

УДК 530.22

Излучение фотонов, сопровождающее нестабильность вакуума, вызванной действием квазипостоянного электрического поля

*Гаврилов Сергей Петрович*¹

gavrilovsergeyp@yahoo.com

SPIN-код: 5762-0816

Гитман Дмитрий Максимович^{2(*)}

gitman@if.usp.br

Адорну Тиаго^{3(*)}

tiago.adorno@xjtlu.edu.cn

¹РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия²ФИ РАН, Москва, Россия³Сиань Цзяотун-Ливерпульский университет, Сучжоу, Китай

Аннотация. Следуя непертурбативной формулировке КЭД сильного поля, развитой в наших более ранних работах, мы рассматриваем излучение фотонов, сопровождающее нестабильность вакуума, вызванную действием квазипостоянного сильного электрического поля конечной длительности T . Получены замкнутые формулы для полных вероятностей, изучено излучение фотонов электроном и излучение, сопровождающее рождение электрон-позитронных пар из вакуума. Исследовано угловое и поляризационное распределение излучения, в том числе характеристики излучения в высокочастотном приближении относительно $1/T$. Анализируется применимость представленных расчетов к трехмерным дираковским полуметаллам, в которых поведение низкоэнергетических безмассовых возбуждений может быть описано уравнением Дирака, а роль скорости света в вакууме играет скорость Ферми.

Ключевые слова: квантовая электродинамика, сильное электрическое поле, нестабильный вакуум, эффект Швингера, излучение, дираковские полуметаллы

Введение. Рождение пар частиц и античастиц из вакуума благодаря непертурбативному взаимодействию с внешним полем (эффект Швингера) в настоящее время рассматривается во многих полевых моделях явлений в физике высоких энергий, астрофизике и физике наноструктур (см. недавние обзоры [1–4]). Наблюдение эффекта рождения электрон-позитронных пар в электрическом поле пока не доступно из-за большой интенсивности необходимого в этом случае поля. Однако есть аналоги — эффективные теории дираковских полуметаллов с безмассовыми квазичастицами, где требуемая интенсивность электрического поля достижима в лабораторных условиях. Рождение пар частиц и античастиц удобно наблюдать по сопровождающему эффект характерному излучению фотонов. Мы сопоставляем характеристики этого излучения в КЭД и аналоговых моделях.

Методы и материалы; результаты. Для расчетов используется непертурбативная формулировка КЭД сильного поля, развитая в наших более ран-

них работах, см. например, [1] и исследование излучения в двумерном дираковском полуметалле [2].

Заключение. Результаты для характеристик излучения при рождении пар из вакуума в КЭД можно сопоставлять с аналогичными результатами для трехмерных дираковских полуметаллов, учитывая, что в последних роль скорости света для заряженных частиц играет скорость Ферми, которая намного меньше скорости света.

Список источников

- [1] Gelis F., Tanji N. Schwinger mechanism revisited. Prog. Part. Nucl. Phys., 2016, vol. 87, art. no. 1. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2015.11.001>
- [2] Fedotov A., Ilderton A., Karbstein F., King B., Seipt D., Taya H., Torgrimsson G. Advances in QED with intense background fields. Phys. Rep., 2023, vol. 1010. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2023.01.003>
- [3] Armitage N.P., Mele E.J., Vishwanath A. Weyl and Dirac Semimetals in Three Dimensional Solids. Rev. Mod. Phys., 2018, vol. 90, no. 1, art. no. 015001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.015001>
- [4] Zhou Y., Huang Y., Xu X., Fan Z., Khurgin J.B., Xiong Q. Nonlinear optical properties of halide perovskites and their applications. Applied Physics Reviews, 2020, vol. 7, art. no. 041313.
- [5] Fradkin E.S., Gitman D.M., Shvartsman Sh.M. Quantum Electrodynamics with Unstable Vacuum. Berlin, Springer-Verlag, 1991. <https://doi.org/10.1063/5.0025400>
- [6] Gavrilov S.P., Gitman D.M. Photon emission in the graphene under the action of a quasiconstant external electric field. Eur. Phys. J. Plus, 2023, vol. 138, art. no. 171. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.110.014410>

Photon Emission Accompanying Vacuum Instability under the Action of a Quasi-Constant Electric Field

Gavrilov Sergei Petrovich¹

gavrilovsergeyp@yahoo.com

SPIN-code: 5762-0816

Gitman Dmitry Maximovich^{2(*)}

gitman@if.usp.br

Adorno Tiago^{3(*)}

tiago.adorno@xjtlu.edu.cn

¹ Herzen SPU of Russia, Saint-Petersburg, Russia

² P.N. Lebedev FI RAS, Moscow, Russia

³ Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China

Abstract. Following a nonperturbative formulation of strong-field QED developed in our earlier works, we consider photon emission accompanying vacuum instability under the action of a quasi-constant strong electric field of finite duration T . We construct closed formulas for the total probabilities and study the photon emission by an electron and for the photon emission accompanying an electron-positron pair creation from a vacuum. We study angular and polarization distribution of the emission as well as emission characteristics in a high-frequency approximations with respect of $1/T$. We analyze the applicability of the

presented calculations to three-dimensional Dirac semimetals in which the behavior of low-energy massless excitations can be described by the Dirac equation and the role of the speed of light in vacuum is played by the Fermi velocity.

Keywords: quantum electrodynamics, strong electric field, unstable vacuum, Schwinger effect, emission, Dirac semimetals

Introduction. The creation of pairs of particles and antiparticles from a vacuum due to non-perturbative interaction with an external field (the Schwinger effect) is currently considered in many field models of phenomena in high-energy physics, astrophysics, and physics of nanostructures (see recent reviews [1-4]). Observation of the effect of electron-positron pair production in an electric field is not yet possible due to the high intensity of the field required in this case. However, there are analogs — effective theories of Dirac semimetals with massless quasiparticles, where the required intensity of the electric field is achievable in laboratory conditions. The production of pairs of particles and antiparticles is conveniently observed by the characteristic radiation of photons accompanying the effect. We compare the characteristics of this radiation in QED and analog models.

Methods and materials; results. For the calculations, we use the non-perturbative formulation of strong-field QED developed in our earlier works, see, for example, [5] and the study of radiation in a two-dimensional Dirac semimetal [6].

Conclusion. The results for the characteristics of radiation during pair production from vacuum in QED can be compared with similar results for three-dimensional Dirac semimetals, taking into account that in the latter the role of the speed of light for charged particles is played by the Fermi velocity, which is much less than the speed of light.

References

- [1] Gelis F., Tanji N. Schwinger mechanism revisited. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2016, vol. 87, art. no. 1. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2015.11.001>
- [2] Fedotov A., Ilderton A., Karbstein F., King B., Seipt D., Taya H., Torgrimsson G. Advances in QED with intense background fields. *Phys. Rep.*, 2023, vol. 1010. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2023.01.003>
- [3] Armitage N.P., Mele E.J., Vishwanath A. Weyl and Dirac Semimetals in Three Dimensional Solids. *Rev. Mod. Phys.*, 2018, vol. 90, no. 1, art. no. 015001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.015001>
- [4] Zhou Y., Huang Y., Xu X., Fan Z., Khurgin J.B., Xiong Q. Nonlinear optical properties of halide perovskites and their applications. *Applied Physics Reviews*, 2020, vol. 7, art. no. 041313.
- [5] Fradkin E.S., Gitman D.M., Shvartsman Sh.M. *Quantum Electrodynamics with Unstable Vacuum*. Berlin, Springer-Verlag, 1991. <https://doi.org/10.1063/5.0025400>
- [6] Gavrilov S.P., Gitman D.M. Photon emission in the graphene under the action of a quasiconstant external electric field. *Eur. Phys. J. Plus*, 2023, vol. 138, art. no. 171. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.110.014410>