

УДК 530.12

Изображения черных дыр в эффективной геометрии, порожденной нелинейной электродинамикой

Ворохов Алексей Валерьевич^()*

alexei.vorohov@yandex.ru

Сушков Сергей Владимирович

sergey_sushkov@mail.ru

КФУ, Казань, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача релятивистского переноса излучения в эффективной геометрии, порожденной нелинейной электродинамикой (НЭД). Разработан программный инструмент для решения этой задачи в произвольной эффективной геометрии. Показано, что эффективная геометрия гораздо сильнее меняет поведение световых геодезических, чем поправки из НЭД к пространственно-временной метрике. Построены и исследованы изображения черных дыр с тонким аккреционным диском в моделях электродинамики Эйлера — Гейзенберга, Бардина и ModMax-электродинамики.

Ключевые слова: перенос излучения, нелинейная электродинамика, эффективная геометрия, черные дыры, численная относительность

Введение. Модели нелинейной электродинамики (НЭД) — это модификации Максвелловской электродинамики, в которых лагранжиан нелинейно зависит от инвариантов электромагнитного поля. Цели построения таких моделей — учет в терминах классической электродинамики поправок из КЭД, решение проблемы расходимости энергии точечных зарядов, новые алгебраические симметрии в лагранжиане и другие [1]. Хотя экспериментальные исследования в области НЭД ведутся порядка пятидесяти лет, до сих пор не удается получить экспериментальных ограничений, позволяющих провести отбор таких моделей [2]. Основная причина этого в сложности достижения характерных для НЭД напряженностей поля в лабораторных условиях.

Сильнейшими электромагнитными полями во Вселенной обладают компактные объекты — черные дыры, нейтронные звезды и белые карлики [3]. В связи с этим существует большой интерес к моделированию компактных объектов в НЭД [1, 4, 5] и сравнению этих результатов с данными наблюдений. Поскольку любые астрономические наблюдения связаны с регистрацией излучения, важный шаг в этой задаче — изучить распространение света и частиц вблизи таких объектов.

Методы и материалы; результаты. Фотон-фотонное взаимодействие в НЭД — наиболее важный процесс, влияющий на распространение света. В работе [6] разработан чисто-геометрический подход к описанию этого процесса, называемый эффективной геометрией. В эффективной геометрии фотоны следуют нулевым геодезическим не в обычной метрике, получаемой как

решение уравнений Эйнштейна, а в эффективной. Для ряда моделей НЭД эта эффективная метрика может зависеть от спиральности фотонов.

Благодаря методу эффективной геометрии можно использовать в НЭД все стандартные методы расчета релятивистского переноса излучения. Единственная сложность здесь состоит в организации расчетов таким образом, чтобы с произвольными моделями НЭД можно было работать в едином подходе. Для решения этой задачи нами был разработан программный инструмент, позволяющий производить такие расчеты в случае произвольной эффективной геометрии [7].

В настоящее время этот инструмент успешно валидирован на классических задачах, и с его помощью получены изображения черных дыр с тонким аккреционным диском в моделях электродинамики Эйлера — Гейзенберга, Бардина и ModMax-электродинамики. Показано, что эффективная геометрия значительно сильнее меняет поведение фотонов, чем поправки из НЭД к обычной метрике, проистекающие из модификации правой части уравнений Эйнштейна.

Заключение. В рамках данной работы был разработан программный инструмент для решения задачи релятивистского переноса излучения в произвольной эффективной геометрии. С его помощью удалось в численных экспериментах показать определяющий вклад процессов фотон-фотонного рассеяния в изменение световых геодезических в НЭД. Этот результат ожидаем из соотношения коэффициентов в обычной и в эффективной метрике. На следующем этапе работы планируется доработать данный инструмент, научиться учитывать поляризацию излучения компактных объектов и рассчитывать спектры излучения в различных сценариях.

Список источников

- [1] Sorokin D.P. Introductory Notes on Non-linear Electrodynamics and its Applications. *Fortschritte der Physik*, 2022, vol. 70, no. 7–8, pp. 1–26. <https://doi.org/10.1002/prop.202200092>
- [2] Fouché M., Battesti R., Rizzo C. Limits on Non-Linear Electrodynamics. *Physical Review D*, 2016, vol. 93, no. 9, pp. 20–32. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.099902>
- [3] Shapiro S.L., Teukolsky S.A. Black holes, white dwarfs and neutron stars: the physics of compact objects. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, 645 p.
- [4] Bambi C. Ed. Regular black holes. Singapore, Springer, 2023, 499 p.
- [5] Denisova I.P., Garmaev B.D., Sokolov V.A. Compact objects in conformal nonlinear electrodynamics. *The European Physical Journal C*, 2019, vol. 79, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7044-5>
- [6] Novello M., Salim J.M. Effective electromagnetic geometry. *Physical Review D*, 2001, vol. 63, no. 8, art. no. 083511. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.63.083511>
- [7] BHTRACE — a tool for GRRT in effective geometry, sourced by nonlinear electrodynamics (Vorokhov A.V.). URL: <https://github.com/alexeivorohov/bhtrace> (accessed 15.03.2025).

Images of Black Holes in Effective Geometry, Sourced by Nonlinear Electrodynamics

Vorokhov Alexei Valerievich^(*)

alexeivorohov@yandex.ru

Sushkov Sergey Vladimirovich

sergey_sushkov@mail.ru

Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract. We consider general relativistic radiative transfer within the framework of effective geometry, sourced by nonlinear electrodynamics (NED). A program tool has been developed for the general case of this task. It has been shown, that effective geometry has a much greater impact on photon geodesics, than direct corrections from NED to the spacetime metric. Images of black holes with thin accretion disks were constructed for the Euler-Heisenberg, Bardeen, and ModMax electrodynamics cases.

Keywords: relativistic radiative transfer, nonlinear electrodynamics, effective geometry, black holes, numerical relativity

Introduction. Theories of nonlinear electrodynamics (NED) are extensions of Maxwell's electrodynamics with lagrangian that depend nonlinearly on one or both of the invariants of the electromagnetic field. These theories are usually introduced to account for QED corrections in terms of classical electrodynamics, to avoid the divergence of charge self-energy, to introduce new algebraic symmetries into the lagrangian, and so on [1]. Despite more than fifty years of experimental search, there have been no informative experimental limitations on NED models [2]. The main reason is the difficulty of achieving critical field strengths in laboratory conditions. Compact objects such as black holes, neutron stars, and white dwarfs, have the strongest magnetic fields in the Universe [3], so their study within the NED framework provides intriguing tests for these theories, widely discussed in the literature [1, 4, 5]. Since any astronomical observation involves some kind of radiation, studying the propagation of particles in the vicinity of these objects is an essential step for these tests.

Methods and materials; results. Photon-photon scattering is a crucial process that affects light propagation in NED. A purely geometrical approach to this process has been developed in [6] and is called effective geometry. In this approach, photons still follow null geodesic lines, but in an effective metric instead of the spacetime metric, which is the solution to the Einstein equations. For a variety of NED models, this effective metric can also depend on photon helicity.

Effective geometry allows us to maintain all standard methods of general relativistic radiation transfer (GRRT). The only caveat is to handle the calculation of all electromagnetic quantities in a way, that allows all NED models to be considered within the united framework. To this end, we have developed a program tool, capable of performing GRRT calculations in an arbitrary effective geometry.

At this point, we have successfully validated the tool on classical tasks and constructed images of black holes with thin accretion disks for the cases of Euler-Heisenberg, Bardeen, and ModMax electrodynamics. We also have shown, that the

effective geometry changes photon propagation more significantly than direct corrections from NED to the spacetime metric, which arise from the right-hand part of Einstein equations.

Conclusion. Within this work we have developed a program tool for GRRT calculations in an arbitrary effective geometry. Using this tool, we have obtained in numerical experiments that the impact of the effective geometry on photon geodesics exceeds the impact from the modification of the spacetime metric. As can be seen from coefficients of effective and normal metrics, this result is evident. For the next stage of our study, we plan to improve this tool and then consider polarized emission from compact objects and calculate emission spectra in various scenarios.

References

- [1] Sorokin D.P. Introductory Notes on Non-linear Electrodynamics and its Applications. *Fortschritte der Physik*, 2022, vol. 70, no. 7–8, pp. 1–26. <https://doi.org/10.1002/prop.202200092>
- [2] Fouché M., Battesti R., Rizzo C. Limits on Non-Linear Electrodynamics. *Physical Review D*, 2016, vol. 93, no. 9, pp. 20–32. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.099902>
- [3] Shapiro S.L., Teukolsky S.A. Black holes, white dwarfs and neutron stars: the physics of compact objects. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, 645 p.
- [4] Bambi C. Ed. Regular black holes. Singapore, Springer, 2023, 499 p.
- [5] Denisova I.P., Garmaev B.D., Sokolov V.A. Compact objects in conformal nonlinear electrodynamics. *The European Physical Journal C*, 2019, vol. 79, pp. 1–8. <https://10.1140/epjc/s10052-019-7044-5>
- [6] Novello M., Salim J.M. Effective electromagnetic geometry. *Physical Review D*, 2001, vol. 63, no. 8, art. no. 083511. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.63.083511>
- [7] BHTRACE — a tool for GRRT in effective geometry, sourced by nonlinear electrodynamics (Vorokhov A.V.). URL: <https://github.com/alexeivorohov/bhtrace> (accessed 15.03.2025).