УДК 539.1

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕЧЕНЫХ СТРУЙ В ПРОЦЕССЕ СЛИЯНИЯ ВЕКТОРНЫХ БОЗОНОВ С ПОСЛЕДУЮЩИМ РАСПАДОМ НА т-ЛЕПТОНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОМПАКТНОГО МЮОННОГО СОЛЕНОИДА НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ ПРИ БОЛЬШОМ КОЛИЧЕСТВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНО НАКЛАДЫВАЕМЫХ *pp*-ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

# А.М. СИРУНЯН<sup>\*</sup>, А.Р. ТУМАСЯН, В.А. ХАЧАТРЯН, А.Г. ПЕТРОСЯН

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

\*e-mail: sirunian@yerphi.am

#### (Поступила в редакцию 8 июня 2016 г.)

Приведена процедура идентификации меченых струй в процессе рождения бозона Хигтса через механизм слияния векторных бозонов с последующим распадом на  $\tau$ -лептоны (VBF H $\rightarrow$  $\tau^{-}\tau^{+}$ ) в торцевой части модернизированного адронного калориметра компактного мюонного соленоида (CMS) в условиях большого количества (140) дополнительно накладываемых *pp*-взаимодействий. Оценены эффективность и чистота отборов меченых струй в торцевой части детектора CMS.

#### 1. Введение

Компактный мюонный соленоид (CMS) [1] на Большом адронном коллайдере (БАК) [2] – детектор общего назначения, разработанный как для проверки и уточнения известных параметров Стандартной модели, так и для поиска новых явлений в физике высоких энергий и элементарных частиц. Физическая программа CMS на БАК включает такие важные задачи современной физики высоких энергий, как открытие и исследование свойств бозона Хиггса, поиск суперсимметричных частиц и дополнительных измерений, исследование дифракционной физики, изучение b-физики, исследование нарушения CP-четности и т. д. Для достижения поставленных целей планируются несколько этапов модернизации БАК и его детекторов. В 2023 г. планируется третья долгая остановка БАК, во время которой будет выполнена вторая фаза модернизации детектора CMS. Этот этап модернизации 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). Планируемая светимость БАК будет составлять  $5-10 \times 10^{34}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, энергия столкновения протонов – 13–14 ТэВ, частота столкновений протонных пучков – 25 нс<sup>-1</sup>, а количество *pp*-взаимодействий при каждом соударении протонных пучков достигнет 140–200.

В 2012 г. в экспериментах CMS и ATLAS было сделано самое значимое открытие в физике высоких энергий за последние десятилетия – экспериментальное открытие бозона Хиггса [4]. В физической программе CMS особое внимание уделяется исследованиям свойств хиггсовского бозона – 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 т-лептона, при исследовании которого (в частности, для отбора таких событий) широко используются так называемые меченые адронные струи, «сопровождающие» бозон Хиггса.

Настоящая работа посвящена проблеме идентификации меченых струй в торцевой части модернизированного детектора CMS в условиях большого количества (140) дополнительно накладываемых (фоновых) *pp*-взаимодействий, соответствующих режиму работы БАК при высоких светимостях. Для расчетов использовались данные процесса VBF  $H \rightarrow \tau^- \tau^+$ , смоделированные с помощью генераторов Монте-Карло Powheg и Pythia\_6. Моделирование и реконструкцию событий, а также анализ выполнялись с помощью программного пакета CMSSW.



Рис.1. Процесс VBF  $H \rightarrow \tau^- \tau^+$ .

#### 2. Характеристики меченых струй в процессе VBF $H \rightarrow \tau^- \tau^+$

Процесс VBF рождения хиггсовского бозона с последующим распадом на два т-лептона представлен на рис.1. Как уже отмечалось, это один из самых перспективных каналов по исследованию свойств бозона Хиггса [5–6]. Преимущество данного процесса над инклюзивным процессом рождения бозона Хиггса заключается в обязательном наличии двух дополнительных адронных струй, так называемых меченых струй, рождаемых от рассеянных кварков. Эти меченые струи имеют определенную корреляцию между собой: антипараллельны по *z*-компоненте импульса в исследуемой области псевдобыстрот, покрываемой калориметрами HGCal + BH (1.5 <  $|\eta|$  < 3). Эти струи находят широкое применение при отборе событий данного процесса и позволяют с достаточной чистотой выделять нужный канал.

В расчетах использовались Particle-Flow CHS струи, реконструированные кластерным алгоритмом Anti-Kt поиска струи [7] с радиусным параметром 0.4. Particle-Flow – основной алгоритм реконструкции в CMS [8], с помощью которого с высокой точностью восстанавливаются заряженные адроны, электроны, мюоны, фотоны, нейтральные адроны, недостающая поперечная энергия для  $P_{\rm T}$ -баланса, а также адронные струи. CHS – дополнение к алгоритму Particle-Flow при реконструкции струй для исключения заряженных адронов от фоновых *pp*-взаимодействий, которые Anti-Kt-алгоритм ошибочно включил при реконструкции. В расчетах к струям также применялась калибровка энергии струи: L1 + L2L3 [9–10], где L1 – коррекция энергии струи на составляющую от фоновых *pp*-взаимодействий, а L2L3 – коррекция расчетов Монте-Карло к энергии реконструированной струи. Распределения меченых струй по поперечному импульсу и по псевдобыстроте показаны на рис.2.



Рис.2. Распределения меченых струй по поперечному импульсу (а) и по псевдобыстроте (b), где сплошная линия соответствует струе с большей псевдобыстротой, а пунктирная – с меньшей.

# 3. Проблема идентификации меченых струй при наличии 140 фоновых *pp*-взаимодействий

Основной проблемой прецизионных измерений и анализа данных в реработы БАК при высоких светимостях являются фоновые *pp*жиме взаимодействия. При этом разделяют их две компоненты: «вне времени» – относящаяся к остаточному энерговыделению от предшествующего столкновения протонных пучков и «во время» – к наложению разных *pp*-взаимодействий во время одного акта столкновения пучков. Из-за хорошего временного разрешения детектора CMS вклад компоненты «вне времени» незначительный и фоновые ppвзаимодействия ассоциируются с его «во время» компонентой. При столкновении протонных пучков количество *pp*-взаимодействий в среднем будет 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 выбирается то, у которого величина суммы квадратов поперечных импульсов всех заряженных частиц  $\sum P_{1}^{2}$  имеет максимальное значение. Это взаимодействие называется основным, а остальные ~139 – дополнительно наложенными (фоновыми) взаимодействиями. В результате наложения возникает необходимость выделения продуктов основного взаимодействия из общего.

Для заряженных частиц такое выделение осуществляется достаточно эффективно благодаря хорошему трекерному разрешению CMS: отбираются те частицы, которые вылетают из вершины основного взаимодействия. Однако для такого сложного объекта как струя нужна более сложная процедура.

Сами по себе отдельные струи от фоновых взаимодействий (в дальнейшем фоновые струи) имеют маленькие энергии по сравнению со струями от основного процесса взаимодействия (в дальнейшем основные струи), и от фоновых струй можно было бы элементарно избавиться наложением ограничения на поперечную компоненту импульса ( $P_T$ ) струи. Однако из-за большого количества фоновых взаимодействий фоновые струи часто накладываются друг на друга, образуя одну высокоэнергичную струю,  $P_T$  которой больше, чем у основной струи.

На рис.3 представлены распределения множественностей струй в процессе VBF  $H \rightarrow \tau^{-}\tau^{+}$  с  $P_{T} > 20$  ГэВ/с в области псевдобыстрот  $1.5 < |\eta| < 3$ . Представлены распределения при отсутствии фоновых взаимодействий и при наличии 140 фоновых взаимодействий.

Очевидно, что с учетом добавления фоновых взаимодействий в среднем количество струй в событиях увеличивается втрое, и для отбора основных струй (в нашем случае это меченые струи) нужна дополнительная процедура.

Строго говоря, в процессе VBF  $H \rightarrow \tau^- \tau^+$  помимо меченых струй могут присутствовать и другие адронные струи, в основном, от распадов  $\tau$ -лептонов, но для идентификации таких струй используется другой алгоритм [11], а в данной работе рассматривается проблема идентификации именно меченых струй при наличии дополнительных струй от фоновых *pp*-взаимодействий.



Рис.3. Множественность струй с  $P_{\rm T} > 20$  ГэВ/с и 1.5 <  $|\eta| < 3$  (а) при отсутствии фоновых *pp*-взаимодействий и (b) при наличии 140 фоновых *pp*-взаимодействий.

#### 4. Алгоритм идентификации основных струй

Однако имеются довольно существенные отличия между фоновыми струями и основными струями. Во-первых, заряженные частицы в составе основной струи рождаются в основной вершине, в то время как для фоновых струй такие частицы относятся к различным вершинам взаимодействия. Во-вторых, различается плотность распределения энергии в струе, а также форма струи в η-φпространстве и т. д. На основе таких различий между основными струями и фоновыми струями был создан алгоритм многомерного анализа PileUpJetId [12], в котором учитываются все различия между характеристиками основных струй и фоновых струй. Этот алгоритм для каждой индивидуальной струи рассчитывает величину так называемого Pile-Up-дискриминатора, который несет вероятностную информацию того, является ли рассматриваемая струя основной или же фоновой струей. Для основных струй значение Pile-Up-дискриминатора близко к 1, а для фоновых струй к –1.

На рис.4 представлены распределения Pile-Up-дискриминатора меченых струй и фоновых струй с  $P_{\rm T} > 20$  ГэВ/с в различных интервалах по псевдобыстротам. Видно, что алгоритм PileUpJetId позволяет достаточно хорошо разделять основные струи от фоновых. Исключение составляет последний интервал по

псевдобыстроте: 2.75–3. Это связано с тем, что струи реконструированные в этом интервале, частично выходят за пределы трекера и HGCal + BH, где алгоритм PileUpJetId плохо работает. Влияние этого эффекта частично проявляется и для интервала  $2.35 < |\eta| < 2.75$  (напомним, что радиусный параметр алгоритма реконструкции струй 0.4, а это означает, что струи, реконструированные в области  $|\eta| > 2.6$ , могут включать составляющие с  $|\eta| > 3$ ).



Рис.4. Распределение Pile-Up-дискриминатора меченых струй (сплошная линия) и фоновых струй (пунктирная линия) в различных интервалах по псевдобыстротам: (a) 1.5–3, (b) 1.5–1.75, (c) 1.75–2, (d) 2–2.35, (e) 2.35–2.75 и (f) 2.75–3.

#### 5. Оптимизация ограничения на Pile-Up-дискриминатор струй

Рис.4 показывает, что разделение меченых струй от фоновых можно осуществить с использованием ограничения на Pile-Up-дискриминатор струй. При этом необходим критерий для определения оптимального ограничения на Pile-Up-дискриминатор струй.

Для начала опишем критерии отбора меченых струй в торцевой части детектора CMS в процессе VBF H $\rightarrow \tau^{-}\tau^{+}$  при наличии дополнительных струй. В каждой части торцевого детектора CMS (1.5 <  $\eta$  < 3 и –3 <  $\eta$  < –1.5) отбирается струя с максимальным поперечным импульсом (причем, с условием  $P_{\rm T}$  > 20 ГэB/с), Pile-Up-дискриминатор которой больше установленного ограничения. Эффективность и чистота отбора струй определяются следующим образом:

а критерием для оптимизации ограничения на Pile-Up-дискриминатор будет максимальность произведения эффективности и чистоты, что, в конечном счете, соответствует условию минимальности статистической ошибки измерения. На рис.5 представлена зависимость произведения эффективности и чистоты от ограничения на дискриминатор.



Рис.5. Зависимость произведения эффективности и чистоты от ограничения на дискриминатор в различных интервалах по псевдобыстротам:  $l - (1.5 < |\eta| < 1.75)$ ,  $2 - (1.75 < |\eta| < 2)$ ,  $3 - (2 < |\eta| < 2.35)$ ,  $4 - (2.35 < |\eta| < 2.75)$ ,  $5 - (2.75 < |\eta| < 3)$ .

В результате этой процедуры были оценены оптимальные ограничения на Pile-Up-дискриминатор (рабочие точки) струй в различных интервалах по псевдобыстроте. На рис.6 показаны значения рабочих точек в зависимости от псевдобыстроты, из которого видно, что в интервале псевдобыстрот  $|\eta| < 2.7$ зависимость рабочих точек от псевдобыстроты слабая. Значение рабочих точек в этом интервале колеблется от 0.6 до 0.75. В области  $|\eta| > 2.75$  рабочие точки принимают значение -1. Это связано с тем, что алгоритм PileUpJetId плохо работает в этом интервале, а чистота отборов практически не зависит от ограничения на Pile-Up-дискриминатор. Однако эффективность отборов уменьшается с ростом ограничения на Pile-Up-дискриминатор, поэтому рабочие точки, соответствующие максимуму произведения эффективности и чистоты, принимают значение -1.



Рис.6. Зависимость оптимального ограничения на Pile-Up-дискриминатор (рабочие точки) струй от псевдобыстроты.

#### 6. Расчет эффективности и чистоты отбора меченых струй

Имея значения рабочих точек, можно осуществлять отбор меченых струй в процессе VBF  $H \rightarrow \tau^- \tau^+$  в соответствии со следующими условиями: отбираются две струи в области 1.5 <  $|\eta| < 3$  с наибольшими поперечными импульсами (причем с условием  $P_T$  > установленного порога) и с Pile-Up-дискриминатором больше, чем рабочая точка для данного интервала по  $\eta$ , которые удовлетворяют условию коррелирования меченых струй  $\eta_1^{jet} \times \eta_2^{jet} < 0$  (требование вылета струй в направлении вперед–назад).

В табл.1 представлены результаты расчетов рабочих точек для пяти рассмотренных интервалов по η, а также эффективность и чистота отбора меченых струй и их произведение при различных ограничениях на *P*<sub>T</sub>-струи.

	Рабочие точки (η1,η2,η3,η4,η5)	Эффектив- ность, %	Чистота, %	Эффективность × Чистота × 100
$P_{\rm T} > 20$	(0.65, 0.65, 0.60, 0.55, 1.00)	4.6	82.6	$3.77 \pm 0.07$
$P_{\rm T} > 25$	(0.65, 0.60, 0.60, 0.50, 1.00)	4.3	84.0	$3.60\pm0.07$
$P_{\rm T} > 30$	(0.50, 0.60, 0.55, 0.40, -1.00)	5.4	67.5	$3.65\pm0.07$
$P_{\rm T} > 35$	(0.65, 0.65, 0.55, 0.45, -1.00)	4.8	73.0	$3.49\pm0.07$
$P_{\rm T} > 40$	(0.65, 0.70, 0.70, 0.70, 0.40, -1.00)	4.1	78.0	$3.20 \pm 0.06$
$P_{\rm T} > 45$	(0.65, 0.70, 0.70, 0.70, 0.40, -1.00)	3.6	78.5	$2.83 \pm 0.06$
$P_{\rm T} > 50$	(0.80, 0.70, 0.70, 0.70, 0.40, -1.00)	3.1	79.7	$2.42\pm0.06$

Табл.1. Рабочие точки для пяти интервалов по η, эффективность и чистота отбора меченых струй и их произведение со статистическими ошибками при различных ограничениях на *P*<sub>T</sub>-струи

## 7. Заключение

Описана процедура идентификации меченых струй в процессе VBF  $H \rightarrow \tau^- \tau^+$  в торцевой части модернизированного детектора CMS в условиях большого количества (140) дополнительно накладываемых *pp*-взаимодействий. Отбор меченых струй выполнялся с использованием ограничений на кинематические характеристики струй и на Pile-Up-дискриминатор струй, рассчитанный алгоритмом многомерного анализа PileUpJetId. Рассчитаны оптимальные ограничения на Pile-Up-дискриминатор струй, а также эффективность и чистота отборов меченых струй при различных ограничениях на поперечный импульс струй.

Отметим, что конструкция ВН-калориметра пока еще в стадии разработки, и основная задача состоит в определении оптимальной поперечной сегментации ВН. Работа алгоритма PileUpJetId, следовательно, идентификация меченых струй в процессе VBF  $H \rightarrow \tau^- \tau^+$  и в целом идентификация процесса VBF  $H \rightarrow \tau^- \tau^+$  зависит от поперечной сегментации ВН. Можно использовать эту зависимость и с помощью изложенного в настоящей работе метода идентификации меченых струй решить проблему оптимизации поперечной сегментации ВНкалориметра.

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).
- 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. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, et al. (CMS Collaboration). Phys. Lett. B, 716, 30 (2012).
- 5. V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, A. Tumasyan, et al. (CMS Collaboration). J. of High Energy Phys., 05, 104 (2014).
- 6. V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, A. Tumasyan, et al. (CMS Collaboration). European Phys. J. C, 75, 212 (2015).
- 7. M. Cacciari, G.P. Salam, G. Soyez. J. High Energy Phys., 04, 063 (2008).
- 8. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, et al. (CMS Collaboration). CMS Physics Analysis Summary, PFT-09-001, CERN, 2009.
- 9. **А.Р. Тумасян**. Известия НАН Армении, Физика, **47**, 4 (2012).
- 10. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, et al. (CMS Collaboration). J. Instrumentation, 6, P11002 (2011).
- 11. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, et al. (CMS Collaboration). J. Instrumentation, 7, P01001 (2012).
- S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, et al. (CMS Collaboration). CMS Physics Analysis Summary, JME-13-005, 2013.

# IDENTIFICATION OF TAGGING JETS IN VBF $H \rightarrow \tau^- \tau^+$ PROCESS WITH CMS EXPERIMENT ON LARGE HADRON COLLIDER AT LARGE AMOUNT OF ADDITIONALLY IMPOSED *pp*-INTERACTIONS

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

Identification procedure of tagging jets in the Higgs boson production process with following decay of the Higgs boson to  $\tau$ -leptons (VBF H $\rightarrow \tau^- \tau^+$ ) for endcup region of upgraded CMS detector at large amount (140) of additionally imposed *pp*-interactions is given. Efficiency and purity of tagging jets selection in CMS endcup region are estimated.