

ПАРАФОТОН КАК КВАЗИЧАСТИЦА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

В.В. Филатов

vvfilatov@bmstu.ru

SPIN-код: 7939-9770

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

С позиций общей теории относительности проанализировано распространение электромагнитного поля в слабоискривленном пространстве-времени. Установлено, что при распространении лазерного луча в вакууме, заполненном электромагнитным полем, искривление метрики пространства-времени соответствует гравитационному полю, описываемому волновым уравнением с квадратичным электромагнитным источником. Показано, что данное уравнение соответствует связанному двухфотонному состоянию — парафотону. Обнаружено синхронное распространение гравитационного и парафотонного полей. Выдвигается гипотеза о парафотоне как квазичастице гравитационного поля. Полученные результаты имеют принципиальное значение как для построения квантовой теории гравитации, так и для задачи непосредственной лабораторной генерации высокочастотных гравитационных волн.

Ключевые слова

Гравитация, квант, парафотон, двухфотонное состояние, неупругое рассеяние, конверсия, гравитационная волна, оптическая гравитационная генерация

Поступила в редакцию 21.01.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Парафотон — гипотетическая аксиноподобная нейтральная псевдоскалярная частица, возникающая в результате неупругого двухфотонного взаимодействия $\gamma + \gamma \rightarrow p\gamma$ (см. рисунок) [1]. Введение частиц подобного типа в теорию продиктовано необходимостью сохранения CP -инвариантности в квантовой хромодинамике [2, 3].

Как видно из представленной диаграммы, парафотон является голдстоуновским бозоном со спином $s = 2$ (в единицах \hbar), не вступающим в сильное или слабое взаимодействия, однако переносящим энергию $W = 2\hbar\omega$, а значит, и массу $m = W/c^2$. Таким образом, парафотон может выступать в роли квазичастицы гравитационного поля. В связи с изложенным задача изучения парафотонов исключительно важна для разработки квантовой теории гравитации, поэтому цель данной статьи — выявление связи парафотонного и гравитационного полей.

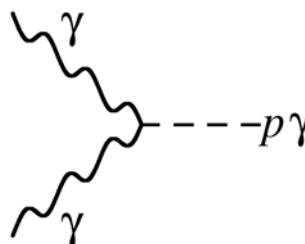


Диаграмма образования парафотона из двух фотонов

Теоретический анализ. Рассмотрим неупругий трехчастичный процесс образования парафотона из двух исходных фотонов: $\gamma + \gamma \rightarrow p\gamma$ (см. рисунок). Для протекания данной реакции, прежде всего, необходимо выполнение закона сохранения 4-импульса (здесь и далее греческие индексы пробегает значения от 1 до 4, т. е. $\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$):

$$\hbar k_{\mu}^{(\gamma_1)} + \hbar k_{\mu}^{(\gamma_2)} = \hbar k_{\mu}^{(p\gamma)}, \quad (1a)$$

или, в покомпонентном виде

$$\begin{cases} \hbar \mathbf{k}^{(\gamma_1)} + \hbar \mathbf{k}^{(\gamma_2)} = \hbar \mathbf{k}^{(p\gamma)}; \\ \hbar \omega^{(\gamma_1)} + \hbar \omega^{(\gamma_2)} = \hbar \omega^{(p\gamma)}. \end{cases} \quad (16)$$

Здесь в левых частях уравнений стоят импульсы и энергии вступающих во взаимодействие фотонов, а в правых — соответствующие величины для парафотона.

Нетрудно убедиться, что система (1a) (или (16)) совместна только в пустом пространстве. Действительно, используя известную связь частоты поля и соответствующего волнового числа ($k = \omega n/c$) находим, что (16) имеет решение только при $n = 1$. Таким образом, двухчастичное объединение фотонов в парафотон может происходить только в вакууме.

Рассмотрим вакуум, заполненный электромагнитным полем, с позиций общей теории относительности. Запишем уравнения Эйнштейна, связывающие между собой метрику искривленного пространства-времени (вакуума) со свойствами заполняющей его материи (электромагнитного поля) [4]:

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}. \quad (2)$$

В представленном соотношении $R_{\mu\nu}$ — тензор Риччи; $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ — скалярная кривизна (здесь и далее по повторяющимся индексам подразумевается суммирование); $g_{\mu\nu}$ — метрический тензор; Λ — космологическая постоянная; $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса; G — гравитационная постоянная; c — скорость света в вакууме.

Поскольку нас интересует возможность лабораторного наблюдения процесса, в условиях лаборатории с большой точностью можно принять $\Lambda g_{\mu\nu} = 0$, так как лямбда-член существен только на космологических масштабах или в областях со значительной кривизной пространства-времени. Аналогичным образом и вторым слагаемым в (2) также можно пренебречь, в результате чего (2) существенно упрощается и приобретает следующий вид:

$$R_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}. \quad (3)$$

Очевидно также, что в случае слабых гравитационных полей, доступных в лаборатории, слабое гравитационное поле $g_{\mu\nu}$ можно представить как невозму-

ценное $\eta_{\mu\nu}$, на которое наложено возмущение $h_{\mu\nu}$, удовлетворяющее стандартной калибровке

$$\bar{h}_{,\nu}^{\mu\nu} = 0, \quad \bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h_{\rho\rho}. \quad (4)$$

Поэтому тензор Риччи приобретает исключительно простой вид ($\Delta = \partial_\mu \partial_\mu$ — 4-мерный лапласиан)

$$R_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\Delta h_{\mu\nu}, \quad (5)$$

откуда получаем

$$\Delta h_{\mu\nu} = \frac{16\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (6)$$

Отметим, что в рассматриваемом случае электромагнитного поля в вакууме тензор энергии-импульса $\mathbf{T}_{\mu\nu}$ выглядит следующим образом [5]:

$$\mathbf{T}_{\mu\nu} = -\frac{1}{\mu_0} \left(\mathbf{F}_{\mu\alpha} g^{\alpha\beta} \mathbf{F}_{\beta\nu} - \frac{1}{4} g_{\mu\nu} \mathbf{F}_{\sigma\alpha} g^{\alpha\beta} \mathbf{F}_{\beta\rho} g^{\rho\sigma} \right), \quad (7)$$

где $\mathbf{F}_{\alpha\beta} = \partial_\alpha \mathbf{A}_\beta - \partial_\beta \mathbf{A}_\alpha$ — тензор электромагнитного поля с 4-потенциалом \mathbf{A}_α . При этом для первых трех компонент $\{i, j\} = \{1, 2, 3\}$ очевидным образом имеем [6]

$$\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{E}_i \mathbf{D}_j + \mathbf{V}_i \mathbf{H}_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} (\mathbf{E}_k \mathbf{D}_k + \mathbf{V}_k \mathbf{H}_k), \quad (8)$$

где \mathbf{E}_i — напряженность электрического поля; \mathbf{D}_j — электрическая индукция; \mathbf{V}_i — индукция магнитного поля; \mathbf{H}_j — его напряженность.

Рассмотрим одномерный случай, типичный, например, для задач с лазерными полями. Выберем систему координат таким образом, чтобы ось x была направлена вдоль лазерного луча (вдоль волнового вектора \mathbf{k} электромагнитной волны), ось y — вдоль колебаний электрического вектора \mathbf{E} , а z — магнитного \mathbf{V} . Тогда $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(ikx - i\omega t)$, а также $\epsilon_0 \mathbf{E}^2 / 2 = \mathbf{V}^2 / (2\mu_0)$, что дает

$$\begin{aligned} k_1 &= k, \quad k_2 = 0, \quad k_3 = 0; \\ E_1 &= 0, \quad E_2 = E_0 e^{i(kx - \omega t)}, \quad E_3 = 0; \\ B_1 &= 0, \quad B_2 = 0, \quad B_3 = B_0 e^{i(kx - \omega t)} = \frac{1}{c} E_0 e^{i(kx - \omega t)}. \end{aligned} \quad (9)$$

При этом T_{ij} будет иметь только одну отличную от нуля компоненту

$$T_{11} = \epsilon_0 E^2 \quad (10)$$

и уравнение (6) принимает следующий вид:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{11} = \frac{16\pi G}{c^4} \epsilon_0 \left[E_0 e^{i(kx - \omega t)} \right]^2. \quad (1)$$

Таким образом, в случае слабых гравитационных полей, возбужденных лазерным источником, гравитационное поле описывается волновым уравнением с квадратичным электромагнитным источником (11). С позиций квантовой теории поля это означает, что гравитационная волна h_{11} порождается процессом, лагранжиан которого содержит квадрат напряженности электрического поля.

Отметим, что псевдоскалярное парафотонное поле описывается тем же уравнением [5]:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -g \mathbf{E}^2, \quad (22)$$

в котором ψ — псевдоскалярное парафотонное поле; \mathbf{E} — векторное электромагнитное поле; g — константа связи указанных полей.

Результаты и их обсуждение. Совпадение парафотонного уравнения (12) с уравнением гравитационной волны (11) может быть интерпретировано следующим образом. В вакууме, заполненном электромагнитным полем, матричный элемент S -матрицы [7], описывающей приведенную выше диаграмму (см. рисунок), отличен от нуля, в результате чего возможно объединение двух фотонов в парафотон, который согласно (12) и (11) движется вместе с гравитационным полем. Таким образом, парафотон может быть интерпретирован как квазичастица гравитационного поля, поскольку обладает подходящей калибровочной симметрией.

Заключение. Подводя итоги, необходимо констатировать, что обнаруженная связь между парафотонным полем и полем гравитации может быть использована в задаче генерации высокочастотных гравитационных волн в лабораторных условиях. Так, фокусировка лазерного излучения в микрорезонаторе [8] формирует в нем поляритонный бозе-конденсат, в котором автоматически выполнены условия синхронизма (1), что приводит к формированию парафотонного поля, которое, как было показано выше, распространяется синхронно с гравитационным. Тем самым парафотоны выступают в роли квазичастиц — переносчиков гравитационного взаимодействия, что открывает перспективы для лабораторной генерации высокочастотных лазерных гравитационных волн [9–14].

Литература

- [1] Alimkina I.S., Filatov V.V., Gorelik V.S., et al. Paraphoton lasing in periodic dielectrics. *Abs. Int. Sci. Conf. PIRT-2019*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2019, pp. 9–10.
- [2] Peccei R.D., Quinn H.R. CP conservation in the presence of pseudoparticles. *Phys. Rev. Lett.*, 1977, vol. 38 no. 25, pp. 1440–1443. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.1440>
- [3] Peccei R.D., Quinn H.R. Constraints imposed by CP conservation in the presence of pseudoparticles. *Phys. Rev. D*, 1977, vol. 16, no. 6, pp. 1791–1797. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.16.1791>
- [4] Weinberg S. *Gravitation and cosmology. Principles and applications of the general theory of relativity*. Wiley, 1972.

- [5] Биленький С.М. Введение в диаграммную технику Фейнмана. М., Атомиздат, 1971.
- [6] Misner C., Thorne K.S., Wheeler J.A. Gravitation. W. H. Freeman, 1973
- [7] Sakurai J.J., Napolitano J. Modern quantum mechanics. Pearson, 2011.
- [8] Пичкуненко С.В., Филатов В.В. Локализация и усиление электромагнитного поля в микрополостях глобулярного фотонного кристалла. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2018, т. 9, № 6, с. 582–584. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562918050214>
- [9] Горелик В.С., Гладышев В.О., Кауц В.Л. О генерации и детектировании высокочастотных гравитационных волн в диэлектрических средах при их возбуждении оптическим излучением. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 2018, № 2, с. 10–21.
- [10] Gorelik V.S., Pustovoit V.I., Gladyshev V.O., et al. Generation and detection of high frequency gravitational waves at intensive electromagnetic excitation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012001>
- [11] Gorelik V.S., Filatov V.V. The resonance photon-paraphoton conversion in media. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012012>
- [12] Izmailov G.N., Gorelik V.S. Gain of photon-axion conversion in paramagnetics. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012015>
- [13] Gorelik V.S., Sverbil V.P., Gorshunov B.P., et al. Pseudoscalar lattice modes in the amino acid crystals and DNA. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 918, art. 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/918/1/012033>
- [14] Горелик В.С. Генерация псевдоскалярных бозонов при вынужденном комбинационном рассеянии света в диэлектрических средах. *Известия РАН. Серия физическая*, 2016, т. 80, № 7, с. 855–860. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873816070145>

Филатов Вадим Викторович — ассистент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Филатов В.В. Парафотон как квазичастица гравитационного поля. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 04(45). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-04-597>

PARA-PHOTON AS A QUASIPARTICLE OF A GRAVITATIONAL FIELD

V.V. Filatov

vfilatov@bmstu.ru
SPIN-code: 7939-9770

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

From the standpoint of the general theory of relativity, the propagation of an electromagnetic field in a slightly curved space-time is analyzed. It is established that when a laser beam propagates in a vacuum filled with an electromagnetic field, the curvature of the space-time metric corresponds to the gravitational field described by the wave equation with a quadratic electromagnetic source. Authors show that this equation corresponds to a coupled two-photon state — a para-photon. A synchronous propagation of gravitational and para-photon fields was detected. The hypothesis is advanced of para-photon as a quasiparticle of the gravitational field. The results obtained are of fundamental importance both for constructing the quantum theory of gravity and for the problem of direct laboratory generation of high-frequency gravitational waves.

Keywords

Gravity, quantum, para-photon, two-photon state, inelastic scattering, conversion, gravitational wave, optical gravitational generation

Received 21.01.2020
© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Alimkina I.S., Filatov V.V., Gorelik V.S., et al. Paraphoton lasing in periodic dielectrics. *Abs. Int. Sci. Conf. PIRT-2019*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2019, pp. 9–10.
- [2] Peccei R.D., Quinn H.R. CP conservation in the presence of pseudoparticles. *Phys. Rev. Lett.*, 1977, vol. 38 no. 25, pp. 1440–1443. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.1440>
- [3] Peccei R.D., Quinn H.R. Constraints imposed by CP conservation in the presence of pseudoparticles. *Phys. Rev. D*, 1977, vol. 16, no. 6, pp. 1791–1797. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.16.1791>
- [4] Weinberg S. Gravitation and cosmology. Principles and applications of the general theory of relativity. Wiley, 1972.
- [5] Bilen'kiy S.M. Vvedenie v diagrammnyuyu tekhniku Feynmana [Introduction into Feynman technique]. Moscow, Atomizdat Publ., 1971 (in Russ.).
- [6] Misner C., Thorne K.S., Wheeler J.A. Gravitation. W H. Freeman, 1973.
- [7] Sakurai J.J., Napolitano J. Modern quantum mechanics. Pearson, 2011.
- [8] Pichkurenko S.V., Filatov V.V. Electromagnetic field localization and its amplification in the globular photonic crystal nuclear physics and engineering. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering], 2018, vol. 9, no. 6, pp. 582–584. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562918050214> (in Russ.).
- [9] Gorelik V.S., Gladyshev V.O., Kauts V.L. On the generation and detection of high-frequency gravitational waves optically excited in dielectric media. *Kratkie soobshcheniya*

- po fizike FIAN*, 2018, no. 2, pp. 10–21 (in Russ.). (Eng. version: *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335618020021>)
- [10] Gorelik V.S., Pustovoit V.I., Gladyshev V.O., et al. Generation and detection of high frequency gravitational waves at intensive electromagnetic excitation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012001>
- [11] Gorelik V.S., Filatov V.V. The resonance photon-paraphoton conversion in media. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012012>
- [12] Izmailov G.N., Gorelik V.S. Gain of photon-axion conversion in paramagnetics. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1051, art. 012015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1051/1/012015>
- [13] Gorelik V.S., Sverbil V.P., Gorshunov B.P., et al. Pseudoscalar lattice modes in the amino acid crystals and DNA. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 918, art. 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/918/1/012033>
- [14] Gorelik V.S. Production of pseudoscalar bosons upon stimulated Raman scattering in dielectric media. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2016, vol. 80, no. 7, pp. 855–860. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873816070145> (in Russ.). (Eng. version: *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, no. 7, pp. 779–784. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873816070145>)

Filatov V.V. — Assistant Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Filatov V.V. Para-photon as a quasiparticle of a gravitational field. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 04(45). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-04-597.html> (in Russ.).