

ВТОРОЙ ЭТАП ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОИСКУ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКСИОНОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ В $M1$ -ПЕРЕХОДЕ ЯДЕР ^{83}Kr

Ю. М. Гаврилюк¹, А. М. Гангапшев^{1,*}, А. В. Дербин²,
В. В. Казалов¹, В. В. Кузьминов¹, В. Н. Муратова²,
С. И. Панасенко³, С. С. Раткевич³, Д. А. Текуева¹,
Е. В. Унжаков², С. П. Якименко¹

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

² Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

³ Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина

Проведен поиск аксионов с энергией 9,4 кэВ, излучаемых в $M1$ -переходе ядер ^{83}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 γ -квантов и электронов использовался пропорциональный счетчик, заполненный криптоном и размещенный в низкофоновой установке. Получено новое ограничение на константу связи аксиона с нуклонами: $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1,02 \cdot 10^{-6}$. В модели адронного аксиона оно приводит к новому ограничению на массу аксиона: $m_A \leq 79$ эВ (95% уровня достоверности).

An experimental search for hadronic axions with energy of 9.4 keV emitted in $M1$ -transition of ^{83}Kr in the Sun is held at the Baksan Neutrino Observatory (INR RAS). We use a proportional counter filled with ^{83}Kr to detect axion via reaction of resonant absorption $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma, e$. An achieved upper limit on axion–nucleon coupling is $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1.02 \cdot 10^{-6}$. It provides an upper limit on mass of hadronic axion at the level of $m_A \leq 79$ eV (95% C.L.).

PACS: 14.80.Va

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-неинва-

*E-mail: gangapsh@list.ru

риантный 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 аксионоподобных частиц (ALPs, axion-like particles), для которых константы связи и массы частицы являются независимыми параметрами. Другая причина интенсивных поисков аксиона обусловлена тем, что аксион и ALPs — популярные кандидаты на роль частиц, из которых состоит темная материя. Соответствующие подробные теоретические и экспериментальные обзоры представлены в [4].

Если аксион существует, то Солнце должно быть одним из наиболее мощных его источников. Переходы магнитного типа с возможным испусканием аксионов возникают в ядрах ^{57}Fe , ^{55}Mn , ^{23}Na и т. п., 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 магнитного перехода [11, 12]. Целью данной работы является поиск монокроматических аксионов с энергией 9,4 кэВ, излучаемых в $M1$ -переходе в ядрах ^{83}Kr на Солнце. На Земле аксионы могут быть обнаружены в обратной реакции резонансного поглощения путем регистрации частиц (γ и рентгеновских квантов, конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня. Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром ^{83}Kr в зависимости от вероятности излучения аксиона в данном переходе ω_A/ω_γ , 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:

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

$$= 8,53 \cdot 10^{21} (g_{AN}^3 - g_{AN}^0)^4 \left(\frac{p_A}{p_\gamma} \right)^6 = \quad (2)$$

$$= 2,41 \cdot 10^{-10} m_A^4 \left(\frac{p_A}{p_\gamma} \right)^6, \quad (3)$$

где p_A и p_γ — импульсы аксиона и фотона соответственно, в нашем случае $p_A/p_\gamma \cong 1$. Количество зарегистрированных γ -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 γ -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}Kr) [13]. Рабочий объем счетчика составляет 8,77 л. Счетчик работает при давлении 1,8 бар, что соответствует 58 г изотопа ^{83}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]. Поток мюонов в месте расположения установки составляет $(2,60 \pm 0,09) \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ [15].

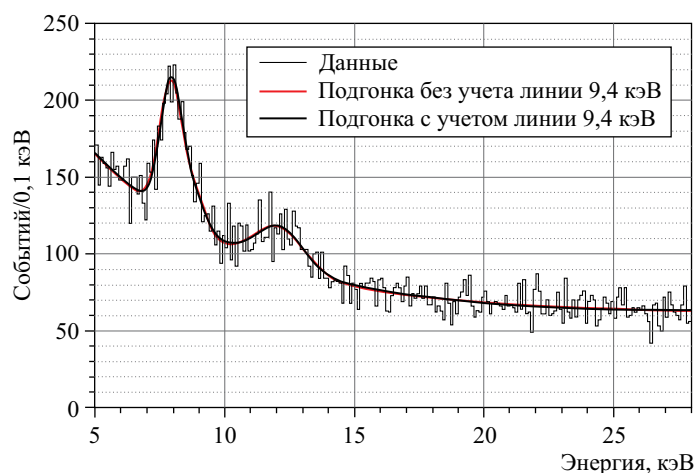
Полная форма сигнала с пропорционального счетчика записывалась с помощью цифрового осциллографа. Процедура обработки сигналов подробно описана в [16, 17].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Энергетический интервал 5–28 кэВ полученного энергетического спектра, в котором следует ожидать появления «аксионного» пика, показан на рисунке. В спектре доминируют два пика с энергиями $\simeq 12,6$ 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. Верхний предел на скорость поглощения аксионов ядрами ^{83}Kr для 95 %-го уровня достоверности был рассчитан по следующей формуле:

$$R \leq \frac{1,96\sqrt{2B}}{MT} \frac{1}{\epsilon} \frac{1}{0,95} = 9,9 \cdot 10^{-3} \text{ г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}, \quad (4)$$

где $M = 58 \text{ г}$ — масса изотопа ^{83}Kr в мишени; $T = 274,3 \text{ сут}$ — время измерений; $\epsilon = 0,91$ — эффективность регистрации фотонов с энергией 9,4 кэВ; $B = 2424$ — количество фоновых событий в окне 8,5–10,3 кэВ, куда должны попасть 95 % всех «аксионных» событий. Условие (4) позволяет установить верхние ограничения на вероятность излучения аксиона ω_A/ω_γ , комбинацию



(Рисунок цветной в электронной версии.) Энергетический спектр

констант связи аксиона с нуклонами $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0|$ и массу аксиона m_A . Используя соотношения (1)–(3) при условии $(p_A/p_\gamma)^6 \cong 1$, что справедливо при $m_A < 2$ кэВ, получаем

$$\omega_A/\omega_\gamma \leq 1,51 \cdot 10^{-12}, \quad (5)$$

$$|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1,02 \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

$$m_A \leq 79 \text{ эВ}. \quad (7)$$

Ограничения (5) и (6) являются модельно-независимыми пределами. Ограничение (7) 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}Fe [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен поиск резонансного поглощения 9,4 кэВ солнечных аксионов ядрами ^{83}Kr , приводящего к возбуждению первого ядерного уровня ^{83}Kr . В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с нуклоном: $|g_{AN}^3 - g_{AN}^0| \leq 1,02 \cdot 10^{-6}$, что соответствует ограничению на массу адронного аксиона $m_A \leq 79$ эВ ($S = 0,5$, $z = 0,56$) для 95 %-го уровня достоверности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-02-00258 и 15-02-02117).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peccei R. D., Quinn Helen R.* // Phys. Rev. D. 1977. V. 16. P. 1791;
Peccei R. D., Quinn Helen 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. Р.* // ЯФ. 1980. Т. 31. С. 497.
8. *Dine M., Fischler F., Srednicki M.* // Phys. Lett. B. 1981. V. 104. P. 199.
9. *Baker K. et al.* // 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., Гангапшев А. Н., Дербин А. В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, вып. 10. С. 739.
14. *Gavrilyuk Yu. M. et al.* // 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. Techn. 2010. V. 53. P. 57.
17. *Gavrilyuk Yu. M. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 035501.
18. *Gangapshev A. M. et al.* // JETP Lett. 2015. V. 101. P. 664.
19. *Derbin A. V. et al.* // Phys. At. Nucl. 2011. V. 74. P. 596.