Поиск проявления космологических реликтовых нейтрино в β-спектре ^{210}Bi

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

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ „Курчатовский институт“,
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия
e-mail: ivanov_dv@pnpi.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 11 сентября 2024 г.
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты анализа β-спектра ^{210}Bi в диапазоне 1162−1192 keV вблизи граничной энергии с целью оценки чувствительности спектрометра к реакции обратного β-распада $\nu+^{210}\mathrm{Bi}\rightarrow{}^{210}\mathrm{Po}+\mathrm{e}^-$ для реликтовых нейтрино. Отсутствие статистически значимого числа таких событий позволило установить верхнее ограничение на произведение потока реликтовых нейтрино Φ_ν и сечения реакции σ_ν. Для нейтрино с массой $m_\nu \approx 0$ полученное ограничение составило $\sigma_\nu \cdot \Phi_\nu \leq 1.4 \cdot 10^{-12} s^{-1}$ для 90% уровня достоверности.

Ключевые слова: реликтовый нейтринный фон, стерильное нейтрино, бета-спектр.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59238.333-24

Возможный метод наблюдения реликтовых нейтрино с помощью реакции обратного β-распада на ядрах трития был предложен С. Вайнбергом и рассматривается в современном проекте PTOLEMY [1]. Оптимистические прогнозы по обнаружению реликтовых нейтрино основываются на предположении об эффекте их гравитационной кластеризации в окрестностях Земли [2]. Результатом реакции захвата нейтрино является появление пика моноэнергетических электронов в области граничной энергии β-спектра Q_β. Фундаментальный интерес представляет рассмотрение возможности регистрации захвата реликтовых нейтрино более тяжелыми ядрами, испытывающими β-распад. В настоящей работе исследовалась область граничной энергии β-спектра изотопа ^{210}Bi, который испытывает запрещенный в первом порядке неуникальный переход на основное состояние ^{210}Po: $^{210}\mathrm{Bi}(1^-) \rightarrow {}^{210}\mathrm{Po}(0^+) + \tilde{\nu} + e^-$ ($Q_\beta = 1162.7$ keV, $T_{1/2} = 5.0d$). Ядро ^{210}Bi обладает рядом уникальных характеристик, таких как сильное отличие формы β-спектра от разрешенной и аномально большое время жизни, и оно широко исследовалось, начиная с 30-х годов прошлого века в большом количестве экспериментальных и теоретических работ. В настоящей работе поиск пика моноэнергетических электронов проводился в диапазоне от Q_β до $Q_\beta + 30$ keV с целью включения в анализ тяжелых стерильных нейтрино с массой ~ 10 keV, которые являются мотивированными кандидатами на роль частиц темной материи [3].

Изотоп висмута ^{210}Bi относится к естественной цепи радиоактивного распада ^{238}U, являясь продуктом распада газа ^{222}Rn и последующего долгоживущего изотопа свинца ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22$ года). Безносительный планарный источник ^{210}Pb был изготовлен методом термического окисления с высаживанием на стальную фольгу. Схема измерения β-спектра была основана на простой геометрии β-спектрометра — „мишень-детектор“. Si(Li)-детектор, вместе с ^{210}Po-мишенью, помещался в вакуумный криостат, где охлаждался до температуры жидкого азота. Сигнал с детектора поступал на зарядочувствительный предусилитель, далее на стандартный аналоговый усилитель формирователь и оцифровывался 14 разрядным АЦП [4]. На рис. 1 показан β-спектр ^{210}Bi, полученный в результате 634 h измерений. В начале спектра хорошо виден спектр электронов и гамма-квантов от распада $^{210}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{210}\mathrm{Bi}$.

Энергетическое разрешение Si(Li) детектора, определенное для конверсионных электронов с энергией 30 keV, составило 1.0 keV, нижний порог регистрации был установлен на уровне 5 keV. Накопление данных происходило короткими одночасовыми сериями для контроля стабильности спектрометрического тракта. Общее число зарегистрированных электронов составило 10^8.

Измеренный β-спектр ^{210}Bi описывался выражением

$$N(E) = \int\limits_{E/mc^2+1}^{W_0} S(W) \cdot R(W, E) \cdot dW, \qquad (1)$$

где $R(W, E)$ — нормированная функция отклика спектрометра, полученная при моделировании методом Монте-Карло потока электронов с энергией W; $S(W)$ — распределение β-частиц по энергии, которое можно выразить как

$$S(W) = P \cdot W \cdot (W - W_0)^2 \cdot F(W, Z) \cdot C(W), \qquad (2)$$

где P и W — импульс и полная энергия электрона: $W = T/m \cdot c^2 + 1$, где T — кинетическая энергия электрона; $W_0 = T_0/m \cdot c^2 + 1$ — граничная энергия β-спектра; $F(W, Z)$ — функция Ферми, учитывающая взаимодействие вылетающего электрона с ядром и атомной оболочкой; $C(W)$ — функция формфактора ядра, учитывающая эффекты внутренних ядерных взаимодействий.

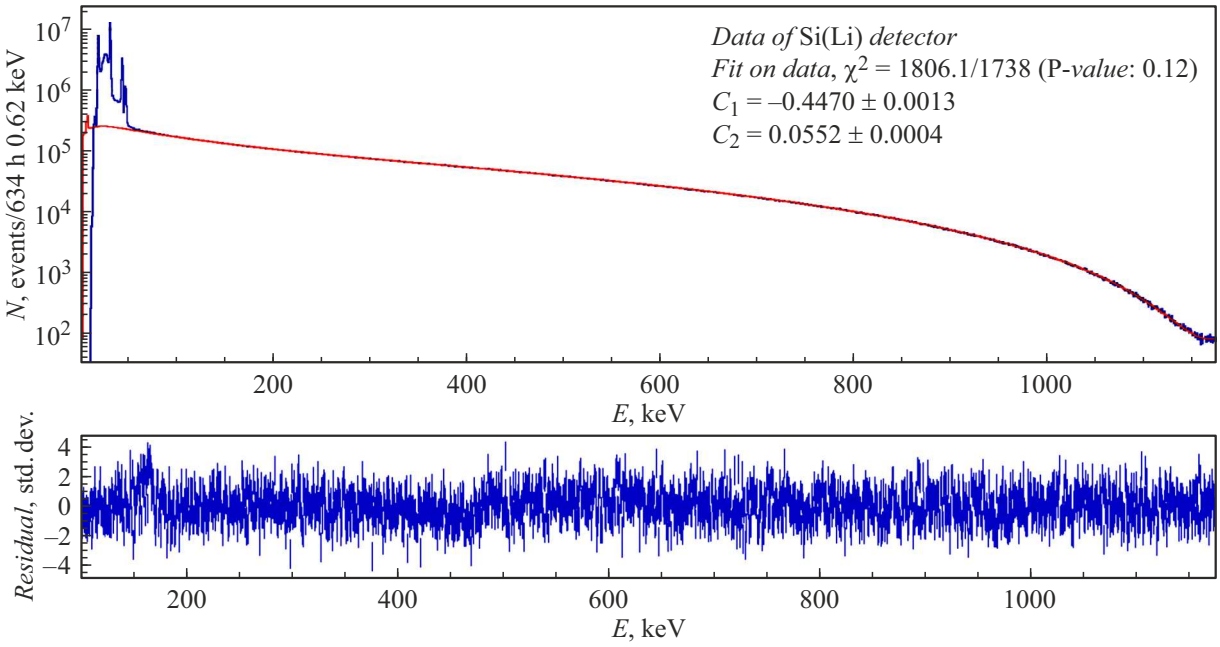

Рис. 1. Спектр источника ^{210}Pb, измеренный Si(Li)-детектором за 634 h.

Каноническая функция Ферми $F_0(W, Z)$, рассчитанная первоначально в приближении точечного ядра, была модифицирована с включением дополнительных поправок:

$$F(W, Z) = F_0(W, Z) \cdot L_0(W, Z) \cdot M(W, Z) \cdot S(W, Z) \cdot G_\beta(W), \tag{3}$$

где Z — заряд дочернего ядра, $L_0(E, Z)$ и $M(E, Z)$ — поправки на конечный размер ядра (электромагнитное и слабое взаимодействие), $S(E, Z)$ — поправка на экранирование атомной оболочки, $G_\beta(E)$ — радиационная поправка.

Ядерный формфактор $C(W)$ описывался с помощью двух параметров C_1 и C_2:

$$C(W) = 1 + C_1 \cdot W + C_2 \cdot W^2. \tag{4}$$

При моделировании функции отклика предполагалось однородное распределение точки появления электрона внутри источника и изотропное угловое распределение направления импульса электрона. Для моделирования был использован пакет GEANT 4.10.04 со стандартным пакетом электромагнитных взаимодействий G4Em Standard Physics Option4. При подгонке измеренного спектра варьировались 6 параметров: общий нормировочный коэффициент, наклон калибровочной прямой, параметры формфактора C_1 и C_2 и два дополнительных параметра функции отклика спектрометра.

Подгонка спектра проводилась в диапазоне энергий 120−1175 keV с линейной аппроксимацией фона. В результате был получен минимум $\chi^2/NDF = 1806.1/1738$, соответствующий уровню значимости $P = 0.12$ и значениям параметров формфактора $C_1 = -0.4470 \pm 0.0013$ и $C_2 = 0.0552 \pm 0.0004$ [4].

Для поиска пика вблизи граничной энергии модель экспериментального β-спектра (1) была дополнена двумя параметрами: E_{NC} и N_{NC}. Параметр E_{NC}, эквивалентный энергии моноэнергетического электрона, при которой производился поиск пика, фиксировал его положение, при этом в качестве амплитуды (числа событий в пике) возвращался параметр N_{NC}. Подгонка β-спектра осуществлялась аналогично описанной выше процедуре с формой спектра (1), параметры формфактора оставались свободными, диапазон подгонки был расширен до 120−1200 keV. Наиболее вероятные значения параметра N_{NC} были получены в диапазоне энергий 1162−1192 keV, который соответствует интервалу масс нейтрино 0−30 keV, с шагом 0.5 keV. Значений N_{NC}, отклоняющихся от нулевого значения более чем на 3 стандартных отклонения, не было выявлено, что свидетельствовало об отсутствии статистически значимых пиков. Для каждого значения N_{NC} был вычислен верхний предел N_{90} на число событий захвата нейтрино для 90% уровня достоверности с учетом только положительной части площади функции распределения $f(N_{\mathrm{NC}})$ (рис. 2).

На рис. 3 показан ожидаемый дополнительный вклад в измеренный спектр при энергии электронов, близкой к граничной $E_{\mathrm{NC}} = 1162$ keV ($m_\nu \approx 0$), который соответствует 790 событиям, что в 10 раз больше, чем установленный верхний предел при данной энергии.

Ожидаемое число захватов нейтрино N_{NC} может быть представлено как

$$N_{\mathrm{NC}} = \sigma_\nu \cdot \Phi_\nu \cdot I \cdot t \cdot \tau, \tag{5}$$

где σ_ν — сечение реакции захвата нейтрино, Φ_ν — поток реликтовых нейтрино, t — время измерения, I —

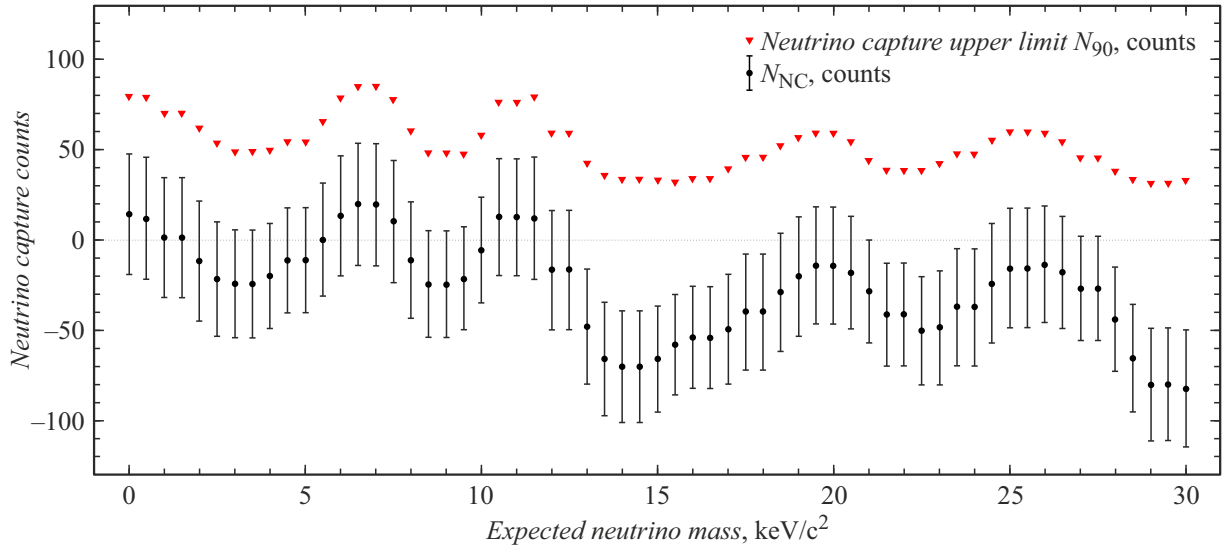

Рис. 2. Наиболее вероятные значения N_{NC} и соответствующие верхние пределы N_{90} для различных значений масс нейтрино.

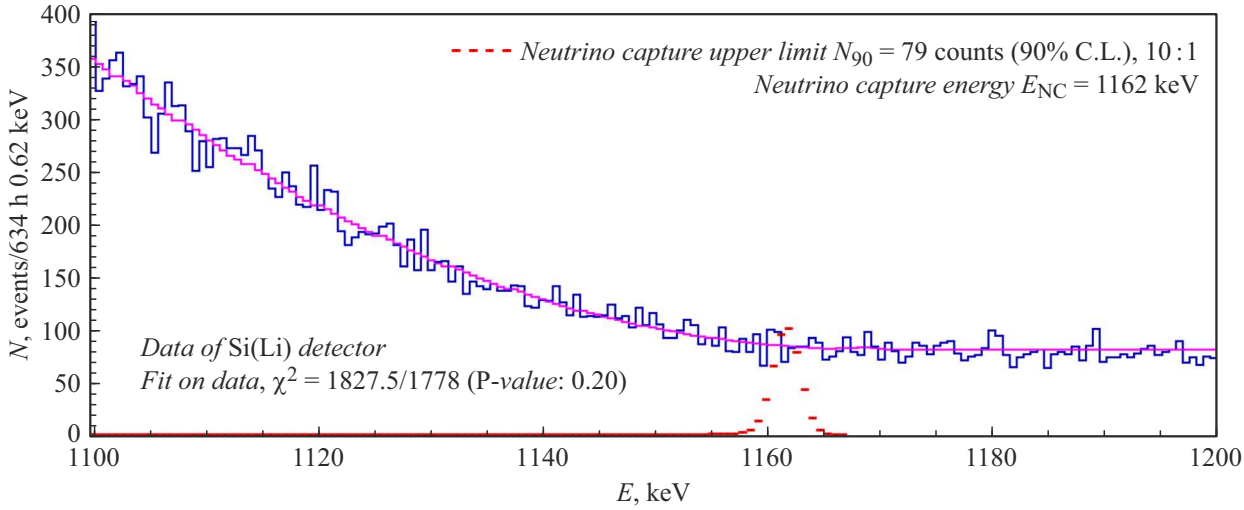

Рис. 3. Измеренный спектр в интервале 1100–1200 keV и функция отклика детектора при энергии $E_{NC} = 1162$ keV.

скорость счета ^{210}Bi Si(Li)-детектором, которая задается скоростью распада долгоживущего ^{210}Pb, и τ — время жизни ядра ^{210}Bi.

Из условия $N_{NC} < N_{90}(m_\nu)$ можно получить верхние пределы на произведение сечения взаимодействия и потока нейтрино для различных масс нейтрино. В частности, отсутствие пика в β-спектре при энергии, равной граничной энергии ($m_\nu \approx 0$, $N_{90} = 79$), приводит к ограничению на произведение $\sigma_\nu \cdot \Phi_\nu \leq 1.4 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{s}^{-1}$.

Предполагая, что реликтовые нейтрино с концентрацией $330\,\mathrm{cm}^{-3}$, движутся с нерелятивистскими скоростями частиц темной материи ~ 300 km/s, можно получить верхний предел на сечение взаимодействия реликтовых нейтрино с ядрами ^{210}Bi: $\sigma_{CNB} \leq 1.4 \cdot 10^{-22}\,\mathrm{cm}^2$. Верхнее ограничение на массу самого тяжелого состояния нейтрино из данных телескопа Planck и значений осцилляционных параметров составляет 65 meV [5,6]. Если полагать, что вся темная материя с плотностью $0.3\,\mathrm{GeV/cm}^3$ состоит из таких нейтрино, верхний предел на сечение захвата нейтрино оказывается более строгим: $\sigma_{DM} \leq 1.0 \cdot 10^{-29}\,\mathrm{cm}^2$ [7].

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] M.G. Betti, M. Biasotti, A. Bosca, F. Calle, N. Canci, G. Cavoto, C. Chang, A.G. Cocco, A.P. Colijn, J. Conrad, N. D'Ambrosio, N. De Groot, P.F. de Salas, M. Faverzani, A. Ferella, E. Ferri, P. Garcia-Abia, I. García-Cortés, G. Garcia Gomez-Tejedor, S. Gariazzo, F. Gatti, C. Gentile, A. Giachero, J.E. Gudmundsson, Y. Hochberg, Y. Kahn, A. Kievsky, M. Lisanti, C. Mancini-Terracciano, G. Mangano, L.E. Marcucci, C. Mariani, J. Martínez, M. Messina, A. Molinero-Vela, E. Monticone, A. Moroño, A. Nucciotti, F. Pandolfi, S. Parlati, S. Pastor, J. Pedrós, C. Pérez de los Heros, O. Pisanti, A.D. Polosa, A. Puiu, I. Rago, Y. Raitses, M. Rajteri, N. Rossi, I. Rucandio, R. Santorelli, K. Schaeffner, C.G. Tully, M. Viviani, F. Zhao, K.M. Zurek. J. Cosmology and Astroparticle Phys., 07, (2019). DOI: 10.1088/1475 7516/2019/07/047

[2] J.-C. Peng, G. Baym. Phys. Rev. D, **106** (6), (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.106.063018

[3] R. Adhikari, M. Agostini, N. Anh Ky, T. Araki, M. Archidiacono, M. Bahr, J. Baur, J. Behrens, F. Bezrukov, P.S. Bhupal Dev, D. Borah, A. Boyarsky, A. de Gouvea, C.A. de S. Pires, H.J. de Vega, A.G. Dias, P. Di Bari, Z. Djurcic, K. Dolde, H. Dorrer, M. Durero, O. Dragoun, M. Drewes, G. Drexlin, Ch.E. Düllmann, K. Eberhardt, S. Eliseev, C. Enss, N.W. Evans, A. Faessler, P. Filianin, V. Fischer, A. Fleischmann, J.A. Formaggio, J. Franse, F.M. Fraenkle, C.S. Frenk, G. Fuller, L. Gastaldo, A. Garzilli, C. Giunti, F. Glück, M.C. Goodman, M.C. Gonzalez-Garcia, D. Gorbunov, J. Hamann, V. Hannen, S. Hannestad, S.H. Hansen, C. Hassel, J. Heeck, F. Hofmann, T. Houdy, A. Huber, D. Iakubovskyi, A. Ianni, A. Ibarra, R. Jacobsson, T. Jeltema, J. Jochum, S. Kempf, T. Kieck, M. Korzeczek, V. Kornoukhov, T. Lachenmaier, M. Laine, P. Langacker, T. Lasserre, J. Lesgourgues, D. Lhuillier, Y.F. Li, W. Liao, A.W. Long, M. Maltoni, G. Mangano, N.E. Mavromatos, N. Menci, A. Merle, S. Mertens, A. Mirizzi, B. Monreal, A. Nozik, A. Neronov, V. Niro, Y. Novikov, L. Oberauer, E. Otten, N. Palanque-Delabrouille, M. Pallavicini, V.S. Pantuev, E. Papastergis, S. Parke, S. Pascoli, S. Pastor, A. Patwardhan, A. Pilaftsis, D.C. Radford, P.C.-O. Ranitzsch, O. Rest, D.J. Robinson, P.S. Rodrigues da Silva, O. Ruchayskiy, N.G. Sanchez, M. Sasaki, N. Saviano, A. Schneider, F. Schneider, T. Schwetz, S. Schönert, S. Scholl, F. Shankar, R. Shrock, N. Steinbrink, L. Strigari, F. Suekane, B. Suerfu, R. Takahashi, N. Thi Hong Van, I. Tkachev, M. Totzauer, Y. Tsai, C.G. Tully, K. Valerius, J.W.F. Valle, D. Venos, M. Viel, M. Vivier, M.Y. Wang, C. Weinheimer, K. Wendt, L. Winslow, J. Wolf, M. Wurm, Z. Xing, S. Zhou, K. Zuber. J. Cosmology and Astroparticle Phys., 01, (2017). DOI: 10.1088/1475 7516/2017/01/025

[4] I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakovet. Phys. Rev. C, **102** (6), (2020). DOI: 10.1103/PhysRevC.102.064329

[5] N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, A.J. Banday, R.B. Barreiro, N. Bartolo, S. Basak, R. Battye, K. Benabed, J.-P. Bernard, M. Bersanelli, P. Bielewicz, J.J. Bock, J.R. Bond, J. Borrill, F.R. Bouchet, F. Boulanger, M. Bucher, C. Burigana, R.C. Butler, E. Calabrese, J.-F. Cardoso, J. Carron, A. Challinor, H.C. Chiang, J. Chluba, L.P.L. Colombo, C. Combet, D. Contreras, B.P. Crill, F. Cuttaia, P. de Bernardis, G. de Zotti, J. Delabrouille, J.-M. Delouis, E. Di Valentino, J.M. Diego, O. Doré, M. Douspis, A. Ducout, X. Dupac, S. Dusini, G. Efstathiou, F. Elsner, T.A. Enßlin, H.K. Eriksen, Y. Fantaye, M. Farhang, J. Fergusson, R. Fernandez-Cobos, F. Finelli, F. Forastieri, M. Frailis, A.A. Fraisse, E. Franceschi, A. Frolov, S. Galeotta, S. Galli, K. Ganga, R.T. Génova-Santos, M. Gerbino, T. Ghosh, J. González-Nuevo, K.M. Górski, S. Gratton, A. Gruppuso, J.E. Gudmundsson, J. Hamann, W. Handley, F.K. Hansen, D. Herranz, S.R. Hildebrandt, E. Hivon, Z. Huang, A.H. Jaffe, W.C. Jones, A. Karakci, E. Keihänen, R. Keskitalo, K. Kiiveri, J. Kim, T.S. Kisner, L. Knox, N. Krachmalnicoff, M. Kunz, H. Kurki-Suonio, G. Lagache, J.-M. Lamarre, A. Lasenby, M. Lattanzi, C.R. Lawrence, M. Le Jeune, P. Lemos, J. Lesgourgues, F. Levrier, A. Lewis, M. Liguori, P.B. Lilje, M. Lilley, V. Lindholm, M. López-Caniego, P.M. Lubin, Y.-Z. Ma, J.F. Macías-Pérez, G. Maggio, D. Maino, N. Mandolesi, A. Mangilli, A. Marcos-Caballero, M. Maris, P.G. Martin, M. Martinelli, E. Martínez-González, S. Matarrese, N. Mauri, J.D. McEwen, P.R. Meinhold, A. Melchiorri, A. Mennella, M. Migliaccio, M. Millea, S. Mitra, M.-A. Miville-Deschênes, D. Molinari, L. Montier, G. Morgante, A. Moss, P. Natoli, H.U. Nørgaard-Nielsen, L. Pagano, D. Paoletti, B. Partridge, G. Patanchon, H.V. Peiris, F. Perrotta, V. Pettorino, F. Piacentini, L. Polastri, G. Polenta, J.-L. Puget, J.P. Rachen, M. Reinecke, M. Remazeilles, A. Renzi, G. Rocha, C. Rosset, G. Roudier, J.A. Rubiño-Martín, B. Ruiz-Granados, L. Salvati, M. Sandri, M. Savelainen, D. Scott, E.P.S. Shellard, C. Sirignano, G. Sirri, L.D. Spencer, R. Sunyaev, A.-S. Suur-Uski, J.A. Tauber, D. Tavagnacco, M. Tenti, L. Toffolatti, M. Tomasi, T. Trombetti, L. Valenziano, J. Valiviita, B. Van Tent, L. Vibert, P. Vielva, F. Villa, N. Vittorio, B.D. Wandelt, I.K. Wehus, M. White, S.D. M. White, A. Zacchei, A. Zonca. *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters* (2021), arXiv: 1807.06209v4

[6] R.L. Workman, V.D. Burkert, V. Crede, E. Klempt, U. Thoma, L. Tiator, K. Agashe, G. Aielli, B.C. Allanach, C. Amsler, M. Antonelli, E.C. Aschenauer, D.M. Asner, H. Baer, Sw. Banerjee, R.M. Barnett, L. Baudis, C.W. Bauer, J.J. Beatty, V.I. Belousov, J. Beringer, A. Bettini, O. Biebel, K.M. Black, E. Blucher, R. Bonventre, V.V. Bryzgalov, O. Buchmuller, M.A. Bychkov, R.N. Cahn, M. Carena, A. Ceccucci, A. Cerri, R. Sekhar Chivukula, G. Cowan, K. Cranmer, O. Cremonesi, G.D. 'Ambrosio, T. Damour, D. de Florian, A. de Gouvêa, T. DeGrand, P. de Jong, S. Demers, 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, W. Fetscher, B.D. Fields, A. Freitas, H. Gallagher, Y. Gershtein, T. Gherghetta, M.C. Gonzalez-Garcia, M. Goodman, C. Grab, A.V. Gritsan, C. Grojean, D.E. Groom, M. Grünewald, A. Gurtu, T. Gutsche, H.E. Haber, Matthieu Hamel, C. Hanhart, S. Hashimoto, Y. Hayato, A. Hebecker, S. Heinemeyer, J.J. Hernández-Rey, 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, J. Laiho, L.P. Lellouch, J. Lesgourgues, A.R. Liddle, Z. Ligeti, C.-J. Lin, C. Lippmann, T.M. Liss, L. Littenberg, C. Lourenço, K.S. Lugovsky, S.B. Lugovsky,

A. Lusiani, Y. Makida, F. Maltoni, T. Mannel, A.V. Manohar, W.J. Marciano, A. Masoni, J. Matthews, U.-G. Meißner, I.-A. Melzer-Pellmann, M. Mikhasenko, D.J. Miller, D. Milstead, R.E. Mitchell, K. Mönig, P. Molaro, F. Moortgat, M. Moskovic, K. Nakamura, M. Narain, P. Nason, S. Navas, A. Nelles, M. Neubert, P. Nevski, Y. Nir, K.A. Olive, C. Patrignani, J.A. Peacock, V.A. Petrov, 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, B.N. Ratcliff, 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, Y. Sakai, S. Sarkar, F. Sauli, O. Schneider, S. Schönert, 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, S. Spanier, C. Spiering, A. Stahl, S.L. Stone, Y. Sumino, M.J. Syphers, F. Takahashi, M. Tanabashi, J. Tanaka, M. Taševský, K. Terao, K. Terashi, J. Terning, R.S. Thorne, M. Titov, N.P. Tkachenko, D.R. Tovey, K. Trabelsi, P. Urquijo, G. Valencia, R. Van de Water, N. Varelas, G. Venanzoni, 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.G. Wohl, C.L. Woody, W.-M. Yao, M. Yokoyama, R. Yoshida, G. Zanderighi, G.P. Zeller, O.V. Zenin, R.-Y. Zhu, Shi-Lin Zhu, F. Zimmermann, P.A. Zyla. Progress Theoretical and Experimental Phys., **2022**, 8, (2022). DOI: 10.1093/ptep/ptac097

[7] Е.Ф. Бубнов, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, Д.В. Иванов, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, М.В. Трушин, Е.В. Унжаков. *Поиск проявления космологических реликтовых нейтрино в β-спектре* ^{210}Bi, препринт — 3074 (НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ, Гатчина, 2023), ISBN: 978-5-86763-480-3