

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА
имени МИРЗО УЛУГБЕКА**

*На правах рукописи
УДК 530.12:531.51*

МАМАДЖАНОВ АХРОРЖОН ИБРАГИМОВИЧ

**ВАКУУМНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ
И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ
И ВРАЩАЮЩИХСЯ НАМАГНИЧЕННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТАХ**

01.03.02 – Астрофизика и радиоастрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ташкент – 2011

Работа выполнена в Институте ядерной физики
и Астрономическом институте
Академии наук Республики Узбекистан

Научный руководитель: доктор физико – математических наук
Ахмедов Бобомурот Жураевич

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук,
проф. Саггаров Исроил

кандидат физико – математических наук,
доц. Файзуллаев Бируний Амануллаевич

Ведущая организация: Казахский Национальный университет имени
аль-Фараби (г. Алматы)

Защита состоится 2 июня 2011 г. в 14:00 часов на заседании
Специализированного Совета Д067.02.13 при НУУз имени Мирзо Улугбека
по адресу: 100174, г. Ташкент, Вузгородок, физический факультет (кабинет-
музей академика С.Азимова) НУУз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального
университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба присылать по
адресу Физического факультета Национального университета Узбекистана
имени Мирзо Улугбека.

Автореферат разослан 25 апреля 2011 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета
кандидат физ.-мат.наук, доц.

К.Т. МИРТАДЖИЕВА

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. В последнее время в релятивистской астрофизике усилился интерес к физике сильно намагниченных нейтронных звезд (НЗ), таких как аномальные рентгеновские пульсары (АРП) и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (МПП, soft gamma-ray repeaters). Важными наблюдательными фактами для интерпретации природы источников является наличие периодов и переменность рентгеновского потока. Периоды АРП и МПП лежат в диапазоне 5-12 секунд. МПП представляют собой объекты, демонстрирующие случайные (непредсказуемые) периоды активности, носящие характер вспышек излучения в мягком (< 100 кэВ) гамма-диапазоне. Периоды активности длятся от дней до месяцев. Если наличие электромагнитных полей вблизи компактных релятивистских звезд является их существенным признаком, то естественно предположить, что такие звезды, как и обычные, подвержены различным видам колебаний, которые могут быть обнаружены через излучение гравитационных и электромагнитных волн. Это излучение представляет уникальную возможность исследования физики и внутреннего строения звезд, также как и свойств вещества при ядерных плотностях. Более того, недавние наблюдения [1] квазипериодических осцилляций в спектре гигантских вспышек периодических гамма-источников МПП возбудили интерес ученых к исследованию процессов, происходящих в окрестности осциллирующих НЗ. Принимая во внимание то, что механизм излучения НЗ до сих пор не является полностью изученным, исследование влияния осцилляций звезды на ее излучение представляет большой интерес для современной релятивистской астрофизики.

Изучение электродинамики релятивистских звезд, в частности, мод их собственных колебаний, может дать важную информацию, которая относится не только к астрофизике, но также к физике внутреннего строения этих объектов. Однако, мощные электромагнитные поля не являются единственной важной особенностью компактных объектов. Те же астрономические наблюдения, которые определяют существование таких полей, фактически также делают очевидным то, что они связаны с очень плотными объектами, обладающими сильными гравитационными полями. В результате точное описание электродинамики компактных объектов может быть сделано только в рамках формализма, в котором правильно принимаются во внимание общерелятивистские поправки. Не так давно были изучены внутренние и внешние вакуумные электромагнитные поля, создаваемые за счет вращения компактной звезды, обладающей дипольным магнитным полем, и разработан систематический подход к получению аналитических выражений для электромагнитных полей вблизи поверхности звезды (так называемая "ближняя зона").

Свойства черных дыр (ЧД) во внешнем магнитном поле были подробно изучены разными авторами с целью изучения вопроса об извлечении энергии ЧД, в частности через эффект Блэндфорда-Знаека [2] или излучение Хокинга[3].

В настоящее время с большой точностью проводятся прецизионные эксперименты по выявлению влияния гравитационного поля Земли на смещение фазы частиц в нейтронном интерферометре, а также на квантование энергетических уровней ультрахолодных нейтронов. Теоретическое исследование подобных эффектов с использованием различных метрик пространства-времени приведет к значительному продвижению в построении теории квантовой гравитации и послужит проверке различных гравитационных моделей.

Идея многомерного пространства-времени впервые появилась в работе Г. Нордстрёма 1914 года, предвосхитившей создание ОТО в форме скалярной теории гравитации как составной части максвелловской электродинамики в пятимерном пространстве-времени. Основное отличие сегодняшнего подхода к многомерности Вселенной заключается в том, что, несмотря на четырехмерную природу непосредственно наблюдаемого физического мира, дополнительные измерения пространства-времени могут быть макроскопическими и даже некомпактными. При этом четырехмерность нашего мира достигается посредством локализации материи в многомерном пространстве-времени на его четырехмерных подмногообразиях, называемых бранами. Согласно модели мира на бранах, только гравитационное взаимодействие способно свободно распространяться в 5-мерном пространстве, в то время как другие виды взаимодействия "заперты" в 4-мерной Вселенной. С этой точки зрения особенно важным представляется изучение влияния пятого измерения на наш мир в рамках ОТО. Важными инструментами для исследования данного влияния выступают эффекты ОТО на макроскопические квантовые явления. Также исследование структуры электромагнитных полей звезд в рамках модели Вселенной на бранах позволит найти корректировки для соответствующих наблюдаемых величин и открыть возможность тестирования данной модели с помощью астрономических и астрофизических наблюдений.

Степень изученности проблемы. Исследование электромагнитных полей осциллирующей намагниченной звезды – довольно сложная проблема. Однако в последние годы рядом авторов была разработана электродинамика осциллирующих звезд в плоском пространстве, поскольку осцилляции НЗ могут дать мощный инструмент для исследования внутренней структуры звезд. Ранее смоделированы электромагнитные поля, создаваемые в волновой зоне НЗ, подверженной тороидальным колебаниям, для вычисления затухания этих колебаний за счет электромагнитного излучения. Также были выведены точные аналитические решения для электромагнитных полей в ближней зоне и волновой зоне осциллирующей НЗ с дипольным поверхностным магнитным полем. В обоих случаях НЗ рассматривалась в вакууме и для простоты звездные магнитные поля считались невозмущенными, что позволяло не учитывать возмущения магнитного поля при оценке потерь энергии. Недавно была широко исследована электродинамика плазменной магнитосферы НЗ, возмущенной тороидальными колебаниями, опустив при этом предположение о том, что

звезда окружена вакуумом. Перечисленные работы основаны на ньютоновском описании гравитации, но такое описание является достаточно слабым приближением вблизи поверхности релятивистской звезды. С другой стороны, в результате интенсивных исследований нами ранее было показано, что общерелятивистские эффекты имеют исключительно важное влияние на электромагнитные поля вращающейся НЗ. В рамках данной работы расширяются исследования по вращающимся звездам на электродинамику осциллирующих звезд. Несмотря на большое количество работ, посвященных проблемам релятивистской астрофизики, еще остаются неизученными такие вопросы как существование гравитомагнитного монополя. Модель Вселенной на бранах является относительно новой теорией и также требует подробного исследования и обоснования.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.

Диссертационная работа выполнена в ИЯФ АН РУз и АИ АН РУз в период 2007-2011 гг. в рамках научных проектов ЦНТ и ККРНТ Ф – 2.1.9, Ф – 2.2.6, ФА – Ф2 – Ф079, ФА – Ф2 – Ф061, и ФПФИ АН РУз № 1 – 06, 5 – 08, 29 – 08, 1 – 10, 11 – 10.

Цель исследования. Целью данной диссертационной работы является разработка общего формализма и поиск точных аналитических решений для электромагнитных полей в ближней и дальней зоне от звезды, а также исследование влияния эффектов общей теории относительности на дипольные электромагнитные потери энергии в искривленном пространстве-времени сферических релятивистских звезд, испытывающих осцилляции. Исследование эффектов квантовой интерференции, а именно а) смещения фазы частиц в нейтронном интерферометре; б) смещения фазы частиц в интерферометре типа Маха-Зендера; в) эффекта Саньяка в гравитационном поле медленно вращающегося объекта с ненулевым приливным бран зарядом. Получение верхнего предела на значение приливного бран заряда из лабораторных экспериментов по интерферометрии частиц, проводимых на Земле. Исследование механизмов извлечения энергии ЧД в модели на бранах и в пространстве-времени Керр-Тауб-НУТ. Получение выражений, описывающих зависимость теплового излучения Хоукинга ЧД от приливного бран заряда. Исследование электромагнитных полей и движение пробных частиц в окрестности компактных объектов с ненулевым НУТ параметром.

Задачи исследования. Для достижения вышеуказанных целей нам надо было решить нижеследующие задачи:

- Сформулировать уравнения Максвелла в пространстве-времени намагниченной осциллирующей НЗ и граничные условия на ее поверхности. Найти решения для внутреннего электромагнитного поля звезды.

- Получить решения для внешнего магнитного и электрического полей осциллирующей НЗ а) в ближней зоне, б) волновой зоне, для произвольной конфигурации невозмущенного магнитного поля звезды. Применить полученный формализм к случаю дипольной конфигурации магнитного поля звезды.

- Найти общерелятивистские выражения для внешнего магнитного и электрического полей намагниченной компактной звезды в случае различных типов осцилляций осциллирующей НЗ и сравнить с ньютоновскими выражениями.

- Рассмотреть в рамках ОТО различные механизмы затухания осцилляций звезды; получить релятивистские выражения для потерь энергии звезды за счет электромагнитного излучения для различных мод осцилляций; получить релятивистское выражение для омических потерь энергии звезды.

- Рассмотреть эффекты квантовой интерференции в пространстве-времени медленно вращающегося гравитирующего объекта в модели мира на бранах. На основе результатов наземных экспериментов по интерферометрии частиц, установить верхний предел на значение приливного бран заряда.

- Исследовать влияние приливного бран заряда на процесс теплового излучения Хокинга ЧД в рамках модели мира на бранах.

- Изучить процессы Блэнфорда-Знаека, Мейсснера и Пенроуза в пространстве-времени Керр-Тауб-НУТ в окрестности ЧД. Проверить влияние эффекта Мейсснера на эффективность процесса Блэнфорда-Знаека по извлечению энергии ЧД, обладающей ненулевым гравитомагнитным зарядом.

- Проанализировать итоговые результаты исследований, сопоставить их с аналогичными результатами зарубежных авторов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются релятивистские компактные объекты – черные дыры и нейтронные звезды. Предметом исследования являются электромагнитные поля в окрестности компактных намагниченных осциллирующих и вращающихся гравитационных объектов, потери энергии рассматриваемых объектов, а также механизмы извлечения энергии из ЧД.

Методы исследований. В теоретическом плане методами исследования являются математический аппарат макроскопической электродинамики в ОТО и метрической аффинной дифференциальной геометрии, аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений поля и движения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Точные аналитические решения для электрического и магнитного полей во внутренней области, в ближней зоне, а также в волновой зоне намагниченной осциллирующей НЗ для конфигурации невозмущенного магнитного поля звезды и скорости ее осцилляций. Общерелятивистское выражение для электромагнитных потерь энергии осциллирующей НЗ с дипольной конфигурацией исходного магнитного поля.
2. Конкретные аналитические решения для внешнего электромагнитного поля намагниченной компактной звезды, испытывающей а) сфероидальные, б) радиальные, в) тороидальные осцилляции. Релятивистские выражения для потерь энергии осцилляций за счет излучения электромагнитных волн для всех трех указанных мод осцилляций и дипольного магнитного поля звезды, а также для

омических потерь энергии осцилляций за счет джоулева нагревания внутреннего вещества звезды.

3. Выражения для сдвига фазы частиц в нейтронном интерферометре, интерферометре типа Маха-Зендера, а также выражение для разности фаз интерферирующих пучков в эксперименте типа Саньяка во внешнем пространстве-времени медленно вращающегося гравитирующего объекта на бранах, свидетельствующие о заметном влиянии приливного бран заряда на эффекты квантовой интерференции. Верхний предел на величину приливного бран заряда, полученный из анализа наземных лабораторных экспериментов по интерферометрии частиц.
4. Выражения, описывающие тепловое излучение Хокинга ЧД в пространстве-времени с ненулевым приливным бран зарядом, а также, описывающие процессы Блэнфорда-Знаека, Мейсснера и Пенроуза в окрестности ЧД, пространство-время которой описывается метрикой Керр-Тауб-НУТ.

Научная новизна определяется тем, что в диссертации впервые найдены аналитические решения уравнений Максвелла внутри и вне намагниченной осциллирующей релятивистской звезды для произвольной конфигурации фонового магнитного поля звезды и произвольного выражения для скорости осцилляций. В работе впервые показано, что известное ньютоновское выражение для потерь электромагнитной энергии вращающегося магнитного диполя в несколько раз недооценивает потери энергии намагниченной вращающейся компактной звезды, так как оно не учитывает релятивистских эффектов усиления магнитного поля и гравитационного красного смещения частоты излучения в искривленном пространстве-времени звезды. Впервые получены релятивистские выражения для внешних электромагнитных полей намагниченной компактной звезды испытывающей различные типы осцилляций. Впервые показано, что учет релятивистских поправок в выражениях для затухания осцилляций звезды за счет генерируемого ими электромагнитного излучения приводит к значениям, в несколько раз превышающим ньютоновские, для всех типов осцилляций звезды. Впервые приведена оценка релятивистских поправок к затуханиям осцилляций за счет джоулева нагревания внутреннего вещества звезды в предположении его конечной проводимости. Найдено влияние приливного бран заряда на разность фаз интерферирующих пучков в эксперименте Саньяка, на сдвиг фазы частицы в нейтронном интерферометре и на смещение квантовых энергетических уровней ультрахолодных нейтронов. Впервые исследовано влияние приливного бран заряда на тепловое излучение Хоукинга ЧД, а также влияние НУТ параметра на процессы Блэнфорда-Знаека, Мейсснера и Пенроуза в окрестности ЧД.

Научная и практическая значимость результатов исследования состоит в том, что полученные результаты могут играть важную роль при исследовании звездных осцилляций различных типов. Полученное выражение для потерь энергии вращающейся и осциллирующей намагниченной НЗ дает возможность проверки эффектов общей теории

относительности из наблюдательных характеристик звезды.

Одним из важных результатов является получение верхнего предела значения приливного бран заряда на основе данных об экспериментах по интерферометрии частиц, проводимых в земных условиях, что может служить основой для дальнейшей проверки модели мира на бранах.

Исследование механизмов извлечения энергии ЧД в различных гравитационных моделях может привести к более глубокому пониманию физики ЧД и возможности дальнейшей проверки используемых гравитационных моделей.

Реализация результатов. Результаты данной работы включены в специальные курсы по теории гравитации и релятивистской астрофизики в рамках магистратуры по направлению «Теоретическая физика» в Национальном университете Узбекистана.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИЯФ и АИ АН РУз; на научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики" (Ташкент, 2008 г.); на научно-практической конференции студентов и молодых ученых "Роль молодежи в сегодняшнем развитии физики" (Ташкент, 2008 г.); на республиканской конференции молодых ученых (Самарканд, 2008 г.); на II и III республиканской конференции молодых физиков Узбекистана (РКМУ, Ташкент, 2008 г., 2010 г.); на семинар-тренинге "Современные методы в астрономии" (Ташкент, 2009 г.); на школе-семинаре для одаренных студентов и молодых ученых "Актуальные проблемы современной физики" (Самарканд, 2010 г.); на республиканской научно-практической конференции "Актуальные проблемы современной физики и астрономии" (Карши, 2010 г.). Работа удостоена премии 3-й степени на II РКМУ и поощрительной премии на III РКМУ.

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 13 публикаций: из них 4 научные статьи в научных рецензируемых журналах – 2 в международных журналах, 2 в местных журналах, 9 в сборниках трудов международных и республиканских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 132 наименований. Она изложена на 144 страницах в том числе 120 страниц основного текста, включая 7 рисунков и 3 таблиц.

Личный вклад диссертанта. В работах, выполненных совместно с научным руководителем и соавторами, вклад автора диссертации был значительным. Автору принадлежит разработка формализма применения уравнений Максвелла для осциллирующих нейтронных звезд. Вклад автора в получении научных результатов является определяющим. Автор выполнил основные численные и аналитические расчеты, приведенные в диссертации, активно участвовал в обсуждениях постановки задач и при анализе полученных результатов. Обобщение результатов и основные выводы, приведенные в заключительном разделе диссертации, также

сформулированы автором.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи, определены основные положения, выдвигаемые на защиту и дается ее краткая характеристика.

В первой главе рассмотрен случай дипольного магнитного поля звезды и простейшее возможное возмущение поля скоростей – возмущение, генерируемое равномерным вращением диполя. В ближней зоне полученные выражения для электрического и магнитного полей сравнены с решениями, найденными в работах [4] и [5], тогда как в волновой зоне полученные поправки к электромагнитным полям использованы для вычисления релятивистских потерь энергии вращения звезды за счет электромагнитного дипольного излучения.

В результате показано, что хорошо известное выражение, полученное в рамках ньютоновского формализма и часто используемое для вычисления потерь энергии звезды на электромагнитное дипольное излучение, недооценивает значение потерь энергии приблизительно в шесть раз в случае, когда звезда является очень компактной, и приблизительно в два раза для менее компактных звезд.

Рассмотрены основные уравнения Максвелла во внешнем пространстве-времени Шварцшильда и исследованы выражения для электромагнитных полей в вакууме вблизи звезды.

Из уравнений Максвелла в ОТО можно найти решения для электромагнитных полей вблизи поверхности НЗ в виде

$$\begin{aligned} B^{\hat{r}} &= -\frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} [\sin \theta \partial_{\theta} (\sin \theta \partial_{\theta} S) + \partial_{\phi}^2 S], & B^{\hat{\theta}} &= \frac{N}{r} \partial_{\theta} \partial_r S + \frac{1}{Nr \sin \theta} \partial_{\phi} Z, \\ B^{\hat{\phi}} &= \frac{N}{r \sin \theta} \partial_{\phi} \partial_r S - \frac{1}{Nr \sin \theta} \partial_{\theta} Z, & E^{\hat{r}} &= -\frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} [\sin \theta \partial_{\theta} T] + \partial_{\phi}^2 T, \\ E^{\hat{\theta}} &= \frac{N}{r} \partial_{\theta} T + \frac{1}{Nr \sin \theta} \partial_{\phi} X, & E^{\hat{\phi}} &= \frac{N}{r \sin \theta} \partial_{\phi} T - \frac{1}{Nr} \partial_{\theta} X, \end{aligned} \quad (1)$$

где $N = 1 - 2M/r$ – функция красного смещения в пространстве-времени сферически-симметричного гравитационного объекта массой M . Функции S , Z , и T , X можно назвать как «магнитные» и «электрические» функции, соответственно, и их можно разделить по переменным разложив их по сферическим гармоникам $Y_{lm}(\theta, \phi)$:

$$\begin{aligned} S(t, r, \theta, \phi) &= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l S_{lm}(t, r) Y_{lm}(\theta, \phi), & X(t, r, \theta, \phi) &= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l X_{lm}(t, r) Y_{lm}(\theta, \phi), \\ T(t, r, \theta, \phi) &= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l T_{lm}(t, r) Y_{lm}(\theta, \phi), & Z(t, r, \theta, \phi) &= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l Z_{lm}(t, r) Y_{lm}(\theta, \phi). \end{aligned} \quad (2)$$

Поставляя выражения (2) и (1) в уравнения Максвелла получены следующие уравнения для «магнитных» функций:

$$\left[\frac{1}{\sin \theta} \partial_{\theta} (\sin \theta \partial_{\theta} Y_{lm}) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \partial_{\phi}^2 Y_{lm} \right] Z_{lm} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dr} \left[\left(1 - \frac{2M}{r} \right) \frac{d}{dr} S_{lm} \right] - \frac{l(l+1)}{r^2} S_{lm} = 0, \quad (4)$$

особенностью которых является то, что они зависят только от Z_{lm} или от S_{lm} , т.е. могут быть решены по отдельности.

Компоненты магнитного поля, появившиеся вследствие возмущений скорости примут вид

$$B^\epsilon = B_0^\epsilon + \delta B^\epsilon(t) = \frac{l(l+1)}{M^3} \frac{d}{dx} \left[(1+x) \frac{dQ_l}{dx} \right] [s_{lm} + \delta s_{lm}(t)] Y_{lm},$$

$$B^\phi = B_0^\phi + \delta B^\phi(t) = - \left[-\frac{1+x}{(1-x)^3} \right]^{1/2} \frac{1}{M^3} \frac{d}{dx} \left\{ (1-x)^2 \frac{d}{dx} \left[(1+x) \frac{dQ_l}{dx} \right] \right\} [s_{lm} + \delta s_{lm}(t)] \partial_\theta Y_{lm},$$

$$B^\phi = B_0^\phi + \delta B^\phi(t) = - \left[-\frac{1+x}{(1-x)^3} \right]^{1/2} \frac{1}{M^3} \frac{d}{dx} \left\{ (1-x)^2 \frac{d}{dx} \left[(1+x) \frac{dQ_l}{dx} \right] \right\} [s_{lm} + \delta s_{lm}(t)] \frac{1}{\sin \theta} \partial_\phi Y_{lm}$$

здесь $Q_l(x)$ - функция Лежандра второго рода, $x \equiv 1 - r/M$ - новая переменная, константы интегрирования s_{lm} и δs_{lm} можно легко найти после применения соответствующих граничных условий на поверхности звезды.

Таким же образом можно найти уравнения для «электрических» функций T, X :

$$\frac{d}{dr} \left[\left(1 - \frac{2M}{r} \right) \frac{d}{dr} T_{lm} \right] - \frac{l(l+1)}{r^2} T_{lm} = 0, \quad (5)$$

$$l(l+1) Y_{lm} X_{lm} = -r^2 \partial_t B^\epsilon, \quad \partial_r X_{lm} \partial_\theta Y_{lm} = -\frac{r}{N} \partial_t B^\phi, \quad \partial_r X_{lm} \partial_\phi Y_{lm} = -\frac{r \sin \theta}{N} \partial_t B^\phi \quad (6)$$

и записать решение для электрического поля в вакууме в следующей форме

$$\delta E^\epsilon(t) = \frac{M^2}{r^2} l(l+1) \left[Q_{l-1} - \left(1 + \frac{r}{M} l \right) Q_l \right] \delta t_{lm}(t) Y_{lm},$$

$$\delta E^\phi(t) = \frac{M^2}{r^2 N} l^2(l+1) \left[\left(1 - \frac{r}{M} \right) Q_l - Q_{l-1} \right] \delta t_{lm}(t) \partial_\theta Y_{lm} + \frac{r}{M^3 N \sin \theta} \frac{d}{dx} \left[(1+x) \frac{dQ_l}{dx} \right] \delta x_{lm}(t) \partial_\phi Y_{lm},$$

$$\delta E^\phi(t) = \frac{M^2}{r^2 N \sin \theta} l^2(l+1) \left[\left(1 - \frac{r}{M} \right) Q_l - Q_{l-1} \right] \delta t_{lm}(t) \partial_\phi Y_{lm} - \frac{r}{M^3 N} \frac{d}{dx} \left[(1+x) \frac{dQ_l}{dx} \right] \delta x_{lm}(t) \partial_\theta Y_{lm}.$$

Константы интегрирования δt_{lm} и δx_{lm} можно вычислить используя условия сшивки тангенциального электрического поля на поверхности звезды:

$$\delta t_{lm}(t) = \frac{MR^2}{l^3(l+1)^2} \left[\left(1 - \frac{R}{M} \right) Q_l(R) - Q_{l-1}(R) \right]^{-1} \int d\Omega \left\{ \partial_\theta Y_{lm}^* \left[\delta v_R^\phi(t) B_R^\epsilon - \delta v_R^\epsilon(t) B_R^\phi \right] - \right. \\ \left. i \frac{m Y_{lm}^*}{\sin \theta} \left[\delta v_R^\theta(t) B_R^\phi - \delta v_R^\phi(t) B_R^\theta \right] \right\},$$

$$\delta x_{lm}(t) = \frac{f_R}{R} \int d\Omega \left\{ \partial_\theta Y_{lm}^* \left[\delta v_R^\theta(t) B_R^\phi - \delta v_R^\phi(t) B_R^\theta \right] + \frac{m Y_{lm}^*}{\sin \theta} \left[\delta v_R^\phi(t) B_R^\phi - \delta v_R^\phi(t) B_R^\theta \right] \right\},$$

где v_R^i - значения скорости осцилляций на поверхности звезды.

Компоненты для магнитного поля в волновой зоне примут следующий вид

$$B^\epsilon = \frac{e^{-i\omega t} \sqrt{l(l+1)}}{r} H_l(\omega r) u_{lm} Y_{lm}, \quad (7)$$

$$B^{\phi} = \frac{e^{-i\omega t}}{\sqrt{l(l+1)}} (DH_l(\omega r) u_{lm} \partial_{\theta} Y_{lm} - \omega H_l(\omega r) v_{lm} \frac{m Y_{lm}}{\sin \theta}), \quad (8)$$

$$B^{\epsilon} = i \frac{e^{-i\omega t}}{\sqrt{l(l+1)}} (DH_l(\omega r) u_{lm} \frac{m Y_{lm}}{\sin \theta} - \omega H_l(\omega r) v_{lm} \partial_{\theta} Y_{lm}), \quad (9)$$

а компоненты для электрического поля в волновой зоне выражаются как:

$$E^{\epsilon} = -\frac{e^{-i\omega t} \sqrt{l(l+1)}}{r} H_l(\omega r) v_{lm} Y_{lm}, \quad (10)$$

$$E^{\phi} = -\frac{e^{-i\omega t}}{\sqrt{l(l+1)}} (DH_l(\omega r) v_{lm} \partial_{\theta} Y_{lm} + \omega H_l(\omega r) u_{lm} \frac{m Y_{lm}}{\sin \theta}), \quad (11)$$

$$E^{\phi} = -\frac{e^{-i\omega t}}{\sqrt{l(l+1)}} (DH_l(\omega r) v_{lm} \frac{m Y_{lm}}{\sin \theta} + \omega H_l(\omega r) u_{lm} \partial_{\theta} Y_{lm}). \quad (12)$$

Здесь, ω - частота моды осцилляций, $DH_l \equiv (\omega r)^{-1} \partial_r [r H_l(\omega r)]$ обозначает производную по радиальной координате от функции Ханкеля. Отметим, что сферические функции Ханкеля имеют простое разложение по радиусу в случае малых аргументов

$$H_l(\omega r) \approx -i(2l-1)!!(\omega r)^{-l-1}, \quad DH_l(\omega r) \approx i(2l-1)!!l(\omega r)^{-l-2} \quad \text{для } \omega r \approx \omega_R R \ll 1,$$

а в пределе больших аргументов они обнаруживают типичное колебательное движение (в пространстве)

$$H_l(\omega r) \approx (-i)^{l+1} \frac{e^{i\omega r}}{\omega r}, \quad DH_l(\omega r) \approx (-i)^l \frac{e^{i\omega r}}{\omega r} \quad \text{для } \omega r \rightarrow \infty.$$

Коэффициенты интегрирования u_{lm} и v_{lm} , определены через условия сшивки электромагнитных полей на поверхности звезды с использованием граничных условий:

$$u_{lm} = \frac{1}{\sqrt{l(l+1)}} \frac{\exp(i\omega_R t)}{DH_l(\omega_R R) N_R} \int d\Omega \left\{ \partial_{\theta} Y_{lm}^* \left[\delta v_R^{\phi} B_R^{\epsilon} - \delta v_R^{\epsilon} B_R^{\phi} \right] + i \frac{m Y_{lm}^*}{\sin \theta} \left[\delta v_R^{\phi} B_R^{\epsilon} - \delta v_R^{\epsilon} B_R^{\phi} \right] \right\}, \quad (13)$$

$$v_{lm} = \frac{1}{\sqrt{l(l+1)}} \frac{\exp(i\omega_R t)}{H_l(\omega_R R) N_R \omega} \int d\Omega \left\{ i \partial_{\theta} Y_{lm}^* \left[\delta v_R^{\phi} B_R^{\epsilon} - \delta v_R^{\epsilon} B_R^{\phi} \right] + i \frac{m Y_{lm}^*}{\sin \theta} \left[\delta v_R^{\phi} B_R^{\epsilon} - \delta v_R^{\epsilon} B_R^{\phi} \right] \right\}, \quad (14)$$

где величины с нижним индексом R определяются на поверхности звезды.

Определены электромагнитные поля звезды с идеально проводящей корой с полем скоростей $\delta u^{\alpha} = N^{-1}(1, 0, 0, \Omega)$, и соответствующими компонентами для 3-скорости $\delta v^i \equiv (0, 0, \Omega r \sin \theta)$, где $r \leq R$ и Ω -угловая скорость звезды, измеренная удаленным наблюдателем.

Компоненты магнитного поля, возникающего при вращении диполя в ближней зоне примут вид

$$B^{\epsilon} = -\frac{2R^3}{8M^3} \left[\ln N^2 + \frac{2M}{r} \left(1 + \frac{M}{r} \right) \right] B_0 (\cos \chi \cos \theta + \sin \chi \sin \theta \cos \lambda), \quad (15)$$

$$B^{\phi} = \frac{3R^3 N}{8M^2 r} \left[\frac{r}{M} \ln N^2 + \frac{1}{N^2} + 1 \right] B_0 (\cos \chi \sin \theta - \sin \chi \cos \theta \cos \lambda), \quad (16)$$

$$B^{\phi} = \frac{3R^3 N}{8M^2 r} \left[\frac{r}{M} \ln N^2 + \frac{1}{N^2} + 1 \right] B_0 (\sin \chi \sin \lambda), \quad (17)$$

где $\lambda \equiv \phi - \Omega t$ и $B_0 \equiv 2\mu / R^3$ - (ньютоновское) значение магнитного поля для

полярной оси, χ - угол наклона магнитной оси к оси вращения.

Компоненты электрического поля при вращении диполя в ближней зоне имеют вид

$$E^{\phi} = \frac{1}{3} \frac{E_0}{g_R} \left[\left(3 - \frac{2r}{M}\right) \ln N^2 + \frac{2M^2}{3r^2} + \frac{2M}{r} - 4 \right] B_0 (\cos \chi (3 \cos^2 \theta - 1) + \sin \chi \sin \theta \cos \theta \cos \lambda), \quad (18)$$

$$E^{\theta} = -\frac{1}{2} \frac{E_0}{g_R} N \left[\left(1 - \frac{r}{M}\right) \ln N^2 - 2 - \frac{2M^2}{3r^2 N^2} \right] \sin \chi \cos \theta \sin \lambda, \quad (19)$$

где по аналогии с соответствующим ньютоновским выражением, определим электрическое поле E_0 как

$$E_0 \equiv (f_R B_0) \frac{\Omega_R}{N_R} R = (f_R B_0) \Omega R, \quad (20)$$

и где f_R, g_R - сокращенные обозначения:

$$f_R \equiv -\frac{3}{8} \left(\frac{R}{M}\right)^3 \left[\ln N_R^2 + \frac{2M}{R} \left(1 + \frac{M}{R}\right) \right] = -\frac{3}{8} \left(\frac{R}{M}\right)^3 \left[\ln \left(1 - \frac{2M}{R}\right) - \frac{2M}{R} \left(1 + \frac{M}{R}\right) \right], \quad (21)$$

$$g_R \equiv \left(1 - \frac{R}{M}\right) \ln N_R^2 - \frac{2M^2}{3R^2 N_R^2} - 2 = \left(1 - \frac{R}{M}\right) \ln \left(1 - \frac{2M}{R}\right) - \frac{2}{3} \left(\frac{M}{R}\right)^2 \frac{R}{R-2M} - 2. \quad (22)$$

где $N_R^2 \equiv 1 - \frac{2M}{R}$.

Если $l=1$, то $v_{1m}=0$ и u_{11} - единственный отличный от нуля коэффициент, который определяется как:

$$u_{11} = -i \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \Omega_R^2 R^3 f_R B_0 \sin \chi. \quad (23)$$

Тогда дипольные компоненты электромагнитных полей, возбуждаемых при вращении диполя в волновой зоне, выражаются через действительные части следующих решений:

$$\begin{aligned} B^{\hat{r}} &= -i \frac{\Omega_R R^3}{N_R r^2} f_R B_0 \sin \chi \sin \theta e^{i[\Omega(r-t)+\phi]}, & E^{\hat{r}} &= 0, \\ B^{\hat{\theta}} &= \frac{1}{2} \frac{\Omega_R^2 R^3}{r} f_R B_0 \sin \chi \cos \theta e^{i[\Omega(r-t)+\phi]}, & E^{\hat{\theta}} &= \frac{i}{2r} \frac{\Omega_R R^2}{R} E_0 \sin \chi e^{i[\Omega(r-t)+\phi]} = c B^{\hat{\phi}}, \\ B^{\hat{\phi}} &= \frac{i}{2} \frac{\Omega_R^2 R^3}{r} f_R B_0 \sin \chi e^{i[\Omega(r-t)+\phi]}, & E^{\hat{\phi}} &= -\frac{1}{2} \frac{\Omega_R R^2}{r} E_0 \sin \chi \cos \theta e^{i[\Omega(r-t)+\phi]} = -c B^{\hat{\theta}}. \end{aligned}$$

Поскольку волновая зона расположена далеко за пределами светового цилиндра, т.е. на расстояниях $r \gg r_{ic} \equiv c/\Omega$, выражения (54)–(60) показывают, что в этой области электромагнитные поля представляют собой радиально распространяющиеся волны, для которых $|B^{\hat{r}}/B^{\hat{\theta}}| \sim |B^{\hat{r}}/B^{\hat{\phi}}| \sim c/\Omega r \ll 1$.

Опираясь на общерелятивистские решения электродинамики намагниченных НЗ, изучены электромагнитные поля, возникающие когда проводящая поверхность намагниченной релятивистской звезды обладает ненулевым полем скоростей. Модель звезды представляет собой релятивистскую политропу в вакууме с бесконечной проводимостью. Пренебрегаются релятивистские поправки, вносимые вращением звезды в пространстве-времени и плотностью электромагнитной энергии. Оба

приближения подходят для большинства быстровращающихся и намагниченных нейтронных звёзд. Полученные выражения для электромагнитного поля осциллирующих звезд показывают связь между ОТО и ньютоновскими выражениями и могут быть использованы в астрономических исследованиях.

Мощность, испускаемая в виде дипольного электромагнитного излучения, равна

$$L_{em} = \frac{\Omega^4 R^6 \tilde{B}_0^2}{6c^3} \sin^2 \chi, \quad \tilde{B}_0 = B_0 f_R. \quad (24)$$

Сравнивая полученное выражение с ньютоновским выражением для скорости потерь энергии на дипольное электромагнитное излучение

$$(L_{em})_{Newt} = \frac{\Omega^4 R^6 B_0^2}{6c^3} \sin^2 \chi, \quad (25)$$

можно легко видеть, что релятивистские поправки, возникающие в выражении (24) объясняются усилением магнитного поля и гравитационным красным смещением на поверхности НЗ.

Легко можно найти изменение периода пульсара при переходе его вращательной энергии в энергию электромагнитного излучения. Оно может также быть переписано в более удобной форме через наиболее важные наблюдательные характеристики пульсара: период P и его производную по времени \dot{P}

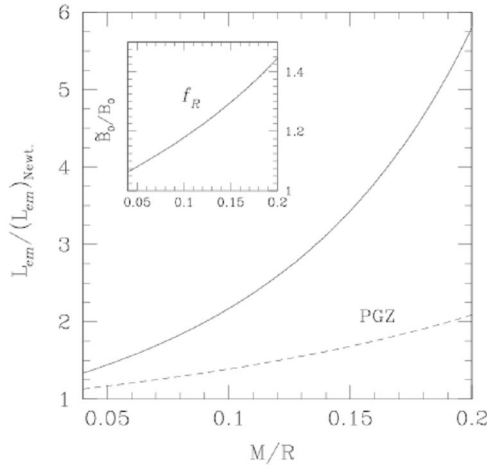


Рис.1. Зависимость общерелятивистского усиления потерь энергии за счет дипольного электромагнитного излучения от параметра компактности НЗ.

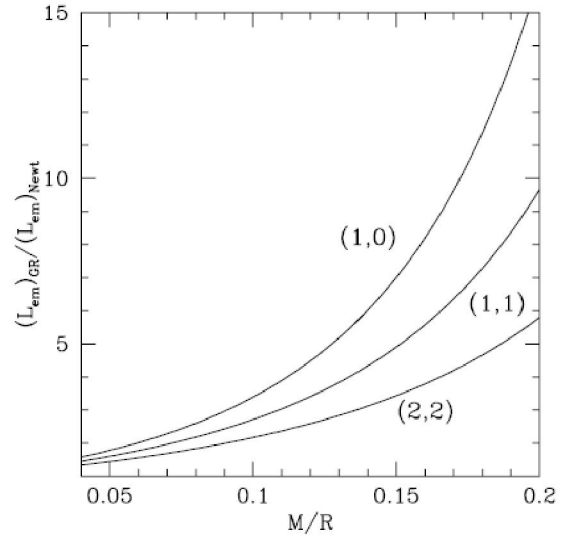


Рис. 2. Общерелятивистские поправки к потерям электромагнитной энергии для типичных мод осцилляций НЗ.

$$P\dot{P} = \left(\frac{2\pi^2}{2c^3} \right) \frac{1}{N_R^4} \frac{R^6 \tilde{B}_0^2}{\tilde{I}} = \left(\frac{f_R^2}{N_R^4} \frac{I}{\tilde{I}} \right) (P\dot{P})_{Newt}, \quad (26)$$

где I - момент инерции звезды и соответствующее ньютоновское выражение задано формулой

$$(P\dot{P})_{Newt} \equiv \left(\frac{2\pi}{3c^3} \right) \frac{R^6 B_0^2}{I}. \quad (27)$$

На рис. 1 показана зависимость общерелятивистского усиления потерь энергии за счет дипольного электромагнитного излучения от параметра компактности звезды. Сплошная линия представляет результат, полученный здесь [см. ур. (24) и (25)], а пунктирная линия представляет феноменологическую оценку. На вставке показано усиление магнитного поля, производимое искривлением пространства-времени для различных значений компактности звезды.

Во второй главе, которая называется «Электромагнитные поля во внешнем пространстве осциллирующей релятивистской звезды. Сфероидальные и тороидальные поля скоростей», результаты первой главы для электромагнитного поля в ближней и волновой зонах осциллирующей намагниченной компактной звезды, полученные в общем случае произвольной скорости осцилляций и произвольного фонового магнитного поля звезды, применены к вычислению электромагнитных полей для конкретных разновидностей звездных осцилляций: сфероидальных осцилляций, в качестве частного случая которых рассмотрены радиальные осцилляции, а также тороидальных осцилляций звезды.

Найдены вакуумные электромагнитные волны в дальней зоне, генерированные сфероидальными и тороидальными осцилляциями звездного вещества. Общий вид скорости сфероидальных осцилляции дается выражениями

$$\delta v^i = \left(\eta(r) Y_{l'm'}(\theta, \phi), \xi(r) \partial_\theta Y_{l'm'}(\theta, \phi), \frac{\xi(r)}{\sin \theta} \partial_\phi Y_{l'm'}(\theta, \phi) \right) e^{-i\omega t}, \quad (28)$$

где ω - частота осцилляций, $\eta(r)$ и $\xi(r)$ представляют собой радиальные собственные функции сфероидальных осцилляций. Тороидальное поле скоростей имеет следующий вид

$$\delta v^i = \left(0, \frac{1}{\sin \theta} \partial_\phi Y_{l'm'}(\theta, \phi), -\partial_\theta Y_{l'm'}(\theta, \phi) \right) \eta(r) e^{-i\omega t}. \quad (29)$$

Для мод низких порядков условие $\omega R \ll 1$ выполняется и в этом пределе можно найти следующее общее выражение для мощности $L_{(em)}(l', m')$, излучаемой произвольной модой тороидальных осцилляции (l', m') (при $l' > 1$)

Таблица 1.

Время затухания тороидальных осцилляций для NS13T8 модели нейтронной звезды.

мода	ν (kHz) [6] 1	E_T (erg) [6] 2	$L_{\text{em}}^{\text{NEWT}}(\text{ergs}^{-1})$ [6] 3	$L_{\text{em}}^{\text{GR}}(\text{ergs}^{-1})$ 4	$\tau_{\text{GW}}(s)$ [6] 5	$\tau_{\text{em}}^{\text{NEWT}}(s)$ [6] 6	$\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}(s)$ 7	$\tau_{\text{GW}}/\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}$ 8	$\tau_{\text{em}}^{\text{NEWT}}/\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}(s)$ 9
${}_1t_1$	17.9	1.09×10^{49}	1.77×10^{43}	1.57×10^{44}	-	1.23×10^6	1.39×10^5	-	8.85
${}_1t_2$	30	6.40×10^{48}	1.44×10^{44}	1.28×10^{45}	-	8.88×10^4	1.00×10^4	-	8.88
${}_1t_3$	43	1.59×10^{48}	5.98×10^{44}	5.30×10^{45}	-	5.32×10^3	6.00×10^2	-	8.87
${}_1t_4$	52.7	2.72×10^{47}	1.33×10^{45}	1.18×10^{46}	-	4.08×10^2	4.60×10^1	-	8.87
${}_2t_0$	0.36	3.31×10^{47}	6.86×10^{32}	3.45×10^{33}	6.62×10^{11}	9.65×10^{14}	1.92×10^{14}	3.45×10^{-3}	5.03
${}_2t_1$	17.9	3.26×10^{49}	9.32×10^{42}	4.96×10^{43}	7.60×10^5	7.00×10^6	1.31×10^6	0.58	5.34
${}_2t_2$	30	1.92×10^{49}	2.17×10^{44}	1.15×10^{45}	2.33×10^5	1.77×10^5	3.33×10^4	70	5.32
${}_2t_3$	43	4.76×10^{48}	1.83×10^{45}	9.72×10^{45}	1.51×10^4	5.21×10^3	9.79×10^2	15.43	5.32
${}_2t_4$	52	8.15×10^{47}	6.1×10^{45}	3.24×10^{46}	4.68×10^3	2.67×10^2	5.03×10^1	93.04	5.31

Таблица 2.

Время затухания тороидальных осцилляций для NS13T8 модели нейтронной звезды.

мода	ν (kHz) [6] 1	E_T (erg) [6] 2	$L_{\text{em}}^{\text{NEWT}}(\text{ergs}^{-1})$ [6] 3	$L_{\text{em}}^{\text{GR}}(\text{ergs}^{-1})$ 4	$\tau_{\text{GW}}(s)$ [6] 5	$\tau_{\text{em}}^{\text{NEWT}}(s)$ [6] 6	$\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}(s)$ 7	$\tau_{\text{GW}}/\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}$ 8	$\tau_{\text{em}}^{\text{NEWT}}/\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}(s)$ 9
${}_1p_1$	104.72	1.55×10^{50}	9.04×10^{44}	4.56×10^{45}	0.23×10^{-3}	3.43×10^5	6.79×10^5	0.34×10^{-6}	4.4
${}_2f$	28.56	1.59×10^{52}	2.38×10^{43}	7.41×10^{44}	7.50×10^{-3}	1.34×10^9	4.29×10^7	1.75×10^{-10}	31.24
${}_2s_2$	14.61	2.53×10^{53}	4.46×10^{43}	1.03×10^{45}	1×10^4	1.13×10^{10}	4.90×10^8	0.2×10^{-4}	23.06
${}_2s_2$	8.6	1.32×10^{54}	5.13×10^{43}	1.12×10^{45}	4.32×10^4	5.15×10^{10}	2.36×10^9	1.83×10^{-5}	21.82
${}_2i_2$	0.63	4.08×10^{47}	5.49×10^{43}	1.16×10^{45}	5.04×10^9	1.48×10^4	7.01×10^2	0.72×10^7	21.11
${}_2i_1$	0.35	1.63×10^{53}	5.49×10^{43}	1.16×10^{45}	8.64×10^5	5.93×10^9	2.80×10^8	3.1×10^{-3}	21.18
${}_2g_2^s$	0.12	5.49×10^{43}	5.49×10^{43}	1.16×10^{45}	7.57×10^{16}	5.24×10^{-3}	2.27×10^{-4}	3.1×10^{20}	21.21
${}_2g_3^s$	0.1	1.96×10^{40}	5.49×10^{43}	1.16×10^{45}	1.17×10^{17}	0.71×10^{-3}	0.34×10^{-4}	3.4×10^{21}	20.88
мода	ν (kHz) 1	E_T (erg) 2	$L_{\text{em}}^{\text{NEWT}}(\text{ergs}^{-1})$ 3	$L_{\text{em}}^{\text{GR}}(\text{ergs}^{-1})$ 4	$\tau_{\text{GW}}(s)$ 5	$\tau_{\text{em}}^{\text{NEWT}}(s)$ 6	$\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}(s)$ 7	$\tau_{\text{GW}}/\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}$ 8	$\tau_{\text{em}}^{\text{NEWT}}/\tau_{\text{em}}^{\text{GR}}(s)$ 9

$$L_{(em)}(l', m') = \frac{c}{8\pi} \left(\frac{\eta_R}{\omega_R R} \right)^2 \left(\frac{f_R}{N_R} \right)^2 B_0^2 R^2 \left(\frac{\omega_R R}{c} \right)^{2l'+2} \times \frac{1}{l'(2l'-1)[(2l'-3)!!]^2} \times \left[\frac{m'^2}{(2l'-1)(l'+1)} + \frac{(l'+1)(l'-m'^2)}{(l'-1)(2l'-1)} \right]. \quad (30)$$

В пределе $\omega_R R \ll 1$ можно найти следующие общие выражения для мощности $L_{(em)}(l', m')$, испущенной произвольной сфероидальной осцилляционной модой (l', m') (при $l' > 2$)

$$L_{(em)}(l', m') = \frac{c}{32\pi} \left[\frac{2(l'+1)f_R \xi_R - h_R \eta_R}{(\omega_R R) N_R} \right]^2 B_0^2 R^2 \left(\frac{\omega_R R}{c} \right)^{2l'} \times \frac{(l'-1)(l'^2 - m'^2)}{[(2l'-3)!!]^2 l'(2l'+1)(2l'-1)} \quad (31)$$

где $\omega_R N_R = \omega$.

На рис. 2. показаны общерелятивистские поправки к потерям электромагнитной энергии для различных мод осцилляций для NS13T8 модели НЗ массой $M = 1,326$ масс Солнца, радиусом $R = 7,853$ км и магнитным полем $B = 10^{12}$ Гс, введенной в статье [6]. В таблицах 1 и 2 приведены данные по вычислениям энергии излучения и времени затухания тороидальных и сфероидальных мод колебаний звезды. Различные столбцы соответствуют характеристикам моды колебаний, такие как частота и кинетическая энергия, мощность электромагнитного излучения, затухание гравитационных и электромагнитных колебаний в случаях ньютоновской гравитации и ОТО.

Ньютоновские значения для частоты осцилляций, кинетической энергии и время затухания приведены в таблицах 4 и 6 в работе [6] и эти результаты повторно приводятся для сравнения в столбах (1)–(3) и (5)–(6) в таблицах 1 и 2. Общерелятивистские значения потери энергии электромагнитного излучения и время затухания осцилляций приводятся в столбах (4) и (7). Последних двух столбах (8) и (9) приведены отношения времени затухания за счет гравитационного и электромагнитного излучения и отношения времени затухания за счет электромагнитного излучения в ньютоновском случае и а случае ОТО, соответственно.

В последнем столбце представлено отношение временных шкал гравитационных и электромагнитных колебаний.

В третьей главе, которая называется «Эффекты квантовой интерференции в пространстве-времени медленно вращающегося намагниченного компактного объекта в модели мира на бранах», рассматривается сдвиг фазы частицы в нейтронном интерферометре интерферометре типа Маха-Зендера, а также эффект Саньяка и в пространстве-времени Керр-Тауб-НУТ.

Эффект Саньяка выражает тот факт, что между лучами света либо пучками частиц, распространяющимися в противоположных направлениях вдоль замкнутого пути вокруг вращающегося интерферометра, возникает разность фаз $\Delta\phi$, которая соответствует разности времен прохождения пучками контура ΔT . Выражение для разности времен ΔT не включает в себя массу и энергию частиц, что позволяет рассматривать эффект Саньяка

как "универсальный" эффект, присущий самой геометрии пространства-времени вне зависимости от физической природы интерферирующих пучков[7].

Найдены следующие выражения для $\Delta\phi$ и ΔT между интерферирующими пучками в эксперименте Саньяка в модели мира на бранах:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi m}{\hbar} r^2 (\Omega - \tilde{\omega}) \rho^0, \quad (32)$$

$$\Delta T = \frac{4\pi}{c^2} r^2 (\Omega - \tilde{\omega}) \rho^0, \quad (33)$$

где m – масса интерферирующих частиц и введено обозначение

$$\rho^0 = \left[1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^*}{r^2} - r^2 \Omega (\Omega - \tilde{\omega}) \right]^{-1/2}. \quad (34)$$

Эксперимент по исследованию влияния гравитационного поля Земли на сдвиг фазы частицы в нейтронном интерферометре был впервые удачно проведен в статье [8]. После проведенного эксперимента были обнаружены также и другие эффекты, оказывающие влияние на сдвиг фазы интерферирующих частиц. Среди них эффект, связанный с вращением Земли, который является квантовомеханическим аналогом эффекта Саньяка, эффект Лензе-Тирринга - общерелятивистский эффект увлечения инерциальных систем отсчета.

Найдена следующая поправка к сдвигу фазы частицы в нейтронном интерферометре, обусловленная присутствием в метрике приливного бран заряда Q^* :

$$\beta_{brane} = -\frac{1}{5} \frac{r_g Q^*}{R_I^3} \beta_{Sag},$$

$$\beta'_{brane} = -\frac{1}{5} \frac{Q^*}{R_I^2} \beta_{Sag}, \quad (35)$$

$$\beta_{Sag} \cong \frac{2m\vec{\Omega} \cdot \vec{S}}{\hbar}, \quad (36)$$

где R_I – радиус-вектор интерферометра относительно центра гравитирующего объекта, \vec{S} – вектор площади интерферометра.

На Рис. 3 показана зависимость сдвига фазы (за счет гравитационного поля) от радиуса при разных значениях приливного параметра Q^* .

Как известно из эксперимента проведенного в работе [8], смещение фазы частицы за счет гравитационного потенциала Земли находится в хорошем согласии с теоретически предсказанным значением, так что ошибка составляет порядка 1 %. Следовательно, отсюда можно легко получить следующий верхний предел на абсолютное значение приливного заряда $\sim Q^* \leq 10^7 \text{ см}^2$.

В четвертой главе, которая называется «Энергетические процессы в окрестности черных дыр в различных гравитационных моделях» исследовано излучение Хокинга в модели мира на бранах. Найдена зависимость температуры ЧД от приливного бран заряда, аналитическое выражение которой определяется как:

$$T = \frac{1}{2\pi r_+^2} \left(M - \frac{Q^*}{r_+} \right)$$

Здесь M - масса центральной ЧД, r_+ - радиус горизонта событий ЧД.

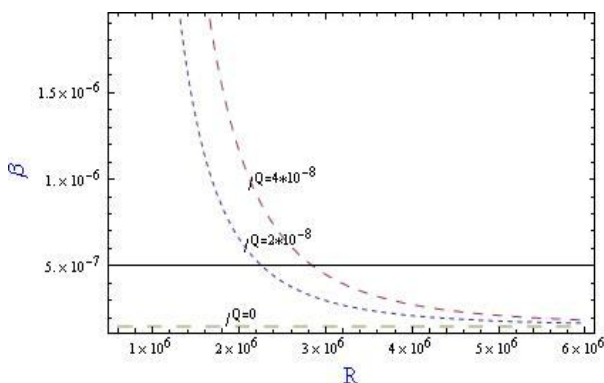


Рис. 3. Фазовый сдвиг за счет гравитации массивного объекта для различных значений приливного бран заряда Q^* .

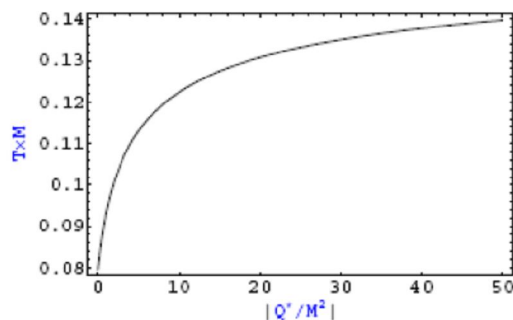


Рис.4. Зависимость температуры ЧД от приливного бран заряда.

На рис. 4 приведена зависимость температуры ЧД от приливного бран заряда.

Площадь и энтропия Бекенштейна-Хокинга, соответствующие горизонту событий ЧД, выражаются следующим образом:

$$A_+ = \int \sqrt{-g} d\theta d\phi = 4\pi r_+^2 \quad S_{BH} = \frac{1}{4} A_+ = \pi r_+^2 \quad (37)$$

Показано, что изменение энтропии Бекенштейна-Хокинга в присутствии приливного бран заряда увеличивается значительно. Данный результат подтверждает то, что в присутствии приливного бран заряда существенно увеличивается количество энергии извлеченной ЧД за счет излучения Хокинга.

Также в данной главе показано, что с увеличением гравитомагнитного монополюсного момента область реализации процесса Пенроуза сдвигается в сторону удаленного наблюдателя.

В заключении приведены выводы и перечислены основные результаты, полученные в этой диссертации.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены точные аналитические общерелятивистские выражения для электромагнитного поля во внутренней и внешней областях

- вращающейся осциллирующей намагниченной компактной звезды для произвольной конфигурации невозмущенного магнитного поля звезды и скорости ее осцилляций.
2. Получено общерелятивистское выражение для потерь энергии вращающейся осциллирующей нейтронной звезды, обладающей дипольным магнитным полем, и доказано, что за счет эффектов общей теории относительности потери энергии такой звезды становятся больше ньютоновского значения в 2-6 раз в зависимости от компактности звезды.
 3. Получены точные аналитические релятивистские выражения для электромагнитного поля в ближней и волновой зонах намагниченной компактной звезды, в случае, когда звезда испытывает а) сфероидальные осцилляции, б) радиальные осцилляции, в) тороидальные осцилляции. Для указанных трех случаев получены точные релятивистские выражения для потерь энергии осцилляций звезды за счет электромагнитного излучения, генерируемого осцилляциями. Показано, что учет релятивистских поправок может увеличить значение электромагнитных потерь энергии звезды до восьми раз по сравнению с ньютоновским значением, в зависимости от компактности звезды и типа испытываемых осцилляций. Получено точное релятивистское выражение для затухания энергии осцилляций звезды за счет джоулева нагревания в приближении конечной проводимости звезды и показано, что поправки ОТО в этом случае также являются непренебрежимыми.
 4. Получены выражения для смещения фазы частицы в нейтронном интерферометре, смещения фазы частицы в интерферометре типа Маха-Зендера, а также для разности фаз интерферирующих пучков в эксперименте Саньяка в пространстве-времени с ненулевым приливным бран зарядом. На основе полученных результатов и данных об экспериментах по интерферометрии частиц получен верхний предел на значение приливного бран заряда. Получено выражение для модификации квантовых энергетических уровней ультрахолодных нейтронов за счет присутствия в метрике приливного бран заряда.
 5. Получено выражение для теплового излучения Хокинга черной дыры в модели мира на бранах. Получены выражения для механизмов Блэнфорда-Знаека, Мейсснера и Пенроуза в окрестности черной дыры, пространство-время которой описывается метрикой Керр-Тауб-НУТ, свидетельствующие о заметном влиянии НУТ параметра на эти эффекты.

Цитируемая литература:

1. Israel G. L., Belloni T., Stella L., Rephaeli Y., Gruber D. E., Casella P., Dall'Osso S., Rea N., Persic M., Rothschild R. E. The Discovery of Rapid X-Ray Oscillations in the Tail of the SGR 1806-20 Hyperflare // *Astrophys. J.* – 2005. – V. 628. – P. L53-L56.
2. Blandford R.D., Znajek R.L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes// *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1977. – V. 179. – P. 433-456.

3. Hawking S.W. Black hole explosions?// Nature – 1974. – V. 248. – P. 30-31.
4. Rezzolla L., Ahmedov B.J., Miller J.C. General relativistic electromagnetic fields of a slowly rotating magnetized neutron star - I. Formulation of the equations// Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2003. – V. 338. – P. 816-831.
5. Kojima Y., Matsunaga N., Okita T. Stationary electromagnetic field in the exterior of a slowly rotating relativistic star: a description beyond the lowfrequency approximation// Mon. Not. R. Astron. Soc.. – 2004. – V. 348. – P. 1388-1394.
6. McDermott P.N., Van Horn H.M., Hansen C.J. Nonradial oscillations Neutron Stars// Astrophys. J. – 1988. – V. 325. – P. 725-748.
7. Rizzi G., Ruggiero M.L., Serafini A. Synchronization Gauges and the Principles of Special Relativity// Foundations of Physics – 2004. – V. 34. – P. 1835-1887.
8. Colella R., Over Hauser A.W., Werner S.A. Observation of Gravitationally Induced Quantum Interference// Phys. Rev. Lett. – 1975. – V. 34. – P. 1472-1474.

4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ:

1. Морозова В.С., Рахматов А.С., **Мамаджанов А.И.** Анизотропия скорости света в пространстве-времени Керр-Тауб-НУТ // Тезисы докладов республиканской конференции молодых ученых. – 7-8 мая 2008. НУУз. Ташкент – С. 65.
2. Абдужаббаров А.А., Рахматов А.С., Рафиева Э., **Мамаджанов А.И.** Движение частиц в окрестности компактных гравитационных объектов с НУТ параметром во внешнем магнитном поле // Физика фанининг бугунги ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни: Иқтидорли талабалар ва ёш олимларнинг илмий-амалий конференцияси материаллари. – Тошкент: ЎЗМУ, 4-5 июнь 2008. – С. 3-8.
3. Абдужаббаров А.А., **Мамаджанов А.И.** Эффект Пенроуза в гравитационном поле компактного объекта с гравитомагнитным монополярным зарядом // II республиканская конференция молодых физиков Узбекистана: Сб. докл. – Ташкент, 25-26 ноября 2008. – С. 237-240.
4. Abdujabbarov A.A., **Mamadjanov A.I.**, Rakhmatov A.S. The Blandford-Znajek and Penrose Mechanisms in Plasma Magnetospheres in Kerr-Taub-NUT Spacetime // **Вестник НУУз.** – Ташкент, 2009. – No. 2. – С. 79-86.
5. **Mamadjanov A.I.**, Hawking Thermal radiation for Black Hole on Brane // The Seventh International Conference 'Modern Problems of Nuclear Physics. 22-25 September, - 2009, Tashkent, Uzbekistan, - P. 117-118.
6. **Мамаджанов А.И.**, Хакимов А.А., Морозова В.С. Эффекты квантовой интерференции в пространстве – времени медленно вращающегося объекта на бране // Материалы республиканской конференции "Современная физика и ее перспективы". – Ташкент, 12-13 ноября 2009 . – С. 284-286.

7. Morozova V.S., Ahmedov B.J., Abdujabbarov A.A., **Mamadjanov A.I.** Plasma Magnetosphere of Rotating Magnetized Neutron Star in the Braneworld // **Astrophys. Space Sci.** – Berlin Heidelberg: Springer, 2010. – V. 330. – P. 257 – 266.
8. **Mamadjanov A. I.**, Hakimov A.A., Tojiev S.R. Quantum Interference Effects in Spacetime of Slowly Rotating Compact Objects in Braneworld // **Mod. Phys. Lett. A.** – Singapore: World Scientific, 2010. – V. 25 – P. 243-256.
9. **Мамаджанов А. И.** Тепловое излучение Хокинга в метрике медленно вращающегося компактного объекта на бранах // **Доклады АН РУз** – Ташкент, 2010. – No. 3. – С. 41-45.
10. **Мамаджанов А.И.** Затухание сфероидальных и тороидальных мод осцилляций намагниченной релятивистской звезды // "Замонавий физика ва астрономиянинг долзарб муаммолари" Республика микёсидаги илмий-амалий конференция. - Қарши, 14-май 2010. – С. 132-133.
11. **Мамаджанов А.И.** Внешние электромагнитные поля осциллирующей релятивистской нейтронной звезды // "Актуальные проблемы современной физики", школа-семинар для одаренных студентов и молодых ученых. – Самарканд. 28-29 мая 2010. Узбекистан. – С. 28-33.
12. Тожиев С.Р., **Мамаджанов А.И.** Вакуумная звезда из темной энергии в однородном магнитном поле // "Актуальные проблемы современной физики", школа-семинар для одаренных студентов и молодых ученых. – Самарканд, 28-29 мая 2010. – С. 95-98.
13. **Мамаджанов А.И.**, Сфероидальные и радиальные осцилляции намагниченных нейтронных звезд // III Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана: Сб. докл. - Ташкент, 1-2 декабря 2010. – С. 15-21.

* * *

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Б.Ж. Ахмедову за постановку задачи, обсуждение результатов и постоянную поддержку при подготовке диссертации. Автор также выражает благодарность директору ИЯФ АН РУз, профессору У.С. Салихбаеву и директору АИ АН РУз, профессору Ш.А. Эгамбердиеву за поддержку, искреннее внимание к работе, полезные советы, а также, предоставленную возможность пользоваться информационными и материальными ресурсами организаций. Автор выражает искреннюю признательность научным коллегам к.ф.-м.н. В.С. Гирянской, к.ф.-м.н. А.А. Абдужаббарову, А.А. Хакимову, С.Р. Тожиеву, к.ф.-м.н. К.Т. Миртаджиевой, д.ф.-м.н. И.С. Саттарову, к.ф.-м.н. С.П. Ильясову, к.ф.-м.н., доц. Б.А. Файзуллаеву, к.ф.-м.н. А.В. Хугаеву за неоценимую помощь в процессе подготовки диссертационной работы.

РЕЗЮМЕ

диссертации Мамаджанова Ахроржона Ибрагимовича на тему: «Вакуумные электромагнитные поля и астрофизические процессы осциллирующих и вращающихся намагниченных релятивистских компактных объектов» на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

Ключевые слова: релятивистская астрофизика, астрофизика нейтронных звезд, движение частиц, электромагнитные поля.

Объекты исследования: нейтронные звезды, черные дыры.

Цель работы: разработка общего формализма и поиск точных решений для электромагнитных полей звезды, а также исследование потери энергии звезды в наличии звездных осцилляций. Исследование эффектов квантовой интерференции в пространстве вращающегося объекта с ненулевым приливным бран зарядом. Исследование механизмов извлечения энергии ЧД в модели на бранах и в пространстве Керр-Тауб-НУТ.

Методы исследования: математический аппарат макроскопической электродинамики в ОТО, метрической афинной дифференциальной геометрии, численные методы вычисления, с дальнейшим развитием методики численных вычислений для поставленных задач.

Полученные результаты и их новизна: найдены аналитические решения уравнений Максвелла внутри и вне намагниченной осциллирующей звезды. Показано, что ньютоновское выражение для потерь энергии вращающегося магнитного диполя недооценивает потери энергии намагниченной вращающейся компактной звезды. Получены релятивистские выражения для внешних электромагнитных полей намагниченной компактной звезды испытывающей различные типы осцилляций. Найдено влияние приливного бран заряда на разность фаз интерферирующих пучков в эксперименте Саньяка. Впервые исследовано влияние приливного бран заряда на тепловое излучение Хокинга ЧД, а также влияние НУТ параметра на процессы Блэнфорда-Знайека, Мейсснера и Пенроуза в окрестности ЧД.

Практическая значимость: полученные результаты могут играть важную роль при исследовании звездных осцилляций различных типов. Полученное выражение для потерь энергии вращающейся и осциллирующей намагниченной НЗ дает возможность проверки эффектов ОТО из наблюдательных характеристик НЗ. Полученный верхний предел значения приливного бран заряда может служить основой для дальнейшей проверки модели мира на бранах. Исследование механизмов извлечения энергии ЧД в различных моделях приводит к более глубокому пониманию физики ЧД.

Степень внедрения и экономическая эффективность: диссертация носит теоретический характер. Ее результаты используются для изучения компактных объектов в релятивистской астрофизике. Эти научные результаты внедрены в специальный курс «Теория гравитации», читаемый в рамках магистратуры в Национальном университете Узбекистана.

Области применения: релятивистская астрофизика, физика черных дыр, астрофизика нейтронных звезд, проверка ОТО.

Физика – математика фанлари номзоди илмий даражасига талабгор
 Мамаджанов Ахроржон Ибрагимовичнинг 01.03.02–астрофизика
 ва радиоастрономия ихтисослиги бўйича «Тебранувчи ва айланувчи
 релятивистик компакт объектларда электромагнит майдонлар ва астрофизик
 жараёнлар» мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: релятивистик астрофизика, нейтрон юлдузлар астрофизикаси, заррачалар харакати, электромагнит майдонлар.

Тадқиқот объектлар: нейтрон юлдузлар, қора ўралар.

Ишнинг мақсади: умумий формализм ишлаб чиқиш ва юлдузлар электромагнит майдонлари учун аниқ ечимларни излаш, юлдузларда тебранишлар мавжуд ҳол учун энергия йўқотишини тадқиқ этиш. Айланувчи бран зарядли фазо-вақтида квант интерференция эффектларини тадқиқ этиш. Қора ўрадан энергия чиқиш механизмларини брандаги олам модели ва Керр-Тауб-НУТ фазо-вақтида ўрганиш.

Тадқиқот усули: умумий нисбийлик назариясидаги макроскопик электродинамикаси, метрик аффин дифференциал геометриясининг математик аппарати, қўйилган масалаларга қараб такомиллаштириб борилувчи рақамли усуллар.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: Максвелл тенгламаларининг магнитланган ва тебранувчи юлдуз ички ва ташқи қисмларидаги аналитик ечимлари олинди. Айланувчи диполнинг энергия йўқотиши Ньютон ифодаси магнитланган айланувчи юлдуз энергия йўқотишини тўлиқ боҳоламаслиги кўрсатилди. Турли хил тебранишлар мавжуд ҳоллар учун магнитланган компакт юлдуз ташқи электромагнит майдонлари учун релятивистик ифодалар олинди. Саньяк тажрибасидаги интерференцияланувчи оқимлар фаза фарқига бран зарядининг таъсири топилди. Илк бора бран зарядининг Хокинг иссиқлик нурланишига, НУТ параметрининг Блэнфорд-Знайек, Мейсснер ва Пенроуз эффектларига таъсири тадқиқ қилинди.

Амалий аҳамияти: олинган натижалар турли типдаги юлдуз тебранишларини тадқиқ этишда муҳим роль ўйнайди. Магнитланган тебранувчи нейтрон юлдуз энергия йўқотиш ифодаси умумий нисбийлик назарияси эффектларини текшириш имконини беради. Бран заряднинг юқори ченараси учун олинган қиймат брандаги олам моделини текшириш учун ишлатилиши мумкин. Қора ўралар энергия чиқорилишини тадқиқи уларнинг физикасини чуқурроқ тушунишга имкон беради.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: диссертация назарий характерга эга. Унинг натижалари астрофизикада компакт объектларни ўрганишда ишлатилади, ҳамда улар Ўзбекистон Миллий Университети магистратураси доирасида ўқиладиган «Гравитация назарияси» курси таркибига киритилган.

Области применения: релятивистик астрофизика, қора ўралар физикаси, нейтрон юлдузлар астрофизикаси, УНН текшириш.

RESUME

Thesis of Mamadjanov Ahrorjon Ibragimovich on the academic degree competition of the candidate of physics and mathematics sciences, on speciality 01.03.02 – astrophysics and radioastronomy
subject: «Vacuum electromagnetic fields and astrophysical processes around oscillating and rotating magnetized relativistic compact objects».

Key words: relativistic astrophysics, neutron star astrophysics, particle motion, electromagnetic fields.

Object of the research: neutron stars, black holes.

Aim of the research: to develop general formalism and find exact solutions for electromagnetic fields, study energy loss of the star in the presence of stellar oscillations. Study of quantum interference effects in the spacetime of slowly rotating object on the brane. Study of energy extraction mechanisms of black hole in the braneworld model and Kerr-Taub-NUT spacetime.

Methods of the research: mathematical methods of electrodynamics in general relativity, differential geometry, numerical methods of calculation with further developing of the numerical methods for considered problems..

The results achieved and their novelty: analytical solutions of the Maxwell equations in outer zones of magnetized oscillating star have been found. It has been shown that Newtonian expressions for energy loss of magnetic dipole underestimate the real energy loss of magnetized rotating compact star. Relativistic expressions for external electromagnetic fields of magnetized compact star for the different types of oscillations have been found. The influence of brane parameter on phase shift of interfering particles in the experiment of Sagnac has been found. Influence of brane parameter on Hawking thermal radiation and influence of NUT parameter on Blandford-Znajek, Meissner and Penrose processes have been studied.

Practical value: obtained results can play significant role in the study of the different types of stellar oscillations. Obtained expression for energy loss of rotating and oscillating magnetized neutron star can be used for tests of general relativistic effects using astrophysical observational data on neutron stars. Obtained upper limit for the value of brane parameter allows us to check the braneworld model. The study of energy extraction mechanisms from black hole gives us the possibility of deep understanding of the physics of black hole.

Degree of embed and economic effectivity: The dissertation is of theoretical character. The results obtained could be used for studying compact objects in relativistic astrophysics. These scientific results are introduced in the special course «Theory of Gravitation» delivered to graduate students at the National University of Uzbekistan.

Sphere of usage: relativistic astrophysics, black hole physics, neutron star astrophysics, test of general relativity.