

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА СОЛНЕЧНЫХ АДРОННЫХ АКСИОНОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ В $M1$ -ПЕРЕХОДЕ ЯДЕР $^{83}\text{Kr}$

З. А. Ахматов<sup>1</sup>, Ю. М. Гаврилюк<sup>2</sup>, А. М. Гангапшев<sup>1,2,\*</sup>,  
А. В. Дербин<sup>3</sup>, И. С. Драчнев<sup>3</sup>, В. В. Казалов<sup>2</sup>,  
В. В. Кобычев<sup>4</sup>, В. В. Кузьминов<sup>2</sup>, В. Н. Муратова<sup>3</sup>,  
С. И. Панасенко<sup>5</sup>, С. С. Раткевич<sup>5</sup>, Д. А. Текуева<sup>2</sup>,  
Е. В. Унжаков<sup>3</sup>, А. Х. Хоконов<sup>1,2</sup>, С. П. Якименко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова,  
Нальчик, Россия

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

<sup>3</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

<sup>4</sup> Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

<sup>5</sup> Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина

Проведен поиск аксионов с энергией 9,4 кэВ, излучаемых в  $M1$ -переходе ядер  $^{83}\text{Kr}$  на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения  $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma, e$  (9,4 кэВ). Для регистрации  $\gamma$ -квантов и электронов использовался пропорциональный счетчик, заполненный криптоном и размещенный в низкофоновой установке. Получено новое ограничение на константу связи аксиона с нуклонами:  $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 8,4 \cdot 10^{-7}$ . В модели адронного аксиона оно приводит к новому ограничению на массу аксиона:  $m_A \leq 65$  эВ (95%-й уровень достоверности). Описана возможность поиска солнечных аксионов с помощью полупроводниковых кристаллов, содержащих изотоп  $^{57}\text{Fe}$ .

An experimental search for hadronic axions with an energy of 9.4 keV emitted in  $M1$ -transition of  $^{83}\text{Kr}$  in the Sun is held in BNO INR RAS. We use a proportional counter filled with  $^{83}\text{Kr}$  to detect axion via reaction of resonant absorption  $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma, e$ . Now an achieved upper limit on axion–nucleon coupling is  $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 8.4 \cdot 10^{-7}$ . It provides an upper limit on mass of hadronic axion at the level of  $m_A \leq 65$  eV (95% C.L.). The possibilities of using semiconductor crystals containing  $^{57}\text{Fe}$  as a detector of axions are described.

PACS: 14.80.Va

---

\*E-mail: gangapsh@list.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Наиболее естественное решение CP-проблемы сильных взаимодействий было получено путем введения новой киральной симметрии [1], спонтанное нарушение которой при энергии  $f_A$  полностью компенсирует CP-неинвариантный член в лагранжиане квантовой хромодинамики (КХД) и приводит к появлению аксиона [2, 3]. Модель «стандартного» (или PQWW) аксиона, в которой значение  $f_A$  полагалось равным масштабу электрослабых взаимодействий, была надежно закрыта серией экспериментов [4].

Были развиты модели двух классов «невидимого» аксиона. Это модели адронного (или KSVZ)-аксиона [5, 6] и GUT- или DFSZ-аксиона [7, 8]. Ограничения на массу аксиона возникают как следствие экспериментальных ограничений на константы связи аксиона с фотонами ( $g_{A\gamma}$ ), электронами ( $g_{Ae}$ ) и нуклонами ( $g_{AN}$ ), которые, в свою очередь, являются модельно-зависимыми величинами. В связи с этим можно рассматривать более широкий класс аксиноподобных частиц (ALPs, axion-like particles), для которых константы связи и масса частицы являются независимыми параметрами. Другая причина интенсивных поисков аксиона обусловлена тем, что аксион и ALPs являются популярными кандидатами на роль частиц, из которых состоит темная материя. Соответствующие подробные обзоры по теоретическим и экспериментальным исследованиям представлены в работе [4].

Если аксион существует, Солнце должно быть одним из наиболее мощных его источников. Переходы магнитного типа с возможным испусканием аксионов возникают в ядрах  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{23}\text{Na}$  и т. д., низколежащие уровни которых возбуждаются за счет высокой температуры звезды [11]. Полный поток излучаемых Солнцем аксионов зависит от энергии уровня, температуры, времени жизни ядерного уровня, распространенности изотопа на Солнце и отношения вероятности ядерного перехода с излучением аксиона к вероятности перехода с излучением фотона [11, 12]. Целью данной работы является поиск монохроматических аксионов с энергией 9,4 кэВ, излучаемых в  $M1$ -переходе в ядрах  $^{83}\text{Kг}$  на Солнце. На Земле аксионы могут быть обнаружены в обратной реакции резонансного поглощения путем регистрации частиц ( $\gamma$ - и рентгеновских квантов, конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня. Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром  $^{83}\text{Kг}$  в зависимости от вероятности излучения аксиона в данном переходе  $\omega_A/\omega_\gamma$ , параметра  $(g_{AN}^3 - g_{AN}^0)^2$ , описывающего аксион-нуклонное взаимодействие, и массы аксиона в KSVZ-модели рассчитана в работе [13] и имеет следующие значения:

$$R[\text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}] = 4,23 \cdot 10^{21} \left( \frac{\omega_A}{\omega_\gamma} \right)^2 =$$

$$\begin{aligned}
 &= 8,53 \cdot 10^{21} (g_{AN}^3 - g_{AN}^0)^4 \left( \frac{p_A}{p_\gamma} \right)^6 = \\
 &= 2,41 \cdot 10^{-10} m_A^4 \left( \frac{p_A}{p_\gamma} \right)^6,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $p_A$  и  $p_\gamma$  — импульсы аксиона и фотона соответственно, в нашем случае  $p_A/p_\gamma \cong 1$ . Количество зарегистрированных  $\gamma$ -квантов, следующих за поглощением аксиона, определяется массой мишени, временем измерений и эффективностью регистрации детектора, в то время как вероятность наблюдения пика с энергией 9,4 кэВ зависит от уровня фона экспериментальной установки.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

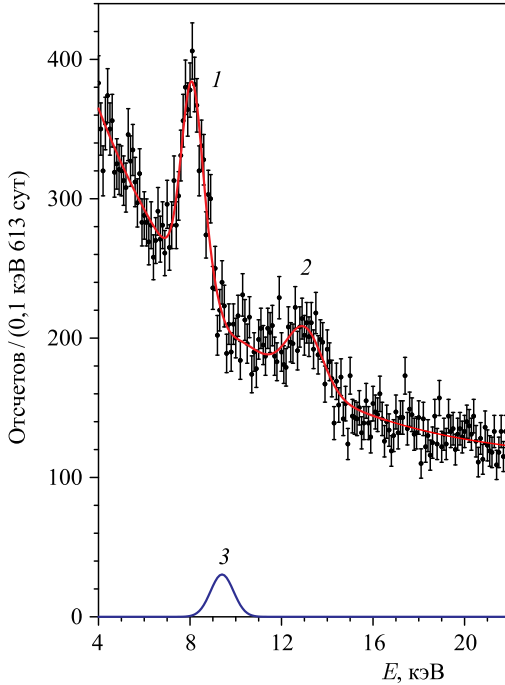
Для регистрации рентгеновских и  $\gamma$ -квантов, конверсионных и оже-электронов, возникающих в результате разрядки возбужденного уровня с энергией 9,4 кэВ, использовался большой пропорциональный счетчик, заполненный криптоном (99,9%  $^{83}\text{Kr}$ ) [13]. Рабочий объем счетчика составляет 8,77 л. Счетчик работает при давлении 1,8 бар, что соответствует 58 г изотопа  $^{83}\text{Kr}$  в рабочем объеме. Камера была окружена пассивной защитой из меди (20 см), свинца (20 см) и полиэтилена (8 см). Установка располагалась в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м в.э. [14]. Плотность потока мюонов в месте расположения установки составляет  $(2,6 \pm 0,09) \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  [15].

Полная форма сигнала с пропорционального счетчика записывалась с помощью цифрового осциллографа. Процедура обработки сигналов подробно описана в [16, 17].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектр сигналов, зарегистрированных в интервале 5–28 кэВ, показан на рисунке. В спектре доминируют два пика с энергиями  $\simeq 12,6$  кэВ и  $\simeq 8,0$  кэВ, которые связаны с регистрацией рентгеновских квантов  $K_{\alpha 1,2}$  криптона и меди. Видно, что пик с энергией 9,4 кэВ явно не проявился.

Результаты подгонки спектра, соответствующие минимуму  $\chi^2$ , показаны сплошной линией на рисунке. Для определения верхнего предела на число событий в пике с энергией 9,4 кэВ использовалась стандартная методика, связанная с построением профиля  $\chi^2$ . Определенный таким образом верхний предел на число событий в пике составляет  $S_{\text{lim}} = 127$  событий для 95%-го



Энергетический спектр сигналов: 1 —  $\text{CuK}_{\alpha,\beta}$ -рентген; 2 —  $^{81}\text{Kr}$ -К-захват; 3 —  $^{83}\text{Kr}$  (9,4 кэВ)

уровня достоверности. Ожидаемое число зарегистрированных аксионов составит

$$S_A = RMT\varepsilon \leq S_{\text{lim}}, \quad (2)$$

где  $M = 58$  г — масса изотопа  $^{83}\text{Kr}$  в мишени;  $T = 613,25$  сут — время измерений;  $\varepsilon = 0,825$  — эффективность регистрации фотонов с энергией 9,4 кэВ. Условие (2) позволяет установить верхние ограничения на комбинацию констант связи аксиона с нуклонами  $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0|$  и массу аксиона  $m_A$ . Используя соотношения из формулы (1), при условии  $(p_A/p_\gamma)^6 \cong 1$ , что справедливо при  $m_A < 2$  кэВ, получаем

$$|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 8,4 \cdot 10^{-7}, \quad (3)$$

$$m_A \leq 65 \text{ эВ}. \quad (4)$$

Ограничение (3) является модельно-независимым пределом. Ограничение (4) на массу адронного аксиона — наиболее строгое ограничение, полученное для аксионов в экспериментах по поиску резонансного поглощения

и аксиоэлектрического эффекта. Данный предел улучшает наш предыдущий результат [18] и результат, полученный в эксперименте по поиску резонансного поглощения, 14,4 кэВ аксионов ядром  $^{57}\text{Fe}$  [19].

Для существенного улучшения данного результата и достижения наиболее интересной области масс 3–30 эВ потребуются создание новой установки с массой мишени из  $^{83}\text{Kг}$  на несколько порядков больше.

Другой возможностью является создание детектора ионизирующего излучения на основе материала, содержащего железо в достаточно большой пропорции (не менее нескольких процентов). Использование изотопа  $^{57}\text{Fe}$  в данном случае эффективнее, по сравнению с  $^{83}\text{Kг}$ , так как ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов в  $3,5 \cdot 10^3$  раз выше при прочих равных условиях.

Одним из таких веществ является пирит ( $\beta\text{-FeS}_2$ ). Это полупроводник с шириной запрещенной зоны 0,95 эВ. Форма кристаллической решетки пирита имеет кубическую сингонию. В природе обнаруживаются образцы кристаллов больших размеров (десятки сантиметров), более чистые кристаллы имеют кубическую форму. В качестве материала для предполагаемого детектора исследовались образцы природного пирита разных размеров: от шарика диаметром 1 мм до бруска размером  $2,7 \times 2,0 \times 1,5$  см. Чистый пирит является диамагнетиком, однако измерения ферромагнитного резонанса для сферических образцов из исследуемого пирита и эталонного железа дали одинаковую величину внешнего магнитного поля  $B_0 = 0,23$  Тл для резонанса на частоте СВЧ-волны  $\nu = 9,3$  ГГц. Это свидетельствует о том, что в кристаллической решетке изучаемого образца содержатся примесные атомы железа, обуславливающие проводимость  $n$ -типа и характеризующиеся термом  $^5D_4$ , что соответствует спину  $S = 2$  для  $3d$ -электронов. Удельное сопротивление исследуемых нами образцов оказалось равным  $\rho = 22$  Ом·см при концентрации носителей заряда, равной  $n = 10^{15}$  см $^{-3}$ . При этом подвижность электронов в пирите равна  $\mu = 46,8$  см $^2$ /(В·с). Таким образом, высокая электропроводность природного пирита не позволяет использовать его в качестве детектора из-за аномально больших фоновых токов, на несколько порядков превышающих ток  $I_S$  полезного сигнала, который, в свою очередь, определяется энергией фотона  $E_\gamma = 14,4$  кэВ, шириной запрещенной зоны в пирите  $\Delta = 0,95$  эВ и временем сбора заряда  $\tau$  соотношением  $I_S \approx (eE_\gamma)/(\tau\delta) = 0,12$  нА, в котором время сбора заряда положено равным 20 мкс. Ситуацию может изменить использование искусственно выращенного пирита, например, методом CVT [20] с контролируемым допированием атомами примесей, дающими проводимость  $n$ -типа, для которой фоновый ток не будет превышать  $I_S$ . На данный момент нет технологии выращивания чистых синтетических кристаллов пирита размером более 5 мм, в основном все работы связаны с разработкой технологий изготовления тонких пленок для фотовольтаики (солнечных панелей, см., например, [21]).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен поиск резонансного поглощения солнечных аксионов с энергией 9,4 кэВ ядрами  $^{83}\text{Kr}$ , приводящего к возбуждению первого ядерного уровня  $^{83}\text{Kr}$ . В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с нуклоном:  $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 8,4 \cdot 10^{-7}$ , что соответствует ограничению на массу адронного аксиона  $m_A \leq 65$  эВ ( $S = 0,5$ ,  $z = 0,56$ ) для 95%-го уровня достоверности.

Изучены свойства кристаллов природного пирита как возможного материала для изготовления полупроводникового детектора ионизирующих излучений. Обнаружено, что кристаллы природного пирита для этого не пригодны из-за высокой концентрации примесей в них. Для дальнейших исследований нужны синтетические кристаллы пирита с низким содержанием примесей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-02-00258-а, № 15-02-02117-а, № 16-29-13011-офи-м и № 17-02-00305).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peccei R. D., Quinn H. R.* // Phys. Rev. D. 1977. V. 16. P. 1791;  
*Peccei R. D., Quinn H. R.* // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 38. P. 1440.
2. *Weinberg S.* // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 40. P. 223.
3. *Wilczek F.* // Ibid. P. 279.
4. *Olive K. A. et al. (Particle Data Group)* // Chin. Phys. C. 2014. V. 38. P. 090001.
5. *Kim J. E.* // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43. P. 103.
6. *Shifman M. A., Vainstein A. I., Zakharov V. I.* // Nucl. Phys. B. 1980. V. 166. P. 493.
7. *Житницкий А. П.* // ЯФ. 1980. Т. 31. С. 497.
8. *Dine M., Fischler F., Srednicki M.* // Phys. Lett. B. 1981. V. 104. P. 199.
9. *Baker K., Cantatore G., Cetin S. A., Davenport M., Desch K., Döbrich B., Gies H., Irastorza I. G., Jaeckel J., Lindner A., Papaevangelou T., Pivovarov M., Raffelt G., Redondo J., Ringwald A., Semertzidis Y., Siemko A., Sulc M., Upadhye A., Zioutas K.* // Ann. Phys. 2013. V. 525. P. A93; arXiv:1306.2841.
10. *Jaeckel J.* // Frascati Phys. Ser. 2013. V. 56. P. 172.
11. *Haxton W. C., Lee K. Y.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. P. 2557.
12. *Mariyama S.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 3222.
13. *Гаврилюк Ю. М., Ганганшиев А. Н., Дербин А. В., Драчнев И. С., Казалов В. В., Кобычев В. В., Кузьминов В. В., Муратова В. Н., Панасенко С. И., Раткевич С. С., Семенов Д. А., Текуева Д. А., Унжаков Е. В., Якименко С. П.* // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, вып. 10. С. 739.

14. *Gavriljuk Yu. M., Gangapshev A. M., Gezhaev A. M., Kazalov V. V., Kuzminov V. V., Panasenko S. I., Ratkevich S. S., Yakimenko S. P.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 729. P. 576.
15. *Гаврин В. Н. и др.* Препринт ИЯИ РАН П-698. М., 1991.
16. *Gavrilyuk Yu. M. et al.* // Instr. Exp. Tech. 2010. V. 53. P. 57.
17. *Gavrilyuk Yu. M., Gangapshev A. M., Kazalov V. V., Kuzminov V. V., Panasenko S. I., Ratkevich S. S.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 035501.
18. *Gavrilyuk Yu. M., Gangapshev A. M., Derbin A. V., Drachnev I. S., Kazalov V. V., Kobychiev V. V., Kuz'minov V. V., Muratova V. N., Panasenko S. I., Ratkevich S. S., Semenov D. A., Tekueva D. A., Unzhakov E. V., Yakimenko S. P.* // JETP Lett. 2015. V. 101. P. 664.
19. *Derbin A. V., Muratova V. N., Semenov D. A., Unzhakov E. V.* // Phys. At. Nucl. 2011. V. 74. P. 596.
20. *Ming-Yih Tsay, Ying-Sheng Huang, Yang-Fang Chen* // J. Appl. Phys. 1993. V. 74, No. 4. P. 2786.
21. *Berry N., Ming Cheng, Craig L., Limpinsel M., Hemminger J. C., Law M.* // Adv. Energy Mater. 2012. V. 2, No. 9. P. 1124.