

ПОИСКИ РАСПАДОВ БОЗОНА ХИГГСА НА ЧАСТИЦЫ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

М. В. Покидова^{1,2,*}, Ю. Г. Нарышкин^{2,**},
Я. А. Бердников^{1,2,***}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Представлен обзор результатов исследований по поиску распадов бозона Хиггса на частицы темной материи в эксперименте ATLAS Большого адронного коллайдера. В исследованиях были использованы данные в pp -столкновениях, полученные за первый ($\sqrt{s} = 7, 8$ ТэВ) и второй ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ) рабочие циклы Большого адронного коллайдера. Определены верхние пределы для вероятности распада бозона Хиггса на частицы темной материи ($H \rightarrow inv$) в различных процессах его рождения, а также для объединенного результата. Полученное значение для наблюдаемого (ожидаемого) верхнего предела для вероятности распада $H \rightarrow inv$ равно 0,107 (0,077) при 95%-м уровне достоверности. Данный результат является наиболее строгим к настоящему времени. Приведено сравнение полученных в эксперименте ATLAS верхних пределов с результатами экспериментов по прямому поиску частиц темной материи.

This paper presents an overview of the latest results and research methodology of statistical combination of Higgs invisible searches at ATLAS Large Hadron Collider experiment using data collected for Run I ($\sqrt{s} = 7, 8$ TeV) and Run II ($\sqrt{s} = 13$ TeV). In this search multiple production modes of the Standard Model Higgs boson were considered. Obtained upper limit on $H \rightarrow inv$ branching ratio of 0.107 (0.077) at the 95% confidence level is observed (expected). This result is the most strict up to date. Obtained values at ATLAS experiment are compared with the results of direct searches experiments.

PACS: 12.60.-i; 14.80.Bn; 95.35.+d

ВВЕДЕНИЕ

В 2012 г. в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (CERN)

* E-mail: marina.pokidova@cern.ch

** E-mail: yury.naryshkin@cern.ch

*** E-mail: berdnikov@spbstu.ru

был обнаружен бозон Хиггса с массой 125 ГэВ [1, 2] — последняя недостающая частица, предсказанная в рамках Стандартной модели (СМ). С тех пор проводились многочисленные исследования по проверке его основных свойств. На данный момент все измеренные характеристики бозона Хиггса совместимы с предсказаниями СМ [3]. Экспериментально наблюдались пять основных каналов распада бозона Хиггса: на пару калибровочных W^+W^- -бозонов, на два Z -бозона, на два фотона, на два тау-лептона, на пару b -кварк – анти- b -кварк [4].

Как известно, в настоящее время одной из наиболее актуальных проблем современной физики частиц является поиск явлений «новой физики», т. е. физики за пределами СМ [5]. К таким исследованиям относится поиск частиц темной материи (ТМ), существование которой следует из астрофизических наблюдений [6, 7]. Существует ряд расширенных СМ, которые называются моделями «хиггсовского портала», которые предсказывают распад бозона Хиггса СМ на пару частиц ТМ [8]. В этих моделях рассматриваются сценарии, в которых частицы, составляющие ТМ, взаимодействуют только с сектором Хиггса и являются слабодействующими массивными частицами (WIMP — Weakly Interacting Massive Particle) [9]. Частицы ТМ будут проходить через детектор, не взаимодействуя, и это косвенно определяется наличием недостающей поперечной энергии E_{miss}^T в конечном состоянии.

ПОИСК РАСПАДОВ БОЗОНА ХИГГСА НА ЧАСТИЦЫ ТМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

Модели «хиггсовского портала» лежат в основе поиска распадов бозона Хиггса на частицы ТМ в эксперименте ATLAS.

Диаграммы Фейнмана процессов рождения бозона Хиггса с последующим его распадом на частицы ТМ, которые использовались при анализе данных, представлены на рис. 1. При распаде бозона Хиггса на пару Z -бозонов в рамках СМ возможен последующий распад каждого Z -бозона на пару нейтрино. Так как нейтрино, которые образовались в результате этого распада, не регистрируются детектором, такой распад характеризуется большими значениями E_{miss}^T [10]. Этот процесс является основным фоновым процессом при поиске распада бозона Хиггса СМ на частицы темной материи, который невозможно исключить с помощью кинематических критериев отбора.

В эксперименте ATLAS с целью поиска распада бозона Хиггса на частицы ТМ были рассмотрены следующие процессы образования бозона Хиггса: в результате слияния векторных бозонов (VBF) [11], в событиях с рождением высокоэнергетической струи (mono-jet) [12], в ассоциативном рождении с векторным Z -бозоном (ZH) [13], при ассоциативном рождении с двумя топ-кварками (ttH) [14], в процессах слияния векторных бозонов с излучением дополнительного фотона (VBF + g) [15] (рис. 1). В данных процессах конечное состояние характеризуется боль-

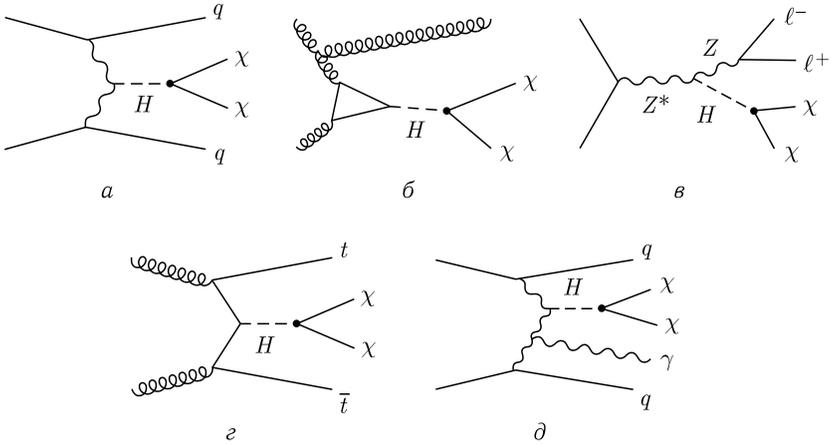


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для процессов рождения бозона Хиггса с последующим его распадом на частицы ТМ в модели «хиггсовского портала»: в результате слияния векторных бозонов (а), в событиях с высокоэнергетической струей (б), в ассоциативном рождении с векторным бозоном (в), в сочетании с двумя топ-кварками (г), в слиянии векторных бозонов с испускаемым фотоном в конечном состоянии (д)

шим значением E_{miss}^T и дополнительными физическими объектами, образованными в результате реакции.

Так, в анализе процесса рождения при слиянии векторных бозонов происходит отбор событий с использованием критериев, которые характеризуют искомое конечное состояние: $E_{\text{miss}}^T > 160$ ГэВ, две струи с большим разделением по псевдобыстроте ($\eta > 3,8$) и большая инвариантная масса двух струй ($m_{jj} > 0,8$ ТэВ).

Для исследования процесса с рождением высокоэнергетической струи производился отбор событий с учетом следующих критериев: события со струей с большим значением поперечного импульса ($p_T > 150$ ГэВ) и большим значением E_{miss}^T (> 200 ГэВ) в конечном состоянии.

При исследовании процесса с ассоциативным рождением калибровочного Z-бозона были отобраны события с двумя лептонами (от распада Z-бозона) и с $E_{\text{miss}}^T > 160$ ГэВ в конечном состоянии.

При исследовании процесса рождения бозона Хиггса в сочетании с двумя топ-кварками рассматривались события с различными конечными состояниями. Так как топ-кварк распадается практически в 100 % случаев на W-бозон и b-кварк, а W-бозон — на заряженный лептон (электрон, мюон, тау-лептон) и нейтрино или на пару кварков, то в зависимости от канала распада W-бозона были рассмотрены конечные состояния с 0, 1 и 2 лептонами.

В другом анализе при исследовании рождения бозона Хиггса в процессе слияния векторных бозонов с дополнительным испускаемым фото-

ном события характеризуются большим значением E_{miss}^T (> 150 ГэВ) и фотоном в конечном состоянии, в дополнение к типичной для данного процесса паре струй с высоким значением псевдобыстроты ($\eta > 3,0$) и большой инвариантной массой двух струй ($m_{jj} > 250$ ГэВ).

Анализ полученных в эксперименте данных проводился в наиболее чувствительной к искомому процессу области, которая называется «сигнальной» [16]. Все процессы, предсказываемые СМ, вклад которых в этой области отличен от нуля, являются фоновыми. Сигнальная область выбиралась на основе процедуры оптимизации отбора событий [16], которая проводилась индивидуально для каждого процесса с учетом его кинематики. Для процедуры оптимизации использовались как сигнальные, так и фоновые события, полученные с использованием генераторов частиц на основе моделирования методом Монте-Карло (МК). При создании МК-событий для сигнального и фонового процессов использовались следующие генераторы событий: POWHEG[17], MADGRAPH5 аMC@NLO [18], Sherpa [19], PYTHIA8 [20]. Для моделирования прохождения частиц через экспериментальную установку детектора ATLAS использовался пакет библиотек GEANT4 [21]. Вклад фоновых процессов в сигнальную область оценивался как с помощью МК-моделирования, так и с помощью методик, основанных на использовании экспериментальных данных (так называемые data-driven методы), суть которых заключается в определении поправочных коэффициентов в так называемых контрольных областях, т. е. в кинематических областях, где доминирует определенный тип фоновых событий [16].

В сигнальной области проводилось сравнение распределений по наиболее чувствительным для каждого процесса кинематическим переменным между экспериментальными данными и предсказаниями СМ. Признаком, указывающим на существование распадов бозона Хиггса на частицы ТМ, является наличие статистически и систематически значимых отклонений экспериментальных данных от предсказаний СМ. Например, в процессе рождения при слиянии векторных бозонов были проанализированы экспериментальные спектры по таким кинематическим переменным, как E_{miss}^T и инвариантная масса двух струй m_{jj} [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS

Исследования по поиску распадов бозона Хиггса на частицы ТМ были проведены коллаборацией ATLAS с использованием данных, полученных в протон-протонных столкновениях на БАК за первый ($\sqrt{s} = 7, 8$ ТэВ) и второй ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ) периоды работы, с полными значениями светимостей $4\text{--}20,3$ и $139\text{--}140$ фб⁻¹ для каждого периода соответственно. На основании анализа экспериментальных данных для каждого процесса отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Были получены верхние пределы для вероятности распада бозона Хиггса на частицы ТМ, которые

Верхние пределы вероятности распада бозона Хиггса на частицы ТМ для каждого процесса его рождения и их статистическая комбинация, полученные при 95%-м уровне достоверности в эксперименте ATLAS [22]

Процесс рождения бозона Хиггса	Ожидаемый предел	Наблюдаемый предел
Mono-jet	0,383	0,329
VBF + g	0,346	0,375
ttH	0,295	0,376
ZH	0,185	0,185
VBF	0,103	0,145
Run2	0,080	0,113
Run1	0,265	0,252
Run1 + Run2	0,077	0,107

были определены с использованием метода максимального правдоподобия (таблица).

С целью повышения точности полученных верхних пределов в эксперименте ATLAS была проведена работа по объединению (статистическая комбинация) полученных результатов для исследованных каналов рождения [22]. Под верхним пределом в таком случае мы понимаем оценку, полученную для совместной функции максимального правдоподобия, где верхний предел является интересующим параметром [23]. Полученные результаты представлены на рис. 2 и в таблице.

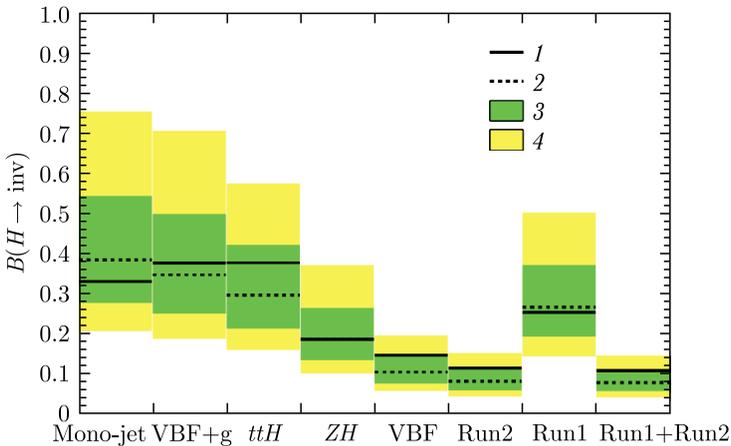


Рис. 2. Верхние пределы для вероятностей распадов бозона Хиггса на частицы ТМ в различных процессах его рождения, полученные в эксперименте ATLAS, и их статистическая комбинация. На гистограмме представлены наблюдаемый (1) и ожидаемые (2) пределы при 68%-м (3) и 95%-м (4) уровне достоверности [22]

Наблюдаемый (ожидаемый) верхний предел, полученный с учетом комбинации результатов за первый и второй периоды работы (Run1 + Run2), составил 0,107 (0,077) при 95%-м уровне достоверности [22]. Этот результат является более строгим по сравнению с предыдущей оценкой при объединении результатов, полученных в эксперименте ATLAS [24].

Результаты эксперимента ATLAS сравнивались с данными экспериментов по прямому поиску частиц ТМ [24]. Существуют различные методики проведения экспериментов по прямому поиску, одной из которых является измерение спектра ядер отдачи при рассеянии частиц ТМ на ядрах мишени или детектора. Наблюдаемый верхний предел, определенный в эксперименте ATLAS, может быть преобразован в предел независимого от спина сечения рассеяния WIMP и нуклона (WIMP–нуклон) [25], который можно было бы сравнить с результатами экспериментов по прямому поиску.

Интерпретация предела осуществляется в рамках моделей «хиггсовского портала» с использованием эффективной теории поля, где предполагается, что медиатор новых взаимодействий имеет энергию выше уровня ТэВ и, следовательно, значительно превышает масштаб, связанный с массой бозона Хиггса [26, 27]. Этот подход предполагает, что распады бозона Хиггса на пару частиц WIMP возможны при определен-

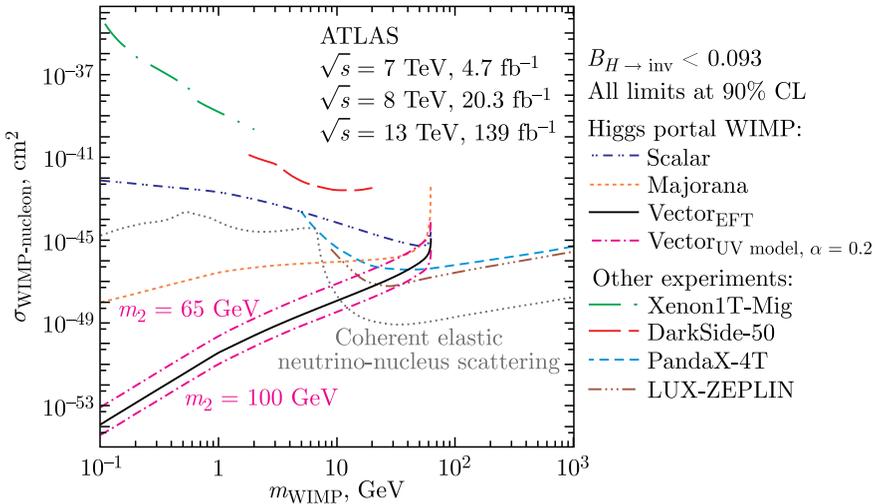


Рис. 3. Верхние пределы для сечений рассеяния ТМ на нуклонах в зависимости от массы WIMP (в доверительном интервале 90%), полученные в эксперименте ATLAS, в сравнении с измеренными в экспериментах по прямому поиску Xenon1T-Mig, DarkSide-50, PandaX-4T и LUX-ZEPLIN. Результаты представлены для моделей скалярного, майорановского и векторного кандидатов на частицы ТМ. Представлены пределы с использованием моделей, основанных на эффективной теории поля, включающие «темный» бозон Хиггса с массой 65 и 100 ГэВ [22]

ных кинематических условиях ($m_{\text{WIMP}} < m_H/2$) и что частица WIMP может быть либо скаляром, либо фермионом Майораны, либо векторным состоянием. Для векторных состояний WIMP также были рассмотрены ультрафиолетовые завершённые модели (UV completion) [28], где векторный кандидат на роль ТМ вводится как калибровочное поле группы $U(1)$, расширяющее симметрию СМ. Также вводится «темный» хиггсовский сектор, который генерирует массу векторного бозона через механизм спонтанного нарушения симметрии Хиггса.

Сравнение результатов эксперимента ATLAS с измерениями, полученными в ходе экспериментов Xenon1T-Mig [29], DarkSide-50 [30], PandaX-4T [31] и LUX-ZEPLIN [32], представлено на рис.3. Из приведенного сравнения следует взаимодополняемость прямых и коллайдерных экспериментов. Так, коллайдерные эксперименты имеют более высокую чувствительность для меньших масс WIMP (< 10 ГэВ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте ATLAS на БАК был проведен анализ данных pp -столкновений, накопленных за первый ($\sqrt{s} = 7, 8$ ТэВ) и второй ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ) периоды работы БАК, с целью поиска распадов бозона Хиггса на частицы ТМ. Исследованы различные процессы рождения бозона Хиггса СМ. Результаты, полученные в разных процессах за оба периода набора данных, были объединены с целью повышения точности наблюдаемого предела для распада бозона Хиггса на частицы ТМ. По результатам этого объединения верхний наблюдаемый (ожидаемый) предел для распада бозона Хиггса в эксперименте ATLAS составил 0,107 (0,077) при 95%-м уровне достоверности. Сравнение результатов, полученных в эксперименте ATLAS, с результатами экспериментов по прямому поиску показало, что результаты экспериментов, проводимых на коллайдере, имеют лучшую чувствительность в области малых масс WIMP (< 10 ГэВ). Исследования по поиску распадов бозона Хиггса на частицы ТМ планируется продолжать с использованием данных третьего периода работы БАК (Run 3) при более высоких энергии и светимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ATLAS Collab.* Measurements of the Higgs Boson Production and Decay Rates and Coupling Strengths Using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the ATLAS Experiment // Eur. Phys. J. C. 2016. V.76, No.1; <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3769-y>.
2. *CMS Collab.* Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC // Phys. Lett. B. 2012. V.716, No.1. P.30-61; <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>.
3. *Jenni P., Virdee T.S.* The Discovery of the Higgs Boson at the LHC // Particle Physics Reference Library. V.1. Theory and Experiments / Ed. by

- H. Schopper. Cham: Springer Intern. Publ., 2020. P. 263–309; https://doi.org/10.1007/978-3-030-38207-0_6.
4. *Florian D. et al.* Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector. 2016. V. 2.
 5. *Paudel E. R.* Problems of Standard Model, Review // BMC J. Sci. Res. 2021. V. 4, No. 1. P. 65–73; <https://www.nepjol.info/index.php/bmcjsr/article/view/42253>.
 6. *Zwicky F.* On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae // *Astrophys. J.* 1937. V. 86. P. 217–246.
 7. *Rubin V. C., Ford Jr. W. K., Thonnard N.* Extended Rotation Curves of High-Luminosity Spiral Galaxies. IV. Systematic Dynamical Properties, Sa through Sc // *Astrophys. J. Lett.* 1978. V. 225. P. L107–L111.
 8. *Arcadi G., Djouadi A., Raidal M.* Dark Matter through the Higgs Portal // *Phys. Rep.* 2020. V. 842. P. 1–180; <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2019.11.003>.
 9. *Kamionkowski M.* WIMP and Axion Dark Matter. arXiv:hep-ph/9710467. 1997.
 10. *Bélanger G., Dumont B., Ellwanger U., Gunion J., Kraml S.* Status of Invisible Higgs Decays // *Phys. Lett. B.* 2013. V. 723, No. 45. P. 340–347; <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2013.05.024>.
 11. *ATLAS Collab.* Search for Invisible Decays of a Higgs Boson Using Vector-Boson Fusion in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // *J. High Energy Phys.* 2016. V. 2016, No. 1; [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01\(2016\)172](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01(2016)172).
 12. *ATLAS Collab.* Search for New Phenomena in Events with an Energetic Jet and Missing Transverse Momentum in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Rev. D.* 2021. V. 103, No. 11; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.103.112006>.
 13. *ATLAS Collab.* Search for Associated Production of a Z Boson with an Invisibly Decaying Higgs Boson or Dark Matter Candidates at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Lett. B.* 2022. V. 829. P. 137066; <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2022.137066>.
 14. *ATLAS Collab.* Search for a Scalar Partner of the Top Quark in the All-Hadronic $t\bar{t}$ Plus Missing Transverse Momentum Final State at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector // *Eur. Phys. J. C.* 2020. V. 80, No. 8; <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8102-8>.
 15. *ATLAS Collab.* Observation of Electroweak Production of Two Jets in Association with an Isolated Photon and Missing Transverse Momentum, and Search for a Higgs Boson Decaying into Invisible Particles at 13 TeV with the ATLAS Detector // *Eur. Phys. J. C.* 2022. V. 82, No. 2; <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09878-z>.
 16. *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, No. 1. P. 1–29; <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>.
 17. *Oleari C.* The POWHEG BOX // *Nucl Phys. B. Proc. Suppl.* 2010. V. 205–206. P. 36–41; *Loops and Legs in Quantum Field Theory.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563210001994>.
 18. *Atwall J. et al.* The Automated Computation of Tree-Level and Next-to-Leading Order Differential Cross Sections, and Their Matching to Parton Shower

- Simulations // *J. High Energy Phys.* 2014. V. 2014, No. 7; [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP07\(2014\)079](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP07(2014)079).
19. *Bothmann E. et al.* Event Generation with Sherpa 2.2 // *SciPost Phys.* 2019. V. 7, No. 3; <http://dx.doi.org/10.21468/SciPostPhys.7.3.034>.
 20. *Laycock P. et al.* ATLAS Data Preparation in Run 2 // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 898, No. 4. P. 042050; <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/898/4/042050>.
 21. *Agostinelli S. et al.* Geant4 — A Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 506, No. 3. P. 250–303; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
 22. *ATLAS Collab.* Combination of Searches for Invisible Decays of the Higgs Boson Using 139 fb^{-1} of Proton–Proton Collision Data at 13 TeV Collected with the ATLAS Experiment // *Phys. Lett. B.* 2023. V. 842. P. 137963; <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2023.137963>.
 23. *Cowan G., Cranmer K., Gross E., Vitells O.* Asymptotic Formulae for Likelihood-Based Tests of New Physics // *Eur. Phys. J. C.* 2011. V. 71, No. 2; <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1554-0>.
 24. *ATLAS Collab.* Combination of Searches for Invisible Higgs Boson Decays with the ATLAS Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 122, No. 23; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.231801>.
 25. *Antonio B. et al.* Recommendations on Presenting LHC Searches for Missing Transverse Energy Signals Using Simplified s -Channel Models of Dark Matter. arXiv:1603.04156. 2016.
 26. *Djouadi A., Falkowski A., Mambrini Y., Quevillon J.* Direct Detection of Higgs-Portal Dark Matter at the LHC // *Eur. Phys. J. C.* 2013. V. 73, No. 6; <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2455-1>.
 27. *Patt B., Wilczek F.* Higgs-Field Portal into Hidden Sectors. arXiv:hep-ph/0605188. 2006.
 28. *Zaazoua M., Truong L., Assamagan K. A., Fassi F.* Higgs Portal Vector Dark Matter Interpretation: Review of Effective Field Theory Approach and Ultraviolet Complete Models // *Lett. High Energy Phys.* 2022. V. 2022; <http://dx.doi.org/10.31526/lhep.2022.270>.
 29. *XENON Collab.* Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121, No. 11; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.111302>.
 30. *DarkSide-50 Collab.* Search for Low-Mass Dark Matter WIMPs with 12 Ton-Day Exposure of DarkSide-50. arXiv:2207.11966. 2023.
 31. *PandaX Collab.* Search for Solar ^8B Neutrinos in the PandaX-4T Experiment Using Neutrino-Nucleus Coherent Scattering // *Phys. Rev. Lett.* 2023. V. 130, No. 2; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.021802>.
 32. *LUX-ZEPLIN Collab.* First Dark Matter Search Results from the LUX-ZEPLIN (LZ) Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2023. V. 131, No. 4; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.041002>.