Поиск бустерной темной материи, ускоренной электронами космических лучей, в данных детектора Borexino

© А.В. Дербин, И.С. Драчнев, Д.В. Иванов, В.Н. Муратова, М.А. Панкратов, Д.А. Семенов, М.В. Трушин, Е.В. Унжаков

Петербургский институт ядерной физики НИЦ КИ,
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия
e-mail: derbin_av@pnpi.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 3 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Спектр детектора Borexino, измеренный в подземной лаборатории Гран-Сассо с экспозицией 1.09 kt years, проанализирован с целью поиска событий от частиц темной материи (ТМ), ускоренных электронами космических лучей и упруго взаимодействующих с электронами в жидком сцинтилляторе детектора. В результате для частиц ТМ с массой в интервале 0.1 eV–1.0 MeV установлены новые верхние пределы на сечение упругого рассеяния на электроне на уровне $10^{-34} - 10^{-32}$ cm^2.

Ключевые слова: бустерная темная материя, слабовзаимодействующие массивные частицы, упругое рассеяние, детектор Borexino.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64050.316-26

Введение

Эксперименты по поиску частиц темной материи (ТМ), такие как XENON, LZ, PandaX, DarkSide и другие [1], основаны на упругом рассеянии нерелятивистских частиц (χ) на ядрах посредством спин-независимых и спин-зависимых (χ-N)-взаимодействий. Прямые эксперименты теряют чувствительность при массах ТМ ниже GeV, поскольку легкие частицы ТМ не могут передать ядрам энергии выше порога регистрации детектора.

Процесс упругого (χ-e)-рассеяния ТМ на электронах позволяет частично продвинуться в область более легких частиц. Несколько экспериментов были посвящены поиску (χ-e)-рассеяния с использованием детекторов на жидких благородных газах XENON [2], DarkSide [3], PandaX [4] и твердотельных детекторов SuperCDMS [5], EDELWEISS [6], DAMIC [7], CDEX [8] и SENSEI [9].

Бустерная (ускоренная) ТМ (БТМ) — термин, появившийся в последнее десятилетие, — возникает из обычной холодной ТМ при ее упругом и неупругом взаимодействии с частицами Стандартной модели, некоторых гипотетических частиц или ряда других процессов, таких как аннигиляция и распады более тяжелых частиц ТМ. Релятивистские частицы БТМ могут появляться в результате ускорения ТМ частицами космических лучей, диффузным нейтринным фоном, излучением сверхновых, джетами блазаров и Солнцем. В отличие от холодной ТМ частицы БТМ могут оставлять сигнал с энергией порядка MeV в существующих нейтринных детекторах или детекторах ТМ, при взаимодействии с электронами или ядрами.

Детектор солнечных нейтрино Borexino имеет очевидное преимущество перед другими детекторами, связанное с рекордно низким уровнем фона, при поиске сигналов БТМ, ожидаемых в низкоэнергетической области до 18 MeV. В настоящей работе мы проанализировали энергетический спектр детектора Borexino, измеренный в течение 1494 суток [10,11], с целью поиска событий от частиц БТМ, ускоренных электронами космических лучей.

1. Вычисление спектра электронов отдачи в детекторе Borexino

Электроны космических лучей нашей галактики являются субдоминантной, но весьма энергичной компонентой. Энергетический спектр обычно аппроксимируется двумя функциями, при энергиях электрона T_{eCR} меньше 6.88 GeV (1a) и T_{eCR} больше 6.88 GeV (1b) [12]:

$$\frac{d\phi_{eCR}}{dT_{eCR}} = \frac{1.799 \times 10^{44} T_{eCR}^{-12.061}}{1 + 2.762 \times 10^{36} T_{eCR}^{-9.269} + 3.853 \times 10^{40} T_{eCR}^{-10.697}}, \quad (1a)$$

$$\frac{d\phi_{eCR}}{dT_{eCR}} = 3.259 \times 10^{10} T_{eCR}^{-3.505} + 3.204 \times 10^{5} T_{eCR}^{-2.620}. \quad (1b)$$

Поток приведен в единицах [sr^{-1}m^{-2} s^{-1} MeV^{-1}], а энергия электрона выражена в [MeV]. Отметим, что вклад части спектра (1b) в исследуемую нами область энергий электрона отдачи до 18 MeV, в случае сечения (χ, e)-рассеяния, независящем от энергии, составляет пренебрежимо малую часть.

Частицы ТМ со скоростями около 10^{-3} s можно рассматривать как находящиеся в состоянии покоя по сравнению с электронами космических лучей. Кинетическая энергия, передаваемая частице ТМ массой m_χ налетающим электроном с кинетической энергией T_{eCR} и рассеянным под углом θ в системе центра масс, равна

$$T_\chi = 0.5 T_\chi^{\max}(1 - \cos\theta). \quad (2)$$

Максимальная кинетическая энергия, передаваемая частице ТМ электронами, составляет

$$T_\chi^{\max} = \frac{T_{eCR}^2 + 2m_e T_{eCR}}{T_{eCR} + (m_e + m_\chi)^2/2m_\chi}. \quad (3)$$

Мы рассмотрим случай удобной параметризации, когда сечение взаимодействия темной материи с электронами, подобно нерелятивистскому рассеянию частиц ТМ на ядрах, не зависит от энергии и изотропно [13,14]:

$$\frac{d\sigma_{\chi e}}{dT_\chi} = \frac{\sigma_{\chi e}^0}{T_\chi^{\max}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\chi e}^0$ — искомый параметр. Спектр частиц ТМ после их взаимодействия с электронами КЛ получается путем интегрирования:

$$\frac{d\phi_\chi}{dT_\chi} = D_{\text{eff}} \frac{\rho_\chi}{m_\chi} \int\limits_{T_e^{\min}}^{T_e^{\max}} \frac{d\phi_{eCR}}{dT_{eCR}} \frac{d\sigma_{\chi e}}{dT_\chi} dT_{eCR}, \quad (5)$$

где $\rho_\chi = 0.3\,\text{GeV/cm}^3$ — локальная плотность темной материи, T_χ и T_{eCR} — кинетические энергии ускоренной ТМ и электронов КЛ соответственно, $T_e^{\min}$ — минимальная энергия электрона, необходимая для передачи частице ТМ энергии T_χ:

$$T_e^{\min} = \left(\frac{T_\chi}{2} - m_e\right)\left(1 \pm \left(1 + \frac{2T_\chi(m_e + m_\chi)^2}{m_\chi(2m_e - T_\chi)^2}\right)^2\right), \quad (6)$$

при этом знак $(+)$ соответствует случаю, когда $T_\chi > 2m_e$ и соответственно наоборот. В качестве верхней границы для энергий электрона $T_e^{\max}$ было выбрано значение 100 GeV.

Величина D_{eff} представляет собой эффективное расстояние, которое возникает при вычислении абсолютного значения потока частиц ТМ при интегрировании по телесному углу с учетом распределения плотности ρ_{MW} гало ТМ в нашей Галактике [15]:

$$D_{\text{eff}} = \frac{1}{\rho_\chi} \int \frac{d\Omega}{4\pi} \int\limits_0^{l\,\max} \rho_{MW}\, dl. \quad (7)$$

Величина D_{eff}, примерно, равна расстоянию $l_{\max}$, до которого учитываются космические лучи. Поток БТМ пропорционален $\rho_\chi\ D_{\text{eff}}$, а извлекаемое из измерений сечение $\sigma_{\chi e}^0$ пропорционально $(\rho_\chi\ D_{\text{eff}})^{-1/2}$. Для различных профилей гало темной материи значение D_{eff} составляет несколько kpc. В настоящей работе мы используем консервативное значение $D_{\text{eff}} = 1\,\text{kpc}$, как и в ряде предыдущих работ [13,16].

Поток БТМ имеет значительную угловую зависимость, наибольший поток должен исходить из направления галактического центра, где плотность темной материи максимальна. Однако сцинтилляционные детекторы, подобные Borexino, не обладают достаточной направленной чувствительностью для использования этой информации.

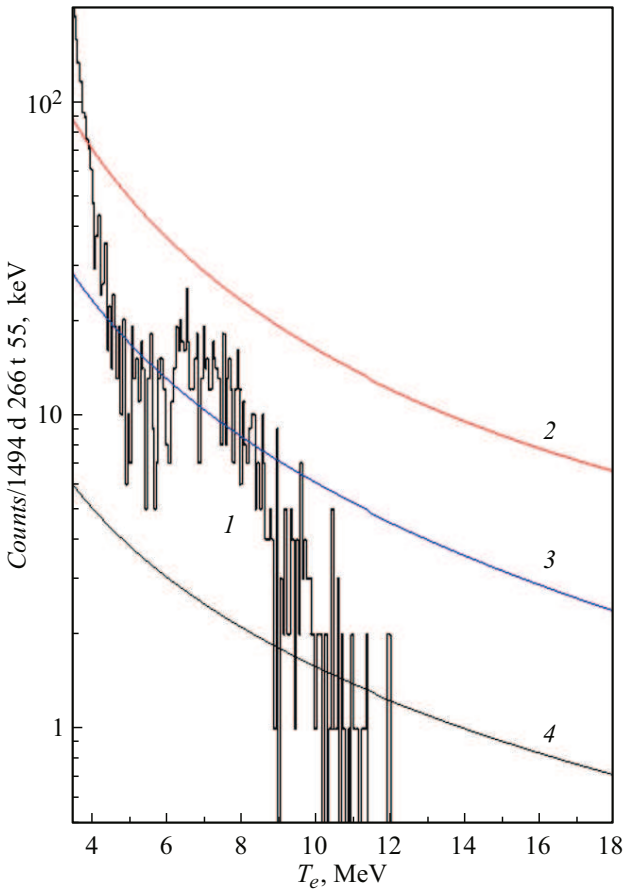


Рис. 1. Спектр детектора Borexino (гистограмма *1*) [11]. Ожидаемые спектры электронов отдачи при (χ, e)-рассеянии частиц БТМ с массами $m_\chi = 1$, 10 и 100 eV (кривые *2–4* соответственно), вычисленные для значения $\sigma_{\chi e}^0 = 3 \cdot 10^{-33}\,\text{cm}^2$.

Ускоренные частицы ТМ будут рассеиваться на электронах в лабораторных установках. Спектр электронов отдачи, регистрируемых детектором, вычисляется аналогично выражению (5), когда в качестве налетающей частицы рассматривается ускоренная частица ТМ:

$$\frac{d\phi_e}{dT_e} = \int\limits_{T_\chi^{\min}(Te)}^{T_e^{\max}} \frac{d\phi_\chi}{dT_\chi} \frac{d\sigma_{\chi e}}{dT_e} dT_\chi. \quad (8)$$

Значение минимальной энергии $T_\chi^{\min}$, необходимой для передачи электрону энергии T_e, может быть получено из формулы (6) путем обмена индексов χ и e. Ожидаемые спектры электронов отдачи, которые пропорциональны квадрату сечения (χ, e)-рассеяния $(\sigma_{\chi e}^0)^2$ и вычислены для значения $\sigma_{\chi e}^0 = 3 \cdot 10^{-33}\,\text{cm}^2$, показаны на рис. 1 для трех различных значений масс m_χ.

2. Полученные результаты

Детектор Borexino — большой (300 t) сцинтилляционный детектор, созданный для регистрации солнечных

нейтрино, который был расположен в подземной лаборатории Гран-Сассо и впервые в режиме реального времени обеспечил регистрацию нейтрино в области энергий ниже 5 MeV. Сцинтиллятор был изготовлен на основе псевдокумола (C_9H_{12}) со спектральной добавкой PPO 1.5 mg/l. Детектор обладает рекордно низким уровнем фона при энергиях порядка MeV, хорошим пространственным и энергетическим разрешением. Именно эти характеристики, позволившие выделить одиночные события рассеяния солнечных нейтрино на электроне, делают детектор Borexino, несмотря на сравнительно небольшую массу, незаменимым при поиске редких низкоэнергетических процессов, связанных как с физикой частиц, так и с астрофизическими явлениями.

Спектр детектора Borexino, измеренный за 1494 суток с эффективной массой детектора 266 тонн, показан на рис. 3 в работе [10,11]. Энергетическая шкала приведена в фотоэлектронах N (p.e.), детектируемых фотоумножителями. В области энергий 2–18 MeV связь между N и энергией события E описывается линейной зависимостью $N = aE + b$, с параметрами $a = (459 \pm 11)$ p.e./MeV и $b = (115 \pm 38)$ p.e. [10]. Энергетический спектр показан на рис. 1 в сравнении со спектрами электронов отдачи, вычисленными для сечения $\sigma^0_{\chi e} = 3 \cdot 10^{-33}\,\mathrm{cm}^2$. Спектры приведены для трех значений масс $m_\chi = 1$, 10 и 100 eV и соответствуют экспозиции 1494 d × 266 t (или 1.09 kt years). Чувствительность экспериментов к поиску частиц БТМ определяется нижним порогом регистрации, уровнем фона, массой детектора и временем измерения.

Для установления верхнего предела на сечение (χ, e)-рассеяния, мы использовали факт отсутствия событий с энергией более 12 MeV. В этом случае, при ожидаемом нулевом фоне, верхний предел на число событий в интервале 12–18 MeV составляет $S_{\mathrm{lim}} = 2.44$ для 90 % уровня достоверности [17]. Для различных значений $m_{\chi i}$ вычислялось ожидаемое количество событий $S(m_{\chi i})$ в интервале 12–18 MeV, которое пропорционально $(\sigma^0_{\chi e})^2$. Из условия $S(m_\chi) \le S_{lim}$ были получены верхние пределы на значения $\sigma^0_{\chi e}$, которые показаны на рис. 2 (кривая *1*).

Систематические неопределенности связаны в основном с определением нижней границы анализируемого интервала 12 MeV, которая для указанной калибровки, восстанавливается с точностью 0.3 MeV. Ожидаемый спектр электронов отдачи в интервале 12–18 MeV относительно слабо зависит от энергии, что приводит к 5 % систематической ошибке.

Можно видеть, что установленные ограничения на сечение $\sigma^0_{\chi e}$ близки к результатам, полученным с использованием данных детектора атмосферных и солнечных нейтрино Super-Kamiokande [14,18], и существенно улучшают предел детектора темной материи LZ [19]. Наиболее строгие верхние пределы на сечение взаимодействия БТМ с электронами для модели фермионной ТМ с векторными и скалярными медиаторами в области

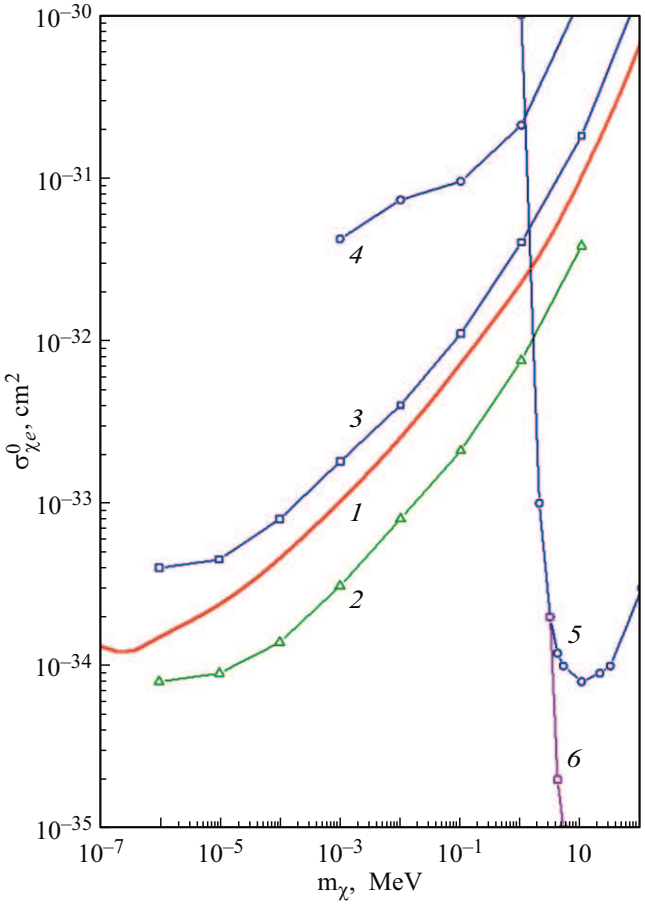


Рис. 2. Верхние ограничения на сечение (χ, e)-рассеяния в зависимости от массы частиц ТМ для 90 % уровня достоверности. |it 1 — настоящая работа, из данных Borexino [11], *2*, *3* — из данных Super-Kamiokande [18,14] соответственно, *4* — из данных LZ [19], *5* — SuperCDMS [20], *6* — из данных XENON10 [21].

масс ниже 100 keV и $D_{\mathrm{eff}} = 10$ kpc получены из данных детектора IceCube [22]. Для масс $m_\chi > 1$ MeV наиболее строгие пределы на $\sigma^0_{\chi e}$ установлены в прямых экспериментах по неупругому рассеянию нерелятивистских частиц ТМ на атомах с детекторами SuperCDMS [20] и XENON10 [21], способными регистрировать отдельные электроны.

Заключение

Вычислен ожидаемый энергетический спектр электронов отдачи при рассеянии частиц БТМ, ускоренной электронами космических лучей. Вычисления выполнены для различных значений масс частиц БТМ для значений $\rho_\chi = 0.3\,\mathrm{GeV/cm}^3$ и $D_{\mathrm{eff}} = 1$ kpc в предположении, что сечение упругого (χ, e)-рассеяния не зависит от энергии. Используя данные детектора Borexino, полученные для экспозиции 1494 d × 266 t, для частиц БТМ с массой от 0.1 eV до 1 MeV установлены новые верхние огра-

ничения на сечение рассеяния частиц ТМ на электронах на уровне $10^{-34} - 10^{-32}\,\mathrm{cm}^2$.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-12-00046.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Navas, C. Amsler, T. Gutsche, C. Hanhart, J.J. Hernández-Rey, C. Loureno, A. Masoni, M. Mikhasenko, R.E. Mitchell, C. Patrignani, C. Schwanda, S. Spanier, G. Venanzoni, C.Z. Yuan, K. Agashe, G. Aielli, B.C. Allanach, J. Alvarez-Muñiz, M. Antonelli, E.C. Aschenauer, D.M. Asner, K. Assamagan, H. Baer, Sw. Banerjee, R.M. Barnett, L. Baudis, C.W. Bauer, J.J. Beatty, J. Beringer, A. Bettini, O. Biebel, K.M. Black, E. Blucher, R. Bonventre, R.A. Briere, A. Buckley, V.D. Burkert, M.A. Bychkov, R.N. Cahn, Z. Cao, M. Carena, G. Casarosa, A. Ceccucci, A. Cerri, R.S. Chivukula, G. Cowan, K. Cranmer, V. Crede, O. Cremonesi, G. D'Ambrosio, T. Damour, D. de Florian, A. de Gouva, T. DeGrand, S. Demers, Z. Demiragli, B.A. Dobrescu, M. D'Onofrio, M. Doser, H.K. Dreiner, P. Eerola, U. Egede, S. Eidelman, A.X. El-Khadra, J. Ellis, S.C. Eno, J. Erler, V.V. Ezhela, A. Fava, W. Fetscher, B.D. Fields, A. Freitas, H. Gallagher, T. Gershon, Y. Gershtein, T. Gherghetta, M.C. Gonzalez-Garcia, M. Goodman, C. Grab, A.V. Gritsan, C. Grojean, D.E. Groom, M. Grünewald, A. Gurtu, H.E. Haber, M. Hamel, S. Hashimoto, Y. Hayato, A. Hebecker, S. Heinemeyer, K. Hikasa, J. Hisano, A. Höcker, J. Holder, L. Hsu, J. Huston, T. Hyodo, Al. Ianni, M. Kado, M. Karliner, U.F. Katz, M. Kenzie, V.A. Khoze, S.R. Klein, F. Krauss, M. Kreps, P. Križan, B. Krusche, Y. Kwon, O. Lahav, L.P. Lellouch, J. Lesgourgues, A.R. Liddle, Z. Ligeti, C.-J. Lin, C. Lippmann, T.M. Liss, A. Lister, L. Littenberg, K.S. Lugovsky, S.B. Lugovsky, A. Lusiani, Y. Makida, F. Maltoni, A.V. Manohar, W.J. Marciano, J. Matthews, U.-G. Meißner, I.-A. Melzer-Pellmann, P. Mertsch, D.J. Miller, D. Milstead, K. Mönig, P. Molaro, F. Moortgat, M. Moskovic, N. Nagata, K. Nakamura, M. Narain, P. Nason, A. Nelles, M. Neubert, Y. Nir, H.B. O'Connell, C.A.J. O'Hare, K.A. Olive, J.A. Peacock, E. Pianori, A. Pich, A. Piepke, F. Pietropaolo, A. Pomarol, S. Pordes, S. Profumo, A. Quadt, K. Rabbertz, J. Rademacker, G. Raffelt, M. Ramsey-Musolf, P. Richardson, A. Ringwald, D.J. Robinson, S. Roesler, S. Rolli, A. Romaniouk, L.J. Rosenberg, J.L. Rosner, G. Rybka, M.G. Ryskin, R.A. Ryutin, B. Safdi, Y. Sakai, S. Sarkar, F. Sauli, O. Schneider, S. Schnert, K. Scholberg, A.J. Schwartz, J. Schwiening, D. Scott, F. Sefkow, U. Seljak, V. Sharma, S.R. Sharpe, V. Shiltsev, G. Signorelli, M. Silari, F. Simon, T. Sjöstrand, P. Skands, T. Skwarnicki, G.F. Smoot, A. Soffer, M.S. Sozzi, C. Spiering, A. Stahl, Y. Sumino, F. Takahashi, M. Tanabashi, J. Tanaka, M. Taševský, K. Terao, K. Terashi, J. Terning, U. Thoma, R.S. Thorne, L. Tiator, M. Titov, D.R. Tovey, K. Trabelsi, P. Urquijo, G. Valencia, R. Van de Water, N. Varelas, L. Verde, I. Vivarelli, P. Vogel, W. Vogelsang, V. Vorobyev, S.P. Wakely, W. Walkowiak, C.W. Walter, D. Wands, D.H. Weinberg, E.J. Weinberg, N. Wermes, M. White, L.R. Wiencke, S. Willocq, C.L. Woody, R.L. Workman, W.-M. Yao, M. Yokoyama, R. Yoshida, G. Zanderighi, G.P. Zeller, R.-Y. Zhu, S.-L. Zhu, F. Zimmermann, P.A. Zyla. Phys. Rev. D, **110**, 030001 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001

[2] E. Aprile, J. Aalbers, F. Agostini, M. Alfonsi, L. Althueser, F.D. Amaro, V.C. Antochi, E. Angelino, F. Arneodo, F. Arneodo, D. Barge, L. Baudis, B. Bauermeister, L. Bellagamba, M.L. Benabderrahmane, T. Berger, P.A. Breur, A. Brown, E. Brown, S. Bruenner, G. Bruno, R. Budnik, C. Capelli, J.M.R. Cardoso, D. Cichon, D. Coderre, A.P. Colijn, J. Conrad, J.P. Cussonneau, M.P. Decowski, P. de Perio, A. Depoian, P. Di Gangi, A. Di Giovanni, S. Diglio, A. Elykov, G. Eurin, J. Fei, A.D. Ferella, A. Fieguth, W. Fulgione, P. Gaemers, A. Gallo Rosso, M. Galloway, F. Gao, M. Garbini, L. Grandi, Z. Greene, C. Hasterok, C. Hils, E. Hogenbirk, J. Howlett, M. Iacovacci, R. Itay, F. Joerg, S. Kazama, A. Kish, M. Kobayashi, G. Koltman, A. Kopec, H. Landsman, R.F. Lang, L. Levinson, Q. Lin, S. Lindemann, M. Lindner, F. Lombardi, J.A.M. Lopes, E. López Fune, C. Macolino, J. Mahlstedt, A. Manfredini, F. Marignetti, T. Marrodán Undagoitia, J. Masbou, S. Mastroianni, M. Messina, K. Micheneau, K. Miller, A. Molinario, K. Morå, Y. Mosbacher, M. Murra, J. Naganoma, K. Ni, U. Oberlack, K. Odgers, J. Palacio, B. Pelssers, R. Peres, J. Pienaar, V. Pizzella, G. Plante, R. Podviianiuk, J. Qin, H. Qiu, D. Ramírez García, S. Reichard, B. Riedel, A. Rocchetti, N. Rupp, J.M.F. dos Santos, G. Sartorelli, N. Šarčević, M. Scheibelhut, S. Schindler, J. Schreiner, D. Schulte, M. Schumann, L. Scotto Lavina, M. Selvi, P. Shagin, E. Shockley, M. Silva, H. Simgen, C. Therreau, D. Thers, F. Toschi, G. Trinchero, C. Tunnell, N. Upole, M. Vargas, G. Volta, O. Wack, H. Wang, Y. Wei, C. Weinheimer, D. Wenz, C. Wittweg, J. Wulf, J. Ye, Y. Zhang, T. Zhu, J.P. Zopounidis. Phys. Rev. Lett., **123**, 251801 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.251801

[3] P. Agnes, I.F.M. Albuquerque, T. Alexander, A.K. Alton, M. Ave, H.O. Back, G. Batignani, K. Biery, V. Bocci, W.M. Bonivento, B. Bottino, S. Bussino, M. Cadeddu, M. Cadoni, F. Calaprice, A. Caminata, M.D. Campos, N. Canci, M. Caravati, N. Cargioli, M. Cariello, M. Carlini, V. Cataudella, P. Cavalcante, S. Cavuoti, S. Chashin, A. Chepurnov, C. Cicalò, G. Covone, D. D'Angelo, S. Davini, A. De Candia, S. De Cecco, G. De Filippis, G. De Rosa, A.V. Derbin, A. Devoto, M. D'Incecco, C. Dionisi, F. Dordei, M. Downing, D. D'Urso, M. Fairbairn, G. Fiorillo, D. Franco, F. Gabriele, C. Galbiati, C. Ghiano, C. Giganti, G.K. Giovanetti, A.M. Goretti, G. Grilli di Cortona, A. Grobov, M. Gromov, M. Guan, M. Gulino, B.R. Hackett, K. Herner, T. Hessel, B. Hosseini, F. Hubaut, T. Hugues, E.V. Hungerford, An. Ianni, V. Ippolito, K. Keeter, C.L. Kendziora, M. Kimura, I. Kochanek, D. Korablev, G. Korga, A. Kubankin, M. Kuss, M. Kuźniak, M. La Commara, M. Lai, X. Li, M. Lissia, G. Longo, O. Lychagina, I.N. Machulin, L.P. Mapelli, S.M. Mari, J. Maricic, A. Messina, R. Milincic, J. Monroe, M. Morrocchi, X. Mougeot, V.N. Muratova, P. Musico, A.O. Nozdrina, A. Oleinik, F. Ortica, L. Pagani, M. Pallavicini, L. Pandola, E. Pantic, E. Paoloni, K. Pelczar, N. Pelliccia, S. Piacentini, A. Pocar, D.M. Poehlmann, S. Pordes, S.S. Poude,

P. Pralavorio, D.D. Price, F. Ragusa, M. Razeti, A. Razeto, A.L. Renshaw, M. Rescigno, J. Rode, A. Romani, D. Sablone, O. Samoylov, E. Sandford, W. Sands, S. Sanfilippo, C. Savarese, B. Schlitzer, D.A. Semenov, A. Shchagin, A. Sheshukov, M.D. Skorokhvatov, O. Smirnov, A. Sotnikov, S. Stracka, Y. Suvorov, R. Tartaglia, G. Testera, A. Tonazzo, E.V. Unzhakov, A. Vishneva, R.B. Vogelaar, M. Wada, H. Wang, Y. Wang, S. Westerdale, M.M. Wojcik, X. Xiao, C. Yang, G. Zuzel. Phys. Rev. D, **110**, 102006 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevD.110.102006

[4] Ch. Cheng, P. Xie, A. Abdukerim, W. Chen, X. Chen, Yu. Chen, X. Cui, Y. Fan, D. Fang, Ch. Fu, M. Fu, L. Geng, K. Giboni, L. Gu, X. Guo, K. Han, Ch. He, Sh. He, D. Huang, Yan Huang, Yanlin Huang, Zh. Huang, X. Ji, Y. Ju, Sh. Li, Q. Lin, H. Liu, J. Liu, L. Liu, X. Lu, W. Ma, Yu. Ma, Ya. Mao, Yu. Meng, P. Namwongsa, K. Ni, J. Ning, X. Ning, X. Ren, N. Shaheed, Ch. Shang, G. Shen, L. Si, A. Tan, A. Wang, H. Wang, M. Wang, Q. Wang, S. Wang, W. Wang, X. Wang, Zh. Wang, M. Wu, Sh. Wu, W. Wu, J. Xia, M. Xiao, X. Xiao, B. Yan, J. Yang, Yo. Yang, Ch. Yu, J. Yuan, Y. Yuan, X. Zeng, D. Zhang, T. Zhang, L. Zhao, Q. Zheng, J. Zhou, N. Zhou, X. Zhou. Phys. Rev. Lett., **126**, 211803 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.211803

[5] D.W. Amaral, T. Aralis, T. Aramaki, I.J. Arnquist, E. Azadbakht, S. Banik, D. Barker, C. Bathurst, D.A. Bauer, L.V.S. Bezerra, R. Bhattacharyya, T. Binder, M.A. Bowles, P.L. Brink, R. Bunker, B. Cabrera, R. Calkins, R.A. Cameron, C. Cartaro, D.G. Cerdeño, Y.-Y. Chang, R. Chen, N. Chott, J. Cooley, H. Coombes, J. Corbett, P. Cushman, F. De Brienne, M.L. di Vacri, M.D. Diamond, E. Fascione, E. Figueroa-Feliciano, C.W. Fink, K. Fouts, M. Fritts, G. Gerbier, R. Germond, M. Ghaith, S.R. Golwala, H.R. Harris, N. Herbert, B.A. Hines, M.I. Hollister, Z. Hong, E.W. Hoppe, L. Hsu, M.E. Huber, V. Iyer, D. Jardin, A. Jastram, M.H. Kelsey, A. Kubik, N.A. Kurinsky, R.E. Lawrence, A. Li, B. Loer, E. Lopez Asamar, P. Lukens, D. MacDonell, D.B. MacFarlane, R. Mahapatra, V. Mandic, N. Mast, A.J. Mayer, É.M. Michaud, E. Michielin, N. Mirabolfathi, B. Mohanty, J.D. Morales Mendoza, S. Nagorny, J. Nelson, H. Neog, V. Novati, J.L. Orrell, S.M. Oser, W.A. Page, P. Pakarha, R. Partridge, R. Podviianiuk, F. Ponce, S. Poudel, M. Pyle, W. Rau, E. Reid, R. Ren, T. Reynolds, A. Roberts, A.E. Robinson, H.E. Rogers, T. Saab, B. Sadoulet, J. Sander, A. Sattari, R.W. Schnee, S. Scorza, B. Serfass, D.J. Sincavage, C. Stanford, M. Stein, J. Street, D. Toback, R. Underwood, S. Verma, A.N. Villano, B. von Krosigk, S.L. Watkins, L. Wills, J.S. Wilson, M.J. Wilson, J. Winchell, D.H. Wright, S. Yellin, B.A. Young, T.C. Yu, E. Zhang, H.G. Zhang, X. Zhao, L. Zheng. Phys. Rev. D, **102**, 091101 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevD.102.091101

[6] Q. Arnaud, E. Armengaud, C. Augier, A. Benot, L. Bergé, J. Billard, A. Broniatowski, P. Camus, A. Cazes, M. Chapellier, F. Charlieux, M. De Jésus, L. Dumoulin, K. Eitel, E. Elkhoury, J.-B. Fillipini, D. Filosofov, J. Gascon, A. Giuliani, M. Gros, Y. Jin, A. Juillard, M. Kleifges, H. Lattaud, S. Marnieros, D. Misiak, X.-F. Navick, C. Nones, E. Olivieri, C. Oriol, P. Pari, B. Paul, D. Poda, S. Rozov, T. Salagnac, V. Sanglard, B. Siebenborn, L. Vagneron, M. Weber, E. Yakushev, A. Zolotarova. Phys. Rev. Lett., **125**, 141301 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.141301

[7] A. Aguilar-Arevalo, I. Arnquist, N. Avalos, L. Barak, D. Baxter, X. Bertou, I.M. Bloch, A.M. Botti, M. Cababie, G. Cancelo, N. Castelló-Mor, B.A. Cervantes-Vergara, A.E. Chavarria, J. Cortabitarte-Gutiérrez, M. Crisler, J. Cuevas-Zepeda, A. Dastgheibi-Fard, C. De Dominicis, O. Deligny, A. Drlica-Wagner, J. Duarte-Campderros, J.C. D'Olivo, R. Essig, E. Estrada, J. Estrada, E. Etzion, F. Favela-Perez, N. Gadola, R. Gaïor, S.E. Holland, T. Hossbach, L. Iddir, B. Kilminster, Y. Korn, A. Lantero-Barreda, I. Lawson, S. Lee, A. Letessier-Selvon, P. Loaiza, A. Lopez-Virto, S. Luoma, E. Marrufo-Villalpando, K.J. McGuire, G.F. Moroni, S. Munagavalasa, D. Norcini, A. Orly, G. Papadopoulos, S. Paul, S.E. Perez, A. Piers, P. Privitera, P. Robmann, D. Rodrigues, N.A. Saffold, S. Scorza, M. Settimo, A. Singa, R. Smida, M. Sofo-Haro, L. Stefanazzi, K. Stifter, J. Tiffenberg, M. Traina, S. Uemura, I. Vila, R. Vilar, T. Volansky, G. Warot, R. Yajur, T.-T. Yu, J.-P. Zopounidis. Phys. Rev. D, **109**, 062007 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevD.109.062007

[8] Z.Y. Zhang, L.T. Yang, Q. Yue, K.J. Kang, Y.J. Li, H.P. An, Greeshma C., J.P. Chang, Y.H. Chen, J.P. Cheng, W.H. Dai, Z. Deng, C.H. Fang, X.P. Geng, H. Gong, Q.J. Guo, T. Guo, X.Y. Guo, L. He, S.M. He, J.W. Hu, H.X. Huang, T.C. Huang, L. Jiang, S. Karmakar, H.B. Li, H.Y. Li, J.M. Li, J. Li, Q.Y. Li, R.M.J. Li, X.Q. Li, Y.L. Li, Y.F. Liang, B. Liao, F.K. Lin, S.T. Lin, J.X. Liu, S.K. Liu, Y.D. Liu, Y. Liu, Y.Y. Liu, H. Ma, Y.C. Mao, Q.Y. Nie, J.H. Ning, H. Pan, N.C. Qi, J. Ren, X.C. Ruan, M.K. Singh, T.X. Sun, C.J. Tang, Y. Tian, G.F. Wang, J.Z. Wang, L. Wang, Q. Wang, Y.F. Wang, Y.X. Wang, H.T. Wong, S.Y. Wu, Y.C. Wu, H.Y. Xing, R. Xu, Y. Xu, T. Xue, Y.L. Yan, N. Yi, C.X. Yu, H.J. Yu, J.F. Yue, M. Zeng, Z. Zeng, B.T. Zhang, F.S. Zhang, L. Zhang, Z.H. Zhang, J.Z. Zhao, K.K. Zhao, M.G. Zhao, J.F. Zhou, Z.Y. Zhou, J.J. Zhu. Phys. Rev. Lett., **132**, 171001 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.171001

[9] I.M. Bloch, A.M. Botti, M. Cababie, G. Cancelo, B.A. Cervantes-Vergara, M. Daa, A. Desai, A. Drlica-Wagner, R. Essig, J. Estrada, E. Etzion, G.F. Moroni, S.E. Holland, J. Kehat, I. Lawson, S. Luoma, A. Orly, S.E. Perez, D. Rodrigues, N.A. Saffold, S. Scorza, M. Sofo-Haro, K. Stifter, J. Tiffenberg, Sh. Uemura, E.M. Villalpando, T. Volansky, F. Winkel, Yi. Wu, T.-T. Yu. Phys. Rev. Lett., **134**, 161002 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.161002

[10] G. Bellini, J. Benziger, S. Bonetti, M. Buizza Avanzini, B. Caccianiga, L. Cadonati, F. Calaprice, C. Carraro, A. Chavarria, A. Chepurnov, F. Dalnoki-Veress, D. D'Angelo, S. Davini, H. de Kerret, A. Derbin, A. Etenko, K. Fomenko, D. Franco, C. Galbiati, S. Gazzana, C. Ghiano, M. Giammarchi, M. Goeger-Neff, A. Goretti, E. Guardincerri, S. Hardy, Aldo Ianni, Andrea Ianni, M. Joyce, G. Korga, D. Kryn, M. Laubenstein, M. Leung, T. Lewke, E. Litvinovich, B. Loer, P. Lombardi, L. Ludhova, I. Machulin, S. Manecki, W. Maneschg, G. Manuzio, Q. Meindl, E. Meroni, L. Miramonti, M. Misiaszek, D. Montanari, V. Muratova, L. Oberauer, M. Obolensky, F. Ortica, M. Pallavicini, L. Papp, L. Perasso, S. Perasso, A. Pocar, R.S. Raghavan, G. Ranucci, A. Razeto, A. Re, P. Risso, A. Romani, D. Rountree, A. Sabelnikov, R. Saldanha, C. Salvo, S. Schönert, H. Simgen, M. Skorokhvatov, O. Smirnov, A. Sotnikov, S. Sukhotin, Y. Suvorov, R. Tartaglia, G. Testera, D. Vignaud, R.B. Vogelaar, F. von Feilitzsch, J. Winter, M. Wojcik, A. Wright, M. Wurm, J. Xu, O. Zaimidoroga,

S. Zavatarelli, G. Zuzel. Phys. Rev. D, **82**, 033006 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevD.82.033006
[11] M. Agostini, K. Altenmüller, S. Appel, V. Atroshchenko, Z. Bagdasarian, D. Basilico, G. Bellini, J. Benziger, D. Bick, D. Bravo, B. Caccianiga, F. Calaprice, A. Caminata, P. Cavalcante, A. Chepurnov, D. D'Angelo, S. Davini, A. Derbin, A. Di Giacinto, V. Di Marcello, X.F. Ding, A. Di Ludovico, L. Di Noto, I. Drachnev, A. Formozov, D. Franco, C. Galbiati, M. Gschwender, C. Ghiano, M. Giammarchi, A. Goretti, M. Gromov, D. Guffanti, C. Hagner, T. Houdy, E. Hungerford, Aldo Ianni, Andrea Ianni, A. Jany, D. Jeschke, V. Kobychev, G. Korga, S. Kumaran, T. Lachenmaier, M. Laubenstein, E. Litvinovich, P. Lombardi, I. Lomskaya, L. Ludhova, G. Lukyanchenko, L. Lukyanchenko, I. Machulin, S. Marcocci, J. Martyn, E. Meroni, M. Meyer, L. Miramonti, M. Misiaszek, V. Muratova, B. Neumair, M. Nieslony, R. Nugmanov, L. Oberauer, V. Orekhov, F. Ortica, M. Pallavicini, L. Papp, . Penek, L. Pietrofaccia, N. Pilipenko, A. Pocar, G. Raikov, M.T. Ranalli, G. Ranucci, A. Razeto, A. Re, M. Redchuk, A. Romani, N. Rossi, S. Rottenanger, S. Schönert, D. Semenov, M. Skorokhvatov, O. Smirnov, A. Sotnikov, Y. Suvorov, R. Tartaglia, G. Testera, J. Thurn, E. Unzhakov, A. Vishneva, R.B. Vogelaar, F. von Feilitzsch, M. Wojcik, M. Wurm, S. Zavatarelli, K. Zuber, G. Zuzel. Phys. Rev. D, **101**, 062001 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevD.101.062001
[12] M.J. Boschini, S. Della Torre, M. Gervasi, D. Grandi, G. Jóhannesson, G. La Vacca, N. Masi, I.V. Moskalenko, S. Pensotti, T.A. Porter. Astrophys. J., **854**, 94 (2018).
[13] T. Bringmann, M. Pospelov. Phys. Rev. Lett., **122**, 171801 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.171801
[14] C.V. Cappiello, J.F. Beacom. Phys. Rev. D, **100**, 103011 (2019).
[15] J.F. Navarro, C.S. Frenk, S.D.M. White. Astrophys. J., **490**, 493 (1997).
[16] J.B. Dent, B. Dutta, J.L. Newstead, I.M. Shoemaker, N.T. Arellano. Phys. Rev. D, **103**, 095015 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.103.095015
[17] G.J. Feldman, R.D. Cousins. Phys. Rev. D, **57**, 3873 (1998).
[18] Y. Ema, F. Sala, R. Sato. Phys. Rev. Lett., **122**, 181802 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.181802
[19] S. Jeesun, A. Majumdar. Phys. Rev. D, **114**, 023029 (2026). arXiv:2601.16903v3
[20] R. Agnese, T. Aralis, T. Aramaki, I.J. Arnquist, E. Azadbakht, W. Baker, S. Banik, D. Barker, D.A. Bauer, T. Binder, M.A. Bowles, P.L. Brink, R. Bunker, B. Cabrera, R. Calkins, C. Cartaro, D.G. Cerdeño, Y.-Y. Chang, J. Cooley, B. Cornell, P. Cushman, P.C.F. Di Stefano, T. Doughty, E. Fascione, E. Figueroa-Feliciano, C. Fink, M. Fritts, G. Gerbier, R. Germond, M. Ghaith, S.R. Golwala, H.R. Harris, Z. Hong, E.W. Hoppe, L. Hsu, M.E. Huber, V. Iyer, D. Jardin, C. Jena, M.H. Kelsey, A. Kennedy, A. Kubik, N.A. Kurinsky, R.E. Lawrence, J.V. Leyva, B. Loer, E. Lopez Asamar, P. Lukens, D. MacDonell, R. Mahapatra, V. Mandic, N. Mast, E.H. Miller, N. Mirabolfathi, B. Mohanty, J.D. Morales Mendoza, J. Nelson, J.L. Orrel, S.M. Oser, W.A. Page, R. Partridge, M. Pepin, A. Phipps, F. Ponce, S. Poude, M. Pyle, H. Qiu, W. Rau, A. Reisetter, T. Reynolds, A. Roberts, A.E. Robinson, H.E. Rogers, R.K. Romani, T. Saab, B. Sadoulet, J. Sander, A. Scarff, R.W. Schnee, S. Scorza, K. Senapati, B. Serfass, J. So, D. Speller, C. Stanford, M. Stein, J. Street, H.A. Tanaka, D. Toback, R. Underwood, A.N. Villano, B. von Krosigk, S.L. Watkins, J.S. Wilson, M.J. Wilson, J. Winchell, D.H. Wright, S. Yellin, B.A. Young, X. Zhang, X. Zhao. Phys. Rev. Lett., **121**, 051301 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.051301
[21] R. Essig, A. Manalaysay, J. Mardon, P. Sorensen, T. Volansky. Phys. Rev. Lett., **109**, 021301 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.021301
[22] C.V. Cappiello, Q. Liu, G. Mohlabeng, A.C. Vincent. arXiv:2405.00086