

## О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СКАЛЯРНЫХ И ПСЕВДОСКАЛЯРНЫХ БОЗОНОВ

В. С. Горелик, М. А. Дресвянников, Л. Н. Жерихина, А. М. Цховребов

*В статье анализируются свойства процессов конверсии “холодных” сверхлегких скалярных или псевдоскалярных бозонов, слабо взаимодействующих с материальными средами, в фотоны с энергией 0.001–1.0 мэВ. Приведены схемы возможных экспериментов, включающие в себя замкнутые резонаторные кюветы, находящиеся при низких температурах и высокочувствительные приёмники радиочастотных фотонов. Существование элементарных частиц подобного типа предсказывается в различных вариантах расширения “стандартной модели”. Их прямое или косвенное обнаружение позволило бы прояснить природу феномена “темной материи”.*

**Ключевые слова:** аксион, парафотон, резонатор, приёмник, масса покоя, конверсия, джозефсоновский ток.

Одной из приоритетных задач современной физики является поиск высокоэнергетического скалярного бозона (бозона Хиггса), введение которого в калибровочную теорию электрослабых взаимодействий позволяет, как известно [1–3], посредством механизма спонтанного нарушения симметрии “сделать” безмассовые кванты силовых полей массивными. В теории показано [4–7], что у такого скалярного бозона с аномально большой ожидаемой массой покоя имеется квантово-полевой “смежник” – безмассовый бозон Голдстоуна. Классической иллюстрацией того, как соотносятся упомянутые бозоны, является картина потенциального рельефа в виде бутылочного дна: два минимума в поперечном его сечении, куда поле спонтанно “скатывается” из неустойчивого центра, приобретая массу, приводят к формированию тяжелого скалярного бозона (бозона Хиггса), отвечающего квантованию колебаний поля вблизи выбранного минимума; движение вдоль кругового углубления соответствует безмассовому бозону Голдстоуна (ариону).

В последнее время на основе астрофизических данных была выдвинута гипотеза [5–10] о существовании низкоэнергетических скалярных и псевдоскалярных бозонов, являющихся элементарными частицами Тёмной Материи с массой покоя в диапазоне 0.001–1 мэВ. В соответствии с правилами отбора легкий псевдоскалярный бозон (аксион [9]) в сильном магнитном поле может конвертироваться в фотон микроволнового диапазона. Без присутствия внешнего магнитного поля в центросимметричной среде (в вакууме) согласно правилам отбора легкий скалярный бозон (парафотон) может распадаться на два перепутанных (*entangled*) фотона с энергиями  $\hbar\omega_p/2$  вдвое меньшими энергии покоя исходного бозона  $\hbar\omega_p$  и противоположно направленными импульсами. “Холодные” парафотоны и аксионы являются нерелятивистскими (ньютоновскими) частицами и при достаточно большой плотности могут переходить в состояние бозе–эйнштейновского конденсата. “Горячие” парафотоны и аксионы являются релятивистскими частицами и движутся со скоростью, близкой к скорости света. Характерным свойством этих частиц является сверхслабое взаимодействие с материальными средами, аналогичное исключительно малому сечению взаимодействия нейтрино. В настоящее время ставится задача генерации и детектирования этих частиц в лаборатории. Задача регистрации “холодных” аксионов сводится к обнаружению в сильном магнитном поле микроволнового излучения, энергия квантов которого совпадает с энергией аксионов. В работах [11–17] были выполнены попытки экспериментального обнаружения аксионов в лаборатории с использованием высокодобротного резонатора в качестве детектора фотонов, конвертированных из аксионов в магнитном поле. Для регистрации парафотонов имеется возможность регистрации пар микроволновых фотонов даже без присутствия внешнего магнитного поля. Перепутанные микроволновые фотоны могут возникать в результате распадов парафотона (скалярного бозона) на два тождественных фотона, движущихся в противоположных направлениях. Принципиальная схема детектора микроволновых фотонов, возникающих в результате распада парафотонов, представлена на рис. 1. При этом используется резонатор, состоящий из двух ниобиевых зеркал (1, 2). Резонатор вместе с фокусирующей линзой (3), модулятором излучения (4) и высокочувствительным приёмником микроволнового излучения (5) помещается в низкотемпературную камеру.

Плотность энергии тёмной материи в околоземном пространстве составляет  $\approx 10^{-10}$  Дж/см<sup>3</sup>. Таким образом, величина энергии тёмной материи, сосредоточенной в объёме  $V = 1$  м<sup>3</sup>, составляет  $10^{-4}$  Дж. Если исходить из гипотезы о том, что облака тёмной материи в околоземном пространстве состоят главным образом из парафотонов, то ин-

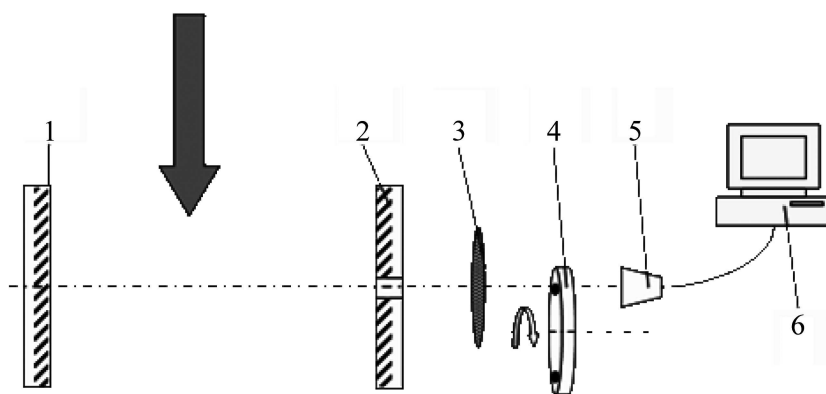


Рис. 1: Принципиальная схема установки для обнаружения микроволновых фотонов, возникающих в результате распадов парафотонов; 1 – глухое зеркало с напылением ниобием; 2 – глухое зеркало с отверстием в центре; 3 – линза из тефлона; 4 – механический модулятор; 5 – приёмник электромагнитного излучения; 6 – компьютер.

тенсивность микроволнового излучения, возникающего в результате распадов парафотонов на микроволновые фотоны, определяется вероятностью процессов таких распадов и может быть достаточной для регистрации современными приёмниками излучения.

“Ловушкой” для каждого из перепутанных фотонов микроволнового диапазона может быть высокодобротный сверхпроводящий резонатор, охлаждённый до низких температур и связанный с анализатором спектра электромагнитных колебаний, принцип действия которого основывается на пассивном нестационарном эффекте Джозефсона [18–21].

Принципиальная схема приёмника микроволновых фотонов, возникающих в результате распада парафотонов, представлена на рис. 2. Использование схемы совпадений при регистрации микроволнового излучения позволит использовать эффект перепутанности микроволновых фотонов для повышения чувствительности приёмника.

Возможность повышения вероятности спонтанного распада парафотона на пары фотонов микроволнового излучения и соответственно повышения интенсивности микроволнового излучения фотонов, возникающих в результате парафотон-фотонной конверсии, может быть реализована в том случае, когда внутри резонатора (см. рис. 3) помещается материальная среда, обеспечивающая уменьшение групповой скорости ( $v \ll c$ ) микроволновых фотонов и соответственно увеличение плотности фотонных состояний [22] на частоте рождающихся микроволновых фотонов. В качестве такой среды могут быть использованы метаматериалы [23–26], фотонные кристаллы [27–32] с запрещённой

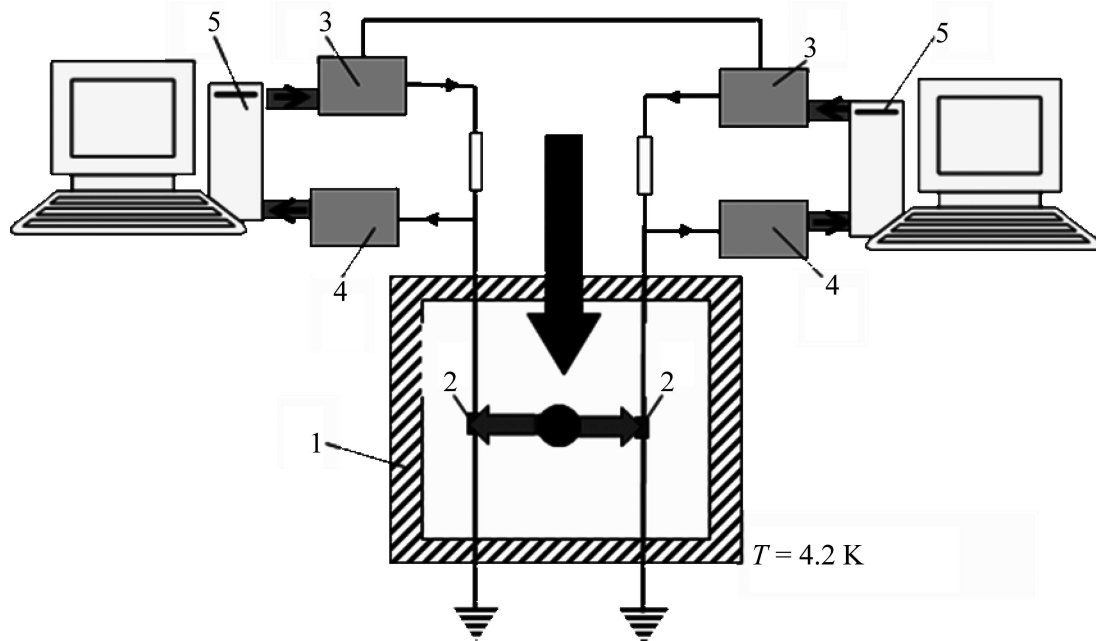


Рис. 2: Блок-схема установки для регистрации микроволновых фотонов, возникающих в результате распада парафотона; 1 – теплоизолирующий корпус с металлическим резонатором; 2 – детекторы; 3, 4 – регистраторы тока и напряжения; 5 – компьютеры.

зоной в микроволновом диапазоне, сегнетоэлектрики с высокодобротной мягкой модой и др.

Остановимся более подробно на особенностях регистрации микроволнового излучения перепутанных фотонов с использованием джозефсоновского приёмника излучения. В связи с ожидаемыми энергиями перепутанных фотонов (0.0005–5 мэВ) – продуктов распада низкоэнергетического скалярного бозона (парафотона), резонатор (1) (см. рис. 2) должен быть многомодовым. Многомодовость означает формирование “мелкой” сетки резонансных частот  $f_{n+1} - f_n \sim c/R$ , обеспечивающей высокую вероятность “попадания” рождающихся микроволновых фотонов в один из резонансов. Высокая добротность резонатора обеспечивает стимулированные процессы распада и увеличивает время ( $t \sim 2\pi Q/f$ ) регистрации каждого акта распада до времени цикла частотного сканирования, которое производится джозефсоновским анализатором спектра. Действие анализатора сводится [18] к записи вольт-амперной характеристики (ВАХ) джозефсоновского перехода, который подвергается воздействию исследуемого излучения. Распознавание ступенек Шапиро [19], возникающих при этом на ВАХ, позволяет, задаваясь

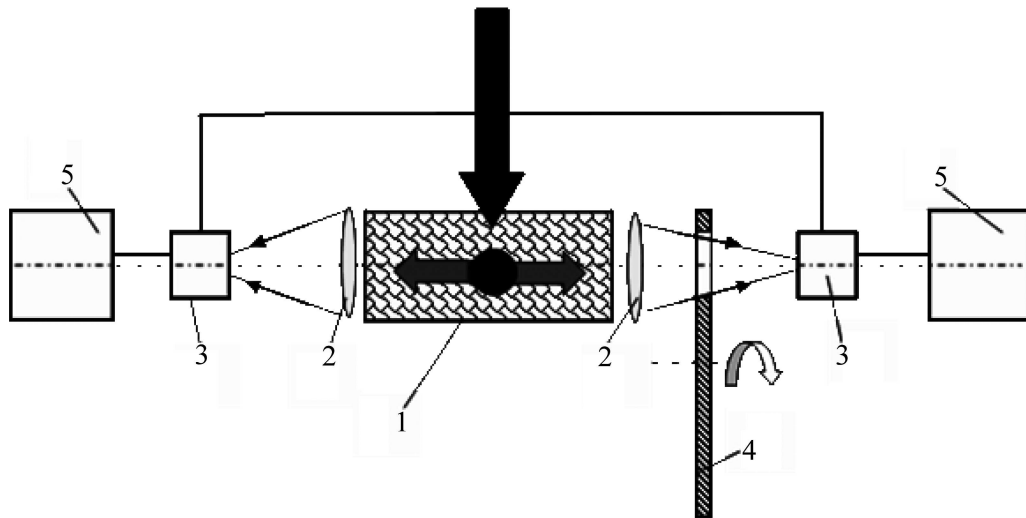


Рис. 3: Принципиальная схема для регистрации перепутанных микроволновых фотонов с использованием метаматериала в резонаторе; 1 – резонатор с метаматериалом, 2 – тefлоновые линзы, 3 – детектор, 4 – модулятор, 5 – приёмники микроволнового излучения.

простейшей моделью, восстановить спектр исходного сигнала. Как известно [20], джозефсоновский ток, отвечающий когерентному туннелированию куперовских пар, имеет характерную зависимость от разности фаз на туннельном барьере:  $I_J = I_{JC} \sin \varphi$ , где  $I_{JC}$  – критический джозефсоновский ток куперовских пар, проникающих через потенциальный барьер.

При облучении джозефсоновского контакта излучением с частотой  $\omega = 2\pi f$  напряжение на переходе будет зависеть от времени по закону:  $V(t) = V_0 + v \cos \omega t$ . Соответственно разность фаз на “сверхпроводящих берегах” потенциального барьера после интегрирования  $V(t)$  выражается в виде:  $\varphi(t) = \int_0^t \frac{2eV(t)}{\hbar} dt = \frac{2eV_0}{\hbar} t +$

$\frac{2ev}{\hbar\omega} \sin \omega t + \varphi_0$ , а джозефсоновский ток преобразуется в ряд Фурье:  $I_J = I_{JC} \sin \varphi(t) = I_{JC} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left( \frac{2ev}{\hbar\omega} \right) \sin \left( \left( n\omega - \frac{2eV_0}{\hbar} \right) t + \varphi_0 \right)$ , хорошо известный в радиофизике из теории спектров частотно-модулированного сигнала. Здесь в качестве амплитуды  $n$ -гармоники  $I_{JC} J_n \left( \frac{2ev}{\hbar\omega} \right)$  выступает произведение функции Бесселя  $n$ -го порядка на критический ток перехода  $I_{JC}$ , который зависит от туннельной проницаемости барье-

ра. Если  $n\omega - \frac{2eV_0}{\hbar} = 0$ , то соответствующее слагаемое оказывается не зависящим от времени и, таким образом, при напряжении  $V_0 = n \frac{\hbar\omega}{2e}$  возникает ненулевая постоянная составляющая тока  $\delta I = I_{JC} J_n \left( \frac{2ev}{\hbar\omega} \right) \sin \phi_0$ . Из данных формул следует, что при облучении джозефсоновского перехода микроволновым излучением на его ВАХ должны наблюдаться ступеньки тока (ступеньки Шапиро), высота которых есть  $2I_{JC} J_n \left( \frac{2ev}{\hbar\omega} \right)$ . Таким образом, в соответствии с элементарной теорией пассивного нестационарного эффекта Джозефсона на основе туннельного перехода, образованного между двумя сверхпроводниками, можно создать высокочувствительный быстродействующий спектроанализатор СВЧ-диапазона. Использование в такой системе высокотемпературных сверхпроводников позволит работать в области вплоть до нескольких терагерц, так как высокой критической температуре отвечает широкая щель в спектре возбуждений сверхпроводника. При этом энергии терагерцовых квантов оказывается недостаточно для разрушения куперовских пар, что обеспечивает расширение частотного диапазона области высокой чувствительности спектроанализатора. Действие такого прибора сводится к записи ВАХ с использованием компьютерной программы распознавания ступенек Шапиро и решения задачи восстановления спектра сигнала.

Таким образом, нами предложены принципиальные схемы установок для обнаружения низкоэнергетических скалярных бозонов (парафотонов), предположительно являющихся элементарными частицами тёмной материи, возникающими в процессах парафотон-фотонной конверсии. Ожидаемая масса покоя парафотонов соответствует микроволновому диапазону спектра: 0.001–1 мэВ. В качестве детекторов микроволновых фотонов, возникающих в результате распада парафотонов, предлагается использовать высокочувствительный спектроанализатор, основанный на нестационарном эффекте Джозефсона. Для повышения интенсивности возникающего в результате парафотон-фотонной конверсии микроволнового излучения в объём микроволнового резонатора предложено вводить метаматериалы или фотонные кристаллы, замедляющие микроволновые фотоны до скоростей, существенно меньших скорости света.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. А. Рябов, В. А. Царев, А. М. Цховребов, УФН **178**(11), 1129 (2008).
- [2] T. Appelquist, H.-C. Cheng, and V. A. Dobrescu, Phys.Rev. D **62**, 035002 (2001).

- [3] G. Servant and T. M. Tait, Nucl. Phys. B **650**, 391 (2001).
- [4] J. Goldstone, A. Salam, and S. Weinberg, Phys. Rev. **127**, 965 (1962).
- [5] L. B. Okun, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **83**, 892 (1982).
- [6] S. Hoffmann, Phys. Lett. B **193**, 117 (1986); L. J. Rosenberg and K. A. van Bibber, Phys. Rep. **325**, 1 (2000).
- [7] C. Picciotto and M. Pospelov, Phys. Lett. B **605**, 15 (2005).
- [8] J. Jaeckel, J. Redondo, and A. Ringwald, EPL **87**, 10010 (2009).
- [9] P. Sikivie, D. B. Tanner, and K. van Bibber, Phys. Rev. Lett. **98**, 172002 (2007).
- [10] K. A. van Bibber, N. R. Dagdeviren, S. E. Koonin, et al., Phys. Rev. Lett. **59**, 759 (1987).
- [11] L. D. Duffy, P. Sikivie, D. B. Tanner, et al., Phys. Rev. D **74**, 012006 (2006).
- [12] I. J. Rosenberg and K. A. Bibber, Phys. Rep. **325**, 1 (2000).
- [13] D. D. Stancil, Phys. Rev. D **76**, 111701(R) (2007).
- [14] A. Afanasev, O. K. Baker, K. B. Beard, et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 120401 (2008).
- [15] Guido Mueller, Pierre Sikivie, D. B. Tanner, and K. van Bibber, Phys. Rev. D **80**, 072004 (2009).
- [16] P. Sikivie, D. B. Tanner, and Karl van Bibber, Phys. Rev. Lett. **98**, 172002 (2007).
- [17] J. Hoskins, J. Hwang, P. Sikivie, and D. B. Tanner, Phys. Rev. Lett. **104**, 041301 (2010).
- [18] B. D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962).
- [19] С. Ю. Ларкин, *Измерение частоты монохроматического СВЧ поля на основе нестационарного эффекта Джозефсона* (Киев, Наукова думка, 1999).
- [20] A. Shapiro, R. Janus, and S. Holly, Rev. Mod. Phys. **36**, 223 (1964).
- [21] А. И. Головашкин, В. Г. Еленский, К. К. Лихарев, *Эффект Джозефсона и его применение* (М., Наука, 1983).
- [22] E. M. Purcell, Phys. Rev. **69**, 681 (1946).
- [23] E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
- [24] E. John, Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987).
- [25] J. P. Dowling and C. M. Bowden, Phys. Rev. A **46**(1), 612 (1992).
- [26] S. John and T. Quang, Phys. Rev. Lett. **74**, 3419 (1995).
- [27] V. N. Astralov, V. N. Bogomolov, A. A. Kapkyanskii, et al., Nuovo Cimento D **17**, 1349 (1995).

- [28] V. N. Bogomolov, S. V. Garonenko, A. M. Kapitonov, et al., *Appl. Phys.* **A63**(6), 613 (1996).
- [29] V. S. Gorelik, *Quantum Electronics* **37**(5), 409 (2007).
- [30] V. S. Gorelik, *Laser Physics* **3**(12), 1479 (2008).
- [31] Yu. A. Voshchinskii and V. S. Gorelik, *Inorganik Materials* **47**(2), 148 (2011).
- [32] V. S. Gorelik, *Europeon Journal – Appl. Phys.* **49**(3), 3307 (2010).

Поступила в редакцию 23 апреля 2013 г.