АННОТАЦИЯ
к диссертационной работе на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D061100 – Физика и астрономия»

НҰРБАҚЫТ ГҮЛМИРА

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПОЛЯ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Общая характеристика исследования

Класс компактных объектов часто включает в себя планетоподобные тела, белые карлики, нейтронные звезды, другие экзотические плотные звезды и черные дыры. Известно, что ньютоновская теория гравитации достаточна для описания гравитационного поля традиционных астрофизических объектов. Однако открытие экзотических компактных объектов, таких как квазары и пульсары, а также возможность гравитационного коллапса вплоть до черной дыры указывают на важность теории относительности в астрономии и астрофизике. Кроме того, достижения в исследовании космоса и развитие современных измерительных технологий потребовали учета эффектов относительности даже внутри Солнечной системы.

Одной из важнейших задач современной релятивистской гравитации является описание Вселенной с помощью теории относительности Эйнштейна, особенно исследование характеристик гравитационных полей вокруг небесных тел, таких как звезды и черные дыры, и объяснение их динамических свойств.

Общая теория относительности фундаментальная теория Эйнштейна, описывающая гравитацию через кривизну пространства-времени. Она расширила ньютоновскую механику и позволила объяснить астрофизические явления в сильных гравитационных полях. Общая теория относительности имеет большое значение не только в теоретической физике, но и в астрофизике, небесной механике, космологии, физике компактных объектов и гравитационных волн.

Настоящая диссертационная работа посвящена описанию гравитационного поля компактных объектов, включая нейтронные звезды и черные дыры, в рамках общей теории относительности. В диссертационной работе рассматриваются условия образования черных дыр, их физические характеристики и гравитационные эффекты. Также проводится анализ соответствия наблюдательных данных по сверхмассивным черным дырам, область применения решений общей теории относительности и сравнительный анализ с альтернативными моделями. Данная работа направлена на более глубокое описание природы компактных объектов на основе теоретических моделей и современных наблюдательных данных.

Актуальность исследования

Одним из важных направлений современной физики и астрономии является исследование гравитационных полей вокруг небесных тел, таких как звезды и черные дыры, в рамках общей теории относительности. Общая теория относительности имеет широкое практическое применение: например, в системах глобального позиционирования GPS(Global Positioning System) или при расчете траекторий космических аппаратов, таких как Voyager и New Horizons, необходимы поправки, основанные на этой теории. Также невозможно описать нейтронные звезды, рентгеновские двойные системы или объекты в центрах галактик без учета общей теории относительности.

Черные дыры один из основных объектов исследований современной астрофизики. До появления общей теории относительности были предложены гипотетические объекты, такие как «черные звезды». Однако с 1967 года, после открытия пульсаров, кандидатов в черные дыры в двойных звездных системах, а также активных галактических ядер, квазаров и блазаров, черные дыры были признаны реальными астрофизическими объектами. Компактные тела, наблюдаемые в плотных двойных системах, не соответствовали известным на тот момент нейтронным звездам или белым карликам. Кроме того, в центрах галактик были обнаружены объекты с массой в миллионы, а в некоторых случаях, в миллиарды солнечных масс, природу которых можно объяснить только через сверхмассивные чёрные дыры.

С 2016 года, после регистрации гравитационных волн, интерес к физике черных дыр звездной массы значительно возрос. Это явление, предсказанное Эйнштейном, было обнаружено с помощью высокочувствительных лазерных интерферометров, таких как LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory – Лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория) и Virgo (интерферометрическая обсерватория для регистрации гравитационных волн), и внедрения новых методов детектирования и анализа данных.

Получение изображения тени сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик M87 и Млечного Пути стало важным достижением глобального научного сотрудничества. Это исследование подтвердило предсказания общей теории относительности и доказало правильность теории.

В настоящее время, хотя предлагаются альтернативные решения черных дыр, такие как решения Шварцшильда, Рейснера-Нордстрёма и Керра, точность наблюдений не позволяет их различить.

Следует отметить, что в 2017 году Райнер Вайсс, Барри Бэриш и Кип Торн были удостоены Нобелевской премии за вклад в регистрацию гравитационных волн, а в 2020 году Роджер Пенроуз, Райнхард Генцель и Андреа Гез получили Нобелевскую премию за открытия, связанные с черными дырами.

Понимание истории возникновения Вселенной поэтапно также является достижением общей теории относительности и современной астрофизики. От Большого взрыва (13,8 млрд лет назад) до формирования

первых элементов, разделения космического микроволнового фона, образования первых звезд и галактик, формирования Солнечной системы все эти процессы основаны на физических законах. В настоящее время расширение Вселенной продолжается.

Однако происхождение сверхмассивных чёрных дыр до конца не ясно. Существуют различные гипотезы: прямой коллапс первичных газовых облаков, слияние черных дыр звездной массы или аккреция материи остатками первых звезд. В 2025 году было зарегистрировано событие *AT2024tvd*, в котором астрономы впервые наблюдали, как блуждающая сверхмассивная чёрная дыра поглощает звезду на окраине галактики. Это показывает, что черные дыры могут существовать не только в центрах галактик, но и в других местах. Исследования черных дыр будут продолжаться и в будущем.

Таким образом, происхождение черных дыр, их свойства и характеристики в рамках общей теории относительности являются одним из основных направлений современной астрофизики. Поэтому тема, цель и задачи диссертационной работы полностью соответствуют специальности «физика и астрономия».

Цель исследования

Исследование гравитационных полей чёрных дыр и нейтронных звёзд на основе общей теории относительности.

Объекты исследования

Сильные гравитационные поля, черные дыры и нейтронные звезды, уравнения поля Эйнштейна. Движение пробных частиц.

Предмет исследования

Точные и приближенные решения уравнений поля Эйнштейна. Адиабатическая теория движения тел в общей теории относительности. Механизм образования сверхмассивных чёрных дыр.

Методы исследования

В данном исследовании были использованы следующие теоретические и численные методы:

- Аналитические и численные решения уравнений поля Эйнштейна;
- Методы дифференциальной геометрии и тензорного анализа;
- Лагранжев и Гамильтонов формализм, пертурбативный метод;
- Численное моделирование.

Задачи исследования

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Найти связь между приближенной метрикой Эреза-Розена и внешней статической метрикой Хартла-Торна.
2. Изучить движение тел в общей теории относительности через адиабатическую теорию.
3. Исследовать образование сверхмассивных чёрных дыр, возникших в результате гравитационного коллапса фермионной темной материи.

Научная новизна и основные результаты

В данной работе впервые:

1. Была установлена связь между приближенной метрикой Эреза-Розена и внешним статическим решением Хартла-Торна, без применения преобразования Зипоя-Вурхиза в приближении ~ Q и M^2.

2. Описание движения пробных частиц в рамках адиабатической теории позволило получить выражение для прецессии перигелия для метрики Хартла-Торна и метрики Керра в приближении ~ $1/c^2$. Было показано влияние вращения и деформации центрального тела на траекторию пробной частицы. Также было доказано, что полученная формула соответствует принципу суперпозиции релятивистских эффектов.

3. Предложен новый механизм формирования сверхмассивных чёрных дыр. Сверхмассивные чёрные дыры формируются в результате гравитационного коллапса темной материи в центрах галактик. Показано, что черные дыры, образующиеся через этот механизм, впоследствии увеличивают свою массу за счет аккреции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установка связи между приближенной метрикой Эреза-Розена и статической метрикой Хартла-Торна в приближении Q и M^2 не требует преобразования Зипоя-Вурхиса, в отличии от в приближении Q, где установка связи между двумя метриками осуществляется только за счет преобразования Зипоя-Вурхиса.

2. Эффекты, возникающие от массы, углового момента и квадрупольного момента источника гравитационного поля, описываются принципом суперпозиции релятивистских эффектов. Влияние углового и квадрупольного момента Солнца на смещение перигелия планет незначительно.

3. Первичные черные дыры в центре галактики формируются в результате гравитационного коллапса плотных фермионных ядер темной материи. Этот процесс значительно быстрее, чем традиционные звездные механизмы, и способствует образованию сверхмассивных чёрных дыр.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Результаты исследования вносят вклад в развитие теоретических и численных методов в астрофизике, физике компактных объектов и космологии. Кроме того, полученные теоретические результаты позволяют объяснить источники рентгеновских пульсаров и гамма-излучений.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Полученные результаты соответствуют наблюдательным данным. Достоверность диссертационной работы подтверждается статьями, опубликованными в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором и в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно выполнила весь процесс исследования от начала до конца, включая литературный обзор и все численные расчёты, консультируясь с научными руководителями. Приняла непосредственное

участие в выборе методов исследования и совместно с научными руководителями проанализировала полученные результаты.

Апробация работы

В процессе написания диссертационной работы было опубликовано 8 печатных работ. Из них 2 статьи опубликованы в авторитетных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК *International Journal of Mathematics and Physics* и *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия физико-математическая*. 3 статьи опубликованы в международных журналах с высоким импакт-фактором, входящих в базы данных Web of Science и Scopus. Также 3 тезиса представлены на международных конференциях. Данная диссертация вносит значительный вклад в исследование гравитационного поля компактных объектов в рамках общей теории относительности.

Статьи с высоким импакт-фактором, опубликованные в изданиях, входящих в международные научные базы данных Thomson Reuters или Scopus

1. Boshkayev K., Quevedo H., Nurbakyt G., Malybayev A., Urazalina A. The Erez-Rosen Solution versus the Hartle-Thorne Solution // Symmetry – 2019. – Vol.11(10). – art. № 1324. *(***WoS (JCR):** Impact Factor (2019) = 2.645, Q2. **Scopus (CiteScore):** 54%*).*

2. Arguelles C. R., Boshkayev K., Krut A., Nurbakyt G., Rueda J. A., Ruffini R., Uribe-Suarez J. D. Yunis R. On the growth of supermassive black holes formed from the gravitational collapse of fermionic dark matter cores // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (MNRAS) – 2023. – Vol. 523(2). – P. 2209-2218. *(***WoS (JCR):** Impact Factor (2022) = 4.8, Q1. **Scopus (CiteScore):** 85%*).*

3. Boshkayev K., Nurbakyt G., Quevedo H., Suliyeva G., Taukenova A. S., Tlemissov A., Tlemissova Zh., Urazalina A., Dalelkhankyzy A., Stuchlik Z., Beissen N., Gumarova Sh. “Adiabatic theory in Kerr spacetimes” // General Relativity and Quantum Cosmology. – 2024. – Vol. 56(5). – art. №. 67 *(***WoS (JCR):** IF (2022) = 2.0, Q2. **Scopus (CiteScore):** 73%*).*

Публикации в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан

1. Boshkayev K., Malybayev A., Quevedo H., Nurbakyt G., Taukenova A., Urazalina A. The correspondence of the Erez-Rosen solution with the Hartle-Thorne solution in the limiting case of ~Q and ~M^2//News of the National Academy of science of the Republic of Kazakhstan: Physico-Mathematical Series, – 2020. – Vol. 5, no.333 – P. 19-27.

2. Suliyeva G. B., Boshkayev K., Nurbakyt G., Quevedo H., Taukenova A. S., Tlemissov A. T., Tlemissova Zh. A., Urazalina A. Adiabatic theory of motion of bodies in the Hartle-Thorne spacetime // International Journal of Mathematics and Physics. – 2022. – Vol. 13 (1). – P. 82-90.

Публикации в материалах международных и отечественных научных конференций

1. Boshkayev K.A., Nurbakyt G. Correspondence of the Erez-Rosen metric with the q-metric // International Scientific Conference of students and Young scientists "Farabi Alemi" of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty – 2019. – P. 13.

2. Boshkayev K.A., Zhumakhanova G., Nurbakyt G. Erez-Rosen metric versus q-metric // The 6th International Workshop of Nuclear Physics, Nuclear Astrophysics and Cosmic Rays Almaty, Kazakhstan, – 2019. – P. 58.

3. Нұрбақыт Г. Қонысбаев Т., Курманов Е. Квазипериодты тербелістер арқылы шағын нысандардың негізгі параметрлерін анықтау // «Фараби әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық ғылыми конференция материалдары, Алматы, Қазақстан. – 2022. – Б. 54.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников. Работа содержит 316 формул, 2 таблицы, 11 рисунков, список литературы из 191 наименований и охватывает 108 страниц.