

# ПОИСК ТЕМНОЙ МАТЕРИИ, АССОЦИАТИВНО РОЖДЕННОЙ С БОЗОНОМ ХИГГСА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В $pp$ -СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 13 ТЭВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS (LHC)

А. А. Айрапетян<sup>1,\*</sup>, М. В. Савина<sup>2</sup>,  
А. Р. Тумасян<sup>1</sup>, С. В. Шматов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальная научная лаборатория им. А. И. Алиханяна, Ереван

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена стратегия анализа для поиска темной материи, рождаемой ассоциативно с бозоном Хиггса ( $h$ ) Стандартной модели, в рамках предсказаний модели «2HDM + a» в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере (LHC). Стратегия оптимизирована для анализа с использованием экспериментальных данных 2018 г. по  $pp$ -столкновениям при 13 ТэВ, соответствующих интегральной светимости  $\sim 60 \text{ fb}^{-1}$ . Показано, что наибольшей чувствительности к предполагаемому сигналу можно достичь при введении двух категорий анализа, соответствующих большим и малым значениям поперечного импульса  $h$ -бозона.

Analysis strategy for search for dark matter produced in association with Standard Model Higgs boson ( $h$ ) predicted within “2HDM + a” model in CMS (LHC) experiment is presented. Analysis strategy was optimized for investigations using 2018 data of  $pp$  collisions at 13 TeV corresponding to integral luminosity  $\sim 60 \text{ fb}^{-1}$ . It is shown that highest sensitivity to presumed signal could be reached with introduction of two analysis categories corresponding to high and low values of  $h$ -boson transverse momentum.

PACS: 95.35.+d

## ВВЕДЕНИЕ

Для объяснения некоторых астрофизических и космологических явлений, таких как аномально быстрое вращение внешних слоев галактик и гравитационное линзирование, где необходимо наличие гораздо большей массы, чем наблюдается, вводится гипотетический вид материи, которая не участвует в электромагнитном взаимодействии, но участвует в гравитационном. Этот вид материи называют темной материей. Для объ-

---

\* E-mail: aram.hayrapetyan@cern.ch

яснения явления расширения Вселенной с ускорением был введен гипотетический вид энергии, которую называют темной энергией. Наличие темной материи и темной энергии во Вселенной для объяснения вышеперечисленных явлений является самой распространенной гипотезой современности, согласно которой Вселенная примерно на 70 % состоит из темной энергии, примерно на 25 % — из темной материи и только на 5 % — из обычной (видимой) материи.

Согласно некоторым моделям, темная материя может проявить себя в процессах взаимодействия элементарных частиц при высоких энергиях. При этом особый интерес вызывают процессы, включающие недавно открытый  $h$ -бозон [1].

Данная работа посвящена разработке методики для поиска в эксперименте CMS темной материи, которая предсказывается в рамках упрощенной модели темной материи с наличием псевдоскалярного медиатора  $a$  и двух хиггсовских дублетов «2HDM +  $a$ » (Two Higgs Doublet Model + pseudoscalar mediator, 2HDMa) [2]. Эта модель предсказывает рождение темной материи ассоциативно с  $h$ -бозоном в  $pp$ -столкновениях на ЛHC. На выходе такого процесса имеется  $h$ -бозон и частицы-фермионы темной материи. На рис. 1 показаны диаграммы, дающие доминирующий вклад в исследуемый процесс. Рассматривается канал с распадом  $h$ -бозона на пару кварков  $b\bar{b}$  (с вероятностью  $\sim 58\%$ ). При регистрации данного процесса в детекторе CMS ожидается наличие двух адронных струй от кварков распада  $h$ -бозона и большой недостаток поперечного импульса для  $p_T$ -баланса, обусловленный суммарным импульсом частиц темной материи, не регистрирующимся в CMS.

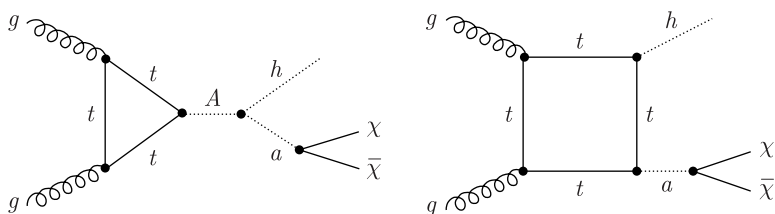


Рис. 1. Диаграммы, дающие основной вклад в рассматриваемый процесс, где  $g$  — глюон,  $t$  — топ-кварк,  $A, a$  — тяжелый и легкий нейтральные псевдоскаляры,  $h$  — бозон Хиггса Стандартной модели,  $\chi$  — частицы-фермионы темной материи

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Модель 2HDMa представляет собой упрощенную модель темной материи, в которой процессы содержат всего один медиатор. Вообще в моделях темной материи частицы Стандартной модели связываются с частицами темной материи коэффициентами Юкавы. Для связывания частиц Стандартной модели с частицами темной материи была введена

новая частица со спином 0. Последняя связывает частицы темной материи с бозоном Хигса Стандартной модели и псевдоскалярными частицами. Используя вакуумные средние значения дуплетов бозона Хигса  $\langle H_i \rangle = (0, v_i/\sqrt{2})^T$ , определяют новую величину  $-\tan \beta = v_2/v_1$ . Связь между нейтральными CP-четными частицами описывается углом смешивания  $\alpha$ , а между нейтральными CP-нечетными частицами — углом смешивания  $\theta$ . В рамках модели считается, что фермионы темной материи зарядово нейтральные.

В изучаемой модели, помимо частиц Стандартной модели, фигурируют нейтральный CP-четный тяжелый бозон Хигса —  $H$ , нейтральный CP-нечетный псевдоскалярный бозон  $A$ , заряженные бозоны Хигса —  $H^+$ ,  $H^-$ , нейтральный синглет — псевдоскалярный  $a$ -бозон и частицы-фермионы темной материи  $\chi$ , свойства которых являются модельными параметрами.

При моделировании исследуемого процесса были использованы следующие значения модельных параметров:

- массы бозонов  $A, H, H^\pm$  — 600 ГэВ;
- масса  $a$ -бозона — 300 ГэВ;
- масса  $\chi$ -фермионов темной материи — 1 ГэВ;
- синус угла смешивания между бозонами  $h$  и  $H$  —  $\sin(\alpha - \beta) = 1$ ,  $\tan \beta = 1$ ;
- синус угла смешивания между бозонами  $a$  и  $A$  —  $\sin \theta = 0,35$ .

Моделирование исследуемого процесса было выполнено с помощью генераторов Монте-Карло MadGraph5\_aMC@NLO [3] и PYTHIA8 [4]. MadGraph5\_aMC@NLO использует правила Фейнмана для вычисления матричных элементов в приближении NLO (Next-to-leading order) и задает набор элементарных частиц и их кинематические характеристики на выходе жесткого процесса. PYTHIA8, в свою очередь, реализует моделирование адронизации-фрагментации и распадов, задавая набор конечных частиц данного процесса и их кинематические параметры. Введенное сечение процесса для выбранных начальных параметров составило 100,7 пб.

Полное моделирование процесса с учетом отклика детектора CMS на данный процесс в условиях CMS (LHC) 2018 г., а также реконструкция событий были выполнены с помощью программного пакета CMSSW [5], в котором имплементированы как пакет GEANT4 [6], так и нужные алгоритмы реконструкции.

## ОТБОР И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СОБЫТИЙ

В эксперименте CMS для процессов, содержащих только адронные струи, основным фоном является квантово-хромодинамический (КХД) многоструйный процесс. В сигнальном процессе единственный объект, с помощью которого можно подавить КХД фон, — это недостающая

поперечная энергия (Missing Energy Transfer, MET), соответствующая суммарной поперечной энергии частиц темной материи, не регистрирующихся в CMS. Поэтому было применено жесткое ограничение на MET ( $MET > 200$  ГэВ). В лидирующем порядке теории возмущений в конечном состоянии исследуемого процесса имеется  $h$ -бозон и частицы темной материи. Следовательно, такое ограничение на MET накладывает аналогичное ограничение и на  $p_T$  реконструированного  $h$ -бозона. При этом угол разлета  $b\bar{b}$ -кварков распада  $h$ -бозона получается маленьким, а струи от адронизации этих кварков накладываются друг на друга. В этом случае целесообразно реконструировать систему этих двух струй как единую, используя струйный алгоритм с большим радиусным параметром. Для этого в данной работе использовался CA (Cambridge–Aachen) [7] алгоритм с радиусным параметром 1,5: CA15. Такая струя интерпретируется как хиггсовская —  $h$ -струя. В работе [8] представлены результаты, полученные с использованием данных CMS (LHC) по  $pp$ -столкновениям 2016 г., соответствующих этой топологии — топологии Б (boosted).

Иной сценарий может возникнуть с учетом дополнительной адронной активности в процессе, когда на выходе фигурируют не только продукты распада  $h$ -бозона, но и дополнительные струи, в частности, из-за излучения в начальном состоянии. В этом случае автоматическое ограничение на  $p_T$  реконструированного  $h$ -бозона из-за отбора по MET может быть смягчен. При этом угол разлета  $b\bar{b}$ -кварков от распада  $h$ -бозона получается достаточно большим, чтобы стандартный кластерный алгоритм реконструкции струй в CMS AK (Anti- $k_T$ ) [9] с радиусным параметром 0,4 оказался более эффективным для восстановления отдельных струй от  $b$ -кварков, чем CA15 для реконструкции  $h$ -струи. В такой топологии — топологии Р (resolved) —  $h$ -бозон реконструируется как система двух струй AK04. Исследования показали, что при выбранных модельных параметрах Р-топология оказывается более чувствительной к сигналу, чем Б-топология, а стратегия с введением двух категорий анализа — Б- и Р-категории — наиболее оптимальной для поиска предполагаемого сигнала. Рис. 2 иллюстрирует характерные события в Б- и Р-топологиях.

В соответствии с выбранной стратегией анализа были разработаны критерии отбора событий для этих двух категорий. Категоризация выполняется с помощью CA15-струи с наибольшим  $p_T$  в событии: если у этой струи  $p_T > 200$  ГэВ, то событие рассматривается в Б-категории, в ином случае — в Р-категории. При этом категории получают взаимноисключающие, и одно и то же событие не может быть рассмотрено в двух категориях одновременно.

В анализе использовались объекты, восстановленные с глобальным алгоритмом реконструкции «Particle-Flow» [10]. Реконструкция струй выполнялась с помощью кластерных алгоритмов CA15 и AK04, а идентификация  $b$ -кварковых струй — с помощью алгоритмов  $b$ -таггинга [11].

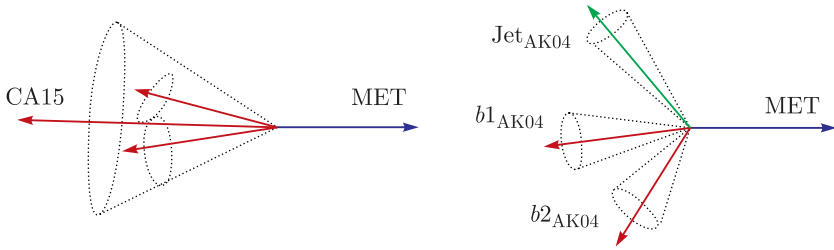


Рис. 2. Б-категория (слева) и Р-категория (справа), где помимо струй от распада  $h$ -бозона ( $b1$  и  $b2$ ) присутствует дополнительная струя (Jet)

Для АК04-струй использовался алгоритм DeepCSV, а для CA15-струй — алгоритм двойного  $b$ -таггинга Double-DeepCSV.

В обеих категориях начальный отбор осуществляется с использованием MET-триггеров CMS, также применялось вето на наличие изолированных лептонов и фотонов, которое существенно подавляет фон электрослабых процессов и процессов, включающих  $t$ -кварки. Рассматривались изолированные электроны с  $p_T > 10$  ГэВ и  $|\eta| < 2,5$ , мюоны с  $p_T > 10$  ГэВ и  $|\eta| < 2,4$ , таоны с  $p_T > 18$  ГэВ и  $|\eta| < 2,3$  и фотоны с  $p_T > 15$  ГэВ и  $|\eta| < 2,5$ . В случае присутствия таких объектов событие не проходило отбор. Накладывалось также вето на дополнительную адронную активность (на дополнительные струи): наличие не больше одной дополнительной АК04-струи с  $p_T > 30$  ГэВ в событиях.

**Критерии отбора событий и эффективность  
для сигнального процесса (онлайн триггер  
HLT\_PFMETNoMu120\_PFMHTNoMu120\_IDTight\_PFH60)**

Критерий	Б-категория	Р-категория
Лептонное вето	Да	Да
Фотонное вето	Да	Да
MET > 200 ГэВ	Да	Да
Вето на дополнительные струи	Да	Да
$\Delta\varphi$ между MET и любой струей > 0,4	Да	Да
CA15-струя с $p_T > 200$ ГэВ, $ \eta  < 2,4$	Да	Нет
CA15-струя с Double-DeepCSV > 0,9	Да	—
100 ГэВ < $M_{CA15}$ < 150 ГэВ	Да	—
Две АК04-струи с $p_T > 30$ ГэВ, $ \eta  < 2,4$	—	Да
АК04-струи ( $b1$ , $b2$ ) с DeepCSV > 0,75	—	Да
100 ГэВ < $M_{b1,b2}$ < 150 ГэВ	—	Да
Эффективность, %	1,36	1,44

В категории Б SA15-струя интерпретируется как  $h$ -струя, а в категории Р две струи с наибольшими значениями  $b$ -таггинга — как струи  $b$ -кварков от распада  $h$ -бозона ( $b1$ ,  $b2$ ).

В таблице приведены критерии отбора событий и итоговая эффективность отборов для сигнального процесса в двух категориях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты были получены с использованием моделированных данных сигнального и фоновых процессов. Предварительное сравнение показывает хорошее соответствие между данными эксперимента и фоном Стандартной модели в данном анализе. На рис. 3, 4 показаны распределе-

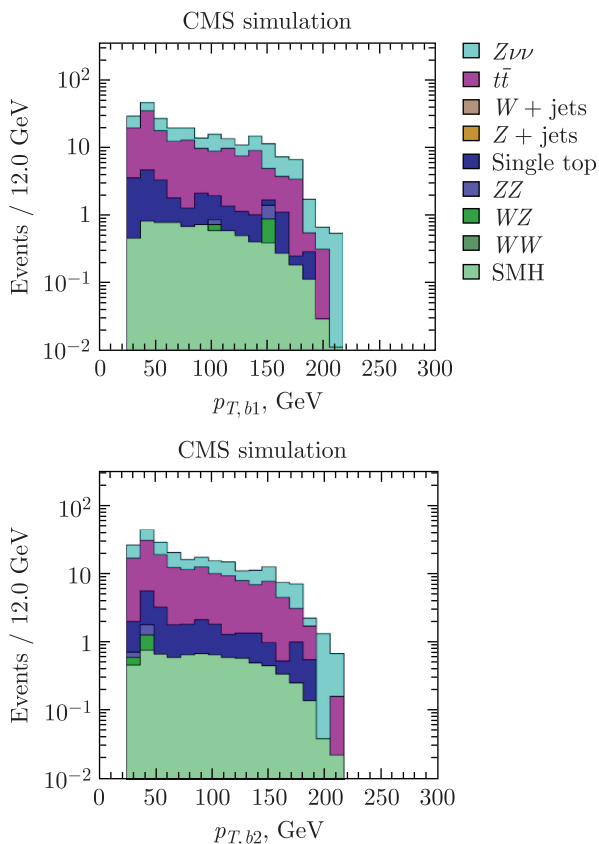


Рис. 3. Распределение поперечных импульсов струй  $b1$  и  $b2$  в Р-категории. Показан вклад различных процессов Стандартной модели из моделирования Монте-Карло и экспериментальные данные 2018 г.

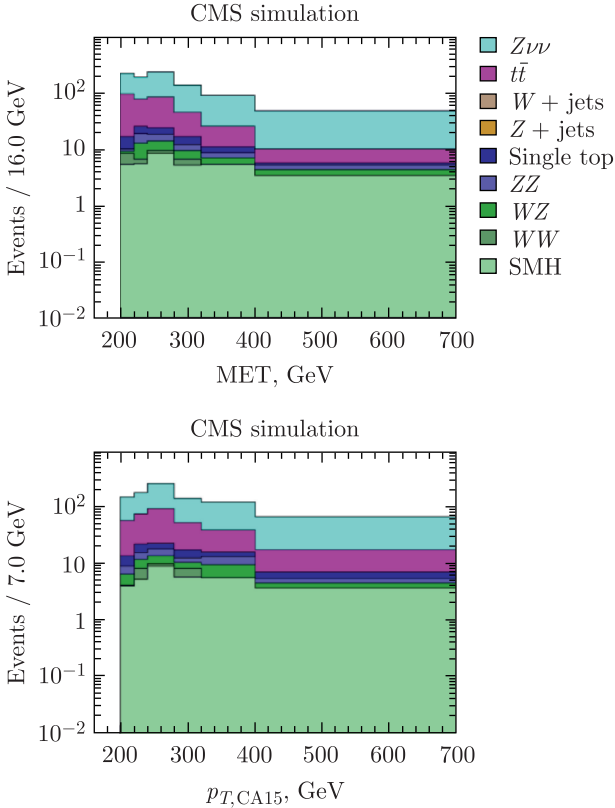


Рис. 4. Распределение поперечного импульса  $h$ -струи и MET в Б-категории

ния поперечных импульсов струй  $b1$  и  $b2$  в Р-категории и распределение поперечного импульса  $h$ -струи и MET в Б-категории. Показан вклад различных процессов Стандартной модели:  $Z\nu\nu$  — процесс с рождением  $Z$ -бозона и распадом на нейтринную пару,  $Z$  (или  $W$ ) + jets — процесс с рождением  $Z$  (или  $W$ )-бозона и распадом на кварковую пару,  $t\bar{t}$  — процесс рождения кварковой пары топ–анти топ, SingleTop — процесс с рождением кварка топ (анти топ),  $ZZ/WZ/WW$  — процессы с рождением пар соответствующих массивных слабых бозонов, SMH — процессы с рождением бозона Хиггса. Вклад остальных процессов Стандартной модели оценивается несущественным.

На рис.5 показаны распределения MET в категориях Б и Р также с наложением предполагаемого сигнального процесса, предсказанного в рамках модели 2HDMa. Наблюдается очевидная несовместимость с предсказаниями Стандартной модели при введенном значении сечения исследуемого процесса  $\sim 100$  пб.

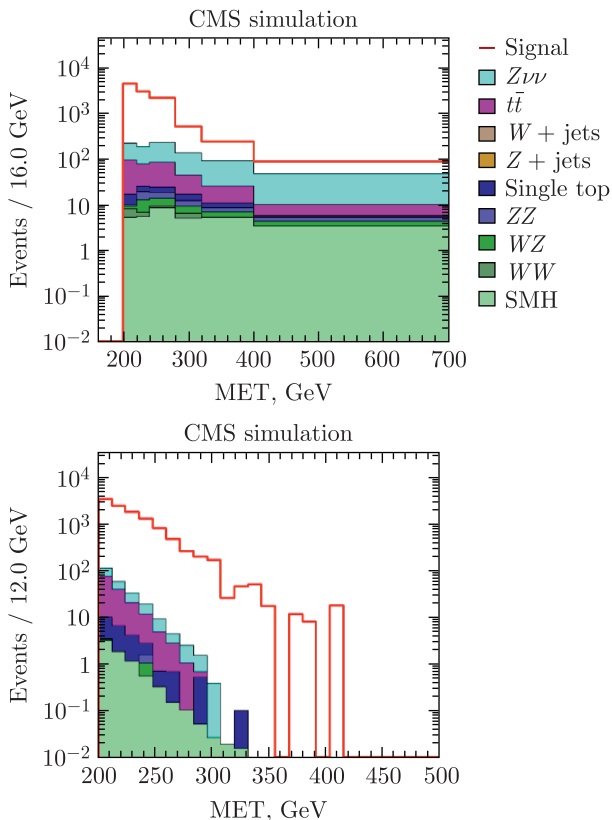


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Распределение MET в категориях Б и Р. Красная линия соответствует гипотетическому сигналу, предсказанному в рамках модели 2HDMa

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана стратегия анализа для поиска темной материи, рождаемой ассоциативно с бозоном Хиггса Стандартной модели, в рамках предсказаний модели «2HDM + a» в эксперименте CMS (LHC). Стратегия оптимизирована для анализа с использованием экспериментальных данных 2018 г. по  $pp$ -столкновениям при 13 ТэВ. Исследования показали, что введение двух категорий анализа, соответствующих большому (Б-категория) и малому (Р-категория) значениям поперечного импульса реконструированного  $h$ -бозона, существенно улучшает чувствительность к предполагаемому сигналу по сравнению только с Б-категорией [8], а при выбранных модельных параметрах категория Р оказывается более чувствительной, чем Б-категория, о чем можно судить по рис. 5 из отношения сигнала к фону.



Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке МОНКС РА в рамках научного проекта 22г1-037 и научного проекта 22АА-1С009.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ATLAS Collab.* Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC // *Phys. Lett. B.* 2012. V. 716. P. 1–29; CERN-PH-EP-2012-218. 2012.
2. *Bauer M., Haisch U., Kahlhoefer F.* Simplified Dark Matter Models with Two Higgs Doublets. I: Pseudoscalar Mediators // *JHEP.* 2017. V. 05. P. 138.
3. *CMS Collab.* Search for Dark Matter Produced in Association with a Higgs Boson Decaying to a Pair of Bottom Quarks in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // *Eur. Phys. J. C.* 2019. V. 79, No. 3. P. 280.
4. *Alwall J., Frederix R., Frixione S., Hirschi V., Maltoni F., Mattelaer O., Shao H.-S., Stelzer T., Torrielli P., Zaro M.* The Automated Computation of Tree-Level and Next-to-Leading Order Differential Cross Sections, and Their Matching to Parton Shower Simulations // *JHEP.* 2014. V. 07. P. 079.
5. *Sjöstrand T., Ask S., Christiansen J.R., Corke R., Desai N., Ilten P., Mrenna S., Prestel S., Rasmussen Ch. O., Skands P.Z.* An Introduction to PYTHIA 8. LU TP 14-36, MCNET-14-22; CERN-PH-TH-2014-190; Fermilab-PUB-14-316-CD; DESY 14-178; SLAC-PUB-16122; <https://arxiv.org/pdf/1410.3012.pdf>.
6. *Bocci A., Kortelainen M., Innocente V., Pantaleo F., Rovere M.* Heterogeneous Reconstruction of Tracks and Primary Vertices with the CMS Pixel Tracker. arXiv:2008.13461.
7. *Banerjee S.* Readiness of CMS Simulation towards LHC Startup // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2008. V. 119. P. 032006.
8. *Atkin R.* Review of Jet Reconstruction Algorithms // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 645. P. 012008.
9. *Cacciari M., Salam G.P., Soyez G.* The Anti- $k_T$  Jet Clustering Algorithm // *JHEP.* 2008. V. 04. P. 063.
10. *Baudette F.* The CMS Particle Flow Algorithm // *Proc. of CHEF2013, Paris, 2013.* P. 10; <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1401/1401.8155.pdf>.
11. *CMS Collab.* Identification of Heavy-Flavour Jets with the CMS Detector in  $pp$  Collisions at 13 TeV // *J. Instrum.* 2018. V. 13, No. 05. P. P05011.