

УДК 524.882

Тонкие аккреционные диски вокруг акустических черных дыр**Юсупова Розалия Мансуровна**^{1,2(*)}

yu.rose@mail.ru

SPIN-код: 9249-9155

Измаилов Рамиль Наильевич^{1,2}

izmailov.ramil@gmail.com

SPIN-код: 7629-3535

¹БГПУ им. М. Акмуллы, Уфа, Россия²УФИЦ РАН, Уфа, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются свойства тонкого аккреционного диска (далее диска), образованного вокруг акустической черной дыры Шварцшильда. Показано влияние параметра ξ на кинематические характеристики, такие как угловая скорость, эффективный угловой момент и эффективная энергия связи. Рассчитан радиус наименьшей стабильной орбиты частиц диска. Выявлены отличительные признаки диска акустической черной дыры от стандартной черной дыры Шварцшильда. В работе использована система единиц измерения $c = G = 1$.

Ключевые слова: тонкий аккреционный диск, модель Новикова — Торна, черная дыра Шварцшильда, акустическая черная дыра

Введение. Идея «акустических черных дыр» впервые была предложена У.Дж. Унру в работе [1] и подробно рассмотрена М. Виссером в работе [2]. Такие черные дыры могут образовываться при движении жидкости со скоростью, превышающей локальную скорость звука, что в конечном итоге может привести к формированию искривленного пространства-времени. Примечательным является тот факт, что аналоги «акустических черных дыр» были экспериментально реализованы в конденсате Бозе — Эйнштейна [3]. В связи с этим интересным будет исследовать свойства дисков, образованных вокруг этих черных дыр.

Методы и материалы; результаты. Явление аккреции вокруг компактных объектов является хорошим инструментом для определения типа объекта и его свойств [4]. Первое всестороннее исследование дисков с использованием ньютоновского подхода было сделано в работе [5]. Позднее общая релятивистская модель диска была разработана в основополагающих работах Новикова и Торна [6], Пейджа и Торна [7] в предположении, что диск находится в стационарном состоянии, то есть темп аккреции массы $\dot{M} = dM/dt$ постоянен во времени и не зависит от радиуса диска. Предполагается, что диск находится в гидродинамическом и термодинамическом равновесии, что обеспечивает электромагнитный спектр и свойства испускаемого излучения черного тела. Модель диска также предполагает, что отдельные частицы движутся по кеплеровским орбитам между радиусом наименьшей стабильной орбиты r_{ms} и внешним радиусом r_{out} .

В работе были исследованы кинематические и излучательные свойства диска, образованного вокруг акустической черной дыры Шварцшильда, которая описывается массой M и акустическим параметром ξ . При значениях $\xi \leq 1$ профили угловой скорости практически не отличаются от профилей диска в случае черной дыры Шварцшильда. При значениях $2 < \xi < 4$ по мере приближения к радиусу горизонта событий скорость частиц уменьшается и при $\xi = 4$ (экстремальный случай) наблюдается разрыв с асимптотой на $r = 4M$, что не характерно для астрофизических черных дыр.

Заключение. Исследованы кинематические свойства диска акустической черной дыры Шварцшильда. В дальнейшем планируется исследовать светимость и температуру диска. Полученные результаты в будущем могут быть использованы в экспериментальной астрофизике, в частности в миссии Миллиметрон.

Список источников

- [1] Unruh W.G. Experimental Black-Hole Evaporation. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, vol. 46, pp. 1351–1353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.46.1351>
- [2] Visser M. Acoustic black holes: horizons, ergospheres, and Hawking radiation. *Class. Quantum Grav.*, 1998, vol. 15, pp. 1767–1791. <https://doi.org/10.48550/arXiv.gr-qc/9712010>
- [3] Lahav O., Itah A., Blumkin A., Gordon C., Steinhauer J. Realization of a Sonic Black Hole Analogue in a Bose-Einstein Condensate. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 105, art. no. 240401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.240401>
- [4] Karimov R.K., Izmailov R.N., Potapov A.A. et al. Can accretion properties distinguish between a naked singularity, wormhole and black hole? *Eur. Phys. J. C*, 2020, vol. 80, art. no. 1138. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08717-x>
- [5] Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black Holes in Binary Systems. *Observational Appearance. Astron. Astrophys.*, 1973, vol. 24, pp. 337–355.
- [6] Novikov I.D., Thorne K.S. *Black Holes*. New York, Gordon and Breach, 1973.
- [7] Page D.N., Thorne K.S. Disk-Accretion onto a Black Hole. Time-Averaged Structure of Accretion Disk. *Astrophys. J.*, 1973, vol. 191, art. no. 499. <https://doi.org/10.1086/152990>

Thin Accretion Disks around Acoustic Black Holes

Yusupova Rosaliya Mansurovna^{1,2(*)}

yu.rose@mail.ru
SPIN-code: 9249-9155

Izmailov Ramil Nail'evich^{1,2}

izmailov.ramil@gmail.com
SPIN-code: 7629-3535

¹BSPU n.a. M. Akmulla, Ufa, Russia

²UFRC RAS, Ufa, Russia

Abstract. This study considers the properties of a thin accretion disk (disk) formed around an acoustic Schwarzschild black hole. The influence of ξ on kinematic characteristics, such as angular velocity, effective angular momentum, and effective binding energy was shown. The radius of the innermost stable orbit of the disk-shaped particles is defined. The distinc-

tive features of the acoustic black hole disk compared with the standard Schwarzschild black hole have been revealed. The system of units of measurement $c = G = 1$ is used in the work.

Keywords: thin accretion disk, Novikov — Thorne model, Schwarzschild black hole, acoustic black hole

Introduction. The idea of “acoustic black holes” was first proposed by W.J. Unruh in [1] and considered in detail by M. Visser in [2]. Such black holes can form when a liquid moves at a speed exceeding the local speed of sound, which can eventually lead to the formation of a space-time curvature. Remarkably, analogs of “acoustic black holes” have been experimentally realized in the Bose — Einstein condensate system [3]. Therefore, it would be interesting to investigate the properties of disks formed around these black holes.

Methods and materials; results. The phenomenon of accretion around compact objects is useful tool for determining the type and properties of an object [4]. The first comprehensive study of disks using the Newtonian approach was performed in Ref. [5]. Subsequently, the general relativistic disk model was developed in the seminal works of Novikov and Thorne in [6] and Page and Thorne in [7] under the assumption that the disk is in a stationary state, that is, the rate of mass accretion $\dot{M} = dM/dt$ is constant in time and does not depend on the disk radius. It is assumed that the disk is in hydrodynamic and thermodynamic equilibrium, which ensures the electromagnetic spectrum and the properties of the emitted blackbody radiation. The disk model also assumes that individual particles move in Keplerian orbits between the radius of the innermost stable orbit r_{ms} and the outer radius r_{out} .

This study investigated the kinematic and radiative properties of a disk formed around an acoustic Schwarzschild black hole, which is described by mass M and acoustic parameter ξ . At $\xi \leq 1$, the angular velocity profiles did not differ from the disk profiles in the case of the Schwarzschild black hole. At $2 < \xi < 4$, the particle velocity decreases as it approaches the radius of the event horizon, and at $\xi = 4$ (extreme case), there is a gap with an asymptote at $r = 4M$, which is not typical for astrophysical black holes.

Conclusion. The kinematic properties of the disk of the acoustic Schwarzschild black hole are investigated. In the future, it is planned to study the luminosity and temperature of the disk. The results obtained can be used in experimental astrophysics in the future, in particular in the Millimetron mission.

References

- [1] Unruh W.G. Experimental Black-Hole Evaporation. Phys. Rev. Lett., 1981, vol. 46, pp. 1351–1353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.46.1351>
- [2] Visser M. Acoustic black holes: horizons, ergospheres, and Hawking radiation. Class. Quantum Grav., 1998, vol. 15, pp. 1767–1791. <https://doi.org/10.48550/arXiv.gr-qc/9712010>

- [3] Lahav O., Itah A., Blumkin A., Gordon C., Steinhauer J. Realization of a Sonic Black Hole Analogue in a Bose-Einstein Condensate. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 105, art. no. 240401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.240401>
- [4] Karimov R.K., Izmailov R.N., Potapov A.A. et al. Can accretion properties distinguish between a naked singularity, wormhole and black hole? *Eur. Phys. J. C*, 2020, vol. 80, art. no. 1138. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08717-x>
- [5] Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance. *Astron. Astrophys.*, 1973, vol. 24, pp. 337–355.
- [6] Novikov I.D., Thorne K.S. *Black Holes*. New York, Gordon and Breach, 1973.
- [7] Page D.N., Thorne K.S. Disk-Accretion onto a Black Hole. Time-Averaged Structure of Accretion Disk. *Astrophys. J*, 1973, vol. 191, art. no. 499. <https://doi.org/10.1086/152990>