϕ). В качестве активного материала выбран сцинтиллятор ввиду относительно маленького ожидаемого радиационного воздействия.

Торцевая калориметрическая система с учетом высокой гранулярности HGCal и большой глубины поглощения ВН предназначена с большой точностью выделять объекты регистрации и обеспечивать хорошее энергетическое разрешение.

3. Идентификация меченых струй при наличии 140 фоновых pp -взаимодействий

Основной проблемой прецизионных измерений и анализа данных в режиме работы БАК при высоких светимостях являются фоновые pp -

взаимодействия. При столкновении протонных пучков количество pp -взаимодействий в среднем равно 140. Эти взаимодействия в подавляющем большинстве случаев – процессы с маленькими поперечными энергиями и не представляют научного интереса в рамках таких задач, как поиск и исследование свойств бозона Хиггса, суперсимметричных частиц и т. д. Для исследования таких задач из ~ 140 pp -взаимодействий выбираются те, у которых величина суммы квадратов поперечных импульсов всех заряженных частиц $\sum P_T^2$ имеет максимальное значение. Это взаимодействие называется основным, а остальные ~ 139 – дополнительно наложенными (фоновыми) взаимодействиями. В результате наложения возникает необходимость выделения продуктов основного взаимодействия от общего.

Табл. 1. Эффективность и чистота отбора меченых струй с использованием и без использования алгоритма идентификации струй по Pile-Up-дискриминатору

	Без использования метода отбора струй по Pile-Up-дискриминатору			С использованием метода отбора струй по Pile-Up-дискриминатору		
	Эффективность, %	Чистота, %	Эффективность $\times$ Чистота $\times 100$	Эффективность, %	Чистота, %	Эффективность $\times$ Чистота $\times 100$
$E_T > 20$ ГэВ	50.7	12.6	6.4	30.5	82.9	25.3
$E_T > 30$ ГэВ	53.9	28.5	15.3	40.8	80.3	32.7

Эта задача особенно сложна для адронных струй из-за трудностей, связанных с реконструкцией объектов. Фоновые струи можно легко отбросить элементарным ограничением на энергию, но из-за наложения (двух или более фоновых струй) может образоваться одна высокоэнергичная струя, которая по своим кинематическим характеристикам будет похожа на основную струю. В интересующем нас энергетическом диапазоне ($E_T > 20$ ГэВ) в области псевдобыстрот $1.5 < |\eta| < 3$ количество фоновых струй в среднем вдвое превышает количество основных струй [4]. Для преодоления этих трудностей был разработан метод идентификации меченых струй при 140 дополнительно накладываемых pp -взаимодействий с учетом специфических характеристик основных и фоновых струй (форма струи, распределение энергии внутри струи, вершины заряженных компонент и т. д. [4, 5]). Этот метод, основанный на алгоритме PileUpJetId [5], позволил с чистотой 80–85% идентифицировать пару меченых

струй, что существенно улучшает качество проводимого анализа (табл.1). Идея состоит в оптимизации ограничения на Pile-Up-дискриминатор (с основной или фоновой струей) с целью достижения максимального отношения сигнала к фону [4] (приоритетом алгоритма является условие максимальности произведения эффективности и чистоты отбора пары меченых струй).

4. Влияние поперечной сегментации ВН на идентификацию меченых струй

Результат разработанного алгоритма зависит от поперечной сегментации ВН. Эту зависимость можно использовать для оценки оптимальной поперечной сегментации ВН. В расчетах использовались Particle-Flow [6, 7] CHS струи, реконструированные кластерным алгоритмом Anti-Kt поиска струи [8] с радиусным параметром 0.4. К струям также применялась калибровка энергии струи [9–10].

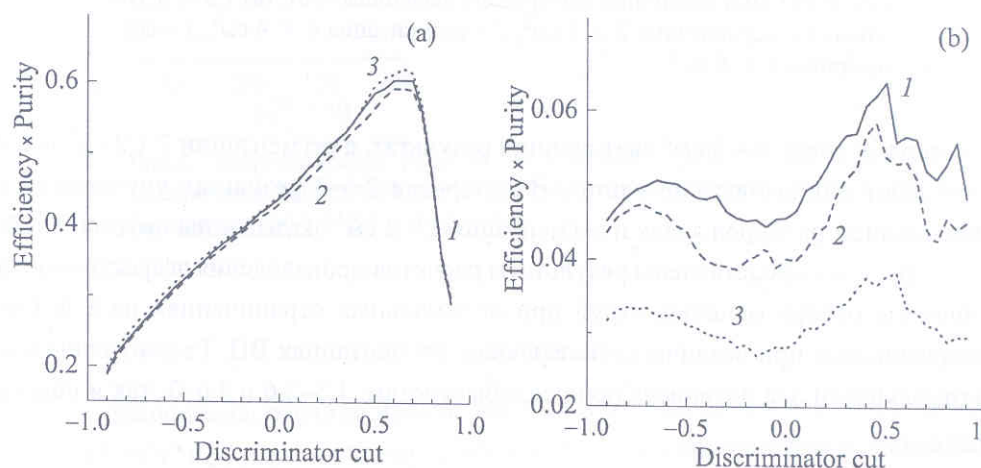


Рис.2. Зависимость произведения эффективности и чистоты отбора меченых струй от ограничения на Pile-Up-дискриминатор для струй с $E_T > 20$ ГэВ в различных интервалах псевдобыстрот: (а) 1.5–2.6, (б) 2.6–3: 1 – сегментация 2×2 см², 2 – сегментация 4×4 см², 3 – сегментация 8×8 см².

На рис.2 и 3 представлены зависимости произведения эффективности и чистоты отбора меченых струй от Pile-Up-дискриминатора при различных поперечных сегментациях ВН. Рассмотрены два интервала по псевдобыстротам: $1.5 < |\eta| < 2.6$ и $2.6 < |\eta| < 3$. Такой подход связан со слабой зависимостью оптимального ограничения на Pile-Up-дискриминатор от псевдобыстроты в этих двух интервалах по отдельности и разрыва этой зависимости при $|\eta| = 2.6$ [4].

Из рисунков видно, что в области псевдобыстрот 1.5–2.6 сегментация ВН

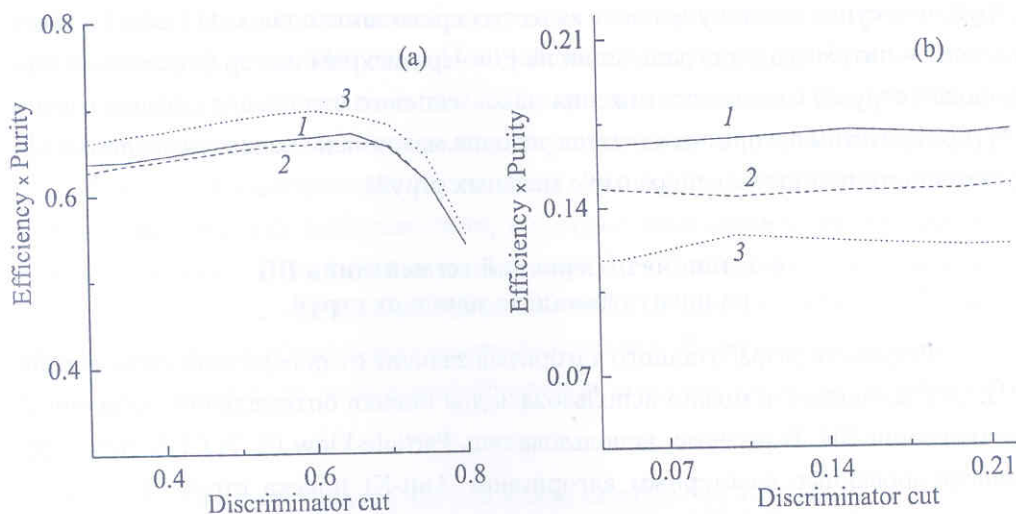


Рис.3. Зависимость произведения эффективности и чистоты отбора меченых струй от ограничения на Pile-Up-дискриминатор для струй с $E_T > 30$ ГэВ в различных интервалах псевдобыстрот: (а) 1.5–2.6, (б) 2.6–3: 1 – сегментация 2×2 см², 2 – сегментация 4×4 см², 3 – сегментация 8×8 см².

с размерами ячеек 8×8 см² дает лучший результат, а сегментации 2×2 см² и 4×4 см² дают одинаковый результат. В интервале 2.6–3 результат улучшается с уменьшением размеров ячеек и сегментация 2×2 см² оказывается оптимальной.

В табл.2 представлены результаты расчетов произведения эффективности и чистоты отбора меченых струй при оптимальных ограничениях на Pile-Up-дискриминатор при различных поперечных сегментациях ВН. Рассмотрены как по отдельности два интервала по псевдобыстротам: 1.5–2.6 и 2.6–3, так и общий

Табл.2. Произведение эффективности и чистоты отбора меченых струй при различных поперечных сегментациях ВН

	Эффективность × Чистота × 100					
	$E_T > 20$ ГэВ			$E_T > 30$ ГэВ		
η-интервал	2×2 см ²	4×4 см ²	8×8 см ²	2×2 см ²	4×4 см ²	8×8 см ²
1.5–2.6	60.3	59.2	62.0	66.9	66.1	69.8
2.6–3.0	6.4	5.9	3.9	19.6	18.8	14.2
1.5–3.0	25.3	23.9	24.8	32.7	31.7	31.4

интервал 1.5–3 при различных ограничениях на поперечную энергию струй: 20 и 30 ГэВ.

Поперечная сегментация ВН может также влиять на энергетическое разрешение струй. На рис.4 представлено энергетическое разрешение меченых струй при различных поперечных сегментациях ВН.

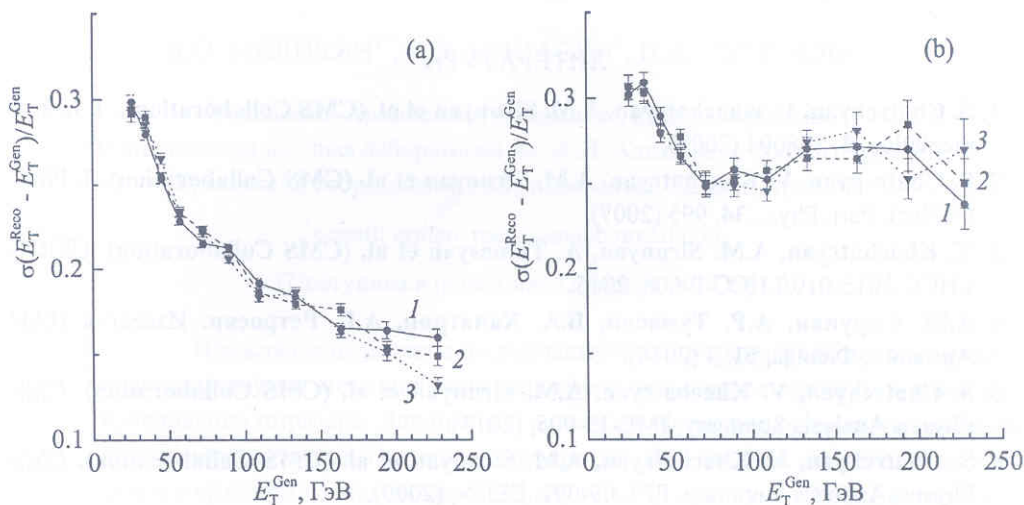


Рис.4. Энергетическое разрешение меченых струй при различных поперечных сегментациях ВН в различных интервалах по псевдобыстротам: (а) 1.5–2.6 и (б) 2.6–3.

5. Заключение

Выполнены расчеты идентификации и отбора меченых струй в процессе $VBF H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ в условиях большого количества (140) дополнительно накладываемых pp -взаимодействий с использованием метода отбора струй по Pile-Up-дискриминатору [4] с целью оптимизировать поперечную сегментацию заднего адронного (ВН) калориметра модернизированного детектора CMS. Для оценки оптимальной сегментации ВН использовалась зависимость произведения эффективности и чистоты отбора меченых струй от поперечных размеров ВН калориметра. Расчеты выполнялись для трех различных поперечных сегментаций ВН с размерами ячеек 2×2 , 4×4 и 8×8 см². Исследования показали, что в области псевдобыстрот 1.5–2.6 сегментация с поперечными размерами ячеек 8×8 см² дает лучший результат, однако в области псевдобыстрот 2.6–3 лучший результат дает более мелкая сегментация (2×2 см²). Сегментация с размерами ячеек 4×4 см² в обоих интервалах оказывается примерно средним результатом между сегментациями 2×2 и 8×8 см². Таким образом, поперечные размеры ячеек заднего

адронного калориметра должны убывать с ростом псевдобыстроты. Это соответствует идее проективной геометрии.

Энергетическое разрешение струй в пределах статистических ошибок можно считать одинаковым для всех трех сегментаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГК МОН Армении в рамках научного проекта № 15Т-С085.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan et al. (CMS Collaboration). J. Instrumentation, 3, S08004 (2008).
2. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan et al. (CMS Collaboration). J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 34, 995 (2007).
3. V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, A. Tumasyan et al. (CMS Collaboration). CERN-LHCC-2015-010/LHCC-P-008, 2015.
4. А.М. Сирунян, А.Р. Тумасян, В.А. Хачатрян, А.Г. Петросян. Известия НАН Армении, Физика, 51, 4 (2016).
5. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan et al. (CMS Collaboration). CMS Physics Analysis Summary, JME-13-005, (2013).
6. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan et al. (CMS Collaboration). CMS Physics Analysis Summary, PFT-09-001, CERN, (2009).
7. M. Cacciari, G.P. Salam, G. Soyez. J. High Energy Phys., 4, 063 (2008).
8. А.Р. Тумасян. Известия НАН Армении, Физика, 47, 4 (2012).
9. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan et al. (CMS Collaboration). J. Instrumentation, 6, P11002 (2011).

INFLUENCE OF TRANSFER SEGMENTATION OF BACK HADRONIC CALORIMETER OF CMS (LHC) DETECTOR ON IDENTIFICATION OF TAGGING JETS IN VBF $H \rightarrow \tau^- \tau^+$ PROCESS

A.M. SIRUNYAN, A.R. TUMASYAN, V.A. KHACHATRYAN,
A.G. PETROSYAN, V.A. ALOYAN

There are presented the results of calculations for identification of the tagged jets in the Higgs boson production via the mechanism of vector boson fusion followed by decaying into τ -leptons (VBF $H \rightarrow \tau^- \tau^+$) at diverse transverse segmentations of the end cup of the modernized hadron calorimeter of the Compact Muon Solenoid on the Large Hadron Collider (LHC). The calculations were made in the presence of a large number (140) of additional pp -interactions when operating the LHC at high luminosities.