

## Поиск солнечных аксионов с энергией 14.4 keV с помощью Kr пропорционального счетчика

© А.В. Дербин<sup>1</sup>, И.С. Драчнев<sup>1</sup>, Ю.М. Гаврилюк<sup>2</sup>, А.М. Гангапшев<sup>2</sup>, В.В. Казалов<sup>2</sup>,  
В.В. Кузьминов<sup>2</sup>, В.Н. Муратова<sup>1</sup>, Д.А. Семенов<sup>1</sup>, Д.А. Текуева<sup>2</sup>, М.В. Трушин<sup>1</sup>,  
Е.В. Унжаков<sup>1</sup>, С.П. Якименко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: derbin\_av@pnpi.rcki.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 29 августа 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Выполнен поиск аксионов с энергией 14.4 keV, возникающих в ядерном M1-переходе изотопа <sup>57</sup>Fe на Солнце, с помощью аксиоэлектрического эффекта в атомах Kr. Для поиска использовался газовый пропорциональный счетчик в низкофоновой установке, расположенной в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. В результате установлен новый верхний предел на произведение константы связи аксиона с электроном и эффективной константы связи аксиона с нуклонами  $|g_{Ae} g_{AN}^{eff}| \leq 3.2 \cdot 10^{-16}$  для 90% уровня достоверности.

**Ключевые слова:** солнечные аксионы, темная материя, аксионоподобные частицы.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59389.6315k

Ожидаемый энергетический спектр солнечных аксионов, подобно спектру солнечных нейтрино, содержит как непрерывную часть, так и монохроматические линии. Непрерывный спектр имеют аксионы, которые возникают при конверсии фотонов в электромагнитном поле плазмы, а также аксионы, рождающиеся в результате тормозного излучения и комптоновских процессов. Монохроматические аксионы испускаются в ядерных реакциях *pp*-цепочки и CNO-цикла, а также в магнитных переходах в некоторых ядрах, низколежащие уровни которых (<sup>169</sup>Tm, 8.4 keV; <sup>83</sup>Kr, 9.4 keV; <sup>57</sup>Fe, 14.4 keV) возбуждаются за счет высокой (1.3 keV) температуры в центре Солнца. При разрядке ядерного уровня вместо  $\gamma$ -кванта или конверсионного электрона может испускаться аксион. Наиболее интенсивный поток монохроматических аксионов ожидается от изотопа <sup>57</sup>Fe, в первую очередь из-за относительно высокого содержания атомов железа  $N_{Fe}$  в Солнце ( $N_{Fe}/N_H = 3.1 \cdot 10^{-5}$ ). Поиск <sup>57</sup>Fe-аксионов с энергией 14.4 keV проводился различными методами в ряде исследований [1,2]. В настоящей работе изучалась возможность обнаружения данных аксионов в реакции аксиоэлектрического эффекта с использованием большого газового пропорционального счетчика, заполненного криптоном.

Измерения с применением Kr-счетчика, расположенного в низкофоновой установке с пассивной и активной защитами, проводились в подземной Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН в течение 777 суток. Счетчик, корпус которого изготовлен из меди, имеет полный объем 10.8 л и заполнен криптоном при давлении 1.8 бар. Масса криптона в рабочем объеме счетчика составляет 58 г. Спектр детектора, измеренный в ин-

тервале 5–22 keV, показан на рис. 1. Первоначально эксперимент ориентирован на поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядром <sup>83</sup>Kr, при котором происходит возбуждение ядерного уровня <sup>83</sup>Kr с энергией 9.4 keV. Детали эксперимента подробно описаны в работах [3–5].

Поток <sup>57</sup>Fe-аксионов на поверхности Земли  $\Phi_A$  зависит от энергии возбуждаемого уровня и его времени жизни, а также от распространенности изотопа <sup>57</sup>Fe на Солнце, распределения температуры внутри Солнца и отношения вероятностей испускания аксиона и фотона [6]. Мы будем использовать вычисленное значение полного потока <sup>57</sup>Fe-аксионов, приведенное в единицах  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ :

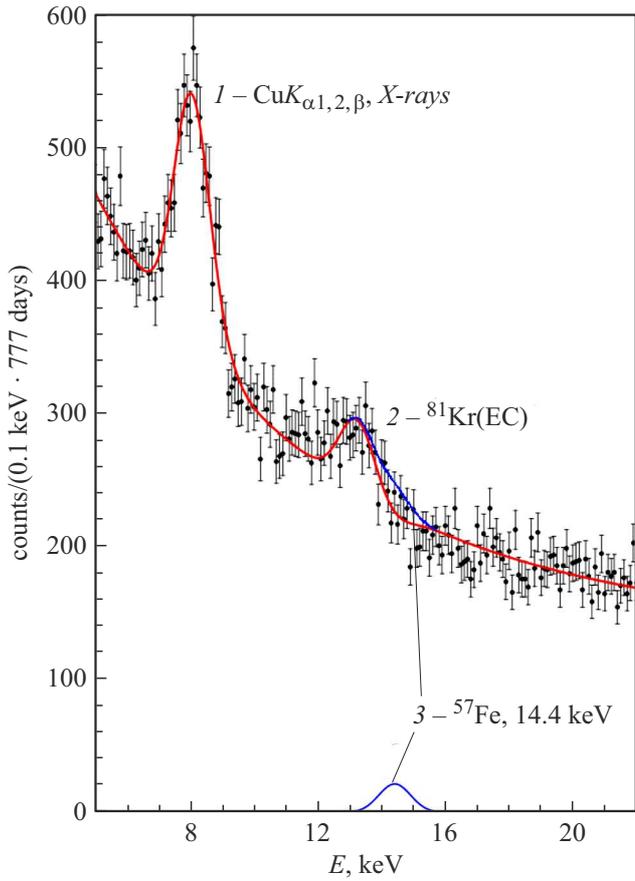
$$\Phi_A = 4.56 \cdot 10^{23} (g_{AN}^{eff})^2 \left( \frac{k_A}{k_\gamma} \right)^3, \quad (1)$$

где  $g_{AN}^{eff} = (-1.19g_{AN}^0 + g_{AN}^3)$  — эффективная константа связи аксиона с нуклонами, состоящая из изоскалярной  $g_{AN}^0$  и изовекторной  $g_{AN}^3$  частей [7],  $k_\gamma$  и  $k_A$  — импульсы фотона и аксиона соответственно.

В качестве детектирующей реакции для аксионов с энергией 14.4 keV нами выбран аксиоэлектрический эффект, который является аналогом фотоэлектрического эффекта. Сечение аксиоэлектрического эффекта  $\sigma_{ae}$  пропорционально сечению фотоэффекта  $\sigma_{pe}$  и константе связи аксиона с электроном  $g_{Ae}$  [8]:

$$\sigma_{ae}(E_A, m_A) = \sigma_{pe} \frac{3g_{Ae}^2 E_A^2}{16\pi\alpha m_e^2 \beta_A} \left( 1 - \frac{\beta_A^{2/3}}{3} \right), \quad (2)$$

где  $\beta_A = v/c = p_A/E_A$  — скорость аксиона,  $m_e$  — масса электрона,  $\alpha = 1/137$  — постоянная тонкой структуры.



**Рис. 1.** Спектр Кг-счетчика и результаты подгонки теоретической формой. 1 — пик рентгеновского излучения меди; 2 — пик, связанный с распадом  $^{81}\text{Kr}$ ; 3 — ожидаемый пик при энергии 14.4 keV, содержащий  $3S_{\text{lim}}$  событий (также показан его вклад в полный спектр).

В результате аксиоэлектрического эффекта возникает электрон, который сопровождается характеристическим рентгеновским излучением атома. Важно, что энергия связи электрона на  $K$ -оболочке атома криптона составляет 14.33 keV. Как следствие, криптон является наиболее подходящим атомом для регистрации аксионов с энергией 14.41 keV, которая соответствует максимальному сечению фотоэффекта для электронов на  $K$ -оболочке. Энергия фотоэлектрона, выбитого с  $K$ -оболочки, составляет всего 80 eV. Энергии последующего рентгеновского излучения имеют значения  $K_{\alpha 1,2} \approx 12.65$  keV,  $K_{\beta} \approx 14.2$  keV и  $L_{\alpha 1} \approx 1.6$  keV. Фактически только рентгеновские кванты  $K$ -серии могут вылетать из рабочего объема счетчика, фотоны  $L$ -серии, равно как и оже-электроны, полностью регистрируются детектором. В результате функция отклика Кг-счетчика при регистрации аксионов с энергией 14.4 keV представляет собой гауссов пик при той же энергии с шириной, определяемой энергетическим разрешением детектора.

Измеренный спектр счетчика подгонялся выражением, описывающим непрерывный фон, гауссовыми функция-

ми с известной энергией и искомым „аксионным“ пиком при энергии 14.4 keV. Результаты подгонки показаны на рис. 1. Два хорошо выраженных пика связаны с характеристическим рентгеновским излучением корпусной меди ( $K_{\alpha 1} = 8.048$  keV,  $K_{\alpha 2} = 8.028$  keV и  $K_{\beta} = 8.905$  keV) и распадами долгоживущего радиоактивного  $^{81}\text{Kr}$ , который образуется из стабильных изотопов  $^{82}\text{Kr}$  и  $^{80}\text{Kr}$  под действием нейтронов и распадается путем электронного захвата на основное состояние  $^{81}\text{Br}$  в 99.7% случаев. Поглощение характеристического рентгеновского излучения и оже-электронов брома в чувствительном объеме счетчика формирует пик при энергии 13.47 keV, соответствующей энергии связи электрона на  $K$ -оболочке атома Br. Рентгеновские кванты криптона ( $K_{\alpha 1,2} = 12.65$  keV) и брома ( $K_{\alpha 1,2} = 11.92$  keV), вылетающие из нечувствительной области детектора, вносят дополнительный вклад в уширенный пик при 13.47 keV. В результате три гауссовых функции описывали известные пики рентгеновского излучения  $K_{\alpha 1,2}$  и  $K_{\beta}$  меди и широкий пик при 13.47 keV, дисперсия и положение которого были свободными параметрами. Четвертый гауссиан описывал аксионный пик, его положение и дисперсия были привязаны к параметрам пика  $K_{\alpha 1,2}$  меди.

Статистически значимого пика при энергии 14.4 keV обнаружено не было, верхний предел на число событий в пике, определенный исходя из профиля  $\chi^2$ , составил  $S_{\text{lim}} = 90$  отсчетов для 90% уровня достоверности (confidence level, CL). Ожидаемое число зарегистрированных аксионов  $S$  определяется как

$$S = \sigma_{ae} \Phi_{AT} N \varepsilon. \quad (3)$$

Здесь  $N$  — число атомов Кг в счетчике,  $T$  — время измерений,  $\varepsilon$  — эффективность регистрации. Условие  $S \leq S_{\text{lim}}$  вместе с выражениями (1) и (2) позволяет ограничить сверху произведение констант  $g_{Ae}^2$  и  $(g_{AN}^{\text{eff}})^2$

$$|g_{Ae} g_{AN}^{\text{eff}}| \leq 3.2 \cdot 10^{-16} \quad (90\% \text{CL}). \quad (4)$$

Полученное ограничение (4) находится на уровне лучших результатов, достигнутых в экспериментах CUORE ( $|g_{Ae} g_{AN}^{\text{eff}}| \leq 2.7 \cdot 10^{-16}$ ) и Edelweiss ( $|g_{Ae} g_{AN}^{\text{eff}}| \leq 4.7 \cdot 10^{-17}$ ), в которых использовались  $\text{TeO}_2$ - и Ge-боллометры для поиска частиц темной материи.

Скалярная  $g_{AN}^0$  и изовекторная  $g_{AN}^3$  части эффективной константы  $g_{AN}^{\text{eff}}$  могут быть выражены через массу аксиона в двух наиболее популярных моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона. В результате на основе условия (4) установлены следующие ограничения на произведение константы связи  $g_{Ae}$  и массы  $m_A$ :

$$|g_{Ae} m_A| \leq 8.5 \cdot 10^{-8} \text{ eV}, \quad (5)$$

$$|g_{Ae} m_A| \leq 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ eV}. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) справедливы для аксионов в KSVZ- и DFSZ-моделях соответственно. При вычислениях мы

использовали константы связи аксиона с протоном и нейтроном, указанные в работах [9,10]. В соотношениях (4)–(6) для наглядности не приведен множитель  $(k_A/k_\gamma)^{3/2}$ , который начинает отличаться от единицы лишь при массах аксиона, больших  $\sim 5$  keV. Области значений  $g_{Ae}$  и  $m_A$ , исключенные условиями (5) и (6), приведены на рис. 2 в сравнении с результатами других экспериментов. Наиболее строгими оказываются ограничения, полученные в работе [5], где был проведен поиск резонансного возбуждения ядерного уровня с энергией 9.4 keV изотопа  $^{83}\text{Kr}$  непрерывным спектром солнечных аксионов, связанных с константой  $g_{Ae}$  (кривая 3 на рис. 2). Наконец, согласно данным рис. 2, верхние пределы на массу аксиона, полученные в настоящей работе, составляют  $m_A \leq 22$  eV и  $m_A \leq 3.3$  keV для DFSZ- и KSVZ-моделей соответственно.

Таким образом, проведен поиск поглощения солнечных аксионов с энергией 14.4 keV атомами криптона за счет аксиоэлектрического эффекта. Для регистрации фотоэлектронов, оже-электронов и рентгенов-

ских квантов использовался большой газовый пропорциональный счетчик, заполненный криптоном. Низкофоновая установка располагалась в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. В результате анализа спектра с экспозицией  $45.1 \text{ kg} \cdot \text{day}$  получено новое ограничение на произведение констант связи аксиона с электроном и нуклонами:  $|g_{Ae}g_{AN}^{eff}| \leq 3.2 \cdot 10^{-16}$  (90% CL), которое позволяет установить верхние пределы на величины  $|g_{Ae}m_A| \leq 8.5 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$  и  $|g_{Ae}m_A| \leq 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$  и массы аксиона  $m_A \leq 3.3 \text{ keV}$  и  $m_A \leq 22 \text{ eV}$  в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона соответственно.

### Финансирование работы

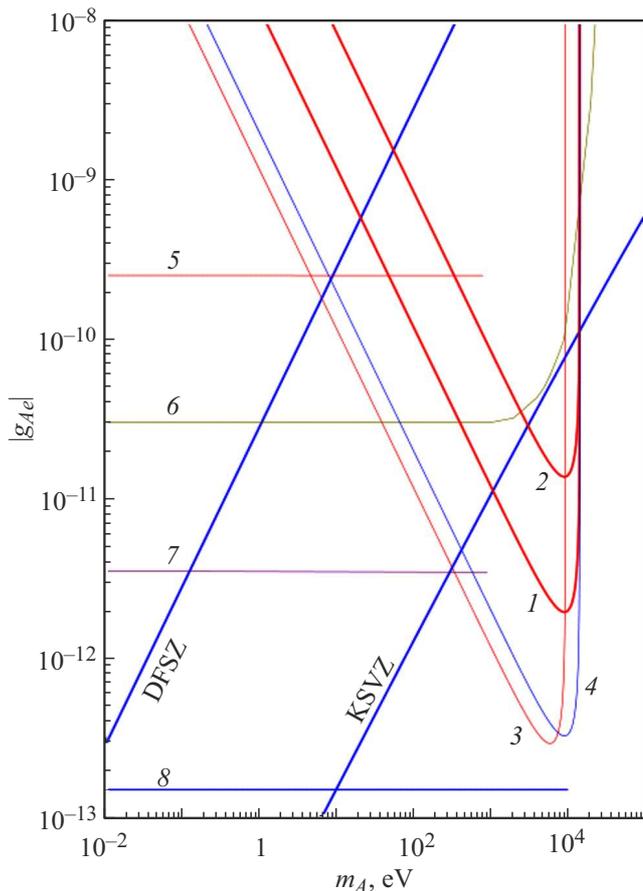
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00046).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] P.A. Zyla, R.M. Barnett, J. Beringer, O. Dahl, D.A. Dwyer, D.E. Groom, C.-J. Lin, K.S. Lugovsky, E. Pianori, D.J. Robinson, C.G. Wohl, W.-M. Yao, K. Agashe, G. Aielli, B.C. Allanach et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys., **2020**, 083C01 (2021). DOI: 10.1093/ptep/ptaa104
- [2] A.V. Derbin, V.N. Muratova, D.A. Semenov, E.V. Unzhakov, Phys. Atom. Nucl., **74**, 506 (2011). DOI: 10.1134/S1063778811040041
- [3] Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.В. Казалов, В.В. Кобычев, В.В. Кузьминов, В.Н. Муратова, С.И. Панасенко, С.С. Раткевич, Д.А. Семенов, Д.А. Текуева, Е.В. Унжаков, С.П. Якименко, Письма в ЖЭТФ, **101** (10), 739 (2015). DOI: 10.7868/S0370274X15100021 [Yu.M. Gavriluyk, A.N. Gangapshev, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.V. Kazalov, V.V. Kobychyev, V.V. Kuz'minov, V.N. Muratova, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Semenov, D.A. Tekueva, E.V. Unzhakov, S.P. Yakimenko, JETP Lett., **101** (10), 664 (2015). DOI: 10.1134/S0021364015100069].
- [4] Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.В. Казалов, В.В. Кобычев, В.В. Кузьминов, В.Н. Муратова, С.И. Панасенко, С.С. Раткевич, Д.А. Текуева, Е.В. Унжаков, С.П. Якименко, Письма в ЖЭТФ, **107** (10), 617 (2018). DOI: 10.7868/S0370274X18100016 [Yu.M. Gavriluyk, A.N. Gangapshev, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.V. Kazalov, V.V. Kobychyev, V.V. Kuzminov, V.N. Muratova, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, E.V. Unzhakov, S.P. Yakimenko, JETP Lett., **107** (10), 589 (2018). DOI: 10.1134/S0021364018100090].
- [5] Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.В. Казалов, В.В. Кузьминов, М.С. Микulich, В.Н. Муратова, Д.А. Текуева, Е.В. Унжаков, С.П. Якименко, Письма в ЖЭТФ, **116** (1), 13 (2022). DOI: 10.31857/S123456782213002X [Yu.M. Gavriluyk, A.N. Gangapshev, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.V. Kazalov,



**Рис. 2.** Верхние ограничения на  $|g_{Ae}|$ , полученные в настоящей работе для DFSZ-модели (1) и KSVZ-модели (2), в сравнении с результатами других экспериментов: 3 — резонансное поглощение  $^{83}\text{Kr}$  [5], 4 — эксперимент Edelweiss [11], 5 — Si(Li)-детектор [12], 6 — данные по солнечным нейтрино [13], 7 — эксперимент LUX [14], 8 — астрофизические ограничения [15].

- V.V. Kuzminov, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, D.A. Tekueva, E.V. Unzhakov, S.P. Yakimenko, *JETP Lett.*, **116** (1), 11 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022601075].
- [6] S. Moriyama, *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 3222 (1995). DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.3222
- [7] W.C. Haxton, K.Y. Lee, *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 2557 (1991). DOI: 10.1103/PhysRevLett.66.2557
- [8] M. Pospelov, A. Ritz, V. Voloshin, *Phys. Rev. D*, **78**, 115012 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevD.78.115012
- [9] F.T. Avignone III, R.J. Creswick, J.D. Vergados, P. Pirinen, P.C. Srivastava, J. Suhonen, *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, **2018**, 021 (2018). DOI: 10.1088/1475-7516/2018/01/021
- [10] А.В. Дербин, И.С. Драчнев, В.Н. Муратова, Д.А. Семенов, М.В. Трушин, Е.В. Унжаков, *Письма в ЖЭТФ*, **118** (3), 154 (2023). DOI: 10.31857/S1234567823150028 [A.V. Derbin, I.S. Drachnev, V.N. Muratova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov, *JETP Lett.*, **118** (3), 160 (2023). DOI: 10.1134/S0021364023602026].
- [11] E. Armengaud, Q. Arnaud, C. Augier, A. Benoit, A. Benoit, L. Bergé, T. Bergmann, J. Blümer, A. Broniatowski, V. Brudanin, P. Camus, A. Cazes, B. Censier, M. Chapellier, F. Charlieux et al. (The Edelweiss Collaboration), *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, **2013**, 067 (2013). DOI: 10.1088/1475-7516/2013/11/067
- [12] А.В. Дербин, И.С. Драчнев, А.С. Каюнов, В.Н. Муратова, *Письма в ЖЭТФ*, **95** (7), 379 (2012). [A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.S. Kayunov, V.N. Muratova, *JETP Lett.*, **95** (7), 339 (2012). DOI: 10.1134/S002136401207003X].
- [13] P. Gondolo, G.G. Raffelt, *Phys. Rev. D*, **79**, 107301 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevD.79.107301
- [14] D.S. Akerib, S. Alsum, C. Aquino, H.M. Araújo, X. Bai, A.J. Bailey, J. Balajthy, P. Beltrame, E.P. Bernard, A. Bernstein, T.P. Biesiadzinski, E.M. Boulton, P. Brás, D. Byram, S.B. Cahn et al. (LUX Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 261301 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.261301
- [15] O. Straniero, C. Pallanca, E. Dalessandro, I. Domínguezet, F.R. Ferraro, M. Giannotti, A. Mirizzi, L. Piersanti, *Astron. Astrophys. A*, **166**, 644 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/202038775