



UDK: 524.8:530.12

Voxid HAMIDOV,

O‘zbekiston Xalqaro islomshunoslik akademiyasi dotsenti, PhD

E-mail: vkhamidov@gmail.com

Diyor RASHIDOV,

“TIQXMMI” Milliy Tadqiqot Universiteti Huzuridagi Fundamental va Amaliy Tadqiqotlar Instituti tayanch doktoranti

Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti “Axborot tizimlari va texnologiyalari” kafedrasida t.f.f.d. (PhD) K.B. Haydarov taqrizi asosida.

QORA TUYNUK ATROFIDA PLAZMA MAVJUDLIGIDA GRAVITATSION LINZALANISH JARAYONINING TAHLILI

Annotatsiya

Maqolada shvartsshildsimon qora tuynuk atrofida plazma muhiti mavjudligida yorug‘lik nurlarining gravitatsion linzalanishi muammosi tadqiq etilgan. Mavzuning dolzarbligi kompakt astrofizik obyektlarning kuzatuv ma’lumotlarini aniqroq talqin qilish zarurati bilan bog‘liq. Tadqiqotning metodologik asosi kuchsiz gravitatsion maydonni yaqinlashtirish va bir jinsli plazmaning fotonlar trayektoriyasiga ta’sirini tahlil qilishdan iborat. Plazma yorug‘likning og‘ish burchagini o‘zgartirishi va manba tasvirining kattalashishiga ta’sir qilishi aniqlangan. Ishning ilmiy ahamiyati gravitatsion linzalanishni modellashtirishda plazma muhitining rolini aniqlashtirishdan iborat.

Kalit so‘zlar: Gravitatsion linzalanish, qora tuynuk, plazma muhiti, yorug‘lik og‘ishi, foton trayektoriyasi, Shvartsshild metrikasi, tasvirni kattalashtirish.

ANALYSIS OF GRAVITATIONAL LENSING IN THE PRESENCE OF PLASMA AROUND A BLACK HOLE

Annotation

This article examines the problem of gravitational lensing of light rays in the presence of a plasma medium around a Schwarzschild-like black hole. The relevance of this topic stems from the need for a more accurate interpretation of observational data from compact astrophysical objects. The methodological basis of the study is the weak gravitational field approximation and an analysis of the influence of a homogeneous plasma on photon trajectories. It has been established that the plasma alters the angle of light deflection and affects the magnification of the source image. The scientific significance of this work lies in clarifying the role of the plasma medium in modeling gravitational lensing.

Keywords: Gravitational lensing, black hole, plasma medium, light deflection, photon trajectory, Schwarzschild metric, image magnification.

АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ В ПРИСУТСТВИИ ПЛАЗМЫ ВОКРУГ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Аннотация

В статье исследуется проблема гравитационного линзирования световых лучей в присутствии плазменной среды вокруг шварцшильдоподобной чёрной дыры. Актуальность темы связана с необходимостью более точной интерпретации наблюдательных данных компактных астрофизических объектов. Методологической основой исследования является приближение слабого гравитационного поля и анализ влияния однородной плазмы на траекторию фотонов. Установлено, что плазма изменяет угол отклонения света и влияет на увеличение изображения источника. Научная значимость работы заключается в уточнении роли плазменной среды при моделировании гравитационного линзирования.

Ключевые слова: Гравитационное линзирование, чёрная дыра, плазменная среда, отклонение света, траектория фотона, метрика Шварцшильда, увеличение изображения.

Введение. В начале XX века создание общей теории относительности Альбертом Эйнштейном стало фундаментальным этапом в развитии современной физики. Согласно данной теории, массивные объекты искривляют пространство-время, вследствие чего изменяется траектория распространения света. Одним из наиболее наглядных проявлений этого эффекта является гравитационное линзирование, которое было впервые подтверждено экспериментально в 1919 году и в настоящее время широко используется для изучения удалённых астрофизических объектов, включая галактики и чёрные дыры [2].

Современные исследования показывают, что распространение электромагнитных волн вблизи компактных объектов зависит не только от гравитационного поля, но и от физических свойств окружающей среды. В частности, наличие плазмы приводит к изменению показателя преломления среды, что влияет на угол отклонения световых лучей и формирование наблюдаемого изображения [5]. В ряде работ установлено, что как однородная, так и неоднородная плазменная среда способны существенно изменять характеристики гравитационного линзирования, включая величину отклонения и яркость изображений источников [6]. Дополнительную актуальность данной проблеме придают результаты современных наблюдений, в частности получение изображения тени чёрной дыры, что подтверждает применимость теоретических моделей [3].

В Республике Узбекистан развитие фундаментальной науки рассматривается как важное направление государственной политики. В трудах Шавката Мирзиёева подчёркивается необходимость поддержки научных исследований и внедрения современных технологий в научную сферу, что способствует развитию астрофизических исследований [1].

В данной работе проводится анализ гравитационного линзирования в присутствии плазмы вокруг Шварцшильдоподобной чёрной дыры с акцентом на влияние плазмы на угол отклонения световых лучей и увеличение изображения источника.

Анализ литературы. Гравитационное линзирование является одним из наиболее изученных эффектов общей теории относительности и широко используется для исследования свойств компактных астрофизических объектов. Классические работы по теории гравитации, в частности фундаментальный труд Миснер, Торн и Уилер, заложили основу для понимания искривления пространства-времени и движения фотонов вблизи массивных тел. В дальнейшем развитие теоретических моделей позволило учитывать более сложные конфигурации гравитационных полей и свойства черных дыр, включая вращение и отклонения от классической метрики Шварцшильда [2].

Особое внимание в научной литературе уделяется гравитационному линзированию в сильных и слабых полях. Работы, посвящённые сильному линзированию, показывают, что вблизи горизонта событий возникают множественные изображения и значительные искажения наблюдаемых объектов. В то же время режим слабого линзирования более применим для анализа удалённых источников и позволяет исследовать влияние дополнительных факторов, таких как окружающая среда.

Одним из ключевых направлений современных исследований является учёт плазменной среды вокруг чёрных дыр. В работах Бисноватый-Коган и Цупко показано, что наличие плазмы приводит к частотно-зависимому изменению траектории фотонов, что существенно влияет на угол отклонения света [5]. Дальнейшие исследования расширили данный подход на случаи вращающихся компактных объектов и различных моделей гравитации, демонстрируя, что как однородная, так и неоднородная плазма способны изменять наблюдаемые характеристики линзирования [6].

Современные астрофизические наблюдения подтверждают теоретические результаты. В частности, получение изображения тени сверхмассивной чёрной дыры коллаборацией Event Horizon Telescope стало важным этапом в проверке предсказаний общей теории относительности и моделей распространения света вблизи компактных объектов [3]. Дополнительные исследования показывают, что анализ гравитационного линзирования может служить эффективным инструментом для тестирования альтернативных теорий гравитации и определения физических параметров чёрных дыр.

Таким образом, проведённый анализ литературы показывает, что учёт плазменной среды является необходимым условием для более точного описания гравитационного линзирования и интерпретации современных наблюдательных данных.

Методология исследования. В данной работе исследование гравитационного линзирования проводится в рамках общей теории относительности с учётом влияния плазменной среды на распространение электромагнитных волн. В качестве базовой модели используется сферически-симметричное пространство-время, близкое к метрике Шварцшильда, которое позволяет описывать гравитационное поле невращающейся чёрной дыры [2]. Для упрощения анализа применяется приближение слабого гравитационного поля, что является стандартным подходом при исследовании отклонения световых лучей на больших расстояниях от компактного объекта [4].

Метрика пространства-времени рассматривается в виде малых возмущений плоской метрики Минковского, что позволяет представить её в следующем виде:

$$g_{\{\mu\nu\}} = \eta_{\{\mu\nu\}} + h_{\{\mu\nu\}} \quad (1)$$

где $\eta_{\mu\nu}$ — метрика плоского пространства-времени, а $h_{\mu\nu}$ описывает гравитационные возмущения [5]. Такой подход упрощает вычисление угла отклонения световых лучей и позволяет выделить вклад гравитационного поля и плазменной среды.

Для описания влияния плазмы используется модель холодной невращающейся среды, в которой показатель преломления зависит от соотношения частоты фотона и плазменной частоты. В этом случае угол отклонения света можно представить как сумму гравитационного и плазменного вкладов, что соответствует современным подходам к анализу распространения излучения вблизи компактных объектов [5, 6]. В работе рассматриваются два типа плазменной среды: однородная и неоднородная, что позволяет более полно оценить влияние физических параметров среды на линзирование.

Для интерпретации полученных результатов используется геометрическая модель гравитационного линзирования, связывающая положение источника, линзы и наблюдателя. На её основе определяется прицельный параметр и угол отклонения, а также рассчитывается увеличение изображения источника. Схематическое представление данной модели приведено на рисунке 1.

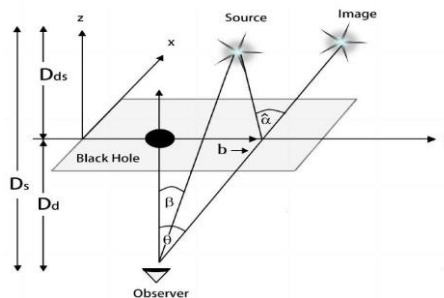


Рис.1. Схематическое изображение системы гравитационного линзирования (взято из [7]).

Анализ и результаты. В рамках проведённого исследования был выполнен анализ влияния гравитационного поля чёрной дыры и плазменной среды на отклонение световых лучей в режиме слабого гравитационного линзирования.

Основное внимание уделено зависимости угла отклонения от прицельного параметра, а также параметров, характеризующих гравитационную метрику и свойства плазмы. Полученные результаты основаны на аналитических выражениях для угла отклонения, полученных в приближении слабого поля, что соответствует условиям распространения излучения на значительном расстоянии от компактного объекта [4].

Результаты расчётов показывают, что при увеличении прицельного параметра угол отклонения световых лучей уменьшается, что соответствует классическим представлениям о гравитационном линзировании. Это связано с тем, что при удалении траектории фотона от центра гравитационного поля влияние искривления пространства-времени ослабевает. Одновременно с этим наблюдается влияние параметра, характеризующего отклонение от классической шварцшильдовской метрики: увеличение данного параметра приводит к снижению угла отклонения, что указывает на изменение структуры гравитационного поля.

Существенное влияние на процесс линзирования оказывает плазменная среда. В случае однородной плазмы установлено, что увеличение плазменной частоты приводит к возрастанию угла отклонения световых лучей. Это объясняется тем, что плазма изменяет показатель преломления среды, вследствие чего траектория фотона дополнительно искривляется [5]. При этом данный эффект имеет частотно-зависимый характер: световые лучи с различными частотами могут отклоняться неодинаково, что особенно важно при анализе радионаблюдений и интерпретации изображений компактных объектов. Таким образом, в присутствии плазмы отклонение света определяется не только гравитацией, но и электромагнитными свойствами среды.

Данные зависимости наглядно представлены на рисунке 2, где показано влияние прицельного параметра и параметров плазмы на угол отклонения.

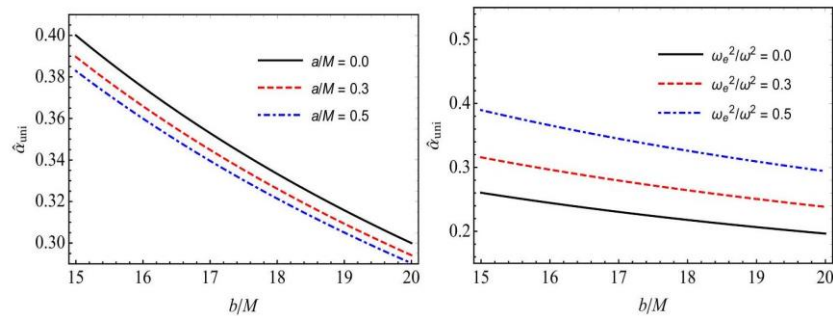


Рис. 2. Зависимость угла отклонения $\hat{\alpha}_{uni}$ от прицельного параметра b для различных значений параметра a/M (левая панель) и плазменной среды ω_e^2/ω^2 (правая панель).

Анализ графиков демонстрирует, что при фиксированных значениях прицельного параметра увеличение плазменного параметра приводит к усилению эффекта линзирования, тогда как увеличение параметра метрики оказывает противоположное влияние.

Дополнительно проведённый анализ показывает, что влияние плазмы становится особенно значимым при сравнительно малых значениях прицельного параметра, когда световые лучи проходят ближе к чёрной дыре. Это указывает на необходимость учёта плазменной среды при интерпретации наблюдательных данных, особенно в задачах, связанных с изучением окрестностей компактных объектов. Полученные результаты согласуются с современными теоретическими и наблюдательными исследованиями и подтверждают важность комплексного подхода к анализу гравитационного линзирования [6].

Помимо изменения угла отклонения, важным результатом гравитационного линзирования является увеличение изображения источника. В проведённом исследовании было проанализировано влияние параметров гравитационного поля и плазменной среды на величину суммарного увеличения. Полученные результаты показывают, что увеличение изображения чувствительно к изменениям как параметра метрики, так и характеристик плазмы [7].

В частности, установлено, что рост параметра, связанного с гравитационным полем, приводит к уменьшению общего увеличения изображения. Это связано с изменением геометрии пространства-времени и перераспределением траекторий фотонов. В то же время увеличение параметров плазмы, таких как плазменная частота, приводит к росту суммарного увеличения, что обусловлено дополнительным вкладом среды в процесс распространения излучения [5].

Наглядное представление данных зависимостей приведено на рисунке 3, где показано влияние параметров системы на величину увеличения.

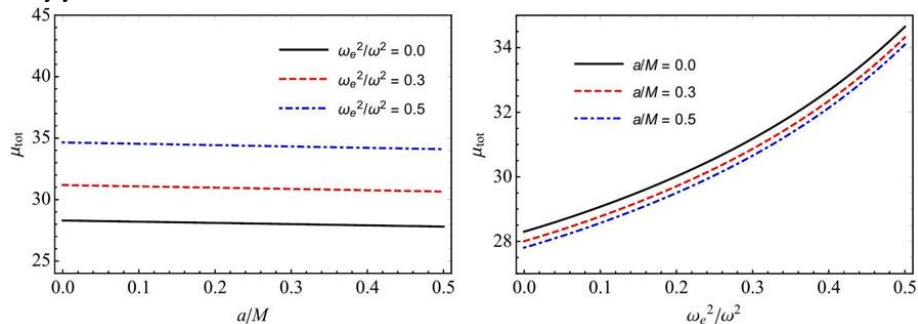


Рис.3. Зависимость полного увеличения μ_{tot} от параметра a при различных значениях плазменной частоты (верхняя панель) и параметра плазмы при различных значениях параметра a (нижняя панель).

Анализ графиков подтверждает, что плазменная среда играет существенную роль в формировании наблюдаемых характеристик линзирования и должна учитываться при интерпретации астрофизических данных [8,9,10].

Заключение и рекомендации. В рамках данного исследования проведён анализ гравитационного линзирования вблизи шварцшильдоподобной чёрной дыры с учётом влияния плазменной среды. Полученные результаты показывают, что отклонение световых лучей определяется не только геометрией пространства-времени, но и физическими свойствами окружающей среды. Установлено, что увеличение прицельного параметра приводит к уменьшению угла отклонения, тогда как рост плазменной частоты, напротив, усиливает эффект линзирования. Это свидетельствует о существенной роли плазмы в формировании наблюдаемых характеристик излучения в окрестности компактных объектов.

Также показано, что суммарное увеличение изображения источника чувствительно к изменениям параметров системы. При увеличении параметров гравитационного поля наблюдается снижение увеличения, в то время как усиление плазменных эффектов приводит к росту яркости наблюдаемого изображения. Данные результаты согласуются с современными теоретическими моделями и подтверждают необходимость комплексного учёта всех факторов при анализе астрофизических наблюдений.

В качестве рекомендаций следует отметить целесообразность дальнейшего исследования влияния плазмы в более сложных моделях гравитации, включая вращающиеся чёрные дыры и неоднородные среды. Кроме того, перспективным направлением является сопоставление теоретических результатов с данными современных наблюдательных проектов. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения параметров компактных объектов и повышения точности интерпретации наблюдаемых эффектов гравитационного линзирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mirziyoyev Sh.M. Yangi O'zbekiston strategiyasi. - Toshkent: O'zbekiston, 2021.
2. Misner C.W., Thorne K.S., Wheeler J.A. Gravitation. - San Francisco: W.H. Freeman, 1973.
3. Akiyama K. et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // *Astrophysical Journal Letters*. - 2019. - Vol. 875. - P. L1.
4. Virbhadra K.S., Ellis G.F.R. Schwarzschild black hole lensing // *Physical Review D*. - 2000. - Vol. 62. - P. 084003.
5. Bisnovatyi-Kogan G.S., Tsupko O.Y. Gravitational lensing in a non-uniform plasma // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. - 2010. - Vol. 404. - P. 1790–1800.
6. Morozova V.S., Ahmedov B.J., Tursunov A.A. Gravitational lensing by a rotating massive object in a plasma // *Astrophysics and Space Science*. - 2013. - Vol. 346. - P. 513–520.
7. Babar G.Z., Atamurotov F., Babar A.Z. Gravitational lensing in 4-D Einstein-Gauss-Bonnet gravity in the presence of plasma // *Physics of the Dark Universe*. - 2021. - Vol. 32. - P. 100798.
8. Atamurotov F., Abdujabbarov A., Rayimbaev J. Weak gravitational lensing Schwarzschild-MOG black hole in plasma // *European Physical Journal C*. -2021. - Vol. 81. - P. 118.
9. Simpson A., Visser M. Regular Black Holes with Asymptotically Minkowski Cores // *Universe*. - 2019. - Vol. 6. - P. 8.
10. Berry T., Simpson A., Visser M. Photon Spheres, ISCOs, and OSCOs: Astrophysical Observables for Regular Black Holes with Asymptotically Minkowski Cores // *Universe*. - 2020. - Vol. 7. - P. 2.