

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
имени Б. И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

УДК 530.12

**КОМАРОВ
Станислав Олегович**

**КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРА ЗВЕЗД, ДВИЖУЩИХСЯ В
ОКРЕСТНОСТИ СВЕРХМАССИВНОЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.02 – теоретическая физика**

Минск – 2019

Работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель: **Горбацевич Александр Константинович**,
доктор физико-математических наук, профессор;
профессор кафедры теоретической физики и
астрофизики Белорусского государственного
университета

Официальные оппоненты: **Рябушко Антон Петрович**,
доктор физико-математических наук, профессор
Выблый Юрий Петрович,
кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Центра фундаментальных вза-
имодействий и астрофизики Института физики
НАН Беларуси

Оппонирующая организация: Научно-исследовательское учреждение
«Институт ядерных проблем» Белорусского
государственного университета.

Защита состоится 24 января 2020 г. в 14.30 на заседании совета по защите
диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики им. Б. И. Степанова НАН Бела-
руси по адресу: 220072, Республика Беларусь, Минск, пр. Независимости, 68-2,
тел. +375 172841559, e-mail: vyblyi@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке
имени Я. Колоса Национальной академии наук Беларуси

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций, кандидат
физико-математических наук

Выблый Ю.П.

ВВЕДЕНИЕ

Гравитационное поле вовлечено во многие явления, наблюдаемые различными астрофизическими обсерваториями. Такими явлениями являются: электромагнитное излучение компактных двойных звезд, в т. ч. пульсаров, электромагнитное излучение звезд и звездных систем, движущихся в окрестности центра Галактики, излучение гравитационных волн сталкивающимися черными дырами и нейтронными звездами.

Особое место среди исследований, позволяющих выявлять и изучать проявления гравитационного поля, занимают исследования двойных звезд и черных дыр. Одно из интересных свойств двойных звездных систем, содержащих белый карлик, было предсказано С. Чандрасекаром. Оно заключается в том, что белый карлик, аккрецирующий вещество от звезды-компаньона, может наращивать массу лишь до определенного универсального предела, называемого пределом Чандрасекара, после чего следует его взрыв, наблюдаемый как сверхновая. Это свойство позволяет проверять многие теории строения вещества в области больших давлений, а также с учетом эффектов специальной и общей теорий относительности. Другие важные эффекты связаны с изучением нейтронных звезд. Нейтронные звезды, входящие в двойные системы, часто видны как пульсары. Период испускания импульсов пульсара в собственной системе отсчета остается постоянным с очень высокой степенью точностью, что позволяет использовать наблюдения за такими системами для проверки теорий гравитации. Изучение двойных систем, состоящих из компактных объектов (таких как нейтронные звезды и черные дыры), интересно еще и тем, что их эволюция неизбежно приводит к столкновению компонент двойной системы, сопровождающемуся всплеском мощности излучения гравитационных волн. Таким образом, в этом случае существует два независимых способа изучения характеристик двойной системы: по принятому сигналу электромагнитного излучения и по сигналу гравитационных волн, что существенно увеличивает достоверность и точность полученных результатов.

Все сказанное выше о свойствах двойных систем, состоящих из звезд или компактных объектов, справедливо и в случае движения такой системы во внешнем гравитационном поле. Двойные системы, движущиеся во внешнем гравитационном поле, создаваемом некоторым третьим телом (телами), являются менее изученными как теоретически, так и с точки зрения наблюдений. В то же время существуют многочисленные астрофизические данные, указывающие на существование большого количества двойных звезд вблизи центров галактик, в том числе и Млечного Пути, где сильное гравитационное поле создается находящейся в центре галактики сверхмассивной черной дырой. Тео-

рия же предсказывает множество новых эффектов, являющихся проявлениями внешнего гравитационного поля. К таким эффектам относятся, например, увеличение частоты столкновений двойных звезд, сопровождающихся всплеском излучения гравитационных волн (эффект Лидова-Козаи), возможность учета дополнительной прецессии орбиты относительного движения звезд, а также их собственных моментов импульса во внешнем гравитационном поле. Внешнее гравитационное поле также сказывается на траектории и времени распространения электромагнитного сигнала, что дает не менее важный вклад при интерпретации наблюдений.

В процессе данного диссертационного исследования был разработан подход для вычисления временной зависимости красного смещения спектра электромагнитного излучения двойной звезды, движущейся во внешнем гравитационном поле вращающейся черной дыры. При этом, использованные в исследовании методы, позволили получить ковариантное описание некоторых эффектов внешнего гравитационного поля, что может быть использовано для реконструкции движения двойной звезды по наблюдательным данным ее красного смещения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами

Тема диссертации включена в государственную программу научных исследований на 2016-2017 годы и 2018-2019 годы ГПНИ «Конвергенция», подпрограмма «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма». Соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований в Республике Беларусь, в частности, пункту 5 («Информатика и космические исследования») перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – вычисление красного смещения спектра излучения двойной звезды, движущейся во внешнем гравитационном поле черной дыры. При этом должны учитываться общерелятивистские эффекты внешнего гравитационного поля, влияющие как на движение звезд, включая двойные, так и на распространение электромагнитного излучения.

В соответствии с целью, в работе поставлены следующие задачи:

1. определение оптических характеристик электромагнитного излучения, распространяющегося во внешнем гравитационном поле;
2. расчет красного смещения спектров одиночных источников, движущихся во внешних гравитационных полях Шварцшильда и Керра;
3. расчет интервалов видимости пульсара, движущегося во внешнем гравитационном поле;
4. исследование красных смещений спектров звезд, входящих в двойные системы, движущиеся во внешних гравитационных полях Шварцшильда и Керра.

Объектом исследования являются двойные звезды, движущиеся во внешнем гравитационном поле черной дыры.

Предметом исследования является временная зависимость красного смещения спектров звезд, движущихся в гравитационном поле черной дыры.

Научная новизна

Результаты работы являются новыми и состоят в следующем:

Найдены характеристики электромагнитного излучения, распространяющегося во внешнем гравитационном поле вращающейся черной дыры, сведением данной задачи к решению системы алгебраических уравнений, в отличие от работ, представленных в литературе.

Получено ковариантное выражение для красного смещения спектра излучения двойной звезды, движущейся во внешнем гравитационном поле черной дыры.

Вычислены промежутки времени видимости пульсара, движущегося во внешнем гравитационном поле.

Решена обратная задача (определение параметров движения двойной звезды по известному красному смещению) для относительного движения компонент двойной системы, движущейся во внешнем гравитационном поле черной дыры.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчет прицельных параметров луча света, испускаемого источником во внешнем гравитационном поле черной дыры Шварцшильда и Керра, выполненный путем сведения задачи к системе алгебраических уравнений и численного решения этих уравнений.

2. Расчет красных смещений спектров одиночных звезд, движущихся в поле черной дыры Шварцшильда и Керра, как функций времени наблюдателя, находящегося на Земле.
3. Красное смещение спектра двойной звезды, движущейся в поле черной дыры, в первом порядке по скоростям относительного движения компонент и расстояния между ними, как функция времени наблюдения.
4. Установление временной структуры видимости пульсара, которая в общем случае представляется в виде интервалов времени. Расположение и продолжительность интервалов зависит как от параметров ориентации пульсара, так и от характеристик внешнего гравитационного поля.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно. В соавторстве выполнены работы [1 – 4, 6 – 11, 13 – 15], в которых вклады авторов равнозначны. Без соавторства опубликованы работы [5,12]. Научному руководителю принадлежат постановка задач и выбор методов, используемых при их решении.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации были представлены и апробированы на следующих конференциях:

- на Республиканских научно-методических конференциях молодых ученых (2014-2015 гг., Брест);
- на Международной конференции «Methods of non-Euclidean geometry in physics and mathematics», Bolyai–Gauss–Lobachevsky-9 (2016 г., Минск);
- на школах - конференциях молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» (2016, 2018, Минск);
- на Международных семинарах "Нелинейные явления в сложных системах" (2016, 2018, 2019 гг., Минск);
- на Конгрессах физиков Беларуси (2015 г., 2017 г., Минск);
- на Международной конференции International Symposium BelINP-2017;
- на Международной конференции, посвященной Я. Б. Зельдовичу «The Third Zeldovich Meeting» (2018 г., Минск);

- на Международных конференциях для студентов и аспирантов «Open Readings» (2017-2019 гг., Вильнюс).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из которых: 5 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 5 авторских листов), 7 статей в сборниках материалов научных конференций, 2 тезиса и 1 препринт.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и библиографического списка. Полный объем диссертации составляет 90 страниц, в том числе 29 рисунков занимают 10 страниц, 3 таблицы на 1,5 страницах. Библиографический список содержит 81 наименование, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** диссертации приводится аналитический обзор литературы. Здесь рассказывается об астрофизических данных, для интерпретации которых необходим теоретический анализ временного изменения красного смещения спектра источников, движущихся во внешнем гравитационном поле. Также описываются известные методы, используемые при анализе этих данных.

Во **второй главе** диссертации описывается решение задачи о вычислении красного смещения для точечного источника, движущегося в поле сферически-симметричной (черной дыры Шварцшильда) и вращающейся черной дыры (черной дыры Керра). Задача решается [1 – 4] на основе общековариантной формулы для красного смещения:

$$z = \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{(k_i)_s(u^i)_s}{(k_i)_o(u^i)_o} - 1, \quad (1)$$

где λ – длина волны испущенного излучения, измеренная в системе отсчета источника, $\delta\lambda$ – разность между принятой длиной волны в системе отсчета наблюдателя, и испущенной в системе отсчета источника, $(k_i)_s$ – волновой вектор в точке испускания излучения, $(u^i)_s$ – вектор 4-скорости источника, $(k_i)_o$ – волновой вектор в точке приема излучения, $(u^i)_o$ – вектор 4-скорости наблюдателя.

Для численного вычисления красного смещения по формуле (1) необходимо знать прицельные параметры луча света, которые и определяют волновой вектор в точке излучения $(k_i)_s$. Использование представленного в работе метода поиска прицельных параметров позволяет свести данную задачу к решению системы алгебраических уравнений в отличие от методов, представленных в литературе.

Для случая вращающейся черной дыры, аналитические выражения для изотропных геодезических, представляющих собой мировые линии луча света, выписаны с точностью до членов порядка a/r , где a – параметр Керра, а r – расстояние до черной дыры. В этом приближении задача о вычислении прицельных параметров луча сведена к решению некоторой системы алгебраических уравнений. Результаты соответствующих вычислений (см. также [2, 3]) для используемой в работе численной модели представлены на рисунках 1 и 2 ($M = Gm_{BH}/c^2$, где m_{BH} – масса сверхмассивной черной дыры, G – гравитационная постоянная, c – скорость света в вакууме).

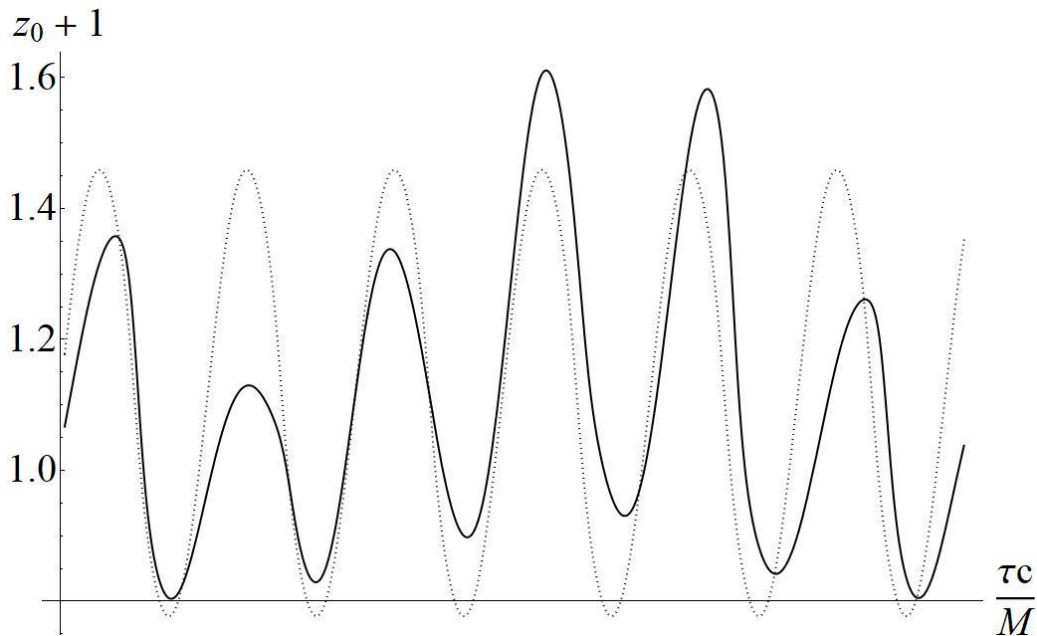


Рис. 1. – Красное смещение z_0 как функция собственного времени в случае круговой орбиты (пунктирная линия; для $E = 0,969; L = 4,33 M$) и для вытянутой орбиты (сплошная линия; для $E = 0,935; L = 4,29 M$). Для обоих случаев временная ось имеет различный масштаб для более удобного сравнения графиков

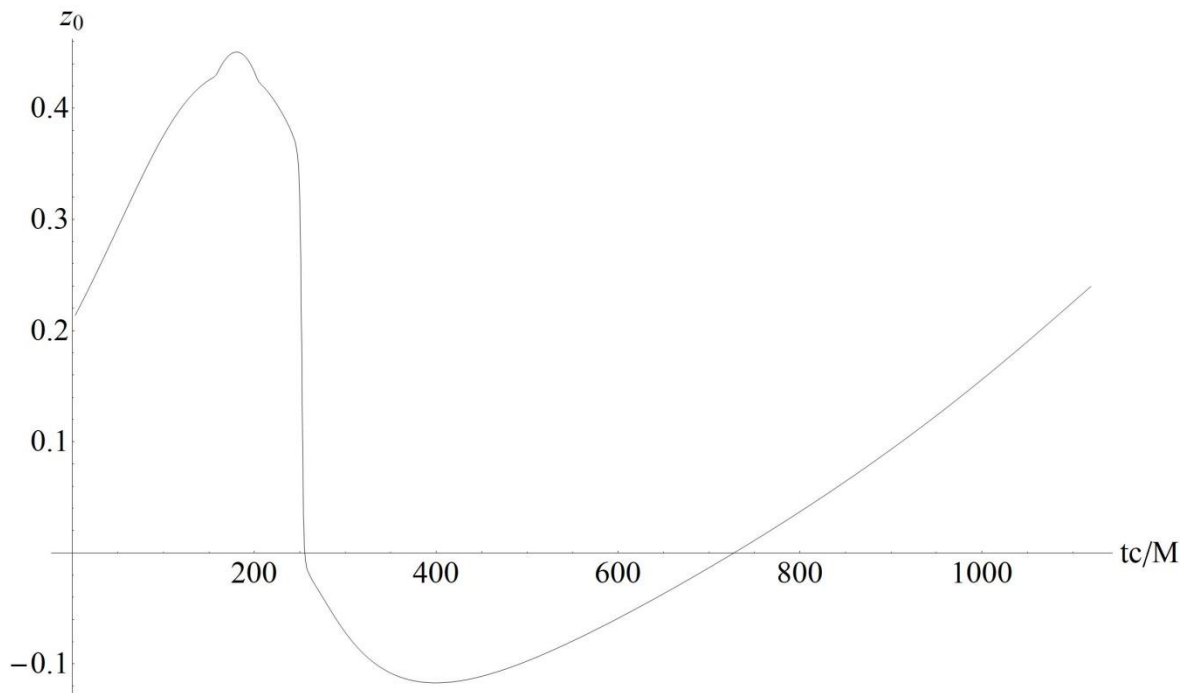


Рис. 2. – Красное смещение z_0 как функция времени наблюдения для точечного источника, движущегося во внешнем гравитационном поле вращающейся черной дыры. Выбранные параметры движения следующие: параметр Керра $a = 0,1 M$; $L = 4,9 M$ $Q = 3,0$; $E = 0,984$.

Здесь также представлено решение задачи о вычислении интервалов времени, в течении которых пульсар, движущийся во внешнем гравитационном поле черной дыры, не может быть виден. Результаты соответствующих вычислений представлены на рисунках 3 – 6, где также указаны параметры математической модели, используемой при вычислениях [5].

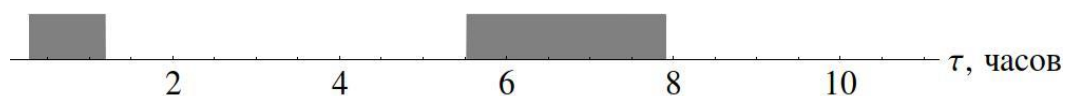


Рис. 3. – Интервалы видимости пульсара. Закрашенные области на оси времени соответствуют интервалам времени, когда пульсар может быть виден наблюдателю на Земле. Параметры орбитального движения пульсара: $L = 5,24 M$, $E = 0,98$. При этих данных период радиального движения пульсара $T \approx 1250M/c \approx 6,85$ ч. Параметры, характеризующие ориентацию оси вращения пульсара и его конус излучения (в радианах): $i = 0$; $\theta_P = 0$; $\varphi_P = 0$; $\alpha_1 = 0,05$; $\alpha_2 = 0,2$

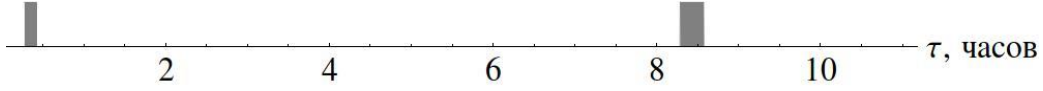


Рис. 4. – Интервалы видимости пульсара. Закрашенные области на оси времени соответствуют интервалам времени, когда пульсар может быть виден наблюдателю на Земле. Параметры орбитального движения пульсара: $L = 5.24 M$, $E = 0,98$. При этих данных период радиального движения пульсара $T \approx 1250M/c \approx 6,85$ ч. Параметры, характеризующие ориентацию оси вращения пульсара и его конус излучения (в радианах): $i = 0$; $\theta_P = 0,2$; $\varphi_P = 0$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,05$

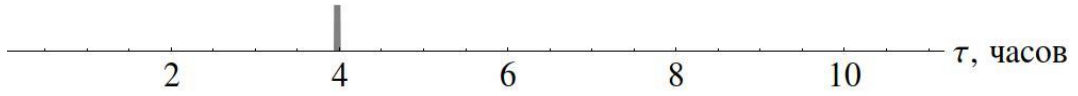


Рис. 5. – Интервалы видимости пульсара. Закрашенные области на оси времени соответствуют интервалам времени, когда пульсар может быть виден наблюдателю на Земле. Параметры орбитального движения пульсара: $L = 5.24 M$, $E = 0,98$. При этих данных период радиального движения пульсара $T \approx 1250M/c \approx 6,85$ ч. Параметры, характеризующие ориентацию оси вращения пульсара и его конус излучения (в радианах): $i = 0$; $\theta_P = 0,4$; $\varphi_P = 0$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,15$

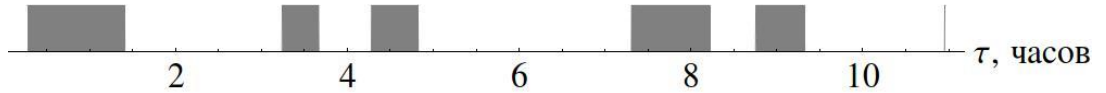


Рис. 6. – Интервалы видимости пульсара. Закрашенные области на оси времени соответствуют интервалам времени, когда пульсар может быть виден наблюдателю на Земле. Параметры орбитального движения пульсара: $L = 5.24 M$, $E = 0,98$. При этих данных период радиального движения пульсара $T \approx 1250M/c \approx 6,85$ ч. Параметры, характеризующие ориентацию оси вращения пульсара и его конус излучения (в радианах): $i = 0,6$; $\theta_P = 1,1$; $\varphi_P = 0$; $\alpha_1 = 0,9$; $\alpha_2 = 1,1$

В третьей главе диссертации рассмотрен случай двойной звезды, движущейся во внешнем гравитационном поле черной дыры Шварцшильда или Керра. Рассмотрен вывод уравнений движения такой двойной системы, на основе введения сопутствующих координат Ферми [3]. Далее рассматривается временная зависимость красного смещения спектра излучения одной из звезд, входящих в данную двойную систему. Показано, что эта зависимость $z(t)$ может быть найдена по формуле [3]:

$$z(\tau) = -1 + (1 + z_0(\tau)) \left(1 - \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{d}{d\tau} (n_{(\alpha)} x^{(\alpha)}) \right) + O\left(\frac{R^2}{M^2}, \frac{v^2}{c^2}\right). \quad (2)$$

Здесь m_1, m_2 – массы компонент (m_1 – масса звезды, излучение которой рассматривается), $x^{(\alpha)}$ – координаты Ферми относительного положения компонент, $n^{(\alpha)}$ – компоненты единичного волнового вектора излучения, v – абсолютное значение скорости относительного движения звезд, z_0 – красное смещение некоторого воображаемого источника, движущегося вместе с центром масс системы вдоль мировой линии, являющейся времениподобной геодезической в используемом приближении, $R^2 = x^{(\alpha)}x_{(\alpha)}$

Результаты численных вычислений красного смещения [4] для двойной звезды представлены на рисунках 7 и 8.

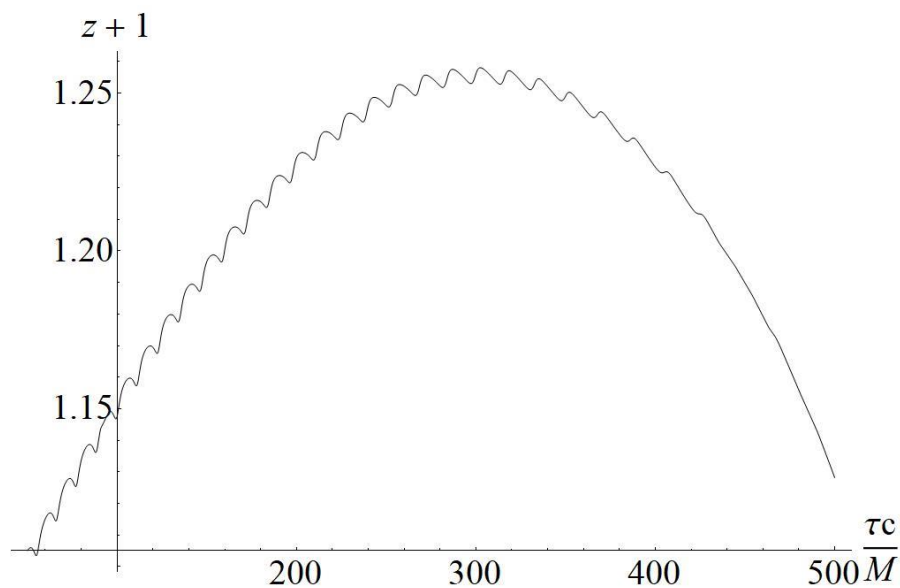


Рис. 7. – Красное смещение z спектра излучения от источника в двойной системе, как функция собственного времени системы τ . Параметры движения двойной звезды следующие: $L = 5,152 M$; $E = 0,9643$; $i = 1$; $m_1 = 8,89 \cdot 10^{-7} M$; $m_2 = 4,45 \cdot 10^{-7} M$; $a = 0$. Начальные условия для координат и скоростей:

$$x^i(0) = \{0; 0,02M; 0\}; v^i/c = \{0,0083; 0; 0,0057\}$$

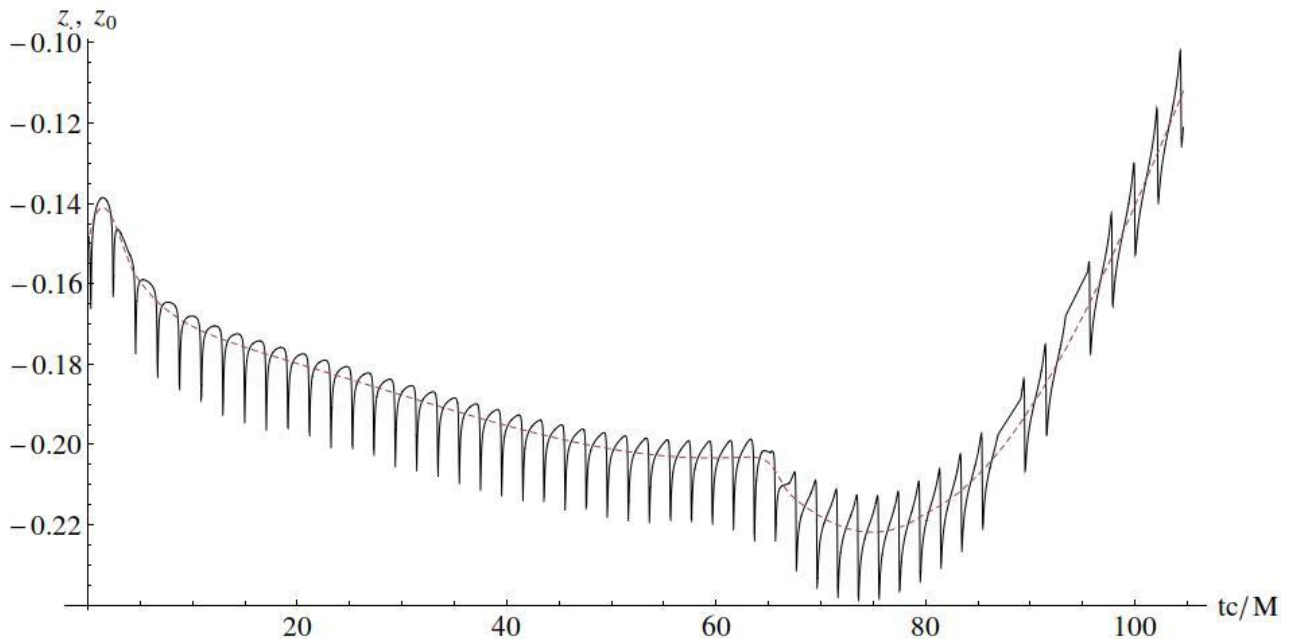


Рис. 8 – Красное смещение как функция времени наблюдателя. Выбранные параметры движения следующие: параметр Керра $a = 0,1M$; $L = 4,9M$; $Q = 3,0$; $E = 0,984$; масса источника $m_1 = 8,89 \cdot 10^{-7} M$; масса звезды-компаньона, $m_2 = 4,45 \cdot 10^{-7} M$; начальное относительное положение, $x^{(\alpha)}(0) = \{0; 0,01 M; 0\}$; начальная относительная скорость, $v^{(\alpha)}(0)/c = \{0,004; 0; 0,003\}$

В четвертой главе проведена реконструкция относительного движения компонент двойной звезды по наблюдаемому красному смещению для заданной численной модели. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Модельные параметры относительного движения и найденные из решения обратной задачи. Для реконструкции движения использован интервал измерения красного смещения $310 < \tau < 490$

Параметр	Модельное значение	Реконструированное значение
Эксцентриситет, e	0,68	0,58
Период относительного движения, T	20,268 M/c	20,264 M/c
Функция масс, M_2	0,0062 $M^{1/3}$	0,0066 $M^{1/3}$
Долгота перицентра, ω_r	1,56 рад	1,32 рад
Время прохождения через перицентр, τ_0	310.6 M/c	309.9 M/c
Орбитальное наклонение, i	1,55 рад	1,31 рад
Позиционный угол, ζ	1,72 рад	3,05 рад

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В диссертации получены следующие результаты:

1. Прицельные параметры луча света во внешнем гравитационном поле черной дыры получены путем сведения задачи к численному решению системы нелинейных алгебраических уравнений [1, 3, 4, 6, 8, 10, 12 – 14].
2. Рассчитаны красные смещения спектра электромагнитного излучения точечных источников электромагнитного излучения, движущихся во внешнем гравитационном поле черной дыры Шварцшильда и Керра, как функции времени наблюдения [2, 9].
3. Получена временная зависимость красного смещения спектра электромагнитного излучения двойной звезды, движущейся во внешнем гравитационном поле сферически-симметричной черной дыры [1, 3].
4. Построен алгоритм для вычисления интервалов времени видимости пульсара, движущегося во внешнем гравитационном поле черной дыры, и разработана соответствующая численная модель [5].
5. Получена временная зависимость красного смещения спектра двойной звезды, движущейся во внешнем гравитационном поле вращающейся черной дыры [4].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенные в диссертации методы и подходы могут быть использованы при обработке результатов астрофизических наблюдений красного смещения двойных звезд, регистрируемых в окрестности Центра Галактики (S-кластер). Представленные методы, при выполнении необходимых обобщений, могут быть применены и при анализе времени прихода импульсов рентгеновских пульсаров, движущихся в гравитационном поле сверхмассивной черной дыры в Центре Галактики. Эти результаты дают возможность проверок общей теории относительности. Результаты диссертации могут быть применены к анализу времени прихода импульсов электромагнитного излучения двойных пульсаров, с целью изучения движения пульсаров под влиянием гравитационной волны.

Полученные в диссертации аналитические соотношения и предложенные подходы могут быть использованы при изучении протяженных астрофизических объектов, находящихся в сильных гравитационных полях. Такими объек-

тами могут являться, аккреционные диски нейтронных звезд и черных дыр и различные гравитационно-связанные кратные системы, находящиеся во внешнем гравитационном поле.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Komarov, S. Time delay of radiation from pulsar in a binary system that moves in field of Schwarzschild black hole / S. Komarov, A. Gorbatsievich and A. Tarasenko // *Lithuanian Journal of Physics* . – 2017 . – Vol 57, № 2. – P. 88–93.
2. Комаров, С. О. Красное смещение излучения точечного источника, движущегося в поле вращающейся черной дыры / С. О. Комаров, А. К. Горбачевич, А. Н. Тарасенко // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 668–673.
3. Komarov, S. Redshift of a compact binary star in the neighborhood of a supermassive black hole / S. Komarov, A. Gorbatsievich, A. Tarasenko // *General Relativity and Gravitation*. – 2018a. – Vol. 50, № 10. – P. 132.
4. Комаров, С. О. Красное смещение спектра электромагнитного излучения источника, входящего в двойную систему, движущуюся в гравитационном поле вращающейся черной дыры / С. О. Комаров, А. К. Горбачевич // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. – 2018. – № 4. – С. 57–69.
5. Комаров, С. О. Время видимости пульсара, движущегося во внешнем гравитационном поле / С. О. Комаров // *Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика*. – 2018. – № 2. – С. 141–150.

Статьи в материалах конференций

6. Комаров, С. О. Движение двойной системы во внешнем гравитационном поле / С. О. Комаров, М. Л. Барабаш // XVI Республиканская научно-методическая конференция молодых ученых: сб. материалов: в 2 ч., Брест, 16 мая 2014 г., Ч. 1 / Брестский гос. ун-т. – Брест, 2014. – С. 39 – 41.
7. Тарасенко, А. Н. Реконструкция движения компактного объекта вблизи черной дыры / А. Н. Тарасенко, С. О. Комаров, А. К. Горбачевич // “Methods of non-Euclidean geometry in physics and mathematics” Bolyai-Gauss-Lobachevsky-9 (BGL-9): proceedings of the IX International Conference / Minsk, 2016. – P. 136–143.
8. Комаров, С. О. Реконструкция движения двойной звезды в поле сверхмассивной черной дыры по ее красному смещению / С. О. Комаров // «Современные проблемы физики», междунар. школа-конф. молодых ученых и специалистов: материалы конференции (2016; Минск) / Инст. Физики им. Степанова НАН Беларуси. – Минск, 2016. – С. 36–40.
9. Gorbatsievich, A. Reconstruction of a compact source motion in the neighbourhood of a black hole by redshift of the received light / A. Gorbatsievich, S. Ko-

marov, A. Tarasenko // *Nonlinear Dynamics and Applications*. – Proceedings of the Twenty-third Annual Seminar NPC'S'2016 May 24–27, 2016, Minsk, Belarus. *Fractals, Chaos, Phase Transitions, Self-organisation* / JPNR Sosny. – 2016. – P. 122–128.

10. Комаров, С. О. Исследование движения двойной звезды в сильном внешнем гравитационном поле с помощью регистрируемого электромагнитного излучения / С. О. Комаров, А. К. Горбачевич, А. Н. Тарасенко // VI Конгресс физиков Беларуси (20-23 ноября 2017): Сборник научных трудов. / редкол.: С. Я. Килин (гл. ред.) [и др.], – Институт физики НАН Беларуси, 2017. – Минск, 2017. – С. 23–25.

11. Комаров, С. О. Исследование движения пульсара в двойной системе, движущейся в поле черной дыры Керра, по ее электромагнитному излучению / С. О. Комаров, А. К. Горбачевич, А. Н. Тарасенко // «Современные проблемы физики»: сборник научных трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов, Минск, 13-15 июня 2018 / Инст. физики им. Степанова НАН Беларуси. – 2018. – С. 36–39.

12. Комаров, С. О. Методы вычисления параметров орбит релятивистских объектов вблизи центра Галактики / С. О. Комаров // XVII Республиканская научно-методическая конференция молодых ученых: сб. материалов: в 2 ч., Брест, 15 мая 2015 г., Ч. 1 / Брестский гос. ун-т. – Брест, 2015. – С. 39–41.

Тезисы докладов

13. Gorbatsievich, A. Time delay of radiation from pulsar in a binary system that moves in field of Schwarzschild black hole / A. Gorbatsievich, S. Komarov, A. Tarasenko // 60th International Conference for Students of Physics and Natural sciences “Open Readings 2017” – March 14-17 / Vilnius University. – Vilnius, Lithuania, 2017. – P. 33.

14. Komarov, S. Redshift of light from the source in binary system that moves in the gravitational field of Kerr black hole / S. Komarov, A. Gorbatsievich, A. Tarasenko // 61 st International Conference for Students of Physics and Natural Sciences – Open Readings 2018 – Programme and Abstracts. March 20-23, 2018, Vilnius, Lithuania / Vilnius University. – Vilnius University. – Vilnius, Lithuania, 2018. – P. 22.

Препринты

15. Gorbatsievich, A. Optical appearance of a compact binary system in the neighbourhood of supermassive black hole / Alexander Gorbatsievich, Stanislav Komarov and Alexander Tarasenko // arXiv:1702.08381. – 2017.

РЕЗЮМЕ

Комаров Станислав Олегович

Красное смещение спектра звезд, движущихся в окрестности сверхмассивной черной дыры

Ключевые слова: сверхмассивная черная дыра, центр Галактики, уравнения движения во внешнем гравитационном поле, гравитационное красное смещение, реконструкция движения.

Объектом исследования являются двойные звезды, движущиеся во внешнем гравитационном поле черной дыры.

Предметом исследования – временная зависимость красного смещения спектров электромагнитного излучения звезд, движущихся в гравитационном поле черной дыры.

Целью работы является вычисление красного смещения спектра электромагнитного излучения двойной звезды, движущейся во внешнем гравитационном поле черной дыры, в рамках общей теории относительности.

Методы исследования: общая теория относительности, численное моделирование.

Полученные результаты и их новизна. Выведены формулы и уравнения, позволяющие находить прицельные параметры луча света, распространяющегося во внешнем гравитационном поле черной дыры между заданными точками пространства. Проведено численное моделирование красного смещения одиночного источника, движущегося во внешних гравитационных полях Шварцшильда и Керра. Выведены уравнения, позволяющие описать движение двойной системы во внешнем гравитационном поле, а также красное смещение спектра ее электромагнитного излучения. Проведено численное моделирование красного смещения спектра звезды, входящей в двойную систему, движущуюся во внешних гравитационных полях Шварцшильда и Керра. Решена обратная задача: определены параметры относительного движения компонент двойной звезды, исходя из зависимости красного смещения ее спектра от времени наблюдения.

Рекомендации по использованию и область применения. Результаты данной диссертационной работы могут быть использованы при обработке данных астрофизических наблюдений красного смещения спектра двойных звезд, регистрируемых в окрестности центра Галактики (S-кластер). Представленные методы могут быть применены и при анализе времени прихода импульсов рентгеновских пульсаров, движущихся в гравитационном поле сверхмассивной черной дыры в центре Галактики. Эти результаты дают возможность проверок общей теории относительности, как основной из рассматриваемых на сегодня теорий гравитации. Результаты диссертации также представляют интерес для анализа излучения двойных пульсаров с целью детектирования гравитационной волны, влиянию которой они подвержены.

РЭЗІЮМЭ

Камароў Станіслаў Алегавіч

Чырвонае зрушанне спектра зорак, рухаючыхся у наваколлі звышмасіўнай чорнай дзіры

Ключавыя словы: звышмасіўная чорная дзіра, цэнтр Галактыкі, раўнанні руху ў знешнім гравітацыйным полі, гравітацыйнае чырвонае зрушэнне, рэканструкцыя руху.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца двайныя зоркі, якія рухаюцца ў знешнім гравітацыйным полі чорнай дзіры.

Прадмет даследавання – часавая залежнасць спектраў электрамагнітнага выпрамянення зорак, рухаючыхся ў гравітацыйным полі чорнай дзіры.

Мэтай работы з'яўляецца вылічэнне чырвонага зрушэння спектра электрамагнітнага выпрамянення двайной зоркі, рухаючэйся ў знешнім гравітацыйным полі чорнай дзіры, у межах агульнай тэорыі адноснасці.

Метады даследавання: агульная тэорыя адноснасці, лікавае мадэліраванне.

Атрыманыя вынікі і навізна. Выведзены формулы і раўнанні, якія дазваляюць знаходзіць прыцэльныя параметры прамяня святла, які распаўсюджваецца ў знешнім гравітацыйным полі чорнай дзіры паміж зададзенымі кропкамі прастору.

Праведзена лічбовае мадэляванне чырвонага зрушэння адзінай крыніцы святла, рухаючэйся ў знешніх гравітацыйных палях Шварцшыльда і Кера. Выведзены раўнанні, якія дазваляюць апісаць рух двайной сістэмы ў знешнім гравітацыйным полі, а так сама чырвонае зрушанне спектра яе электрамагнітнага выпрамянення. Праведзена лікавае мадэліраванне чырвонага зрушэння спектра зоркі, якая ўваходзіць у двайную сістэму, рухаючуюся у знешніх гравітацыйных палях Шварцшыльда і Кера. Вырашана зваротная задача: вызначаны параметры адноснага руху кампанент двайной зоркі, зыходзячы з залежнасці чырвонага зрушэння яе спектра ад часу назірання.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і галіна выкарыстання. Вынікі дадзенай дысертацыйнай работы могуць быць выкарыстаны пры апрацоўцы даных астрафізічных назіранняў чырвонага зрушэння спектра двайных зорак, якія рэгіструюцца ў наваколлі цэнтра Галактыкі (S-класцер). Прадстаўленыя метады, пры выкананні неабходных абагульненняў, могуць быць выкарыстаны пры аналізе часу прыхода імпульсаў рэнтгенаўскіх пульсараў, рухаючыхся ў гравітацыйным полі звышмасіўнай чорнай дзіры ў цэнтры Галактыкі. Гэтыя вынікі даюць магчымасць праверак агульнай тэорыі адноснасці, як асноўнай з разгледжываемых на сёння тэорый гравітацыі. Цікаvasць таксама можа прадстаўляць абагульненне вынікаў дысертацыі, якое дазваляе аналізаваць выпраменьванне двайных пульсараў з мэтай дэтэктавання гравітацыйнай хвалі, уплыву якой яны схільныя.

SUMMARY

Komarov Stanislav

Redshift of the spectrum of the stars that move in the vicinity of a supermassive black hole

Key words: supermassive black hole, Galactic Center, equations of motion in external gravitational field, gravitational redshift, reconstruction of motion.

The object of research the binary stars, moving in external gravitational field of a black hole.

The subject of study – the time dependence of the redshift of spectrum of electromagnetic radiation of stars, moving in external gravitational field of a black hole.

The goal of work is calculation of the redshift of spectrum of electromagnetic radiation of binary star, moving in external gravitational field of black hole in the framework of general theory of relativity.

Methods of investigation: general theory of relativity, numerical modeling.

The received results and their novelty. The formulas and equations, that give possibilities to find impact parameters of light ray in external gravitational field between given points of space are derived. The numerical modeling of redshift of spectrum of unit source in external gravitational fields of Schwarzschild or Kerr gravitational field is performed. The equations that describe motion of a binary star in external gravitational field and redshift of spectrum of its radiation are derived. The numerical modeling of spectrum of binary star, moving in external gravitational fields of Schwarzschild and Kerr black hole is performed. The inverse problem is solved: determination of parameters of relative motion of components of binary star from the time dependence of the redshift of spectral lines of its electromagnetic radiation.

Recommendations on the use and the application area. The results of the dissertation can be used for the data analyzing of astrophysical observations of redshift of spectral lines of binary stars, that are observed in the vicinity of the Galactic Center (S-cluster). The methods, with necessary generalizations, can be used for the analyzing of time of arrival of pulses of pulsars, moving in the vicinity of supermassive black hole in the Galactic Center.

This results give possibility to testing general theory of relativity, as theory of gravitation. The generalizations of the results can be used for the pulsar timing data analysis for the purpose of registration of gravitational wave passing the pulsar.

Комаров Станислав Олегович

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРА ЗВЕЗД, ДВИЖУЩИХСЯ В ОКРЕСТНОСТИ СВЕРХМАССИВНОЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.02 – теоретическая физика

Подписано в печать « » 2019 г. Формат 60×90 1/16.
Бумага офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л.
Учетн. изд. л. Тираж 60 экз. Заказ №

ГНУ «Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» 220072, Минск, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе ГНУ «Институт физики им. Степанова НАН Беларуси»