

DOI: 10.18721/JPM.11112

УДК 539.12

## ПОИСКИ ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

**А.Е. Басалаев, Ю.Г. Нарышкин**

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова национального  
исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
г. Гатчина, Российская Федерация

Одним из перспективных направлений исследований на Большом адронном коллайдере (БАК) является поиск частиц темной материи. Несмотря на значительное число свидетельств о существовании такой материи, а также многочисленные эксперименты по ее поиску, природу этой субстанции до сих пор установить не удалось. Основная гипотеза заключается в том, что темная материя состоит из слабо взаимодействующих массивных частиц. Коллайдерные эксперименты по поиску таких частиц наиболее чувствительны в случае спин-зависимых взаимодействий, а также для малых масс частиц темной материи для спин-независимых взаимодействий. В данной работе описаны стратегии поисков частиц темной материи на БАКе и представлены верхние пределы для сечений рождения частиц темной материи в сравнении с результатами других экспериментов; при этом использованы экспериментальные данные, полученные в 2015 – 2016 гг. экспериментами ATLAS и CMS. В заключение обсуждаются перспективы дальнейших поисков темной материи на БАКе.

**Ключевые слова:** темная материя; большой адронный коллайдер; слабо взаимодействующие массивные частицы; моно- $X$

**Ссылка при цитировании:** Басалаев А.Е., Нарышкин Ю.Г. Поиски частиц темной материи на Большом адронном коллайдере // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 1. С. 122 – 137. DOI: 10.18721/JPM.11112

## DARK MATTER SEARCHES AT THE LARGE HADRON COLLIDER

**A.E. Basalaev, Yu.G. Naryshkin**

Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center “Kurchatov Institute”,  
Gatchina, Russian Federation

One of the promising lines of investigation at the Large Hadron Collider (LHC) is a search for dark matter particles. Despite a large body of evidence for dark matter existence, its nature remains unknown. The leading hypothesis is that dark matter consists of weakly interacting massive particles. Collider searches for such particles are most sensitive in the case of spin-dependent interactions, and for the low masses of dark matter particles in the case of spin-independent interactions. The strategies of dark matter searches at the LHC are described, and upper limits on dark matter-nucleon cross-sections based on the experimental data collected in 2015 and 2016 by the ATLAS and CMS collaborations are presented in comparison with the results of

other experiments. In conclusion, the perspectives of further searches of dark matter at the LHC are discussed.

**Key words:** dark matter; LHC; ATLAS; CMS; WIMP; dark matter associative production; mono- $X$

**Citation:** A.E. Basalaeв, Yu.G. Naryshkin, Dark matter searches at the Large Hadron Collider, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (1) (2018) 122 – 137. DOI: 10.18721/JPM.11112

### Введение

Одной из актуальных задач, стоящих перед экспериментами на Большом адронном коллайдере, который расположен в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария), является поиск частиц темной материи. Впервые гипотеза о существовании такой субстанции была выдвинута голландским астрономом Якобусом Каптейном в 1922 году по результатам изучения скоростей вращения галактик [1]. Широкое распространение термин «темная материя» получил после работ Фрица Цвикки [2].

На сегодняшний день известны астрофизические наблюдения, которые указывают на существование темной материи. К ним относятся изучение скоростей вращения галактик [3], гравитационное линзирование [4], структура скопления Пули [5] и т. п. Указание на небарионную природу темной материи следует из того, что теория первичного нуклеосинтеза предсказывает распространенность химических элементов во Вселенной, которая хорошо согласуется с наблюдаемой барионной материей [6]. Анализ распределения неоднородностей реликтового излучения также указывает на наличие небарионной темной материи [7].

В качестве одного из возможных образований темной материи рассматриваются массивные астрономические компактные объекты – MACHOS. Исследования гравитационного микролинзирования [8, 9] исключают вклад таких объектов с массами в диапазоне от  $0,6 \cdot 10^{-7}$  до  $15 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  – масса Солнца) как возможных образований темной материи. Согласно последним оценкам, темная материя составляет около 26,8 % от полной массы-энергии Вселенной, в то время как доля барионной материи не превышает 5 % [10].

Несмотря на значительный объем косвенных свидетельств существования темной

материи, установить ее природу до сих пор не удалось. Для объяснения такого феномена предпринимались попытки построения теорий модифицированной гравитации, которые столкнулись со значительными трудностями при попытке объяснить все имеющиеся экспериментальные данные [11]. На сегодняшний день основная гипотеза заключается в том, что темная материя состоит из слабо взаимодействующих массивных частиц (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs) [12], которые взаимодействуют с веществом только посредством гравитации и некоего слабого взаимодействия.

Частицы темной материи появляются в некоторых расширениях Стандартной модели. Например, в минимальном суперсимметричном расширении Стандартной модели [13] одной из возможных частиц темной материи считается нейтралино (Lightest Supersymmetric Particle, LSP). В качестве частиц темной материи также рассматриваются стерильные нейтрино [14] и аксионы [15]. Подробный обзор частиц, подходящих на роль объектов темной материи, можно найти в работе [16].

В настоящее время проводятся различные эксперименты по поиску частиц темной материи. Эти опыты можно разделить на прямые, косвенные и коллайдерные.

В экспериментах по прямому поиску частиц темной материи изучаются эффекты взаимодействия частиц темной материи с ядрами мишени [17 – 19]. Подробный обзор прямых экспериментов можно найти в работе [20]. Как правило, такие исследования выполняются в лабораториях, расположенных глубоко под землей (для уменьшения фона), например, в лаборатории, расположенной в Гран-Сассо (Италия).

В экспериментах по косвенному поиску частиц темной материи изучаются эффекты, связанные с аннигиляцией частиц и античастиц темной материи, в результате

которой возникают частица и античастица Стандартной модели, например пары электрон-позитрон или протон-антипротон [21, 22]. В этих экспериментах измеряют отношение количества частиц к количеству античастиц в зависимости от энергии. На основе сравнения измеренных спектров с результатами расчетов, полученными для излучения от известных космических объектов, делаются выводы о существовании темной материи. Другой вариант косвенных экспериментов состоит в измерении потока гамма-излучения, превышение которого над ожидаемым свидетельствует об аннигиляции частиц с античастицами темной материи [23].

В третьем, коллайдерном, типе экспериментов осуществляется поиск частиц темной материи, которые рождаются в результате аннигиляции кварка и антикварка. Поиск таких частиц выполняется путем обнаружения отклонений экспериментальных спектров от предсказаний Стандартной модели.

К настоящему времени в некоторых исследованиях были получены указания на возможное существование частиц темной материи. Например, в эксперименте DAMA [24] изучалось рассеяние частиц темной материи на ядрах мишени. С этой целью измерялся спектр ядер отдачи в течение нескольких лет. Предполагается, что наша галактика находится в облаке темной материи. Поскольку Солнце движется относительно центра галактики со скоростью 220 км/с, а Земля, вращаясь вокруг Солнца со скоростью 30 км/с, движется с разной скоростью относительно центра галактики в различные периоды времени, частота взаимодействий частиц темной материи с ядрами мишени будет разной. В результате наблюдений были обнаружены годовые модуляции сигнала от рассеяния частиц на ядрах, на уровне 9,3 стандартных отклонений, которые можно объяснить рассеянием частиц темной материи на ядрах мишени.

В другом эксперименте — AMS II — были измерены энергетические спектры космических позитронов и антипротонов. Данные этих измерений отличаются от результатов расчетов, которые описывают

взаимодействие космических лучей с межзвездной средой, но хорошо согласуются с предсказаниями моделей, согласно которым существуют частицы темной материи с массой 1 ТэВ.

Тем не менее, чтобы сделать окончательные выводы о существовании частиц темной материи, необходимо исключить вклад излучения от дополнительных источников, например таких, как пульсары. Для этого необходимо исследовать энергетический спектр позитронов в области больших энергий свыше 1 ТэВ, что, в свою очередь, требует большего количества данных; их предполагается получить к 2025 году.

В данной статье представлен обзор исследований по поиску частиц темной материи (WIMPs), выполненных на Большом адронном коллайдере экспериментами ATLAS и CMS в 2015 – 2016 гг. при энергии протон-протонных взаимодействий  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ.

### Эксперименты на коллайдере

Первые поиски частиц темной материи на коллайдере были выполнены в лаборатории Ферми на ускорителе Тэватрон в протон-антипротонных взаимодействиях в экспериментах CDF [25] и D0 [26] при энергии  $\sqrt{s} = 1,96$  ТэВ.

В эксперименте CDF проводился анализ данных по ассоциативному рождению частиц темной материи и  $t$ -кварка. В результате этого исследования были установлены верхние пределы для сечения рождения частиц темной материи 0,5 пбн (пикобарн) для масс частиц темной материи в диапазоне 0 – 150 ГэВ/ $c^2$ .

В эксперименте D0 проводился анализ данных с целью поиска легкого калибровочного бозона, так называемого «темного фотона»  $\gamma_D$ , который предсказан минимальным суперсимметричным расширением Стандартной модели (MSSM). В результате анализа данных темный фотон  $\gamma_D$  не был обнаружен, но были установлены пределы для сечения его рождения.

С началом работы Большого адронного коллайдера поиски частиц темной материи идут по нескольким направлениям. В экспериментах на коллайдере изучается

образование частиц темной материи в результате аннигиляции кварка и антикварка, но при этом сами частицы темной материи не регистрируются детектором. Ввиду этого обстоятельства, регистрация событий с их рождением возможна только в процессах, где происходит образование дополнительных частиц. Например, в так называемом моно- $X$ -канале при аннигиляции кварка и антикварка образуется частица-переносчик взаимодействия, которая далее распадается на частицы темной материи. При этом до аннигиляции кварка и антикварка один из них испускает фотон  $\gamma$ ,  $Z$ - или  $W$ -бозон, или глюон, которые могут быть зарегистрированы детектором. Диаграмма Фейнмана для случая испускания глюона в начальном состоянии, с последующим образованием струи, показана на рис. 1, *a*.

В процессе ассоциативного рождения частиц темной материи (рис. 1, *b*) рождаются  $b\bar{b}$ - или  $t\bar{t}$ - пары кварков с последующим образованием адронных струй. При ассоциативном рождении частиц темной

материи вместо пары кварков может образоваться бозон Хиггса.

Еще одним направлением по поиску частиц темной материи является прямой поиск переносчика взаимодействия между частицами Стандартной модели и частицами темной материи, с помощью регистрации его распада на частицы Стандартной модели (рис. 1, *c*).

При анализе экспериментов, проводимых на коллайдере, применяется так называемый модельно-независимый анализ с использованием эффективной теории поля [27] или упрощенных моделей [28]. Предполагается, что частицы темной материи являются дираковскими фермионами.

В рамках эффективной теории поля описывается точечное взаимодействие двух частиц (кварка и антикварка) с последующим рождением частицы и античастицы темной материи. При таком описании поля присутствует два параметра: масса частицы (античастицы) темной материи, а также параметр

$$\Lambda^2 = M^2 / (g_\chi \cdot g_q),$$

где  $M$  — масса медиатора (частица-переносчик взаимодействия);  $g_\chi, g_q$  — константы связи медиатора с частицами темной материи и кварками, соответственно. Этот параметр характеризует силу взаимодействия между частицами Стандартной модели и частицами темной материи.

Такой подход справедлив лишь при условии, если масса промежуточной частицы (медиатора) больше переданного импульса, т. е.  $M \gg Q$ . В связи с увеличением энергии столкновения на Большом адронном коллайдере до 13 ТэВ, это условие зачастую нарушается, и в настоящее время область применения эффективной теории поля сильно ограничена, поэтому используются упрощенные модели, для которых выполнение данного условия не требуется.

При использовании упрощенных моделей рассматриваются частица (и античастица) темной материи, а также переносчик взаимодействия между частицами Стандартной модели и частицами темной материи. Массы частиц темной материи  $m_\chi$  и переносчика взаимодействия  $m_\eta$  задают-

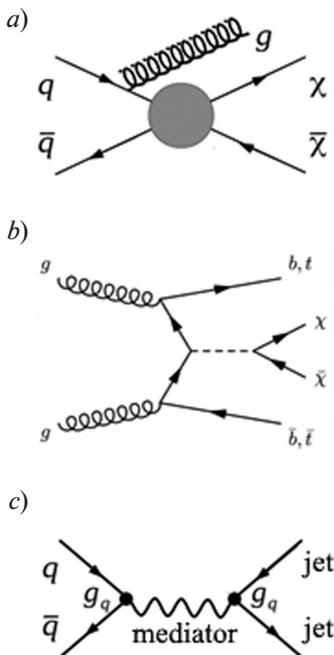


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для процессов рождения частиц темной материи на Большом адронном коллайдере: *a* — моно- $X$ -канал, *b* — ассоциативное рождение, *c* — поиски промежуточной частицы

ся как параметры. В качестве параметров также используют время жизни  $\Gamma$  (ширина распада) переносчика взаимодействия и его константы взаимодействия с частицами Стандартной модели и частицами темной материи ( $g_q$  и  $g_\chi$ ). Таким образом, применение упрощенной модели предполагает наличие пяти параметров.

Анализ данных выполняется в так называемой сигнальной области, т. е. в зоне, где вклад сигнальных событий по отношению к фоновым оказывается максимальным. Эта область выбирается на основе процедуры оптимизации отбора полезных событий. Для оптимизации используются как сигнальные, так и фоновые события, полученные с помощью моделирования методом Монте-Карло. Для оценки вклада фоновых процессов, к которым относятся процессы Стандартной модели, существуют различные методы, основанные как на расчетах с использованием моделирования методом Монте-Карло, так и на использовании экспериментальных данных. Методы оценки фона с использованием данных применяются в тех случаях, когда невозможно получить надежные оценки с помощью моделирования Монте-Карло из-за недостаточной точности описания процесса генератором событий и дополнительных неопределенностей, связанных как с описанием экспериментальной установки, так и функции отклика детектора. Как правило, такие оценки имеют большие систематические неопределенности. Для моделирования процессов рождения частиц темной материи используется генератор событий MadGraph [29]. При использовании упрощенных моделей рассматриваются различные типы переносчиков взаимодействия: векторный, аксиально-векторный, скалярный и псевдоскалярный, с различным набором констант связи и в широком диапазоне масс частиц [30]. Для окончательного выбора сигнальной области, т. е. зоны с максимальным вкладом сигнальных событий, используются критерии статистической значимости. В этой области проводится сравнение измеренных спектров со спектрами фоновых процессов.

### Поиски в канале моно- $X$

Как уже изложено выше, при поиске частиц темной материи в канале моно- $X$ , дополнительно регистрируется  $Z(W)$  – бозон, фотон или струя [31 – 33]. Так например, в процессе моно- $Z$  образуется  $Z$ -бозон, который может быть зарегистрирован по его распаду на электрон и позитрон, мюон и анти-мюон или кварк-антикварковую пару с образованием двух струй. Основным фоновым процессом в этом случае является рождение двух  $Z$ -бозонов ( $ZZ$ ), один из которых распадается на регистрируемые частицы (электроны, мюоны или адроны), а второй – на нейтрино. Разделить сигнальный и фоновый процесс рождения пары  $Z$ -бозонов с помощью кинематических переменных невозможно. Вклад этого процесса в сигнальной области оценивается из Монте-Карло-моделирования. Вклад второго по величине процесса – одновременное рождение  $W$ - и  $Z$ -бозонов – оценивался с помощью метода, основанного на использовании экспериментальных данных. Вклад остальных фоновых процессов существенно меньше упомянутых выше и оценивался с помощью других методов, основанных на экспериментальных данных.

На рис. 2, *a* показан измеренный спектр недостающей поперечной энергии  $E_T^{miss}$  для процесса моно- $Z$  после окончательного отбора событий в сигнальной области, полученный для интегральной светимости  $36,1 \text{ (фбн)}^{-1}$  в эксперименте ATLAS. Для уменьшения вклада фона от процессов рождения  $Z$ -бозонов со струями рассматривались события с  $E_T^{miss} > 90 \text{ ГэВ}$ . Как видно из рис. 2, экспериментальные спектры в пределах статистических и систематических ошибок хорошо согласуются с оценками фоновых событий. Пунктирной линией показан результат моделирования сигнала для частицы темной материи с массой  $m_\chi = 100 \text{ ГэВ}$  и медиатора с массой  $m_{med} = 500 \text{ ГэВ}$ , масштабированный с коэффициентом 0,27. На рис. 2, *b* показаны ограничения на массу частицы темной материи как функции массы промежуточной частицы, при распаде  $Z$ -бозона на пару электронов или мюонов, полученные в экс-

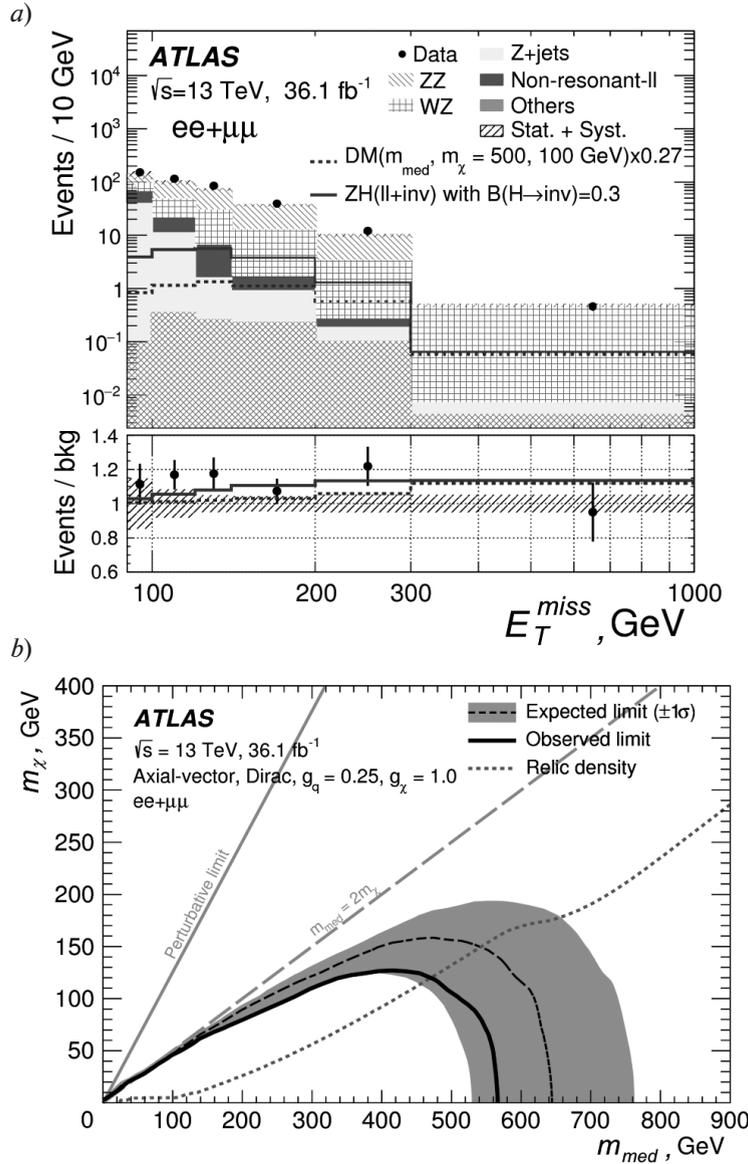


Рис. 2. Результаты поиска частиц темной материи в процессе моно-Z (эксперимент ATLAS,  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ): *a* – распределения по недостающей поперечной энергии  $E_T^{\text{miss}}$  для объединенных  $ee$ - и  $\mu\mu$ -каналов; *b* – ожидаемые и наблюдаемые пределы для значений масс медиатора и частицы темной материи.

*a* – черными точками показаны данные, гистограммами – результаты оценки различных фоновых процессов, штрихами снизу-вверх – полная систематическая ошибка, пунктирной линией – результаты моделирования сигнальных событий для  $m_c = 100$  ГэВ и  $m_{\text{med}} = 500$  ГэВ

перименте ATLAS при анализе данных для аксиально-векторной модели переносчика взаимодействия и константами связи, равными  $g_q = 2,5$  и  $g_\chi = 1,0$ . Область значений масс частиц, которая находится внутри сплошной линии, исключена [31]. Аналогичные результаты были получены в эксперименте CMS [34]. Поиски темной материи

в процессах моно- $X$  с излучением в начальном состоянии  $W$ - или  $Z$ -бозонов с распадом на адроны представлены в работе [35].

### Ассоциативное рождение частиц темной материи

При ассоциативном рождении, кроме частиц темной материи дополнительно

рождаются одна или две частицы. Например, при рождении скалярного или псевдоскалярного переносчика взаимодействия, который распадается на частицы темной материи, также рождаются  $b\bar{b}$ - или  $t\bar{t}$ -кварковые пары с последующей адронизацией в струи (см. рис. 1, *b*). В этом случае при отборе сигнальных событий обязательным условием является наличие двух  $b$ - или  $t$ -кварковых струй. Основными фоновыми

процессами в данном случае являются следующие:

рождение  $Z$ -бозона и двух струй, с последующим распадом  $Z$ -бозона на два нейтрино;

процессы с рождением  $b\bar{b}$ - и  $t\bar{t}$ -кварковых пар.

На рис. 3 показаны верхние пределы сечения рождения частиц темной материи в диапазоне масс от 10 ГэВ до 1 ТэВ, получен-

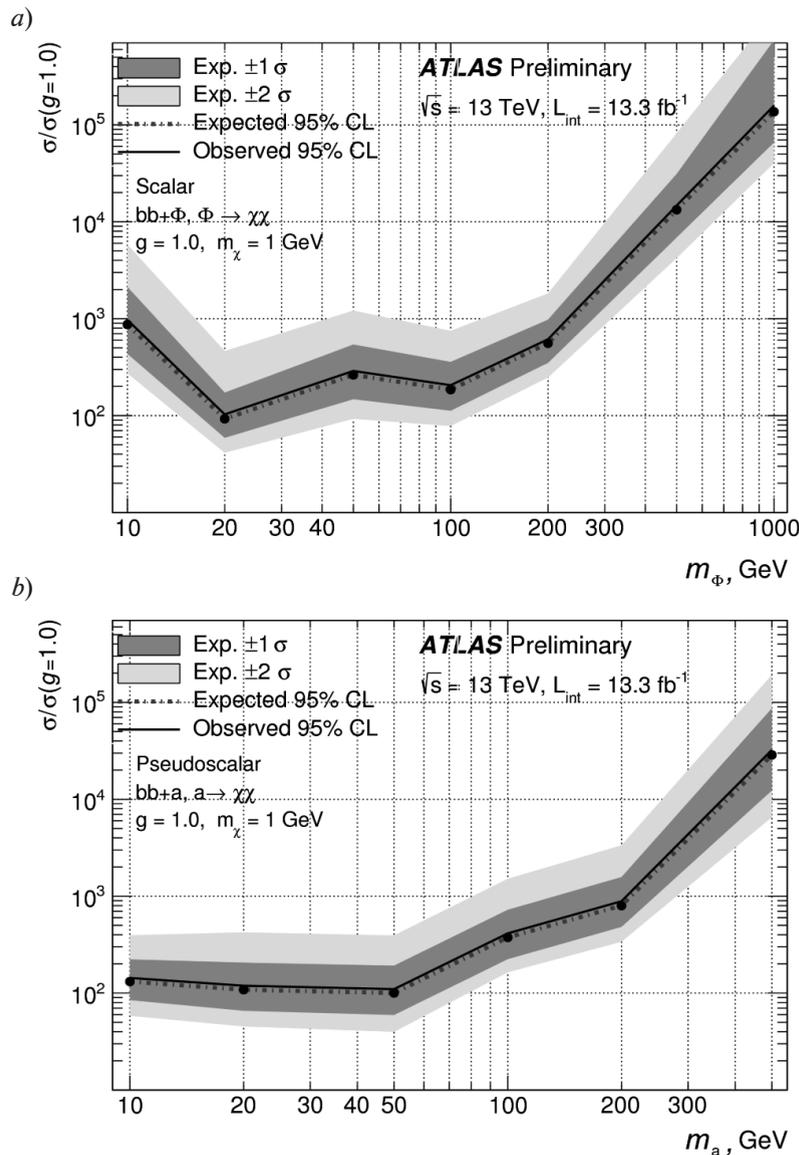


Рис. 3. Ожидаемые и наблюдаемые пределы (доверительный интервал 95 %) для сечений рождения частиц темной материи в зависимости от массы медиатора для случаев скалярного (*a*) и псевдоскалярного (*b*) медиаторов.

Расчеты сделаны для массы частицы темной материи, равной 1 ГэВ;  $g_q = g_\chi = 1,0$ . Проанализированы данные 2015–2016 гг.; интегральная светимость –  $13,3 \text{ (фбн)}^{-1}$  при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$  [36]

ные в эксперименте ATLAS [36], для случая скалярного переносчика взаимодействия с массами в интервале 10 – 1000 ГэВ и для псевдоскалярного переносчика взаимодействия с массами в интервале 10 – 400 ГэВ, в зависимости от массы частицы темной материи, при значении константы связи  $g_q = 1$ . Результаты получены на основе ана-

лиза данных 2015–2016 годов при интегральной светимости  $36,1 \text{ (фбн)}^{-1}$ .

Исследуются также и другие варианты ассоциативного рождения частиц темной материи, например, некоторые расширения Стандартной модели предсказывают образование тяжелого векторного бозона  $Z'$  с последующим его распадом на ча-

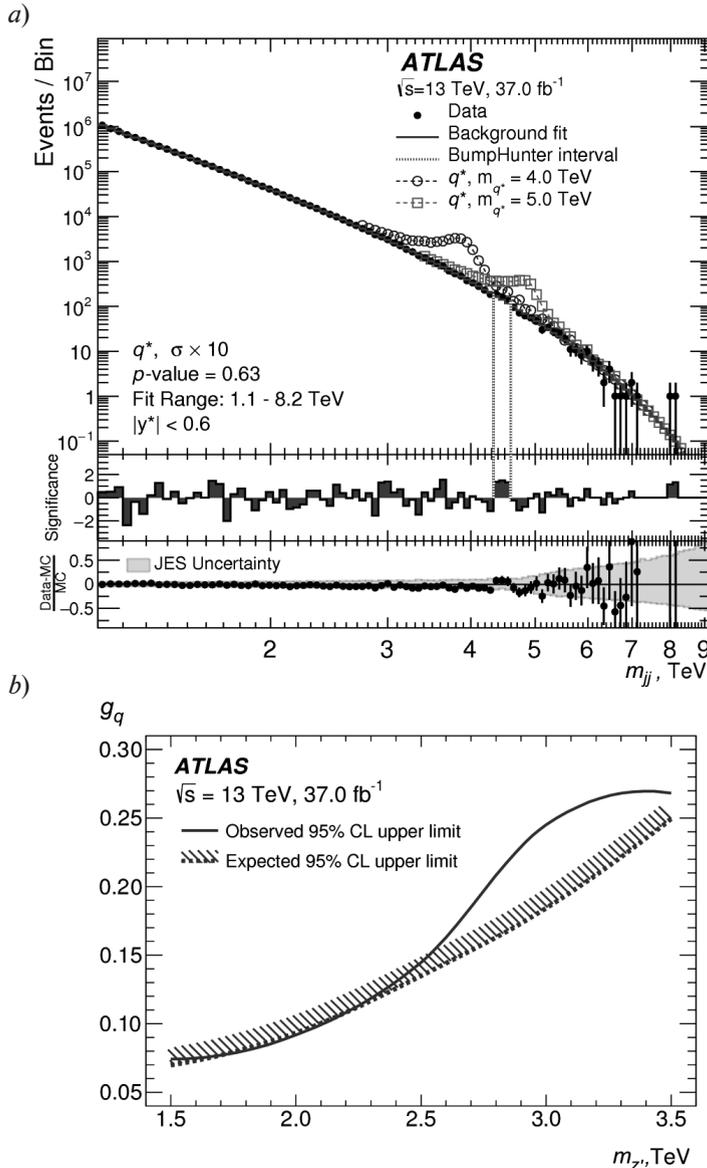


Рис. 4. Результаты исследований по прямому поиску медиатора темной материи (эксперимент ATLAS для двухструйных событий): *a* – спектры по инвариантной массе для данных, фоновых и сигнальных событий; *b* – полученные пределы (доверительный интервал 95 %) на константу  $g_q$  в зависимости от массы промежуточной частицы (модель  $Z'$ -медиатора описана в работе [41]).

В нижней части рис. 4, *a* представлено сравнение эксперимента с результатами моделирования Монте-Карло, сплошная полоска – систематическая ошибка

стицы темной материи [37], или на два бозона Хиггса: легкий нейтральный  $h$  и CP-нечетный псевдоскалярный нейтральный  $A^0$  с последующим распадом  $A^0$  на частицы темной материи  $A^0 \rightarrow \chi\chi$  [38]. Рождение частиц темной материи возможно и при распаде тяжелого CP-четного нейтрального бозона Хиггса  $H$  [38].

### Поиски переносчика взаимодействия

Переносчик взаимодействия между ча-

стицами Стандартной модели и частицами темной материи может также распадаться на частицы Стандартной модели, например кварки с образованием струй в конечном состоянии. Следует отметить, что прямые поиски переносчика взаимодействия возможны только в экспериментах на коллайдере. Существуют различные модели для частицы переносчика взаимодействия, например тяжелый векторный лептофобный бозон  $Z'$ , который имеет малое значение констан-

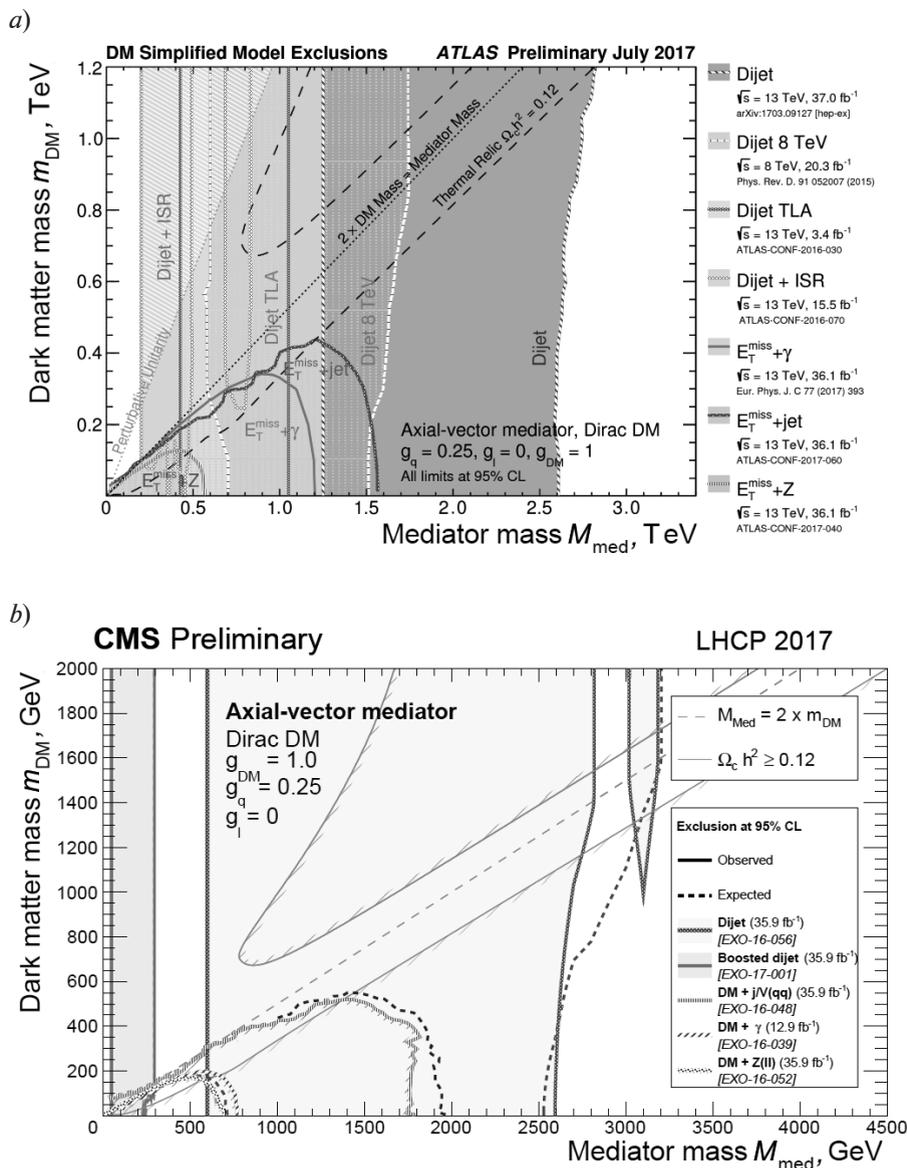


Рис. 5. Предельные значения для масс частицы темной материи в зависимости от массы промежуточной частицы, полученные в экспериментах ATLAS (a) и CMS (b).

При расчетах использовались константы взаимодействия медиатора с частицами темной материи  $g_\chi = 1,00$  и с кварками  $g_q = 0,25$  (одинаковы для всех типов кварков и для аксиально-векторного медиатора)



ты связи с лептонами [39], скалярные или псевдоскалярные частицы либо цветной скалярный переносчик взаимодействия [40]. На рис. 4, *a* показано распределение по инвариантной массе  $m_{ij}$  для двух струй, полученное в эксперименте ATLAS [41]. На этом же рисунке (кружки) показаны результаты

моделирования сигнальных событий для переносчиков взаимодействия с массами 4 и 5 ГэВ. Сплошной кривой показан результат аппроксимации распределения фона. Как видно из рисунка, данные хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной модели в исследуемой области.

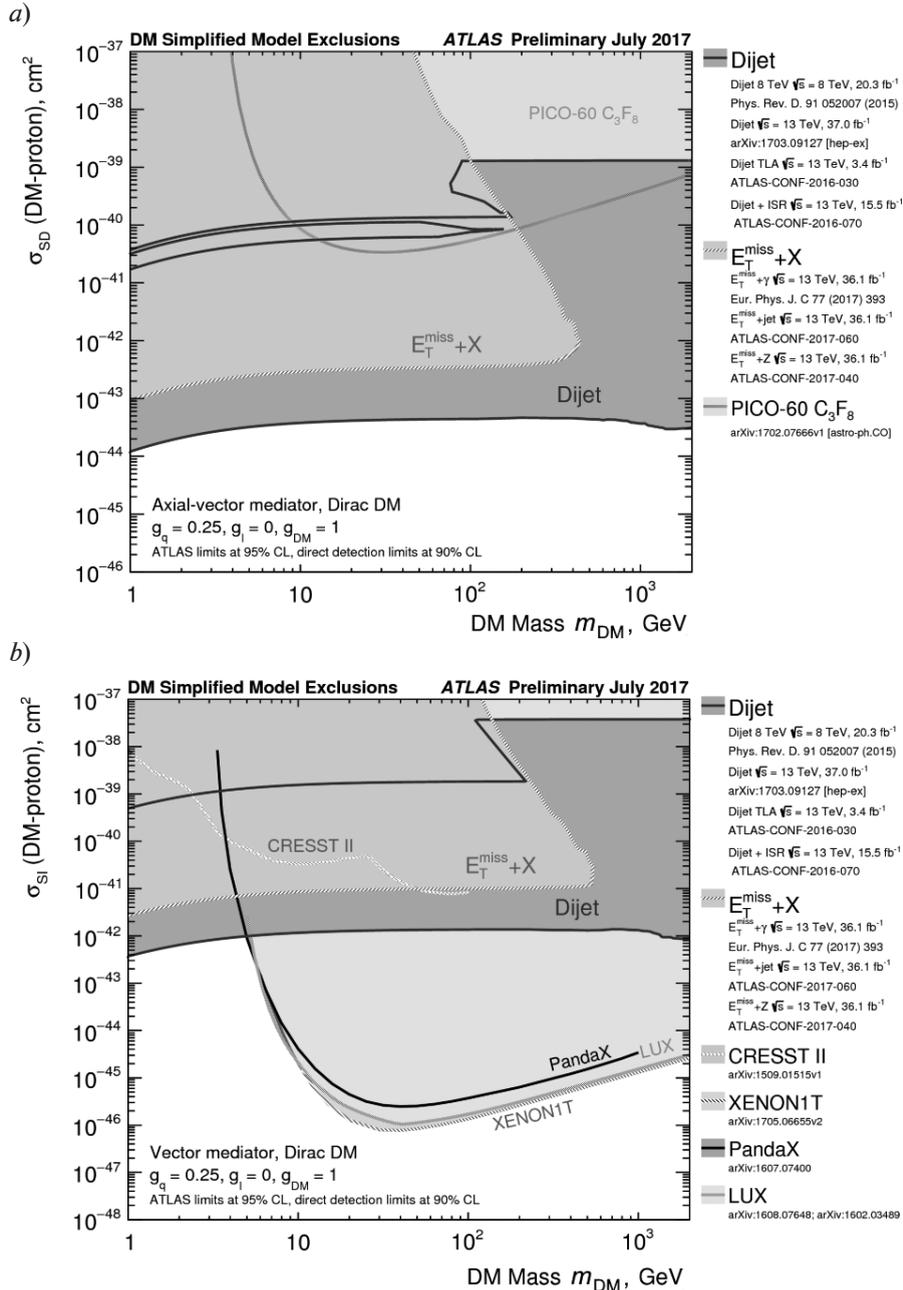


Рис. 6. Сравнение результатов, полученных в эксперименте ATLAS с результатами прямых измерений для спин-зависимых (*a*) и спин-независимых (*b*) сечений. Приведено сравнение с экспериментами PICO (*a*), а также с CRESST, XENON1T, LUX и PandaX (*b*)

Полученные пределы для значения константы связи переносчика взаимодействия с частицами Стандартной модели в зависимости от массы переносчика взаимодействия  $m_Z$  показаны на рис. 4, *b*. Для фиксированной массы сечение растёт с ростом значения  $g_q$ , и таким образом область значений слева и выше кривой – исключена.

#### Результаты коллайдерных экспериментов и их обсуждение

Предельные значения для масс частиц темной материи и аксиально-векторного медиатора, полученные в экспериментах ATLAS и CMS для процессов моно- $X$ , ассоциативного рождения частиц темной материи и поисков частицы медиатора, для значений константы взаимодействия медиатора с частицами Стандартной модели  $g_q = 0,25$  и медиатора с частицами темной материи  $g_\chi = 1,00$  показаны на рис. 5. Как следует из приведенных данных, наиболее сильные ограничения на массу медиатора получены при анализе двухструйных событий.

Сравнение результатов, полученных на БАК в эксперименте ATLAS, с результатами экспериментов по прямому поиску показаны на рис. 6. При таком сравнении рассматриваются как спин-зависимые, так и спин-независимые взаимодействия. На указанном рисунке представлены верхние пределы для сечений взаимодействия частиц темной материи в зависимости от их массы, полученные в эксперименте ATLAS при анализе двухструйных событий [41 – 44] и в канале моно- $X$  [31 – 33], причем приведено сравнение с результатами экспериментов по прямому поиску: CRESST [45], XENON1T [46], PICO [47], LUX [48] и PandaX [49]. Как следует из рис. 6, коллайдерные эксперименты в случае спин-зависимых взаимодействий оказываются более чувствительными, чем таковые по прямому поиску частиц темной материи (PICO, LUX). Для случая же спин-независимого взаимодействия (PandaX) результаты экспериментов по прямому поиску являются более чувствительными для значений масс частицы темной материи свыше 6 ГэВ.

#### Заключение

С начала работы Большого адронного коллайдера в экспериментах ATLAS и CMS было проведено большое количество исследований по поиску частиц темной материи в разных каналах. Для интерпретации результатов применялся модельно-независимый анализ с использованием различных гипотез для переносчика взаимодействия (векторный, аксиально-векторный, скалярный и псевдоскалярный). Был проанализирован большой диапазон возможных значений масс как частиц темной материи, так и переносчика взаимодействия, от 10 ГэВ до 1 ТэВ. Отклонений от предсказаний Стандартной модели не обнаружено, при этом установлены верхние пределы для сечений рождения частиц темной материи, а также для масс частиц темной материи в зависимости от массы переносчика взаимодействия. Представлены сравнения полученных пределов для сечений с результатами экспериментов по прямому поиску для спин-зависимого и спин-независимого взаимодействия: CRESST, XENON1T, PICO, LUX и PandaX. Установленные верхние пределы для сечений рождения частиц темной материи в экспериментах на Большом адронном коллайдере для случая спин-зависимого взаимодействия оказались ниже, чем для экспериментов по прямому измерению; другими словами, эксперименты на коллайдере были более чувствительны. В то же время для спин-независимых сечений эксперименты, проводимые на Большом адронном коллайдере, позволяют анализировать область масс частиц темной материи меньше 6 ГэВ, что недоступно в прямых измерениях.

Ожидается, что до конца второго периода набора данных на Большом адронном коллайдере будет накоплен объем данных, соответствующий интегральной светимости около  $120 \text{ (фбн)}^{-1}$ , что в 4 раза превышает имеющуюся интегральную светимость, использованную для представленных результатов. Для интерпретации данных предполагается использовать, в том числе, расширение Стандартной модели, включающее дополнительный дублет бозонов Хигг-



гса — модель 2HDM [50]. Кроме пределов для сечений в зависимости от массы частиц темной материи и переносчика взаимодействия, предполагается установить пределы для параметров моделей, например отно-

шения вакуумных средних двух хиггсовских полей  $t\beta$  и угол смешивания  $\alpha$ .

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-02-00015.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kapteyn J.C.** First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system // *The Astrophysical Journal*. 1922. Vol. 55. Pp. 302–327.
2. **Zwicky F.** Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // *Helvetica Physica Acta*. 1933. Vol. 6. Pp. 110–127.
3. **Rubin V.C., Thonnard N., Ford W.K., Jr.** Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV. Systematic dynamical properties, SA through SC // *The Astrophysical Journal Letters*. 1978. Vol. 225. Pp. L107–L111.
4. **Taylor A.N., Dye I S., Broadhurst T.J., Benitez N., van Kampen E.** Gravitational lens magnification and the mass of Abell 1689 // *The Astrophysical Journal*. 1998. Vol. 501. No. 2. Pp. 539–553.
5. **Markevitch M., Gonzalez A.H., Clowe D., et al.** Direct constraints on the dark matter self-interaction cross-section from the merging galaxy cluster 1E0657-56 // *The Astrophysical Journal*. 2003. Vol. 606. No. 2. Pp. 819–824.
6. **Patrignani C., Agashe K., Aielli G., et al.** (Particle Data Group). Big-Bang nucleosynthesis // *Chinese Physics. C*. 2016. Vol. 40. No. 10. P. 380.
7. **Canetti L., Drewes M., Shaposhnikov M.** Matter and antimatter in the universe // *New Journal of Physics*. 2012. Vol. 14. No. 9. P. 095012.
8. **Tisserand P., Le Guillou L., Afonso C., et al.** Limits on the MACHO content of the Galactic Halo from the EROS-2 survey of the Magellanic Clouds // *Astronomy and Astrophysics*. 2007. Vol. 469. No. 2. Pp. 387–404.
9. **Graff D.S., Freese K.** Analysis of a Hubble space telescope search for Red Dwarfs: Limits on baryonic matter in the Galactic Halo // *The Astrophysical Journal*. 1996. Vol. 456. No. 1. Pp. L49.
10. **Ade P.A.R., Aghanim N., Alves M.I.R., et al.** (Planck Collaboration). Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results // *Astronomy and Astrophysics*. 2014. Vol. 571. P. A1.
11. **Milgrom M.** A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis // *The Astrophysical Journal*. 1983. Vol. 270. Pp. 365–370.
12. **Kamionkowski M.** WIMP and axion dark matter. <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9710467>.
13. **Baer H., Tata X.** Weak scale supersymmetry: from superfields to scattering events. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 556 p.
14. **Dodelson S., Widrow L.M.** Sterile neutrinos as dark matter // *Physical Review Letters*. 1994. Vol. 72. No. 1. Pp. 17–20.
15. **Holman R., Lazarides G., Shafi Q.** Axions and the dark matter of the universe // *Physical Review. D*. 1983. Vol. 27. No. 4. P. 995.
16. **Feng J.L.** Dark matter candidates from particle physics and methods of detection // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2010. Vol. 48. No.1 Pp. 495–545.
17. **Bernabei R., Belli P., Bussolotti A., et al.** The DAMA/LIBRA apparatus, 17 // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A*. 2008. Vol. 592. No. 3. Pp. 297–315.
18. **Aprile E., Aalbers J., Agostini F., et al.** First dark matter search results from the XENON1T experiment. <https://arxiv.org/pdf/1705.06655>.
19. **Davis J.H., McCabe C., Boehm C.** Quantifying the evidence for dark matter in CoGeNT data // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2014. Vol. 2014. No. 08. P. 014.
20. **Рябов В.А., Царев В.А., Цховребов А.М.** Поиски частиц темной материи // *Успехи физических наук*. 2008. Т. 178. № 11. С. 1129–1164.
21. **Aguilar M., Alberti M., Alpat G., et al.** (AMS Collaboration). First result from the Alpha magnetic spectrometer on the International space station: precision measurement of the positron fraction in primary cosmic rays of 0.5–350 GeV // *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110. No. 14. P. 141102.
22. **Casolino M., De Simone N., Bongue D., et al.** Two 2017s of flight of the Pamela experiment: results and perspectives. <https://arxiv.org/pdf/0810.4980> (2008).
23. **Ackermann M., Ajello M., Albert A., et al.** (Fermi-LAT Collaboration). The Fermi Galactic center GeV excess and implications for dark matter // *The Astrophysical Journal*. 2017. Vol. 840. No. 1. P. 43.
24. **Bernabei R., Belli P., Cappella F., et al.** (DAMA-LIBRA Collaboration). Model independent result on possible diurnal effect in DAMA/LIBRA-phase 1 // *The European Physical Journal. C*. 2014. Vol. 74. No. 3. P. 2827.

25. **Aaltonen T., Alvarez Gonzalez B., Amerio S., et al.** (CDF Collaboration). Search for a dark matter candidate produced in association with a single top quark in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV // *Physical Review Letters*. 2012. Vol. 108. No. 20. P. 201802.
26. **Abazov V.M., Abbott B., Abolins M., et al.** (D0 Collaboration). Search for dark photons from supersymmetric hidden valleys // *Physical Review Letters*. 2009. Vol. 103. No. 8. P. 081802.
27. **Liem S., Bertone G., Calore F., et al.** Effective field theory of dark matter: a global analysis // *Journal of High Energy Physics*. 2016. Vol. 2016. No. 9. P. 077.
28. **Alves D., Arkani-Hamed N., Arora S., et al.** Simplified models for LHC new physics searches // *Journal of Physics. G*. 2012. Vol. 39. No 10. P 105005.
29. **Alwall J., Frederix R., Frixione S., et al.** The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations // *Journal of High Energy Physics*. 2014. Vol. 2014. No. 7. P. 079.
30. **Albert A., Backovic M., Boveia A., et al.** Recommendations of the LHC dark matter working group: Comparing LHC searches for heavy mediators of dark matter production in visible and invisible decay channels. <https://arxiv.org/pdf/1703.05703>.
31. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for an invisibly decaying Higgs boson or dark matter candidates produced in association with a  $Z$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. <http://cds.cern.ch/record/2273610/files/ATLAS-CONF-2017-040.pdf>.
32. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for dark matter at  $\sqrt{s} = 13$  TeV in final states containing an energetic photon and large missing transverse momentum with the ATLAS detector // *The European Physical Journal. C*. 2017. Vol. 77. No. 6. P. 393.
33. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for dark matter and other new phenomena in events with an energetic jet and large missing transverse momentum using the ATLAS detector. <http://cds.cern.ch/record/2273876/files/ATLAS-CONF-2017-060.pdf>
34. **Khachatryan V., Sirunyan A.M., Tumasyan A. et al.** (CMS Collaboration). Search for dark matter, invisible Higgs boson decays, and large extra dimensions in the  $Z \rightarrow ll + E_T^{miss}$  final state using 2016 data. <http://inspirehep.net/record/1599663/files/EXO-16-052-pas.pdf>.
35. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for dark matter produced in association with a hadronically decaying vector boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector // *Physics Letters B*. 2016. Vol. 763. Pp. 251–268.
36. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for dark matter production associated with bottom quarks with 13.3 fb<sup>-1</sup> of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector at the LHC. <http://cds.cern.ch/record/2206279/files/ATLAS-CONF-2016-086.pdf>.
37. **Alves A., Berlin A., Profumo S., Farinaldo S.Q.** Dark matter complementarity and the  $Z'$  portal // *Phys. Rev. D*. 2015. Vol. 92. No. 8. P. 083004.
38. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration) Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to two photons at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. <https://arxiv.org/pdf/1706.03948>.
39. **Buckley M.R., Hooper D., Rosner J.L.** A leptophobic  $Z'$  and dark matter from grand unification // *Physics Letters. B*. 2011. Vol. 703. No. 3. Pp. 343–347.
40. **Ko P., Natale A., Park M., Yokoya H.** Simplified DM models with the full SM gauge symmetry: the case of  $t$ -channel colored scalar mediators // *Journal of High Energy Physics*. 2017. Vol. 2017. No. 1. P. 86.
41. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for new phenomena in dijet events using 37 fb<sup>-1</sup> of  $pp$  collision data collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. <https://arxiv.org/pdf/1703.09127>.
42. **Aad G., Abbott B., Abdallah J., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for new phenomena in the dijet mass distribution using  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector // *Physical Review. D*. 2015. Vol. 91. No. 5. P. 052007.
43. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for light dijet resonances with the ATLAS detector using a Trigger-object level analysis in LHC  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. <http://inspirehep.net/record/1470774/files/ATLAS-CONF-2016-030.pdf>.
44. **Aaboud M., Aad G., Abbott B., et al.** (ATLAS Collaboration). Search for new light resonances decaying to jet pairs and produced in association with a photon or a jet in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. <http://inspirehep.net/record/1480050/files/ATLAS-CONF-2016-070.pdf>.
45. **Angloher G., Bento A., Bucci C., et al.** (CREST Collaboration). Results on light dark matter particles with a low-threshold CREST-II detector // *The European Physical Journal. C*. 2016. Vol. 76. No. 1. P. 25.
46. **Aprile E., Aalbers J., Agostini F., et al.** (XENON Collaboration). First dark matter search



results from the XENON1T experiment. <https://arxiv.org/pdf/1705.06655>.

47. **Amole C., Ardid M., Arnquist I.J., et al.** (PICO Collaboration). Dark matter search results from the PICO-60C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> bubble chamber // Physical Review Letters. 2017. Vol. 118. No. 25. P. 251301.

48. **Akerib D.S., Alsum S., Araujo H.M., et al.** (LUX Collaboration). Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure // Physical

Review Letters. 2017. Vol. 118. No. 2. P. 021303.

49. **Tan A., Xiao M., Cui X. et al.** (PandaX-II Collaboration). Dark matter results from first 98.7 days of data from the PandaX-II experiment // Physical Review Letters. 2016. Vol. 117. No. 12. P. 121303.

50. **Craig N., Galloway J., Thomas S.** Searching for signs of the second Higgs doublet. <https://arxiv.org/pdf/1305.2424>.

*Статья поступила в редакцию 02.10.2017, принята к публикации 06.12.2017.*

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БАСАЛАЕВ Артём Евгеньевич** – стажер-исследователь Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра (НИЦ) «Курчатовский институт», г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, Гатчина, Орлова Роща  
artem.basalaev@cern.ch

**НАРЫШКИН Юрий Германович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина Ленинградской области, Российская Федерация.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, Гатчина, Орлова Роща  
yury.naryshkin@cern.ch

### REFERENCES

[1] **J.C. Kapteyn**, First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system, *Astrophysical Journal*. 55 (1922) 302–327.

[2] **F. Zwicky**, Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, *Helvetica Physica Acta*. 6 (1933) 110–127.

[3] **V.C. Rubin, N. Thonnard, W.K.Jr. Ford**, Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV – Systematic dynamical properties, SA through SC, *The Astrophysical Journal Letters*. 225 (1978) L107–L111.

[4] **A.N. Taylor, S. Dye1, T.J. Broadhurst, N. Benitez, E. van Kampen**, Gravitational lens magnification and the mass of Abell 1689, *The Astrophysical Journal*. 501 (2) (1998) 539–553.

[5] **M. Markevitch, A.H. Gonzalez, D. Clowe, et al.**, Direct constraints on the dark matter self-interaction cross-section from the merging galaxy cluster 1E0657-56, *The Astrophysical Journal*. 606 (2) (2003) 819–824.

[6] **C. Patrignani, K. Agashe, G. Aielli, et al.** (Particle Data Group), Big-Bang nucleosynthesis, *Chinese Physics C*. 40 (10) (2016) 380.

[7] **L. Canetti, M. Drewes, M. Shaposhnikov**, Matter and antimatter in the universe, *New Journal of Physics*. 14 (9) (2012) 095012.

[8] **P. Tisserand, L. Le Guillou, C. Afonso, et al.**, Limits on the Macho content of the Galactic

Halo from the EROS-2 survey of the Magellanic Clouds, *Astronomy and Astrophysics*. 469 (2) (2007) 387–404.

[9] **D.S. Graff, K. Freese**, Analysis of a Hubble Space telescope search for Red Dwarfs: Limits on baryonic matter in the galactic halo, *The Astrophysical Journal*. 456 (1) (1996) L49.

[10] **P.A.R. Ade, N. Aghanim, M.I.R. Alves, et al.** (Planck Collaboration), Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results, *Astronomy and Astrophysics*. 571 (2014) A1.

[11] **M. Milgrom**, A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis, *The Astrophysical Journal* 270 (1983) 365–370.

[12] **M. Kamionkowski**, WIMP and Axion dark matter. Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9710467>.

[13] **H. Baer, X. Tata**, Weak scale supersymmetry: from superfields to scattering events, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.

[14] **S. Dodelson, L.M. Widrow**, Sterile-neutrinos as dark matter, *Physical Review Letters*. 72 (1) (1994) 17–20.

[15] **R. Holman, G. Lazarides, Q. Shafi**, Axions and the dark matter of the universe. *Physical Review D*. 27 (4) (1983) 995.

[16] **J.L. Feng**, Dark matter candidates from particle physics and methods of detection, *Annual*

Review of Astronomy and Astrophysics. 48 (1) (2010) 495–545.

[17] **R. Bernabei, P. Belli, A. Bussolotti, et al.**, The DAMA/LIBRA apparatus, 17, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 592 (3) (2008) 297–315.

[18] **E. Aprile, J. Aalbers, F. Agostini et al.**, First dark matter search results from the XENON1T experiment. Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/pdf/1705.06655>.

[19] **J.H. Davis, C. McCabe, C. Boehm**, Quantifying the evidence for dark matter in CoGeNT data, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2014 (08) (2014) 014.

[20] **V.A. Ryabov, V.A. Tsarev, A.M. Tskhovrebov**, The search for dark matter particles, Physics-Uspexhi. 51 (11) (2008) 1091–1121.

[21] **M. Aguilar, M. Alberti, G. Alpat, et al.** (AMS Collaboration), First result from the Alpha magnetic spectrometer on the International space station: precision measurement of the positron fraction in primary cosmic rays of 0.5–350 GeV, Physical Review Letters. 110 (14) (2013) 141102.

[22] **M. Casolino, N. De Simone, D. Bongue, et al.**, Two years of flight of the Pamela experiment: results and perspectives. <https://arxiv.org/pdf/0810.4980>, (2008).

[23] **M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert A., et al.** (Fermi-LAT Collaboration), The Fermi Galactic center GeV excess and implications for dark matter, The Astrophysical Journal. 840 (1) (2017) 43.

[24] **R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, et al.** (DAMA-LIBRA Collaboration), Model independent result on possible diurnal effect in DAMA/LIBRA-phase 1, The European Physical Journal. C. 74 (3) (2014) 2827.

[25] **T. Aaltonen, B. Alvarez Gonzalez, S. Amerio, et al.** (CDF Collaboration), Search for a dark matter candidate produced in association with a single top quark in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV, Physical Review Letters, 108 (20) (2012) 201802.

[26] **V.M. Abazov, B. Abbott, M. Abolins, et al.** (D0 Collaboration), Search for dark photons from supersymmetric hidden valleys, Physical Review Letters. 103 (8) (2009) 081802.

[27] **S. Liem, G. Bertone, F. Calore, et al.**, Effective field theory of dark matter: a global analysis, Journal of High Energy Physics. 2016 (9) (2016) 077.

[28] **D. Alves, N. Arkani-Hamed, S. Arora, et al.**, Simplified models for LHC new physics searches, Journal of Physics. G. 39 (2012) 105005.

[29] **J. Alwall, R. Frederix, S. Frixione, et al.**, The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations, Journal of

High Energy Physics. 2014 (7) (2014) 079.

[30] **A. Albert, M. Backovic, A. Boveia, et al.**, Recommendations of the LHC dark matter working group: Comparing LHC searches for heavy mediators of dark matter production in visible and invisible decay channels, Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/pdf/1703.05703>.

[31] **M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, et al.** (ATLAS Collaboration), Search for an invisibly decaying Higgs boson or dark matter candidates produced in association with a  $Z$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. <http://cds.cern.ch/record/2273610/files/ATLAS-CONF-2017-040.pdf>.

[32] **M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, et al.** (ATLAS Collaboration), Search for dark matter at  $\sqrt{s} = 13$  TeV in final states containing an energetic photon and large missing transverse momentum with the ATLAS detector, The European Physical Journal. C. 77 (6) (2017) 393.

[33] **M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, et al.**, Search for dark matter and other new phenomena in events with an energetic jet and large missing transverse momentum using the ATLAS detector, <http://cds.cern.ch/record/2273876/files/ATLAS-CONF-2017-060.pdf>.

[34] **A. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam et al.**, Search for dark matter, invisible Higgs boson decays, and large extra dimensions in the  $Z \rightarrow ll + E_T^{miss}$  final state using 2016 data. Rezhim dostupa: <http://inspirehep.net/record/1599663/files/EXO-16-052-pas.pdf>.

[35] **M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, et al.** (ATLAS Collaboration), Search for dark matter produced in association with a hadronically decaying vector boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Physics Letters B. 763 (2016) 251–268.

[36] **M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, et al.**, Search for dark matter production associated with bottom quarks with  $13.3 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector at the LHC. Rezhim dostupa: <http://cds.cern.ch/record/2206279/files/ATLAS-CONF-2016-086.pdf>.

[37] **A. Alves, A. Berlin, S. Profumo, F.S. Queiroz**, Dark matter complementarity and the  $Z'$  portal, Phys. Rev. D. 92 (8) (2015) 083004.

[38] **M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, et al.**, Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to two photons at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/pdf/1706.03948>.

[39] **M.R. Buckley, D. Hooper, J.L. Rosner**, A leptophobic  $Z'$  and dark matter from grand unification, Physics Letters. B. 703 (2011) 343–347.

- [40] **P. Ko, A. Natale, M. Park, H. Yokoya**, Simplified DM models with the full SM gauge symmetry: the case of  $t$ -channel colored scalar mediators, *Journal of High Energy Physics*. 2017 (1) (2017) 086.
- [41] **M. Aaboud, G. Aad, B. Abbott, et al.**, Search for new phenomena in dijet events using 37 fb<sup>-1</sup> of  $pp$  collision data collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/pdf/1703.09127>.
- [42] **G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, et al.** (ATLAS Collaboration), Search for new phenomena in the dijet mass distribution using  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector, *Physical Review D*. 91 (5) (2015) 052007.
- [43] **G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, et al.** (ATLAS Collaboration), Search for light dijet resonances with the ATLAS detector using a Trigger-object level analysis in LHC  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. Rezhim dostupa: <http://inspirehep.net/record/1470774/files/ATLAS-CONF-2016-030.pdf>.
- [44] **G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, et al.** (ATLAS Collaboration), Search for new light resonances decaying to jet pairs and produced in association with a photon or a jet in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. <http://inspirehep.net/record/1480050/files/ATLAS-CONF-2016-070.pdf>.
- [45] **G. Angloher, A. Bento, C. Bucci, et al.** (CRESST Collaboration), Results on light dark matter particles with a low-threshold CRESST-II detector, *The European Physical Journal C*. 76 (1) (2016) 25.
- [46] **E. Aprile, J. Aalbers, F. Agostini, et al.** (XENON Collaboration), First dark matter search results from the XENON1T experiment. <https://arxiv.org/pdf/1705.06655>.
- [47] **C. Amole, M. Ardid, I.J. Arnuist, et al.** (PICO Collaboration), Dark matter search results from the PICO-60C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> bubble chamber, *Physical Review Letters*. 118 (25) (2017) 251301.
- [48] **D.S. Akerib, S. Alsum, H.M. Araujo, et al.** (LUX Collaboration), Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure, *Physical Review Letters*. 118 (2) (2017) 021303.
- [49] **A. Tan, M. Xiao, X. Cui, et al.** (PandaX-II Collaboration), Dark matter results from first 98.7 days of data from the PandaX-II experiment, *Physical Review Letters*. 117 (12) (2016) 121303.
- [50] **N. Craig, J. Galloway, S. Thomas**, Searching for signs of the second Higgs doublet. Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/pdf/1305.2424>.

*Received 02.10.2017, accepted 06.12.2017.*

#### THE AUTHORS

##### **BASALAEV Artyom E.**

*Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center "Kurchatov Institute"*  
Orlova Roscha, Gatchina,  
188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
artem.basalaev@cern.ch

##### **NARYSHKIN Yuriy G.**

*Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center "Kurchatov Institute"*  
Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation  
yury.naryshkin@cern.ch