

УДК 52-52

Ложновакуумное поведение электромагнитного поля в фотонном кристалле

Филатов Владимир Викторович^()*

vvfilatov@bmstu.ru

Волкова Вероника Валерьевна

volkovavv1@student.bmstu.ru

Кулагина Мария Алексеевна

kulaginama@student.bmstu.ru

Чебакова Софья Александровна¹

chebakovasa@student.bmstu.ru

Шумилкина Юлия Романовна

shumilkinayur@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Исследовано состояние электромагнитного поля в фотонном кристалле – метаматериале с периодической оптической сверхструктурой. Установлено, что в критических точках зоны Бриллюэна поляритонное поле С-, Р- и Т-симметрично (то есть, симметрия калибровочного поля $U(1)$ не нарушена), плотность квантовых состояний сингулярна, открыты нелинейные каналы квантовой электродинамики, а также разрешена параметрическая down-конверсия высокоэнергетического поляритонного бозе-конденсата в низкоэнергетический. Результаты воспроизводят эффекты ложного квантового вакуума в лабораторном оптическом эксперименте.

Ключевые слова: Большой взрыв, ложный квантовый вакуум, спонтанное нарушение симметрии, фотонный кристалл, конденсат Бозе — Эйнштейна

Введение. Ложновакуумное (иначе: метастабильное) состояние квантового поля – такое состояние квантового вакуума (области пространства-времени, содержащей только виртуальные частицы), которое локально стабильно, но не энергетически-минимально. Предполагается, что распад ложного квантового вакуума с замороженным хиггсовским полем на планковском масштабе послужил толчком к Большому взрыву, породив четырехмерное пространство-время со свободной энергией, из которой в дальнейшем конденсировались элементарные частицы. В связи с этим изучение свойств ложного квантового вакуума является задачей чрезвычайной важности, способной пролить свет на вопрос о возникновении Вселенной.

В настоящей работе сообщается о лабораторном воспроизведении ложновакуумных эффектов в оптическом эксперименте с фотонным кристаллом.

Методы и материалы; результаты. Современная квантовая теория поля предоставляет мощные теоретические методы, позволяющие единообразно описать явления как физики высоких энергий, так и конденсированного состояния. В частности, экстремальному электромагнитному полю Большого взрыва математически соответствует сингулярная плотность состояний поляритонного конденсата Бозе-Эйнштейна (БЭК), что позволяет использовать последний в качестве модели для изучения особенностей, характерных для

ранней Вселенной. Поляритонный БЭК может быть получен лабораторно конденсацией светового поля в резонансной оптической микрополости, например, фотонного кристалла — метаматериала с оптической сверхрешеткой и удобными естественными (решеточными) пустотами.

Нами установлено, что возбуждение фотонного кристалла внешним оптическим излучением приводит к формированию в критических точках его зоны Бриллюэна поляритонного БЭК, описываемого С-, Р- и Т-симметричной (по отдельности) волновой функцией [1] (особенно отметим Т-симметрию, означающую локальное исчезновение стрелы времени). Сингулярная плотность состояний БЭК делает доступным исключительно узкий нелинейный двухполяритонный канал $\gamma\gamma \rightarrow a$, порождающий «темные» аксионоподобные частицы по механизму, предположительно доминировавшему в ранней Вселенной [2]. При этом в спектрах вторичного излучения наблюдаются [3] следы не только данного процесса, но и распада поляритонного конденсата в менееэнергетический, что интерпретируется как переход «ложного» БЭК в «истинный».

Заключение. Итак, поведение поляритонного бозе-конденсата в особых точках зоны Бриллюэна фотонного кристалла соответствует ожидаемому для ложного вакуума и может использоваться для лабораторного моделирования последнего.

Список источников

- [1] Кулагина М.А. и др. Хиральная симметрия поляритонов и ее нарушение в кристаллической среде. XIV Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. тр. Москва, НИЯУ МИФИ, 2025, с. 367–368.
- [2] Волкова В.В. Поляритонный конденсат Бозе–Эйнштейна — перспективная оптическая среда для генерации аксионных состояний. *Ученые записки физического факультета Московского университета*, 2024, № 4, 2441505.
- [3] Volkova V.V. et al. Non-linear response of the dielectric medium to the intensive optical excitation in the resonant region of the dielectric function. UltrafastLight-2024. Book of Abstracts of VIII International Conference on Ultrafast Optical Science, Moscow, Lebedev Physical Institute Publ., 2024, 130 p.

False Vacuum Alike Behaviour of the Electromagnetic Field in a Photonic Crystal

Filatov Vladimir Viktorovich^()*

vvfilatov@bmstu.ru

Volkova Veronika Valerievna

volkovavv1@student.bmstu.ru

Kulagina Maria Alekseevna

kulaginama@student.bmstu.ru

Chebakova Sofia Aleksandrovna

chebakovasa@student.bmstu.ru

Shumilkina Julia Romanovna

shumilkinayur@student.bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper investigates the electromagnetic field in a photonic crystal that is a metamaterial with periodic optical superstructure. It is found that at the critical points of Brillouin zone, the polariton field is C-, P-, and T-symmetric (i.e., the symmetry of the gauge field $U(1)$ is restored), the density of quantum states is singular, nonlinear process of quantum electrodynamics are observable, and parametric down-conversion of a high-energy polariton Bose condensate into a low-energy one is permitted. The results allow to optically reproduce the false vacuum effects at a laboratory.

Keywords: Big Bang, false vacuum, spontaneous symmetry breaking, photonic crystal, Bose-Einstein condensate

Introduction. In quantum field theory, a false vacuum is a vacuum state that is locally stable but does not occupy the most stable possible ground state. Nowadays the most common view is that the decay of the Planck-scale trapped Higgs field false vacuum into the true vacuum was a key step to the Big Bang. For this reason, understanding the false vacuum, its properties and behavior is important for unraveling the origin of the Universe.

This paper reports the laboratory reproduction of quantum electrodynamics' (QED) false vacuum in an optical experiment with a photonic crystal.

Methods and materials; results. A modern quantum field theory offers powerful theoretical methods to uniformly describe both high-energy physics phenomena and condensed matter ones. This way, the extreme electromagnetic field of the Big Bang can be dealt through a singular density of states of the polariton Bose-Einstein condensate (BEC). The latter can be obtained through condensation of a light in a resonant optical microcavity. This way, the light field inside a photonic crystal, a metamaterial with an optical superlattice and natural (lattice) voids, is capable to reproduce early Universe at a lab.

We found a light directed onto a photonic crystal condense in the nearest-to-the-surface optical microcavity and form polariton BEC at the critical point of the Brillouin zone with C-, P- and T-symmetric wavefunction [1] (note the T-symmetry meaning the arrow of time has disappeared). The BEC's singular density of states opens an extremely narrow nonlinear two-polariton channel $\gamma\gamma \rightarrow$ a generating "dark" axion-like particles via a mechanism that presumably dominated in the early Universe [2]. In the spectra of the secondary radiation we observe not only

this process, but also the transform of the polariton condensate into a lower-energy one, that can be interpreted as a decay of a “false” BEC into a “true” one [3].

Conclusion. The polariton BEC in the special points of the Brillouin zone of a photonic crystal is able to reproduce the QED false vacuum and makes it possible to investigate the latter at a laboratory.

References

- [1] Kulagina M.A. et al. Chiral symmetry of polaritons and its breaking in a crystalline medium, Proceedings of XIV International Conference on Photonics and Information Optics, Moscow, National Research Nuclear University MEPhI Publ., 2025, pp. 367–368. (In Russ.).
- [2] Volkova V.V. The Bose-Einstein polariton condensate is a promising optical medium for generating axion states. Moscow University Physics Bulletin, 2024, vol. 4, art. no. 2441505. (In Russ.).
- [3] Volkova V.V. et al. Non-linear response of the dielectric medium to the intensive optical excitation in the resonant region of the dielectric function. UltrafastLight-2024. Book of Abstracts of VIII International Conference on Ultrafast Optical Science, Moscow, Lebedev Physical Institute Publ., 2024, 130 p.