В.В. ВОЛКОВА *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

**ПОЛЯРИТОННЫЙ КОНДЕНСАТ БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНА — ПЕРСПЕКТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СРЕДА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ АКСИОННЫХ СОСТОЯНИЙ**

Аксио́н (англ. axion от axial + -on) — гипотетическая нейтральная [1] псевдоскалярная элементарная частица, квант поля, постулированного для сохранения CP-инвариантности в квантовой хромодинамике [2,3]. Аксион должен представлять собой псевдоголдстоуновский бозон, возникающий в результате спонтанного нарушения симметрии Печчеи — Квинн. Аксионы, летящие от Солнца, в магнитном поле Земли могут за счёт обратного эффекта Примакова превращаться в фотоны с энергией рентгеновского диапазона. В данных космического рентгеновского телескопа XMM-Newton (Multi Mirror Mission) было обнаружено, что интенсивность рентгеновского излучения, зарегистрированного зондом из области сильного магнитного поля на солнечной стороне Земли, несколько выше сигнала от магнитосферы с теневой стороны планеты. Если учесть все известные источники рентгеновского излучения, то фоновый сигнал должен быть одинаковым из областей с сильным и слабым полем [4]. Один из возможных механизмов нагрева верхнего слоя атмосферы Солнца — излучение Солнцем аксионов или аксионоподобных частиц, которые превращаются в фотоны в областях с сильным магнитным полем [5].

Теория предсказывает двухфотонный распад аксиона по каналу a → γ+γ, однако необходимость CPT-инвариантности означает, что возможен и обратный процесс γ+γ → a. При этом условия сохранения энергии и импульса накладывают чрезвычайно жёсткое ограничение: процесс разрешён только в вакууме, что делает двухфотонное взаимодействие чрезвычайно маловероятным (поскольку в одну и ту же точку пространства нужно одновременно свести два фотона, каждый из которых движется со скоростью 300 000 км/с).

Целью настоящей работы является изучение возможности реализации двухфотонного объединения в аксион при бозе-эйнштейновской конденсации света в вакууме резонансной оптической микрополости ("фотонной ловушке"). Преимуществом такого подхода является автоматическое выполнение условий синхронизма (все фотоны БЭК описываются единой волновой функцией) и резонансное значение величины плотности фотонных состояний в БЭК, что делает даже маловероятный процесс взаимодействия фотонов доступным для наблюдения в лаборатории.

Проводим анализ [6], опираясь на расчёты, приведённые в [7]. Пусть *k*1 и *k*2 - импульсы фотона, λ1 и λ2 - его поляризации, а *q* - импульс аксиона. Тогда начальное состояние системы (два фотона)

Где |0> - основное состояние вакуума, а *a*+ - оператор “рождения” фотона. Конечным состоянием системы является |*q*>. Таким образом, матрицу рассеяния можно записать в следующем виде

Здесь *e*λ1(*k*1) и *e*λ2(*k*2) — 4-поляризации фотонов, *e* — элементарный заряд, δ — δ-функция Дирака. Mμν(*k*1, *k*2; *q*) находим из анализа симметрии с помощью неизвестной константы и учитываем 4-векторы, связанные законом сохранения энергии и импульса, что делает только два (*k*1, *k*2) из них независимыми. Эти два вектора могут объединять псевдотензор 2-го ранга только следующим образом

где ε — символ Леви-Чивиты, а *A* — константа. Построить скаляр *A* из 4- векторов *k*1 и *k*2 можно только двумя способами:

1) *k*12 = *k*22 = 0 что тривиально, и

2) *k*1 *k*2 = ½ *q*2 = -½ *ma*2 , где *ma* — масса аксиона.

Следовательно, *А* определяется массой покоя аксиона *ma*. В локальной инерциальной системе центра масс аксиона суммирование значений λ1 и λ2 даёт

с ηλ = (+1) для λ = 1, 2, 3, и (-1) для λ = 4. Это дифференцальное сечение для упрощения γ+γ → a.

Интегральное сечение фотон-фотонного процесса

где α = *e*2/4π = 1/137 — постоянная тонкой структуры, *ma* — масса аксиона, *A* — константа, которая измеряется в ходе эксперимента.

Из-за Т-симметрии это также поперечные сечения обратного процесса распада аксиона на два фотона.

В теории связанных состояний взаимодействие частиц может быть описано с помощью модельного гамильтониана (см. [8,9])

При этом случае суммирование соответствующих диаграмм рис. 1 приводит к следующему соотношению для двухфотонной функции Грина *D*2:

где

Таким образом, плотность двухфотонных состояний есть

то есть, сравнима с плотностью свободных состояний (ρ2 ≈ ρ02) в начале бозе-конденсации и постепенно снижается (ρ2 ≈ 1/*g*42π2ρ02) с развитием БЭК вследствие формирования мульти­фотонных (трёх-, четырёх- и т.п.) состояний.



Рис. 1. Диаграммное представление уравнения Бете-Сальпетера для биполяритонного пропагатора D2

Таким образом, конденсат Бозе-Эйнштейна представляется перспективной оптической средой для генерации аксионных состояний. Предложенная методика на базе “фотонной ловушки” позволяет моделировать процессы горячей Вселенной в рамках контролируемого лабораторного эксперимента. В частности, ожидается воспроизведение рождения частиц по каналу γ+γ→a в низкоэнергетической области спектра (~1 эВ, а с участием ядер-посредников — и до ~1 мэВ), где, как считается, должны находиться аксионы [10].

**Список литературы.**

1. Александр Березин. Аксионы, быть может, уже обнаружены.
2. Peccei R. D., Quinn H. R. CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles // Physical Review Letters. — 1977. — Vol. 38. — P. 1440—1443.
3. Peccei R. D., Quinn H. R. Constraints imposed by CP conservation in the presence of pseudoparticles // Physical Review D. — 1977. — Vol. 16. — P. 1791—1797.
4. [Ищут давно, но не могут найти](http://elementy.ru/lib/432558) [Архивная копия](https://web.archive.org/web/20150417184833/http%3A/elementy.ru/lib/432558) от 17 апреля 2015 на Wayback Machine / Владислав Кобычев, Сергей Попов // «Троицкий вариант» № 4 (173), 24 февраля 2015 года.
5. The enigmatic Sun: a crucible for new physics. Дата обращения: 27 сентября 2014. Архивировано 17 февраля 2015 года.
6. С. М. Биленький «Введение в диаграммную технику Фейнмана» (1971г.)
7. V.A. Moiseeva and V.V. Filatov «QED analysis of the two photons -- into -- a paraphoton

inelastic scattering».

1. Би Дунсюэ, У Мэнюань, Коноплёва А.А., Филатов В.В. «Плотность биполяритонных состояний при поляритонной бозе-эйнштейновской конденсации в фотонном кристалле».
2. Горелик В.С. «Оптика глобулярных фотонных кристаллов» // Квантовая электроника. 2007. Т.37, No5. С.409-432.
3. В.В. Волкова, В.В. Филатов «Кольцевая резонансная фотонная ловушка для исследований в электромагнитных полях высокой интенсивности».