

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН  
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 14.07.2016.ФМ.01.05  
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ**

**АБДУЖАББАРОВ АХМАДЖОН АДИЛЖАНОВИЧ**

**АКСИАЛ-СИММЕТРИК КОМПАКТ ГРАВИТАЦИОН ОБЪЕКТЛАР  
АТРОФИДАГИ ЗАРРАЧАЛАР ВА ЭЛЕКТРОМАГНИТ МАЙДОНЛАР**

**01.03.01 – Астрономия,  
01.04.02 – Назарий физика  
(физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016**

**Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси**  
**Оглавление автореферата докторской диссертации**  
**Content of the thesis of doctoral dissertation**

Абдужаббаров Ахмаджон Адилжанович Аксиал-симметрик компакт гравитацион объектлар атрофидаги заррачалар ва электромагнит майдонлар .....	3
Абдужаббаров Ахмаджон Адилжанович Частицы и электромагнитные поля в окрестностях аксиально- симметричных компактных гравитационных объектов .....	27
Abdujabbarov Ahmadjon Adiljanovich Particles and electromagnetic fields around axial-symmetric compact gravitating objects .....	51
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works.....	74

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН  
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 14.07.2016.ФМ.01.05  
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ**

**АБДУЖАББАРОВ АХМАДЖОН АДИЛЖАНОВИЧ**

**АКСИАЛ-СИММЕТРИК КОМПАКТ ГРАВИТАЦИОН ОБЪЕКТЛАР  
АТРОФИДАГИ ЗАРРАЧАЛАР ВА ЭЛЕКТРОМАГНИТ МАЙДОНЛАР**

**01.03.01 – Астрономия,  
01.04.02 – Назарий физика  
(физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016**

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 28.04.2016/В2016.2.FM31 рақами билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ядро физикаси институти ва Астрономия институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгаш веб-саҳифаси ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) ва «Ziyonet» таълим ахборот тармоғида ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:** Ахмедов Бобомурат Жураевич,  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** Мусаханов Мирзаюсуф Мирзамахмудович,  
физика-математика фанлари доктори, профессор,  
ЎзР ФА академиги

Туракулов Зафар Ялкинович,  
физика-математика фанлари доктори

Абишев Медеу Ержанович,  
физика-математика фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:** Опавадаги физика институти  
Опава ш., Чехия Республикаси

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги 14.07.2016.FM.01.05 рақамли Илмий кенгаш асосида бир марталик илмий кенгашнинг 2016 йил 28 октябрь соат 11<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент ш., Талабалар шаҳарчаси, Физика факультети, 122-аудитория. Тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-38-21; e-mail: info@inp.uz).

Докторлик диссертацияси билан Ўзбекистон Миллий университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (05-16 рақами билан рўйхатга олинган. (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЎзМУ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2016 йил «    » \_\_\_\_\_ кунлари тарқатилди.  
(2016 йил “    ” \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси)

**Ш. А. Эгамбердиев,**  
Фан доктори илмий даражасини берувчи  
Илмий кенгаш раиси ўринбосари ф.-м.ф.д., профессор

**Р. Ярмухамедов,**  
Фан доктори илмий даражасини берувчи  
Илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., профессор

**И. Хидиров,**  
Фан доктори илмий даражасини берувчи  
Илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси  
ф.-м.ф.д., профессор

## КИРИШ (докторлик диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Дунё миқёсида олиб борилган Ердаги ва космик телескоплардаги кузатувлар ва яқинда қилинган кашфиётлар қора ўраларнинг объектларга салмоқли таъсир кўрсатиши, юлдузларни ютиши натижасида кучли гамма-чакнашларни вужудга келтириши, янги юлдузларни пайдо бўлишини рағбатлантириши ҳақида ишонarli исботлар келтирди. Айланувчи қора ўралар атрофида фотонларнинг ҳаракати тадқиқоти, хусусан, ушбу объектлар соялари шакллари топиш ва таҳлил этиш қора ўраларнинг ҳодисалар горизонти мавжудлигини исботи ва бизнинг галактикамиз марказидаги объект ҳақида маълумотларни олиш учун хизмат қиладиган Black Hole Cam (BHC) и Event Horizon Telesop (EHT) халқаро лойиҳаларни қўйилиши замонавий астрофизиканинг муҳим вазифаларидан бири бўлиб қолмоқда.

Мустақиллик йилларида мамлакатимизда назарий физика ва астрономия йўналишларини ривожлантириш ҳамда дунё миқёсида фундаментал муаммоларни ҳал этишга алоҳида эътибор қаратилди. Бу борада компакт объектлар релятивистик астрофизикасини ривожлантириш, нейтрон юлдузлар магнитосфераси моделларини ишлаб чиқиш, қора ўралар атрофидаги фазо-вақт структурасини таҳлили ва улар атрофидаги синов зарраларнинг ҳаракати борасида сезиларли натижаларга эришилди.

Компакт объектлар атрофидаги астрофизик жараёнларни ўрганиш ва уларни кузатув натижалари билан таққослаш орқали марказий гравитацион объект ҳақида маълумотлар олиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Бу борада мақсадли илмий-тадқиқотларни, жумладан, куйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади: компакт гравитацион объектлар атрофидаги фазо-вақтни тавсифловчи гравитацион назария доирасида қора ўраларнинг ечимларини топиш; топилган ечимлар доирасида фазо-вақт структурасини ва ушбу фазода синов зарраларининг, хусусан, электромагнит тўлқинларнинг ҳаракат тенгламаларини топиш; умумий нисбийлик назарияси ва альтернатив гравитация назарияси доирасида топилган қора ўралар ечими учун қора ўралар соясини аниқлаш; қора ўралар сояларига марказий гравитацион объект ва унинг атрофидаги муҳитнинг таъсирини аниқлаш; релятивистик юлдузларнинг энергия йўқотишига гравитацион моделларнинг таъсирини аниқлаш. Юқорида келтирилган илмий тадқиқотлар мазкур диссертация мавзусининг долзарблигини изоҳлайди.

Ўзбекистон Республикаси Биринчи Президентининг 1993 йил 11 февралдаги ПҚ-559-сон «Астрономик баландтоғ обсерваториялари ва уларга хизмат кўрсатувчи мажмуалар тўғрисида»ги ва 2013 йил 1 мартдаги ПФ-4512-сон «Муқобил энергия манбаларини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорларида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу тадқиқот муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи<sup>1</sup>.** Ташқи асимптотик бир жинсли магнит майдонда жойлашган қора ўралар атрофидаги электромагнит майдон конфигурацияси ва тузилиши, шунингдек айланувчи қора сояларининг тадқиқоти муаммолари устида изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан, Астрономия институти, А.Эйнштейн маркази ва Опавадаги Силезия университети (Чехия), Альберта Университети (Канада), А.Эйнштейн номидаги Макс Планк гравитацион физика институти ва Франкфурт университети (Германия), Университетлараро астрономия ва астрофизика маркази, Физика бўйича илмий лаборатория ва Тата фундаментал тадқиқотлар институти (Ҳиндистон), Бремендаги амалий космик технологиялар маркази ва Ольденбург университети (Германия), Москва давлат университети Штернберг номидаги Давлат астрономия институти (Россия), Ядро физикаси институти, Астрономия институти ва Ўзбекистон Миллий университети томонидан олиб борилмоқда.

Ташқи магнит майдонда жойлашган қора ўралар атрофида зарраларнинг ҳаракати ва электромагнит майдонларига оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан, қуйидаги илмий натижалар олинган: умумий нисбийлик назарияси ва модификацияланган альтернатив гравитация назариялари доирасида айланувчи қора ўраларнинг соялари олинган ва уларнинг хоссалари ўрганилган (А.Эйнштейн номидаги Макс Планк гравитацион физика институти ва Франкфурт университети, Германия; Университетлараро астрономия ва астрофизика маркази, Физика бўйича илмий лаборатория ва Тата фундаментал тадқиқотлар институти, Ҳиндистон; Бремендаги амалий космик технологиялар маркази, Германия; Москва давлат университети Штернберг номидаги Давлат астрономия институти, Россия, Ал-Фаробий номидаги Қозоғистон миллий университети, Қозоғистон); айланувчи қора ўралар атрофида электромагнит майдонлар тузилиши аниқланган, ташқи магнит майдонда жойлашган қора ўра атрофида зарядланган зарраларнинг ҳаракат тенгламалари олинган (Астрономия институти, А.Эйнштейн маркази ва Опавадаги Силезия университети, Чехия; Альберта Университети, Канада; Университетлараро астрономия ва астрофизика маркази, Ҳиндистон; Бремендаги амалий космик технологиялар маркази ва Ольденбург университети, Германия); умумий нисбийлик назарияси ва альтернатив гравитацион назариялар доирасида айланувчи қора ўралар атрофида энергетик жараёнлар, хусусан, Хоржава гравитацион моделида қора ўралар атрофида фазо-вақт структураси аниқланган

---

<sup>1</sup>Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи <http://arxiv.org>; <https://webofknowledge.com>; [https://scholar/google.com](https://scholar.google.com). Ж. Physical Review Letters; Ж. Physical Review D; Ж. Monthly Notices of Royal Astronomical Society; Ж. Astrophysical Journal; Ж. Astrophysics and Space Science; Ж. International Journal of Modern Physics D; ва бошқа манбалар асосида ишлаб чиқилган.

(Астрономия институти, А. Эйнштейн маркази ва Опавадаги Силезия университети, Чехия; Альберта Университети, Канада; Бремендаги амалий космик технологиялар маркази, А.Эйнштейн номидаги Макс Планк гравитацион физика институти ва Франкфурт университети, Германия; Университетлараро астрономия ва астрофизика маркази, Физика бўйича илмий лаборатория ва Тата фундаментал тадқиқотлар институти, Ҳиндистон; Москва давлат университети Штернберг номидаги Давлат астрономия институти, Россия, Ал-Фаробий номидаги Қозоғистон миллий университети, Қозоғистон).

Жаҳонда айланувчи қора ўраларнинг соялари, компакт гравитацион объектлар атрофида зарралар ҳаракати ва энергетик жараёнларни тадқиқ этиш муаммолари бўйича қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: умумий нисбийлик назарияси ва альтернатив гравитацион назариялар доирасида фотонлар ҳаракати ва айланувчи қора ўралар сояларининг таҳлилини олиб бориш; компакт гравитацион объектлар атрофида электромагнит майдонларнинг назарий моделларини тузиш ва улар атрофида синов зарраларининг ҳаракатини таҳлил қилиш; ташқи магнит майдон мавжудлигида айланувчи қора ўралар атрофида энергетик жараёнларни ўрганиш; компакт гравитацион объектлардан электромагнит ва гравитацион нурланишларни тадқиқ этиш.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Айланувчи қора ўраларнинг соялари марказий объектнинг турли параметрлари учун, хусусан, электр заряди, бран заряди, альтернатив гравитацион модел доирасидаги магнит зарядига боғлиқлиги шу пайтгача кўплаб олимлар, масалан, япониялик (К.Ніоки, К.Маеда), америкалик (J.Bardeen), голландиялик (H.Falcke), германияликлар (C.Laemmerzahl, V.Perlick, A.Grenzebach), аргентиналиклар (L.Amarilla, E.Eiroa), италиялик (C.Bambi), чехияликлар (Z.Stuchlik, J.Schee), хиндистонликлар (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil), россияликлар (О. Цупко, А. Захаров, В. Фролов, И. Новиков) ва бошқалар томонидан ўрганиб келинмоқда. Бироқ ушбу ишларда компакт объектлар учун олинган маълум бир ечимлар доирасида қилинган қора ўраларнинг модели, гравитацион назариялари ва ўлчаш услубларига боғлиқ бўлмаган таҳлилининг умумий формализми мавжуд эмас.

Ташқи асимптотик бир жинсли магнит майдонда жойлашган Керр айланувчи қора ўраси учун электромагнит майдон тенгламалари ечимлари, унинг атрофида зарядланган зарранинг ҳаракати, айланувчи қора ўралар атрофида зарраларнинг тезлашиши, секин айланувчи қора ўра атрофида зарраларнинг тезлашишида магнит майдоннинг роли қатор муаллифлар, масалан, америкаликлар (M.Banados, J.Silk, S.M.West ва бошқалар), инглиз олимлари (R.Wald ва бошқалар), россияликлар (Д.В.Гальцов, В.Фролов, А.Алиев), туркиялик (N.Ozdemir), хиндистонликлар (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil), россияликлар (О. Цупко, А. Захаров, В. Фролов, И. Новиков) ва бошқалар томонидан ўрганилган. Бироқ ушбу ишларда гравитомангнит ва деформация параметрлари нолдан фарқли бўлган ташқи магнит майдонда

жойлашган айланувчи қора ўралар атрофида зарядланган зарраларнинг ҳаракати ва энергетик жараёнлар, хусусан, зарраларнинг тўқнашиши ўрганилмаган. Ушбу жараёнларни тадқиқ этиш гравитомагнит заряд ва деформация параметри сингари қора ўранинг параметрларига чегаралар ўрнатиш имконини беради.

Умумий нисбийлик назарияси доирасида компакт гравитацион объектлар атрофида фотонлар ҳаракатига плазма муҳитининг таъсирини ўрганиш муаммоси бир қатор олимлар, масалан, россияликлар (Г.С.Бисноватый-Коган, О. Цупко), ўзбек олимлари (Б.Ж.Ахмедов, А.А.Турсунов, В.С.Морозова), канадалик (А.Rogers), немис олимлари (V.Perlick, J.Kunz), голландиялик (H.Falcke), хиндистонликлар (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) ва бошқалар томонидан ўрганилган. Аммо ушбу ишларда бир жинсли бўлмаган плазманинг қора ўралар оптик хоссаларига таъсири, хусусан, плазманинг айланувчи қора ўралар сояларига таъсирининг таҳлил қилинмаган.

Хоржава гравитацион модели доирасида қора ўралар атрофидаги фазо-вақт хоссалари ва зарраларнинг ҳаракати қатор олимлар, масалан, чехияликлар (Z.Stuchlik, J.Schee) польшаликлар (M.Abramowicz ва бошқалар), португалияликлар (F.Lobo T. Harko, F.Eiroa), немис олимлари (C.Laemmerzahl, J.Kunz, E.Hackmann) ва бошқалар томонидан тадқиқ этилган. Шунга қарамай ҳозирги пайтда энергетик жараёнларга метрик параметрлар ва магнит майдоннинг роли ўрганилмай қолаётир.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим ва илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Ядро физикаси институти ва Астрономия институти илмий-тадқиқотлар режасининг ФА-Ф2-Ф079+Ф069 «Релятивма астрофизика ва космологияда гравитацион ва электродинамик мйдонлар тенгламаларини ҳамда адронлар ва уларнинг ўзаро таъсирини тавсифлашда КХД феномонологик моделини ишлаб чиқиш ва ривожлантириш» (2007-2011); ФА-Ф2-Ф058 «Гравитацион линзалар, шаклланаётган галактикалар ва астрофизик объектларнинг умумлаштирилган моделлари тадқиқоти» (2007-2011); ФЕ2-ФА-Ф134 «Релятив юлдузлар ва альтернатив гравитация назариясида қора ўралар атрофида зарралар ҳаракати ва электромагнит майдонлар» (2012-2013); ЁФ2-ФА-О-25046 «Компакт гравитацион объектлар атрофида спинга эга бўлган зарралар ҳаракати ва электромагнит тўлқинларнинг тарқалиши» (2014-2015); № 1-10 «Юмронқозик ини ва қоронғи энергиядан иборат релятив юлдузлар атрофида зарралар ва майдонлар» (2010-2011) мавзусидаги илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** қора ўралар сояларини тавсифловчи назарий формализм тузиш ва айланувчи қора ўралар атрофида юқори энергетик жараёнлар физик қонуниятларини аниқлашдан иборат.



### **Тадқиқотнинг вазифалари:**

қора ўралар сояларини тавсифлаш учун янги координатага боғлиқ бўлмаган формализм тузиш ва қора ўралар сояларининг шакллари учун сиқилиш параметрларига янги таърифлар таклиф этиш;

янги формализм ва бошқа муаллифлар томонидан таклиф этилган қора ўралар соялари шакллари сиқилиш параметрларининг солиштириш таҳлилини ўтказиш;

ташқи асимптотик бир жинсли магнит майдонда жойлашган айланувчи деформацияланган қора ўралар атрофида электромагнит майдон ва зарядланган зарралар ҳаракатини ўрганиш;

ташқи магнит майдонда жойлашган гравитомагнит зарядга эга бўлган қора ўра атрофида зарядланган зарраларнинг тўқнашишини кўриб чиқиш;

айланувчи қора ўралар соялари шаклига бир жинсли бўлмаган плазманинг таъсирини аниқлаш;

ташқи магнит майдон мавжудлигида Кехагиас Сфетсос очик сингулярлик атрофида зарядланган ва нейтрал зарралар ҳаракати ҳамда тўқнашишининг таҳлилини ўтказиш;

Хоржава гравитацион моделдаги айланувчи қора ўралардан чиқаётган энергия миқдорини баҳолаш;

релятив компакт юлдузларнинг электромагнит майдонлари ва айланишининг секинлашишини таққослаш.

**Тадқиқотнинг объекти** қора ўралар, релятив нейтрон ва ғалати юлдузлардир.

**Тадқиқотнинг предмети** компакт объектлар атрофида электромагнит майдонлар, қора ўралар атрофида синов зарраларининг ички турғун доиравий орбиталари, плазма мавжудлигида қора ўраларнинг соялари, ташқи магнит майдондаги айланувчи қора ўралар атрофида энергетик жараёнлар ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Умумий нисбийлик назариясида макроскопик электродинамика ва метрик аффин дифференциал геометриянинг математик аппарати, ҳаракат ва майдоннинг дифференциал тенгламаларини ечишнинг аналитик ва рақамли усуллари қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

илк бор қора ўралар соялар шаклини тавсифлашда координатага боғлиқ бўлмаган янги формализм тузилган, бунда айланувчи қора ўраларнинг сояларини 0,1% аниқлик билан тавсифлаш учун қатор полиноми коэффицентларининг дастлабки бештаси етарли экани аниқланган ва соя шаклининг сиқилиш параметрлари шовқин сигнаliga нисбатан турғунлиги кўрсатилган;

қора ўра соясининг ўлчами электромагнит нурланишнинг плазма муҳитида синиши ҳисобига камайиши кўрсатилган;

ўта юқори энергетик жараёнларда юқори самарадорликка эришиш учун ҳодисалар горизонтининг бўлмаслиги ва гравитацион объектнинг кучли айланиши даркорлиги кўрсатилган;

зарраларнинг юқори энергияларга эришиши қўшимча зарядланган зарраларга таъсир этувчи электромагнит жараёнларнинг ҳисобига рўй бериши мумкинлиги кўрсатилган;

Хоржава моделида энергия ажралиш механизмлари орасида Пенроуз жараёни орқали қора ўрадан энергия ажралиб чиқиши ҳақиқатга яқинроқлиги кўрсатилган, бундан ташқари Хоржава модели қўшимчасининг таъсири заррачалар чексизликкача тезлашишининг олдини олиши кўрсатилган;

релятив юлдузнинг электромагнит энергия қувватининг йўқотишига ғалати юлдузнинг компактлик таъсири муҳим эканлиги кўрсатилган;

умумий нисбийлик назарияси доирасида ғалати юлдуз худди шундай айланувчи нейтрон юлдузга нисбатан кўпроқ энергия йўқотиши аниқланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

ташқи асимптотик бир жинсли магнит майдондаги айланувчи деформацияланган қора ўраларнинг вакуум электромагнит майдонлари учун аналитик ифодалар топилган ва деформацияланган қора ўралар атрофида индукцияланган электр майдони деформация параметрига чизиқли, магнит майдон эса ушбу параметрнинг квадратига мутаносиблиги аниқланган;

гравитомагнит заряд ва ташқи магнит майдон мавжудлигида қора ўра атрофидаги зарядланган зарраларнинг энергия, импульс моменти ҳамда ички турғун доиравий орбиталарнинг ифодалари топилган ва гравитомагнит заряд таъсири заррачалар чексизликкача тезлашишининг олдини олиши кўрсатилган;

қора ўра соясининг кузатилувчи шакли плазма параметрига, қора ўранинг айланиш параметрига ва қора ўра айланиш ўқининг кузатув текислигига оғиш бурчагига боғлиқ бўлиши кўрсатилган;

ички турғун доиравий орбиталарни кузатув натижалари ҳамда назарий олинган натижаларни таққослаш йўли билан айланувчи деформацияланган қора ўранинг деформация параметри учун юқори чегара қуйидаги кўринишда олинган  $\epsilon \leq 22$ ;

бир жинсли бўлмаган плазма мавжудлигида айланувчи қора ўралар сояларининг шакллари олинган, ва ушбу шакллар соядаги қўшимча асимметрияларни аниқлаш ҳамда бу орқали плазма ва марказий компакт объектни тавсифловчи параметрлар ҳақида маълумотларни олиш учун ишлатилиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** ишда умумий нисбийлик назарияси ва назарий физиканинг замонавий усулларида ҳамда самарали рақамли усуллар ва алгоритмлардан фойдаланилгани; олинган назарий натижаларни астрономи, астрофизик кузатувлар натижалари билан ҳамда бошқа муаллифлар тажрибалари билан солиштирилганлиги; олинган хулосаларнинг гравитацион компакт объектлар майдон назарияларининг асосий тамойиллари билан мослиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти янги радиотелескоплари ёрдамида миллиметр диапазонида яқин келажакда олинадиган қора ўралар

сояларининг таҳлилида диссертацияда тузилган формализмнинг қўлланилиши ва бизнинг ҳамда М87 галактикалари марказидаги ўта массив қора ўранинг турли параметрлари ва хоссалари тўғрисидаги маълумотларнинг олинishi билан изоҳланади. Бундан ташқари сояларнинг янги формализм орқали таҳлили умумий нисбийлик назарияси ва бошқа альтернатив гравитация назарияларини текшириш бўйича синовларни лойиҳалаштириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, қора ўраларнинг турли параметрлари, хусусан, гравитомагнит заряд, деформация параметри ҳамда Хоржава гравитация назарияси доирасида пайдо бўлувчи параметрларни баҳолашда фойдаланиш мумкин. Натижалар, шунингдек, гравитацион майдоннинг характери ва динамикаси таҳлилида ҳамда ғалати юлдузларни топиш ва аниқлаш бўйича тажрибаларни лойиҳалаштиришда ишлатилиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Компакт гравитацион объектлар атрофида зарралар ҳаракати ва электромагнит майдонлар учун олинган ифода ва натижалар асосида:

Кехагиас-Сфетсос экстремал очиқ сингулярлик атрофида зарраларнинг юқори энергетик жараёнлари ва уларнинг узокдаги кузатувчи томонидан қайд этилиши бўйича олинган хулосалар “Компакт объектлар релятивистик астрофизикасида халқаро назарий ва кузатув тадқиқотлар тармоғи билан интеграллашувни қўллаб-қувватлаш” (Европа Иттифоқи ва Чехия Республикасининг давлат бюджети тизимли фондлари томонидан молиялаштирилган ва CZ.1.07/2.3.00/20.0071 рақами билан қайд этилган, 2010-2014) дастури доирасида очиқ сингулярлик атрофида аккрецион дискларни моделлаштиришда ишлатилган (Опавадаги Силезия университетининг 2015 йил 23 апрелдаги маълумотномаси). Ушбу моделлаштириш натижасида галактикалар марказида пайдо бўлувчи релятив джетларнинг табиатини тушунтиришга эришилган.

қора ўраларнинг соялари ва уларга плазма муҳитининг таъсири Дехли марказий университети (Хиндистон) Назарий физика марказида олиб борилувчи илмий лойиҳалар доирасида компакт гравитацион объектлар атрофида фотонларнинг ҳаракатини ҳисоблашда фойдаланилган (Дехли марказий университетининг 2016 йил 20 сентябридаги маълумотномаси). Ушбу ҳисоблашлар натижасида Борн-Инфельд гравитация назарияси доирасида олинган қора ўраларнинг сояларини ҳисоблаш имконини берди.

Нейтрон юлдузларнинг секинлашишининг унинг атрофидаги магнитосфераси ва уларнинг компактлик параметрига боғлиқлигини ифодаловчи ифодалар Хиндистоннинг Пуна шаҳридаги Университетлараро астрономия ва астрофизика марказида олиб борилаётган илмий тадқиқотларда нейтрон юлдузлар магнитосферасини моделлаштиришда жорий қилинган (Университетлараро астрономия ва астрофизика марказининг 2016 йил 21 сентябридаги маълумотномаси). Ушбу

моделлаштириш ва ҳисоблашлар натижасида нейтрон юлдузлар сиртидаги магнит майдон қийматини аниқлаш имконини берди.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 16 та илмий анжуманларда, жумладан, «Замонавий физика ва астрономиянинг долзарб муаммолари» (Қарши, 2010), «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» (Самарқанд, 2010), «Fusion and Plasma Physics» (Triest, 2011), 39-COSPAR General Assembly (Mysore, 2012), «Ядерная наука и ее применение» (Самарқанд, 2012), «Международная школа по субъядерной физике» (Erice, 2013), «General Relativity and Gravitation» (Warsaw, 2013), «Prague Synergy 2013: Accreting relativistic compact objects » (Prague, 2013), «Synergy Olomouc – 2014» (Olomouc, 2014), 40-COSPAR General Assembly (Москва, 2014), «International Congress of Mathematicians» (Seoul, 2014), , “RAGTime – 2013” (Opava, 2013), “RAGTime – 2014” (Prague, 2014), “RAGTime – 2015” (Opava, 2015), “XII Marcel Grossman Meeting” (Rome, 2015), 41-COSPAR General Assembly (Istanbul, 2012) мавзуларидаги халқаро ва республика илмий-амалий конференцияларида маъруза кўринишида баён этилган ҳамда апробациядан ўтказилган.

Диссертация ишининг асосий натижалари Ядро физикаси институти (2010-2016), Астрономия институти (2010–2016), Ўзбекистон миллий университети ядро ва назарий физикаси кафедраси (2015–2016), Чехиядаги Силезия университети, Опавадаги фалсафа ва фан факультети (2013–2016), Германиядаги Гёте университети (2010–2016), Германиядаги Макс Планк гравитация физикаси институти (2013), Германиядаги Амалий космик технологиялар ва микрогравитация маркази (2011), Ҳиндистондаги Тата фундаментал тадқиқотлар институти (2014–2015), Ҳиндистондаги Университетлараро астрономия ва астрофизика маркази (2010–2016), Ҳиндистондаги Дехли марказий университети (2010-2016), Италиядаги халқаро назарий физика маркази (2011) илмий семинарларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 30 та илмий иш нашр қилинган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 15 та мақола, жумладан, 15 таси хорижий журналларда нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, битта илова ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 181 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

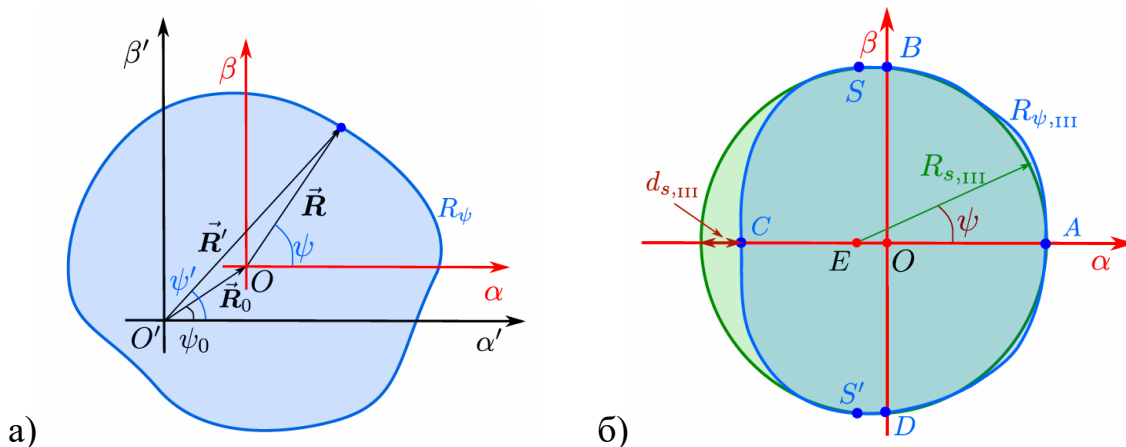
**Кириш** қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Айланувчи қора ўра атрофида фотонлар ва зарраларнинг ҳаракати**» деб номланган биринчи бобда ташқи асимптотик бир жинсли магнит майдонга жойлаштирилган айланувчи деформацияланган ҳамда гравитомагнит зарядга эга бўлган қора ўра атрофида зарядланган зарранинг ҳаракати ва электромагнит майдон кўриб чиқилган. Шунингдек, ушбу бобда қора ўра соясини тавсифловчи умумий формализм тузилган. Соянинг шакли радиоастрономик кузатувлар натижасида олинувчи ва кузатувчи қайд қиладиган ясси текисликда жойлашган ёпиқ эгри чизик кўринишида олинган.

Фараз қилайлик, астрономик кузатувлар қора ўра соясини қуйидаги тенглама орқали бир ўлчамли ёпиқ эгри чизик кўринишида берилган.

$$R' = R'(\psi'), \quad (1)$$

бу ерда  $R'$  ва  $\psi'$  - маркази  $O'$  нуқтада бўлган қутб координаталар системасининг радиал ва бурчак координаталари. Қутб эгри чизигининг схематик тасвири 1а) расмда келтирилган, бунда  $\alpha'$  ва  $\beta'$  - кузатувчининг осмон текислиги координаталари бўлиб, улар ортогонал координаталар системасини ташкил этади.



**1-расм.** Қора ўралар соялари шакллариининг схематик тасвирлари: а) соя шаклининг марказини топиш; б) таянч айлана ва сиқилиш коэффициентларини аниқлаш

Қулай координаталар системасини аниқлаш мақсадида, хусусан, Шварцшильд қора ўраси доиравий шаклга эга бўладиган системани топиш учун эгри чизикнинг эффектив маркази аниқланган

$$\bar{R}_0 := \frac{\int_0^{2\pi} \bar{e}_{R'}(\psi') R' [g_{R'R'}(dR'/d\psi')^2 + g_{\psi'\psi'}]^{1/2} d\psi'}{\int_0^{2\pi} [g_{R'R'}(dR'/d\psi')^2 + g_{\psi'\psi'}]^{1/2} d\psi'}, \quad (2)$$

бу ерда  $\bar{e}_{R'}$  – радиал координатанинг бирлик вектори ва  $g_{R'R'}$ ,  $g_{\psi'\psi'}$  – қутб координаталар системаси  $(R', \psi')$  нинг метрик функциялари.

$\bar{R}_0$  векторнинг қийматини билган ҳолда, янги координата марказининг ифодасини куйидаги кўринишда аниқлаш мумкин бўлади:

$$R_0 := \left( \int_0^{2\pi} R' d\psi' \right)^{-1} \left[ \left( \int_0^{2\pi} R'^2 \cos \psi' d\psi' \right)^2 + \left( \int_0^{2\pi} R'^2 \sin \psi' d\psi' \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\psi_0 := \tan^{-1} \left( \frac{\int_0^{2\pi} R'^2 \sin \psi' d\psi'}{\int_0^{2\pi} R'^2 \cos \psi' d\psi'} \right). \quad (4)$$

Маркази эгри чизикнинг эффектив маркази билан устма-уст тушувчи янги қутб координаталар системасини киритамиз  $(R, \psi)$ . Эски ва янги координаталар системаси ўзаро куйидагича боғланган:

$$R := \left[ (R' \cos \psi' - R_0 \cos \psi_0)^2 + (R' \sin \psi' - R_0 \sin \psi_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\psi := \tan^{-1} \frac{R' \sin \psi' - R_0 \sin \psi_0}{R' \cos \psi' - R_0 \cos \psi_0}. \quad (6)$$

Янги координаталар системасида таянч айланани аниқлашимиз мумкин, бунда айлана ичидаги доира юзи эгри чизик билан чегараланган соҳа юзасига тенг. Берилган  $R = R(\psi)$  ёпик эгри чизик билан чегараланган соҳа юзаси куйидагига тенг:

$$A := \int_{\psi_1}^{\psi_2} d\psi \int_0^R \sqrt{g_{RR} g_{\psi\psi}} dR = \frac{1}{2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} R^2 d\psi = \frac{1}{2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^2(\lambda) \frac{d\psi}{d\lambda} d\lambda, \quad (7)$$

бу ерда  $g_{RR} = 1$  ва  $g_{\psi\psi} = R^2$  эканлигидан фойдаландик,  $\lambda$  – эгри чизик бўйича олинган қандайдир эркин параметр, яъни  $R = R(\psi(\lambda))$ . Агар соя шакли ёпик эгри чизикдан иборат бўлса, интеграллаш чегараси  $\lambda_{1,2}$  куйидаги шартлар орқали топилади  $\psi(\lambda) = 0$  ва  $\psi(\lambda) = 2\pi$ .

Таянч айлананинг радиусини куйидагича топиш мумкин:

$$R_A = \left( \frac{A}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Киритилган таянч айланага нисбатан сиқилиш параметрларини киритамиз. Эгри чизикда мос ҳолда  $\psi = 0$ ,  $\psi = \pi/2$  ва  $\psi = 3\pi/2$  ҳолатларда ётувчи учта А, В ва D нуқталарни қарашдан бошлаймиз (1б расмдаги

диаграммага қаранг). Координаталар маркази О нуктадан ОА, ОВ ва ОD масофаларга мос ҳолда қуйидагига тенг:

$$R_A = R_\psi(\psi = 0) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=0} = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell = \tilde{A}, \quad (9)$$

$$R_B = R_\psi(\psi = \pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=\pi/2} = \sum_{\ell=0}^{\infty} (-1)^\ell \frac{(2\ell)!}{2^{2\ell}(\ell!)^2} c_\ell = \tilde{B}, \quad (10)$$

$$R_D = R_\psi(\psi = 3\pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=3\pi/2} = R_B. \quad (11)$$

$R_A = R_B = R_D$  шартни қондирувчи янги параметрик эгри чизикни аниқлаймиз

$$c_{2\ell-1} = c_{2\ell} \left[ (-1)^\ell \frac{(2\ell)!}{2^{2\ell}(\ell!)^2} - 1 \right]. \quad (12)$$

Таянч айлананинг А, В, ва D нукталардан ўтади деб ҳисоблаб, ихтиёрий йўналишда параметрик эгри чизикнинг айланадан четлашишини аниқлашимиз мумкин. Айланиш ўқи  $\beta$  бўйича йўналган қора ўранинг сояси  $\alpha$  координата бўйича максимал четлашишга эга эканлигидан  $\psi = \pi$  йўналишда четлашиш нимага тенг эканлигини аниқлаш мумкин:

$$d_{s,I} := R_{s,I} - R_{\psi,I}(\psi = \pi) = \tilde{B} - \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{2\ell} + \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1}. \quad (13)$$

Ёки ўлчамсиз сиқилиш параметри учун қуйидаги ифодага келамиз

$$\delta_{s,I} := \frac{d_{s,I}}{R_{s,I}} = \frac{2 \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1}}{\tilde{B}}. \quad (14)$$

Сиқилиш параметрининг иккинчи таърифини координата марказидан А ва В нуктагача бўлган масофалар тенг эмаслигидан фойдаланиб киритишимиз мумкин, яъни  $R_A \neq R_B$ . Бу ҳолда ўқда янги E нуктани танлаб оламизки, бунда масофалар  $AE=EB$  ва E нукта таянч айлананинг маркази бўлиб хизмат қилади.

Бунда сиқилиш параметрини қуйидагича аниқлаш мумкин:

$$\delta_{s,I} := \frac{d_{s,II}}{R_{s,II}} = 2 \left( \frac{\tilde{B}^2 - \tilde{A}\tilde{C}}{\tilde{B}^2 + \tilde{A}^2} \right). \quad (15)$$

бу ерда  $d_{s,II}$  – эгри чизикнинг айланадан четлашиши ва

$$\tilde{C} = R_\psi(\psi = 3\pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} (-1)^\ell c_\ell. \quad (16)$$

Учинчи, сиқилиш параметрининг оптимал таърифи, соя шакли  $\alpha$  ўққа нисбатан симметрик бўлиш билан бир қаторда  $\beta$  ўқни нол оғиш билан кесиб ўтмайди, яъни горизонтга нисбатан нол оғишга эга бўлган S нукта  $\beta$  ўқда ётмайди.

Маркази E нуктада бўлган таянч айлананинг A ва S нукталардан ўтади, деб ҳисоблаб, айлананинг радиуси ва сиқилиш параметри учун қуйидаги ифодаларни олиш мумкин:

$$R_{s,III} = \frac{\tilde{A}^2 - 2x_s \tilde{A} \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) + \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right)^2}{2 \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} (1 - P_{\ell}(x_s) x_s)}, \quad (17)$$

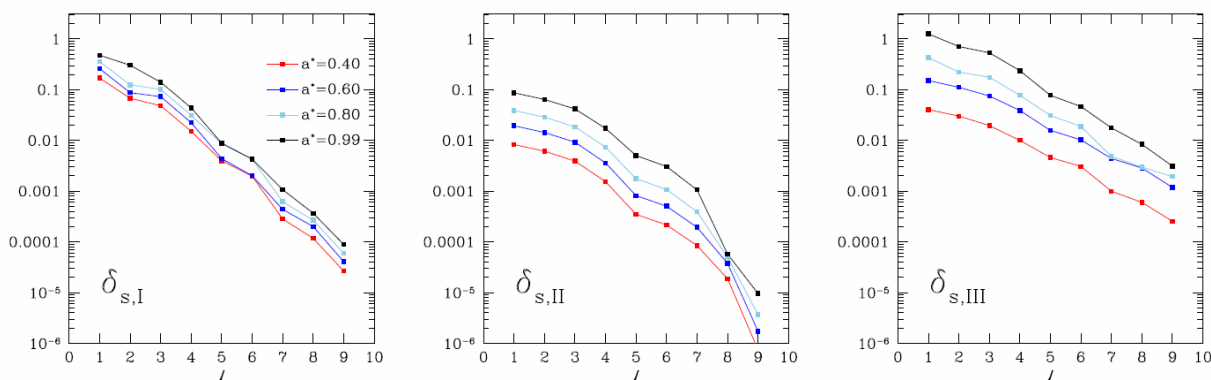
$$d_{s,III} = 2R_{s,III} - R_A + R_C = \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) \frac{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) - x_s \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1} - \tilde{A} \tilde{C}}{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} (1 - P_{\ell}(x_s) x_s)}, \quad (18)$$

$$\delta_{s,III} = \frac{d_{s,III}}{R_{s,III}} = 2 \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) \frac{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) - x_s \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1} - \tilde{A} \tilde{C}}{\tilde{A}^2 - 2x_s \tilde{A} \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) + \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right)^2}, \quad (19)$$

бу ерда  $x_s$  – қуйидаги тенгламанинг ечими.

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x) x - \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} \frac{dP_{\ell}(x)}{dx} (1 - x^2) = 0. \quad (20)$$

2-расмда айланувчи Керр қора ўраси сояси учун ҳисобланган ўлчамсиз сиқилиш параметрларининг қатор коэффицентлари  $\ell$  га боғлиқлиги келтирилган. 2-рамдаги учта график  $\delta_{s,I}$ ,  $\delta_{s,II}$  ва  $\delta_{s,III}$  сиқилиш параметрларига мос келади. Ушбу боғланишдан қаторнинг даражаси ортиши билан мос ҳаднинг қиймати камайиб боришини кўриш мумкин. Шунингдек, қора ўра айланиш параметрининг ошиши билан сиқилиш параметри модулининг ошиши ҳам кузатилади.



**2-расм.** Айланувчи қора ўра айланиш параметрларининг турли қийматлари учун сиқилиш параметрининг қатор коэффицентлари даражасига боғлиқлиги.

Деформацияланган қора ўра атрофидаги стационар аксиал симметрик, асимптотик ясси, вакуум фазо-вақтини тавсифловчи метрика Бойёр-Линдквист координатларида қуйидаги кўринишга эга

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2} \right) (1+h) dt^2 - \frac{4aMr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h) dt d\varphi + \frac{\Sigma^2 (1+h)}{\Delta + a^2 h \sin^2 \theta} dr^2 + \Sigma^2 d\theta^2 + \left[ \Sigma^2 + \frac{a^2 (\Sigma^2 + 2Mr) \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h) \right] \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (21)$$



бу ерда  $S^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \vartheta$ ,  $D = r^2 - 2Mr + a^2$ ,  $h = eM^3r/S^4$ ,  $e$  – деформация параметри.  $e > 0$  ва  $e < 0$  ҳолатлар мос ҳолда Керр қора ўрасига нисбатан қавариқ ёки ботиқ объектларга тўғри келади.  $e = 0$  ҳолда қора ўра одатий умумий нисбийлик назарияси доирасидаги Керр қора ўрасига ўтади. Электромагнит майдоннинг 4-вектор потенциали  $A_\mu$  қуйидаги кўринишга эга:

$$A_0 = -aB \frac{\Sigma^2 - 2Mr + Mr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h), \quad A_1 = 0, \quad A_2 = 0, \quad (22)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} B \sin^2 \theta \left[ \Sigma^2 + \frac{(2Mr + \Sigma^2) \sin^2 \theta - 4Mr}{\Sigma^2} a^2 (1+h) \right]. \quad (23)$$

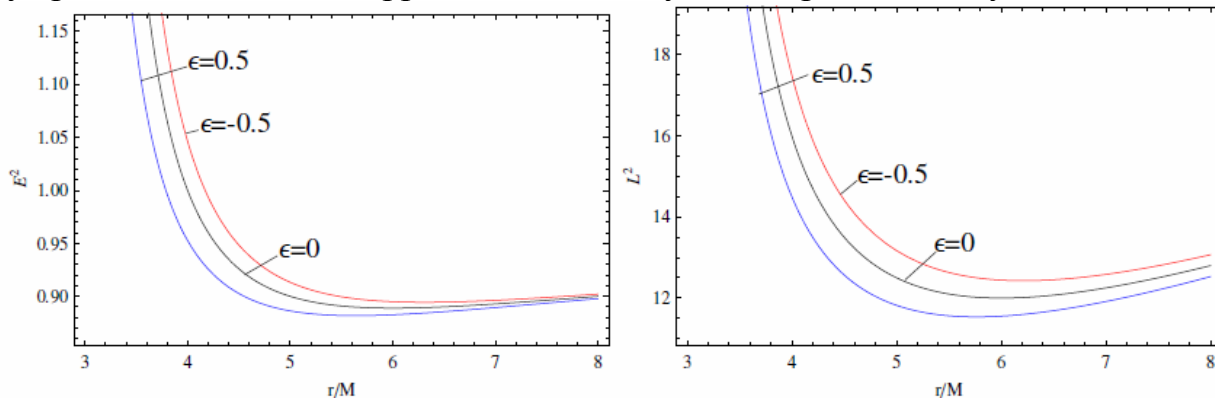
Деформацияланган қора ўра атрофидаги зарядланган зарраларнинг ҳаракати Гамильтон-Якоби тенгламалари орқали топилган

$$g^{\mu\nu} \left( \frac{\partial S}{\partial x^\mu} - eA_\mu \right) \left( \frac{\partial S}{\partial x^\nu} - eA_\nu \right) = -m^2, \quad (24)$$

бу ерда  $e$  ва  $m$  синов заррасининг мос ҳолда электр заряди ва массаси. Вақтсимон ва фазосимон Киллинг векторларининг мавжудлиги синов зарраси учун таъсирни қуйидаги кўринишда ёзиш имконини беради

$$S = -Et + L\varphi + S_{r\varphi}(r, \varphi), \quad (25)$$

бу ерда  $E$  ва  $L$  – синов заррасининг сақланувчи энергия ва импульс моменти.



**3-расм.** Деформация параметрининг турли қийматлари учун қора ўралар атрофида доиравий орбита бўйлаб ҳаракатланаётган зарраларнинг энергияси (чапда) ва импульс моментларининг (ўнгда) радиал ўзгариши.

3-расмда деформация параметрининг турли қийматлари учун қора ўралар атрофида экваториал текисликда доиравий орбита бўйлаб ҳаракатланаётган зарраларнинг энергияси ва импульс моментларининг радиал ўзгариши келтирилган. Ушбу расмдан деформация параметрининг манфий қийматларида синов зарраси доиравий орбитада қолиши учун

каттароқ энергияга эга бўлиш даркорлиги кўринади. Бу манфий деформация параметри ҳисобига гравитацион потенциалнинг ортиши натижасидир.

Ишда, шунингдек, стабил доиравий орбиталар радиусларининг  $\rho_{ISCO} = r_{ISCO} / M$  ифодалари топилган,

$$\rho_{ISCO} = 6 - \frac{2\varepsilon}{9} + O(\varepsilon^2), \quad (26)$$

Астрофизикадаги магнит  $b = eVM/m \gg 1$  бўлган ҳолатларда  $\rho_{ISCO}$  куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\rho_{ISCO} = 1 + \frac{1 - 2a^2/M^2 - \varepsilon}{\sqrt{6b}} + O(b^{-2}, \varepsilon^2), \quad (27)$$

Шунингдек, биринчи бобда гравитомагнит зарядга эга бўлган қора ўра атрофида бирининг массаси  $m$  ва электр заряди  $e$  бўлган ҳамда доиравий орбитада ҳаракатланаётган иккита зарранинг марказий тўқнашиши ҳам кўриб ўтилган. Иккинчи электр жиҳатдан нейтрал бўлган зарра эса қора ўрага чексизликдан келиб тушади. Тўқнашувчи зарраларнинг масса маркази энергияси куйидаги кўринишга эга:

$$\frac{E_{c.m.}}{m} \cong 0.3 \sqrt{\frac{96 - l^2}{\sqrt{8 + l^2}}} b^{1/4}, \quad (28)$$

бу ерда  $l$  – марказий қора ўранинг гравитомагнит заряди.

Диссертациянинг «**Плазма мавжудлигидаги қора ўраларнинг оптик хоссалари**» деб номланган иккинчи бобида қора ўра атрофидаги плазманинг унинг оптик хусусиятларига таъсири ўрганилган.

Айланувчи қора ўра атрофидаги фазо-вақт куйидаги метрика орқали тавсифланади:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2}\right) dt^2 - \frac{4aMr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} dt d\varphi + \frac{\Sigma^2}{\Delta} dr^2 + \Sigma^2 d\theta^2 + \left[\Sigma^2 + \frac{a^2(\Sigma^2 + 2Mr)\sin^2 \theta}{\Sigma^2}\right] \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (29)$$

бу ерда  $M$  ва  $a$  – қора ўранинг массаси ва солиштирма бурчак моменти.

Аксиал қора ўра атрофида плазмани кўриб чиқамиз. Плазманинг синдириш кўрсаткичи –  $n = n(x^i, \omega)$ , бу ерда  $\omega$  –  $u^\alpha$  тезликка эга бўлган кузатувчи томонидан ўлчанган фотон частотаси. Фотоннинг эффефектив энергияси  $\hbar\omega = -p_\alpha u^\alpha$  кўринишга эга. Плазманинг синдириш кўрсаткичи тўрт ўлчамли импульснинг функцияси кўринишда куйидагича ифодаланади:

$$n^2 = 1 + \frac{P_\alpha P^\alpha}{(p_\beta u^\beta)^2}, \quad (30)$$

плазма йўқ бўлганда синдириш кўрсаткичи  $n=1$  га тенг. Плазмадаги қора ўра атрофида ҳаракатланаётган фотоннинг гамильтониани қуйидаги кўринишга эга:

$$H(x^\alpha, p^\alpha) = \frac{1}{2} \left[ g^{\alpha\beta} p_\alpha p_\beta + (n^2 - 1) (p_\beta u^\beta)^2 \right] \quad (31)$$

Плазманинг синдириш кўрсаткичи учун қуйидаги ифодани ишлатамиз

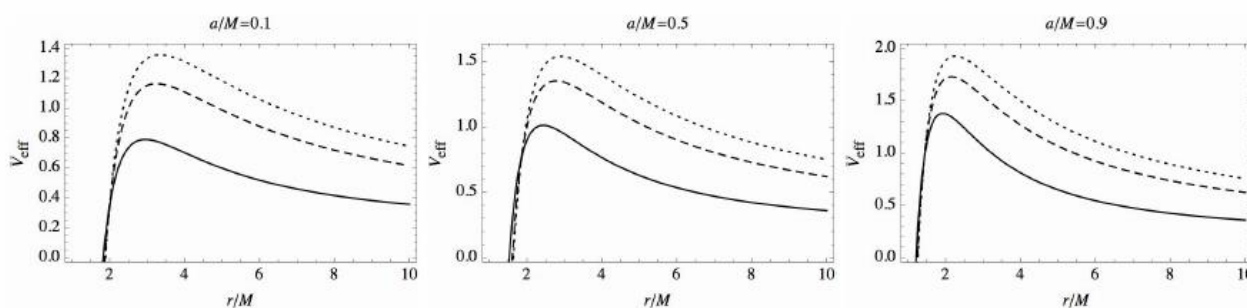
$$n^2 = 1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}, \quad (32)$$

бу ерда  $\omega_e$  – плазма частотаси.

Берилган фазо-вақтнинг геометриясида фотон ҳаракат тенгламаларини аниқлаш учун Гамильтон-Якоби тенгламаларидан фойдаланамиз

$$\frac{\partial S}{\partial \sigma} = -\frac{1}{2} \left[ g^{\alpha\beta} p_\alpha p_\beta - (n^2 - 1) (p_0 \sqrt{-g^{00}})^2 \right], \quad (33)$$

бу ерда  $p_\alpha = \partial S / \partial x^\alpha$ .



**4-расм.** Айланиш параметри ва плазма синдириш кўрсаткичининг турли қийматлари учун фотон радиал ҳаракати эффектив потенциалнинг радиал ўзгариши; бу ерда эффектив потенциал  $V_{\text{eff}}$  фотон энергияси  $E$  га нисбатан нормаллаштирилган

4-расмда айланиш параметри ва плазма синдириш кўрсаткичининг турли қийматлари учун фотон радиал ҳаракати эффектив потенциалнинг радиал ўзгариши келтирилган. Рамда келтирилган графикларда нуқтавий, пунктир ва узлуксиз чизиқлар мос ҳолда  $n^2 = 0.2; 0.44; 0.89$  қийматларга тўғри келади. 4-расмдан синдириш кўрсаткичининг камайиши билан доиравий орбиталарнинг радиуслари камайиши кўрсатилган.

Қора ўранинг атрофида плазма бўлган ҳолдаги сояларини кўриб чиқамиз. Агар плазма билан ўралган қора ўра ёруғлик манбаси кузатувчи орасида жойлашса, кузатувчи ёрқин фонда қора доғни кўриши мумкин. Кузатувчи асбоби қора ўранинг фотонларни ютиши ҳисобига юзага келувчи қора соҳанинг атрофидан келувчи фотонларни қайд этади. Ушбу доғ қора ўранинг соясига тўғри келади ва унинг чегараси қора ўра атрофида фотонларнинг ҳаракат тенгламаси орқали топилиши мумкин.

Плазма билан қуршалган қора ўра соясининг кўринма шаклини топиш учун ёпиқ орбиталарни қараб чиқамиз. Ҳаракат тенгламалари сақланувчи катталиқлар – энергия  $E$ , бурчак моменти  $L$  ва интеграллаш доимийси  $K$  га

боғлиқ бўлгани учун нормаллаштирилган катталиклардан  $\xi = L/E$  ва  $\eta = K/E^2$  фойдаланамиз.

Плазма мавжудлигида қора ўра соясининг шаклини қуйидаги шартлар орқали топиш мумкин.

$$u^r = 0, \quad \frac{du^r}{dr} = 0, \quad (34)$$

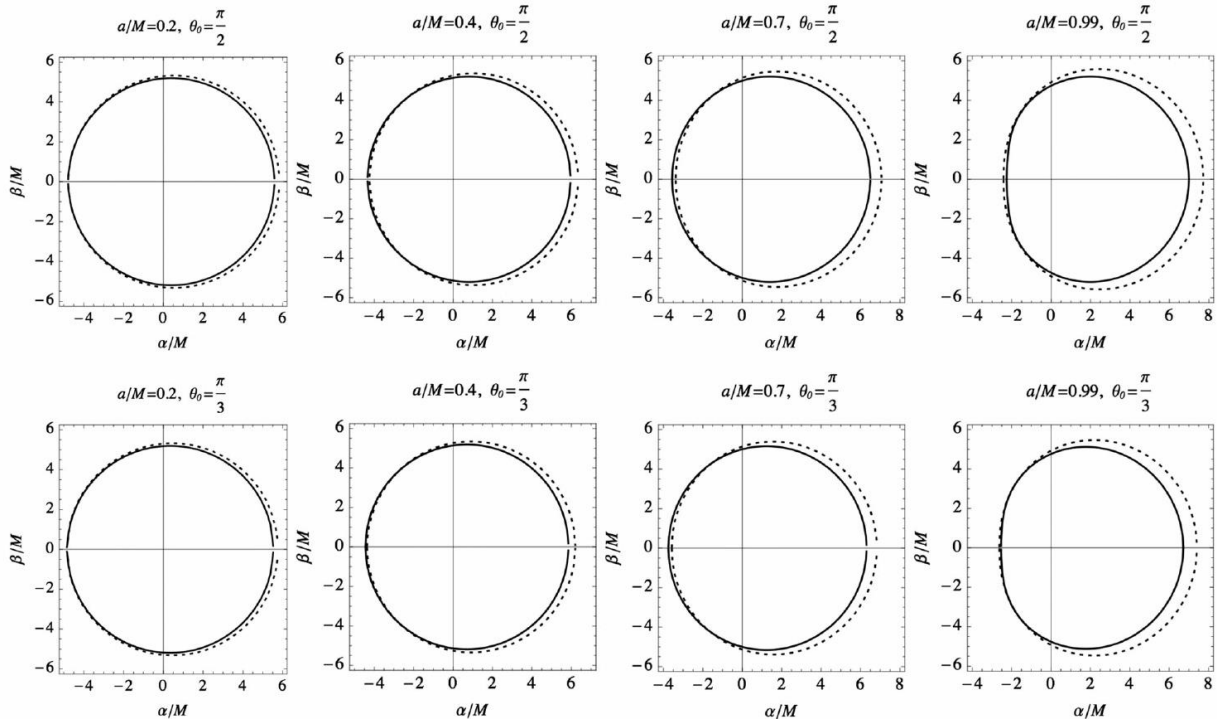
бу ерда  $u^r$  – фотон радиал ҳаракатининг тенгламаси.

Соянинг чегараси ҳаракат тенгламалари орқали ифодаланиши мумкин. Шнга қарамай, соя кузатувчининг «осмон текислиги»да кузатилади ва у осмон координаталари орқали тавсифланади

$$\alpha = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} \left( -r_0^2 \sin \theta_0 \frac{d\phi}{dr} \right), \quad \beta = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} \left( -r_0^2 \frac{d\theta}{dr} \right), \quad (35)$$

бу ерда  $r_0$  - қора ўрадан кузатувчигача бўлган масофа,  $\theta_0$  - қора ўра айланиш ўқининг кузатув текислигига оғиш бурчаги.

5-расмда қора ўра айланиш параметри ва оғиш бурчагининг турли қийматлари учун айланувчи қора ўранинг соялари шакллари келтирилган. 5-расмдан айланиш параметри ва оғиш бурчагининг ўзгариши соя шаклида сиқилишларнинг пайдо бўлишига олиб келиши кўриниб турибди. Бу фотонларнинг қора ўра гравитацион майдонида қизилга силжиш эффекти билан боғлиқдир.



5-расм. Қора ўраларнинг соялари: плазма бўлмаган (узлуксиз чизиқлар) ва плазма бўлган (пунктир чизиқлар) ҳоллар учун

Диссертациянинг «Хоржава-Лифшиц гравитацион моделидаги қора ўралар атрофида энергетик жараёнлар» деб номланган учинчи бобида Хоржава модели доирасида айланувчи қора ўралар атрофида энергетик жараёнлар ўрганилган. Кехагиас-Сфетсос фазо-вақти геометриясининг

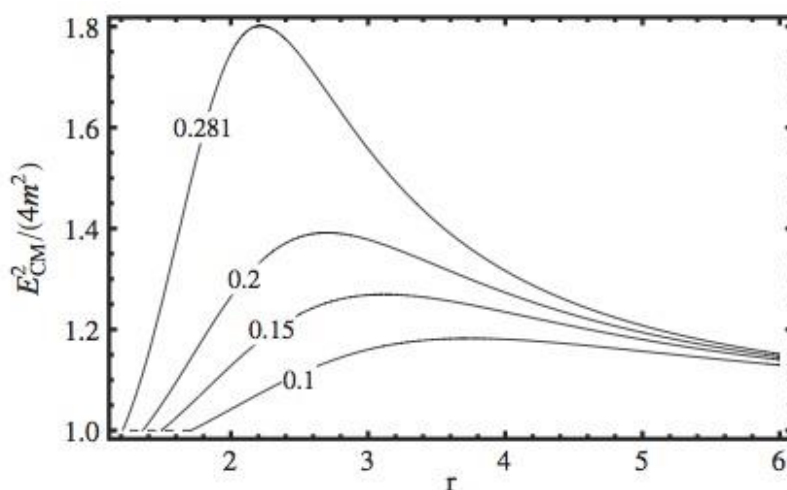
тахлили келтирилган. Хоржава гравитацион модел доирасидаги сферик-симметрик қора ўра атрофидаги фазо-вақтни тавсифловчи Кехагиас-Сфетсос (КС) метрикаси сферик координаталарда қуйидагича кўринишга эга.

$$ds^2 = - \left( 1 + r^2 \omega \left[ 1 - \left( 1 + \frac{4M}{\omega r^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) dt^2 + \left( 1 + r^2 \omega \left[ 1 - \left( 1 + \frac{4M}{\omega r^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2), \quad (36)$$

бу ерда  $\omega$  – Хоржава гравитацияси тузатмалари ҳисобига пайдо бўлувчи параметр.

КС фазо-вақтида фотонлар ҳаракати тенгламаси олинган. Ҳаракат тенгламалари зарраларнинг юқори энергетик тўқнашишларини ўрганишда ишлатилган. Учта характерли ҳолатлар учун масса маркази энергиялари ҳисоблаб чиқилган. Улардан иккитаси экстремал КС фазо-вақти атрофида тўқнашишлар рўй бериш ҳолатларини тадқиқ этади. Бунда чексизликдан радиал йўналишда келаётган зарралар ( $E = m$  ва  $L = 0$ ) доиравий орбитада ҳаракатланаётган зарра билан ёки иккита радиал йўналишда келаётган зарраларнинг ўзаро тўқнашиш масалалари кўрилган. Учинчи ҳолатда эса зарралар экваториал текисликда қарама-қарши йўналишларда доиравий орбиталар бўйлаб ҳаракатланишади. Бунда уларнинг бурчак моментлари ишоралари ҳар-хил ва орбиталари радиал бурилиш нуктасида жойлашган. Соддалик учун тинчликдаги энергияси бир хил бўлган иккита заррани кўриб чиқамиз. Масса маркази энергияси ифодаси қуйидаги кўринишга эга:

$$E_{c.m.} = 2m^2 \left( 1 - g_{\alpha\beta} u_1^\alpha u_2^\beta \right) \quad (37)$$



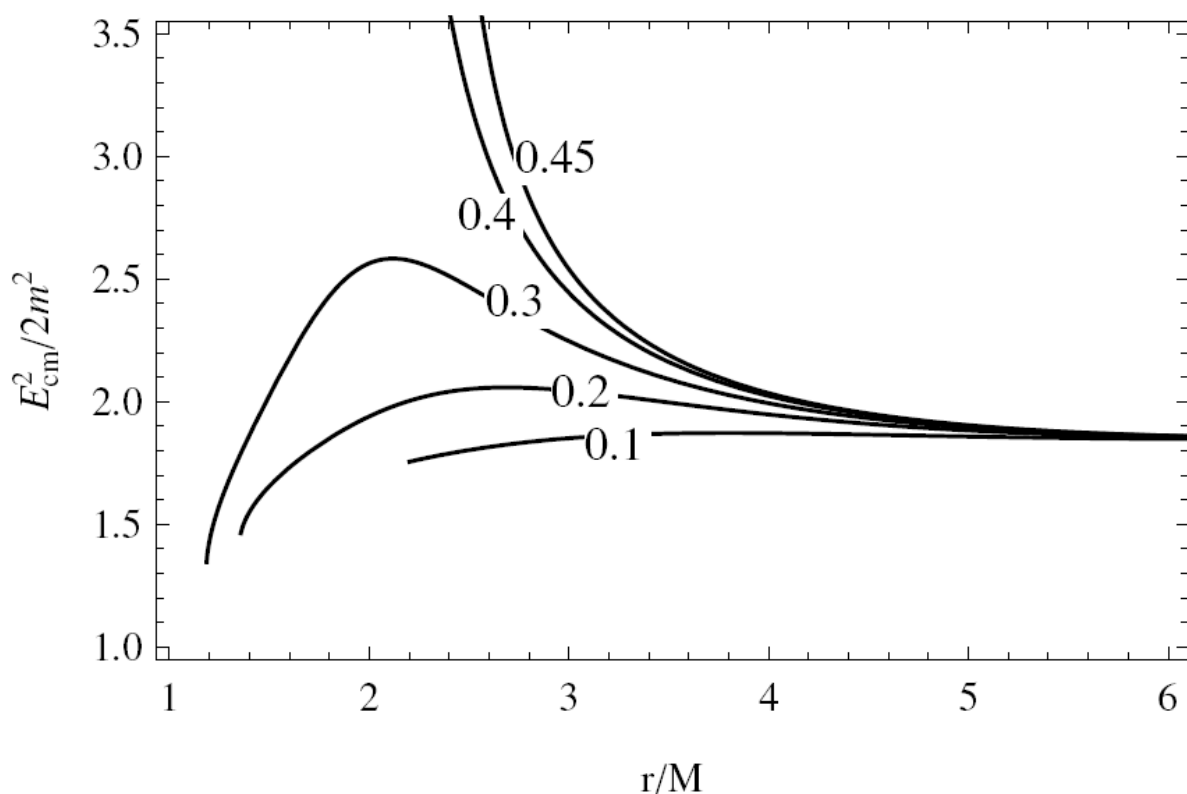
6-расм.  $\omega = 0,1, 0,15, 0,2,$  ва  $0,281$  қийматлар учун Кеплер орбитада ҳаракатланаётган ва радиал йўналишда келаётган иккита зарраларнинг масса маркази энергиясининг радиал ўзгариши

6-расмда доиравий орбитада ҳаракатланаётган ва радиал йўналишда келаётган иккита зарраларнинг масса маркази энергиясининг радиал

ўзгариши келтирилган. Кўриниб турибдики,  $\omega$  параметрнинг камайиши билан энергиянинг максимал қиймати ҳам камайиб борапти. Шунингдек,  $\omega$  параметрнинг камайиши билан максимумнинг жойлашиши ҳам силжиши кузатилмоқда.

7-расмда магнит майдон  $b$  ва  $\omega$  параметрнинг бир неча характерли қийматлари учун зарраларнинг масса маркази энергияларининг радиал ўзгариши келтирилган. Бунда ташқи асимптотик бир жинсли магнит майдонда жойлашган КС очик сингулярлиги атрофида зарраларнинг тезлашиш жараёнига гравитацион ва электромагнит майдонларининг таъсирида масса маркази энергиясининг сезиларли ошишини кузатиш мумкин.

Шунингдек, ушбу бобда Хоржава гравитацион модель доирасида олинган айланувчи қора ўра ечими тавсифи, айланувчи қора ўра эргосферасининг хоссалари ва энергия ажралиб чиқишининг Пенроуз жараёнлари тадқиқ этилган. Экстремал айланувчи қора ўра атрофида зарраларнинг юқори энергияларга тезлашиш механизмлари ўрганилган.



7-расм. Магнит майдон  $b = 0.1$  характерли қиймати учун зарраларнинг масса маркази энергияларининг радиал ўзгариши.

Диссертациянинг «Магнитланган нейтрон юлдузлар электродинамикаси ва секинлашиши» деб номланган тўртинчи бобида айланувчи ва магнитланган ғалати юлдузнинг электромагнит нурланишига умумий нисбийлик назариясининг эффектлари баён қилинган. Бунда электромагнит нурланиш ғалати юлдузнинг дипол конфигурациясига эга

бўлган магнит майдонига нисбатан оғиш бурчак остида айланиши ҳисобига вужудга келади. Ғалати юлдузнинг компактлик параметри юлдузнинг электромагнит нурланиши натижасида энергия йўқотишига сезиларли таъсир кўрсатиши (шундай массали нейтрон юлдузнинг электромагнит нурланиш ҳисобига энергия йўқотишидан ўнлаб фоиз фарқ қилиши мумкинлиги) аниқланди. Бу келажакда ғалати юлдузларни пульсарларнинг секинлашишини кузатиш ёрдамида аниқлаш имконини беради.

Айланувчи ғалати юлдузнинг электромагнит магнитодиполь нурланиши ҳисобига секинланишини кўриб чиқамиз. Бунда магнитланган юлдуз магнитодиполь нурланиш ҳисобига пульсар каби кузатилади, деб фараз қиламиз. Диполь нурланиш ҳисобига релятив юлдузнинг ёрқинлиги ёки диполь электромагнит нурланишнинг куввати қуйидагига тенг:

$$L_{em} = \frac{W_R^4 R^6 \tilde{B}_0^2}{6c^3} \sin^2 \zeta, \quad (38)$$

бу ерда тилда умумий нисбийлик назарияси тузатмаси ҳисобига мос катталиқнинг ўзгарган қийматини билдиради,  $R$  индекс эса мос катталиқнинг  $r=R$  даги қийматини англатади ва  $\chi$  – магнит майдон ва айланиш ўқлари орасидаги оғиш бурчаги ҳисобланади.

Юлдуз энергиясининг диполь нурланиши ҳисобига йўқотилишининг Ньютон механикасидаги ифодасини қарасак,

$$(L_{em})_{Newt} = \frac{W^4 R^6 B_0^2}{6c^3} \sin^2 \zeta, \quad (39)$$

(18) ифодадаги релятив тузатмалар қисман магнит майдоннинг юлдуз сиртида кучайиши

$$\frac{\tilde{B}_0}{B_0} = \frac{\tilde{B}_0 R^3}{2\mu} = f_R = -\frac{3R^3}{8M^3} \left[ \ln N^2 R + \frac{2M}{R} \left( 1 + \frac{M}{R} \right) \right], \quad (40)$$

ва қисман айланишининг эффектив бурчак тезлигининг ошиши ҳисобига эканлигини кўриш мумкин:

$$\Omega(r) = \Omega_R \frac{N_R}{N} = \Omega_R \sqrt{\left( \frac{R-2M}{r-2M} \right) \frac{r}{R}}. \quad (41)$$

Энергия йўқотишни пульсарлар кузатув характеристикалари билан боғлиқ бўлган қулай кўринишда ифодалаш ҳам мумкин: айланиш даври  $P$  ва унинг вақт бўйича ҳосиласи  $\dot{P} = dP/dt$ . 1-жадвалда берилган натижалардан кўришиб турибдики, ғалати юлдузлар одатий нейтрон юлдузларга нисбатан 5 марта тезроқ секинлашаркан. Астрофизик кузатувлар кўпгина пульсарлар 1 с айланиш даврига ва  $10^{-16}$  до  $10^{-14}$  атрофида даврининг ҳосиласига эга бўладилар. Даврлар ҳосиласининг ўзгариш диапазони икки тартибда ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда нейтрон юлдузлар даврларининг ҳосилалари о

Айланувчи ғалати юлдуз атрофида плазма магнитосферасини мавжуд деб билиб, унинг очик куч чизиклар буйича плазма оқимининг ҳисобига секинланишини ҳисоблайлик.

Релятивистик зарралар оқимининг тўлиқ оқим ифодасини назарга олиб, ёрқинликнинг максимал қийматини ҳисоблаш мумкин:

$$(L_p)_{\max} = \frac{3}{2} \kappa(1 - \kappa)L_{em}, \quad (42)$$

бунда  $k = 2I / R^3$  – инерция моменти  $I$  бўлган юлдузнинг компактлик параметри.

#### 1-жадвал

$(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$  боғланишининг компакт объектлар турли параметрларга боғлиқлиги: массаси (Қуёш массаси бирликларида), ғалати  $(R_{SS}, I_{SS})$  ва нейтрон  $(R_{NS}, I_{NS})$  юлдузларнинг радиуси ва инерция моментлари.

$(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$	4,34463	4.53723	5.1094	6.16863
$M / M_{\square}$	1.2	1.3	1.4	1.5
$R_{SS}, km$	7.48	7.62	7.69	7.68
$R_{NS}, km$	11.75	11.72	11.7	11.68
$I_{SS}, \times 10^{45} gm cm^2$	0.65	0.74	0.825	0.9
$I_{NS}, \times 10^{45} gm cm^2$	1.08	1.2	1.36	1.72

Нейтрон ва ғалати юлдузларнинг массалари, радиуси ва инерция моментлари қийматларидан фойдаланиб, уларнинг секинлашиши ҳисобланган. 2-жадвалдаги натижалардан кўришиб турибдики, плазма магнитосфераси мавжуд бўлганда ғалати юлдуз нейтрон юлдузга нисбатан кўра 5 марта секинлашаркан.

#### 2-жадвал

Плазма магнитосфераси мавжудлигида  $(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$  боғланишининг компакт объектлар турли параметрларига боғлиқлиги: массаси (Қуёш массаси бирликларида), ғалати  $(R_{SS}, I_{SS})$  ва нейтрон  $(R_{NS}, I_{NS})$  юлдузларнинг радиуси ва инерция моментлари

$(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$	0,2053	0.2165	0.2199	0.2146
$M / M_{\square}$	1.2	1.3	1.4	1.5
$R_{SS}, km$	7.48	7.62	7.69	7.68
$R_{NS}, km$	11.75	11.72	11.7	11.68
$I_{SS}, \times 10^{45} gm cm^2$	0.65	0.74	0.825	0.9
$I_{NS}, \times 10^{45} gm cm^2$	1.08	1.2	1.36	1.72



Олинган натижаларнинг муҳим қўлланиши тариқасида секин айланувчи ғалати юлдузнинг энергия йўқотиши ҳисобланди. Умумий нисбийлик доирасида ғалати юлдузлар нейтрон юлдузларга нисбатан кўпроқ энергия йўқотиши аниқланди. Олинган натижалар пульсарлар секинлашиши тўғрисидаги астрофизик кузатувлар натижалари билан биргалик ғалати юлдузларнинг келгусида аниқланиши бўйича тадқиқотларда фойдали бўлади.

Магнитланган юлдуз кутб қалпоғидан плазма оқимининг ҳисобига энергия йўқотиши кутб соҳасининг умумий юзаси билан аниқланади. Шунинг учун энергия йўқотиши плазманинг кинетик энергияси ва кутб қалпоғининг юзасига боғлиқ бўлади. Умумий нисбийлик назарияси тузатмалари плазма оқимининг кучайишига олиб келсада (юлдуз сиртидаги магнит майдон қийматининг ошиши ҳисобига), умумий нисбийлик назарияси доирасида кутб қалпоғининг юзаси камаяди ва плазма энергия зичлигининг ортиши кутб соҳасининг камайишини компенсациялай олмайди. Натижавий энергия йўқотишлар умумий нисбийлик доирасида анча камаяди. Ғалати юлдузларда компакт параметри нейтрон юлдузларникидан катта бўлганлиги сабабли, ғалати юлдузларда энергия йўқотиш секинроқ рўй беради.

**Иловаларда** ташқи магнит майдондаги деформацияланган қора ўралар атрофида электромагнит майдонлар учун аниқ ифодалари; айланмайдиган гравитомагнит зарядга эга бўлган қора ўралар атрофида электр ва магнит майдонлар ифодалари; ташқи магнит майдондаги Кехагиас-Сфетсос очик сингулярлиги атрофида электромагнит майдон потенциали ифодалари; ташқи магнит майдондаги Кехагиас-Сфетсос очик сингулярлиги атрофида фотонлар ва зарраларнинг ҳаракати.

## ХУЛОСА

«Аксиал-симметрик компакт гравитацион объектлар атрофидаги заррачалар ва электромагнит майдонлар» мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Қора ўралар соялар шаклини тавсифлаш учун координатага боғлиқ бўлмаган янги формализм тузилган, бунда соянинг шакли кутб координаталар тизимида Лежандр полиномлари орқали ифодаланишига асосланган. Айланувчи қора ўраларнинг сояларини 0,1% аниқлик билан тавсифлаш учун қатор полиноми коэффициентларининг дастлабки бештаси етарли экани аниқланган. Янги формализм соянинг хоссалари ҳақида билимларга асосланмаган ва эгри чизиқни характерловчи бир нечта сиқилиш параметрлари таърифини таклиф этади. Таклиф этилган соя шаклининг сиқилиш параметрлари шовқин сигналига нисбатан турғунлиги кўрсатилган, ушбу параметрлар кузатувша олиниши кутилаётган тасвирларни юқори аниқликда таҳлил этиш имконини беради.

2. Ташқи асимптотик бир жинсли магнит майдондаги айланувчи деформацияланган қора ўраларнинг вакуум электромагнит майдонлари учун аналитик ифодалар топилган. Деформацияланган қора ўралар атрофида

индукцияланган электр майдони деформация параметрига чизиқли, магнит майдон эса ушбу параметрнинг квадратига мутаносиблиги аниқланган. Ушбу маълумотлар кузатувлар ёрдамида деформацияланган қора ўраларни ажратиб олиш имконини беради.

3. Ички турғун доиравий орбиталарни кузатув натижалари назарий олинган натижаларни таққослаш йўли билан айланувчи деформацияланган қора ўранинг деформация параметрига юқори чегара қуйидаги кўринишда олинди:  $\varepsilon \leq 22$ .

4. Бир жинсли бўлмаган плазма мавжудлигида айланувчи қора ўралар сояларининг шакллари олинди. Ушбу соя шаклларидаги қўшимча асимметриялар плазма ва марказий компакт объект параметрлари тўғрисида маълумотлар олиш имконини беради.

5. Гравитамагнит заряд ва ташқи магнит майдон мавжудлигида қора ўра атрофидаги зарядланган зарраларнинг энергия ва импульс моменти ҳамда ички турғун доиравий орбиталарнинг ифодалари топилган. Гравитомагнит заряд таъсири заррачалар чексизликкача тезлашишининг олдини олиши кўрсатилган. Ушбу натижалардан релятив джетларни тавсифловчи моделларини яратишда фойдаланиш мумкин.

6. Плазма билан қуршалган қора ўра соясининг кузатилувчи шакли (а) плазма параметрига, (б) қора ўранинг айланиш параметрига ва (в) қора ўра айланиш ўқининг кузатув текислигига оғиш бурчагига боғлиқ бўлиши кўрсатилган. Қора ўра соясининг ўлчами электромагнит нурланишнинг плазма муҳитида синиши ҳисобига камайиши кўрсатилган. Ўлчамсиз плазма параметрининг ортиши билан қора ўра нурланиш энергияси интенсивлиги камайиши аниқланган. Ушбу натижалар қора ўралар сояларидаги қўшимча асимметриялар табиатини тушунтиришда қўлланилиши мумкин.

7. Ўта юқори энергетик жараёнларда юқори самарадорликка эришиш учун ҳодисалар горизонтининг бўлмаслиги ва кучли айланишнинг бўлиши даркорлиги кўрсатилган. Зарраларнинг юқори энергияларга эришиши қўшимча зарядланган зарраларга таъсир этувчи электромагнит жараёнларнинг ҳисобига рўй бериши мумкин.

8. Хоржава моделида энергия ажралиш механизмлари орасида Пенроуз жараёни орқали қора ўрадан энергия ажралиб чиқиши ҳақиқатга яқинроқлиги кўрсатилган. Бундан ташқари Хоржава модели қўшимчасининг таъсири заррачалар чексизликкача тезлашишининг олдини олиши кўрсатилган ва ушбу маълумотлардан компакт объектлар энергетикасини моделлаштиришда фойдаланиш мумкин.

9. Релятив юлдузнинг электромагнит энергия қувватининг йўқотишига ғалати юлдузнинг компактлик таъсири муҳим эканлиги кўрсатилган. Умумий нисбийлик назарияси доирасида ғалати юлдуз худди шундай айланувчи нейтрон юлдузга нисбатан кўпроқ энергия йўқотиши аниқланган. Олинган натижалар келгусида ғалати юлдузларни аниқлаш тадқиқотларида ишлатилиши мумкин.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ по ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК 14.07.2016.ФМ.01.05 при НАЦИОНАЛЬНОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

---

**АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**АБДУЖАББАРОВ АХМАДЖОН АДИЛЖАНОВИЧ**

**ЧАСТИЦЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ  
АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ КОМПАКТНЫХ  
ГРАВИТАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**01.03.01 – Астрономия,  
01.04.02 – Теоретическая физика  
(физико-математические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

**Ташкент – 2016**

**Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером 28.04.2016/В2016.2.ФМ31.**

Докторская диссертация выполнена в Институте ядерной физики и Астрономическом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице Научного совета ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный консультант:** **Ахмедов Бобомурат Жураевич**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Мусаханов Мирзаюсуф Мирзамахмудович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
академик АН РУз

**Туракулов Зафар Ялкинович**  
доктор физико-математических наук

**Абишев Медеу Ержанович**  
доктор физико-математических наук

**Ведущая организация:** **Институт физики в Опаве**  
г. Опава, Чешская Республика

Защита диссертации состоится 28 октября 2016 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета 14.07.2016.ФМ.01.05 при Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100174, г. Ташкент, Вузгородок, Физический факультет, 122-аудитория Тел.: (+99871) 289-31-18; факс: (+99871) 289-38-21; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Национального университета Узбекистана (регистрационный номер \_\_\_\_), с докторской диссертацией можно ознакомиться в ИРЦ (Адрес: 100214, г.Ташкент, поселок Улугбек, НУУз. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2016 г.).

**Ш.А. Эгамбердиев**

Зам. председателя Научного совета по присуждению  
ученой степени доктора наук д.ф.-м.н., профессор

**Р. Ярмухамедов**

Ученый секретарь Научного совета по присуждению  
ученой степени доктора наук д.ф.-м.н., профессор

**И. Хидиров**

Председатель научного семинара при Научном совете  
по присуждению ученой степени доктора наук д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Современные астрономические наблюдения на мировом уровне на земных и космических телескопах и недавние открытия представили убедительное доказательство того, что черные дыры имеют значительное влияние на близлежащие объекты вокруг, излучая мощные гамма-всплески, поглощая ближайшие звезды, и стимулируя рост числа новых звезд в близлежащих районах. Исследование движение фотонов вокруг вращающихся черных дыр, в частности, нахождение и анализ формы силуэтов этих объектов, постановка и эффективное осуществление соответствующих радионаблюдений по доказательству существования горизонта событий черных дыр и извлечению информации о центральном объекте в нашей галактике в рамках международных проектов Black Hole Cam (BHC) и Event Horizon Telescope (EHT) являются одним из важных задач современной астрофизики.

В годы независимости уделено большое внимание на развития теоретической физики и астрономии и на проведения фундаментальных исследований по этим направлениям на мировом уровне. В этом плане удалось достичь значимым результатам в области релятивистской астрофизики, в частности, по разработке модели магнитосферы нейтронной звезды, анализу структуры пространства-времени и движению пробных частиц вокруг черных дыр

Изучение астрофизических процессов в окрестности компактных объектов и сравнение их с наблюдательными данными является в настоящее время наиболее важным в изучении астрофизику компактных объектов. Важнейшими задачами является проведение цельных научно-исследовательских работ, в частности исследований по следующим направлениям: поиск точных решений описывающих пространство-время вокруг компактных гравитационных объектов; анализ структуры пространства-времени в рамках этих решений и поиск уравнения движения пробных частиц, в частности фотонов; определения силуэтов черных дыр в рамках общей теории относительности и альтернативных теорий гравитации; определение влияния параметров центрального объекта и плазменную среду на формы силуэта; выявить зависимость потерь энергии релятивистской звезды от выбора гравитационной модели. Именно эти задачи обосновывают актуальность на мировом уровне данного научного исследования.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам утвержденных в государственных нормативных документах, в Указах Президента Республики Узбекистан за № УП-559 «О высокогорных астрономических обсерваториях и комплексах их обслуживания» от 11 февраля 1993 года, за № УП-4512 «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» от 1 марта 2013 года.

**Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан – II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>2</sup>.** Научные исследования конфигурации и структуры электромагнитных полей во внешнем асимптотически однородном магнитном поле, а также силуэтов вращающихся черных дыр проводятся ведущими мировыми научными центрами и высшими образовательными учреждениями, в том числе, Астрономическим институтом, Центром А.Эйнштейна и Силезийским университетом в Опаве (Чехия), Университетом Альберты (Канада), Институтом Макса Планка гравитационной физики им. А.Эйнштейна и Франкфуртским университетом (Германия), Межуниверситетским центром астрономии и астрофизики, Научной лабораторией по физике и Тата институтом фундаментальных исследований (Индия), Центром прикладных космических технологий и микрогравитации в Бремене и Университетом Ольденбурга (Германия), Государственным астрономическим институтом им. Штернберга Московского Государственного университета (Россия), Институтом ядерной физики, Астрономическим институтом и Национальным университетом Узбекистана (Узбекистан).

По исследованию движения частиц и электромагнитного поля вокруг черной дыры во внешнем магнитном поле на мировом уровне был получен ряд оригинальных научных результатов, в том числе: получены и исследованы свойства силуэтов вращающихся черных дыр в рамках общей теории относительности и модифицированных альтернативных теорий гравитации (Институт Макса Планка гравитационной физики им. А. Эйнштейна и Франкфуртский университет, Германия; Межуниверситетский центр астрономии и астрофизики, Научная лаборатория по физике, Тата институт фундаментальных исследований, Индия; Центр прикладных космических технологий и микрогравитации, Германия; Государственный астрономический институт им. Штернберга Московского Государственного университета, Россия, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Казахстан); найдены структуры электромагнитного поля вокруг вращающейся черной дыры, исследованы уравнения движения заряженных частиц вокруг вращающейся черной дыры при наличии внешнего магнитного поля (Астрономический институт, Центр А.Эйнштейна и Силезийский университет в Опаве, Чехия; Университет Альберты, Канада; Межуниверситетский центр астрономии и астрофизики, Индия; Центр прикладных космических технологий и микрогравитации, Бремен и Ольденбургский университет, Германия); проведено исследование

---

<sup>2</sup> Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации разработан на основе следующих источников: <http://arxiv.org>; <https://webofknowledge.com>; <https://scholar/google.com>. Ж. Physical Review Letters; Ж. Physical Review D; Ж. Monthly Notices of Royal Astronomical Society; Ж. Astrophysical Journal; Ж. Astrophysics and Space Science; Ж. International Journal of Modern Physics D; и др.

энергетических процессов в окрестности вращающихся черных дыр в рамках общей теории относительности и альтернативных теорий гравитации, в частности широко исследованы свойства пространства-времени вокруг черной дыры в гравитационной модели Хоржава (Центр А.Эйнштейна и Силезийский университет в Опаве, Чехия; Университет Альберты, Канада; Центр прикладных космических технологий и микрогравитации в Бремене, Институт Макс Планка по гравитационной физике имени Альберта Эйнштейна и Франкфуртский университет, Германия, Межуниверситетский центр астрономии и астрофизики, Научная лаборатория по физике, Тата институт фундаментальных исследований, Индия; Центр прикладных космических технологий и микрогравитации, Германия; Государственный астрономический институт им. Штернберга Московского Государственного университета, Россия, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Казахстан).

В настоящее время в мире по проблеме исследования силуэтов вращающихся черных дыр, движения частиц и энергетических процессов в окрестности компактных гравитационных объектов проводятся исследования по ряду приоритетных направлений, в том числе: исследование движения фотонов и получение силуэта вращающихся черных дыр в рамках общей теории относительности и альтернативных теорий гравитации и их анализ; теоретическое моделирование электромагнитных полей вокруг компактных гравитационных объектов и анализ движения частиц вокруг этих объектов; изучение энергетических процессов в окрестности вращающихся черных дыр при наличии внешнего электромагнитного поля; электромагнитное и гравитационное излучение от компактных гравитационных объектов.

**Степень изученности проблемы.** Силуэты вращающейся черной дыры для различных параметров центрального объекта, в частности электрического заряда, бран заряда, магнитного заряда, в рамках альтернативной теории гравитации исследованы многими учеными, например японскими (К. Hioki, К. Maeda), американскими (J. Bardeen), голландскими (H. Falcke), немецкими (C. Laemmerzahl, V. Perlick, A. Grenzebach), аргентийскими (L. Amarilla, E. Eiroa), итальянскими (C. Bambi), чешскими (Z. Stuchlik, J. Schee), индийскими (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil), российскими (О. Цупко, А. Захаров, В. Фролов, И. Новиков) и др. Однако все эти работы выполнялись в рамках отдельно взятого решения компактных объектов, где отсутствует общий формализм описания силуэтов черных дыр независимо от выбора модели черных дыр, теории гравитации и метода измерения.

Решение уравнений электромагнитного поля для вращающейся черной дыры Керра во внешнем асимптотически однородном магнитном поле, движение заряженных частиц вокруг вращающейся черной дыры Керра во внешнем магнитном поле, ускорение частиц вокруг вращающейся черной дыры, роль магнитного поля на процессы столкновения частиц в окрестности медленно вращающейся черной дыры исследованы многими учеными,

например, американскими (M. Banados, J. Silk, S.M. West и др.), английскими (R. Wald и др.), российскими (Д.В. Гальцов, В. Фролов, А. Алиев), турецкими (N. Ozdemir), индийскими (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) и др. Однако детальное изучение движения заряженных частиц и энергетических процессов, в частности, столкновения частиц вблизи вращающейся черной дыры, помещенной во внешнее магнитное поле с ненулевым гравитомагнитным зарядом и/или параметром деформации остается не изученным. Изучение этих эффектов позволит сделать ограничения на численные значения различных параметров черной дыры, таких как гравитомагнитный заряд, параметр деформации и др.

Задачи, связанные с исследованием влияния плазменной среды на движение фотонов вокруг компактных гравитационных объектов в рамках общей теории относительности изучались различными авторами, в частности российскими (Г.С. Бисноватый-Коган, О. Цупко), узбекскими (Б.Ж. Ахмедов, А.А. Турсунов, В.С. Морозова), канадским (A. Rogers), немецкими (V. Perlick, J. Kunz), голландскими (H. Falcke), индийскими (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) и др. В этих работах отсутствует исследование влияние неоднородной плазмы на оптические свойства вращающихся черных дыр, в частности на формы силуэта тени вращающихся черных дыр при наличии неоднородной плазмы.

Свойства метрики пространства-времени и движение частиц в окрестности черной дыры в рамках гравитационной модели Хоржава были изучены рядом авторов, чешскими (Z. Stuchlik, J. Schee) польскими (M. Abramowicz и др.), португальскими (F. Lobo T. Narko, F. Eiroa), немецкими (C. Laemmerzahl, J. Kunz, E. Hackmann и др.) и др. Тем не менее, на данный момент в литературе не рассмотрены вопросы влияния метрических параметров гравитационной модели на энергетические процессы и роли магнитного поля в этих процессах.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного и научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научных проектов Института ядерной физики и Астрономического института по темам: ФА-Ф2-Ф079+Ф069 «Разработка и развитие уравнений электромагнитного и гравитационного полей в релятивистской астрофизике и космологии, а также феноменологических моделей КХД в описании адронов и их взаимодействий» (2007-2011); ФА-Ф2-F058 «Исследование гравитационных линз, образования галактик и обобщенные гравитационные модели» (2007-2011); ФЕ2-ФА-Ф134 «Движение частиц и электромагнитные поля в окрестности релятивистских звезд и черных дыр в альтернативных теориях гравитации» (2012-2013); ЁФ2-ФА-О-25046 «Движение частиц со спином и распространение электромагнитных волн в окрестности компактных гравитационных объектов» (2014-2015); № 1-10 «Частицы и поля в окрестности релятивистских гравитационных объектов из темной энергии и кротовых нор» (2010-2011).



**Целью исследования** является создание теоретического формализма описания силуэтов черных дыр и выявление физических закономерностей высокоэнергетических процессов в непосредственной окрестности вращающихся черных дыр.

**Задачи исследования:**

разработать новый координатно-независимый формализм для описания силуэта черной дыры и предложить новые определения параметров искажения формы тени черной дыры;

провести сравнительный анализ параметров искажения силуэта черной дыры, предложенных в рамках нового формализма и с параметрами, полученными другими авторами;

изучить электромагнитное поле и движение заряженных частиц в окрестности вращающейся деформированной черной дыры, помещенной во внешнее асимптотически однородное магнитное поле;

рассмотреть столкновение электрически заряженных частиц вокруг черной дыры с ненулевым гравитомагнитным зарядом, помещенной во внешнее магнитное поле;

определить влияние неоднородной плазмы на форму силуэта вращающейся черной дыры;

провести анализ движения заряженных и нейтральных частиц и столкновения вокруг Кехагас Сфетсос голой сингулярности в присутствии внешнего магнитного поля;

получить оценки на величину извлекаемой энергии из вращающейся черной дыры в гравитационной модели Хоржава;

сравнить электромагнитные поля и замедление вращения релятивистских компактных звезд.

**Объектом исследования** являются черные дыры, нейтронные и странные релятивистские звезды.

**Предметом исследования** являются электромагнитные поля вокруг компактных объектов, внутренние стабильные круговые орбиты пробных частиц вокруг черных дыр, силуэты черных дыр при наличии плазмы, энергетические процессы в окрестности вращающихся черных дыр в присутствии внешнего магнитного поля.

**Методы исследования.** Математический аппарат макроскопической электродинамики в общей теории относительности и метрической аффинной дифференциальной геометрии, аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений движения и поля.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые разработан новый координатно-независимый формализм для описания формы силуэта черных дыр. Выявлено, что первые пять коэффициентов полинома при разложении достаточны для описания свойств силуэтов вращающихся черных дыр с точностью до 0,1%. Показано, что предложенные определения искажения формы силуэта черных дыр являются устойчивыми на сигнальные шумы;

установлено, что наблюдаемый размер тени черной дыры уменьшается за счет преломления электромагнитного излучения в плазменной среде;

показано, что для высокой эффективности достижения сверхвысоких энергетических процессов относительно удаленного наблюдателя, необходимо отсутствие горизонта событий и сильное вращение гравитационного источника;

выявлено, что значительное увеличение эффективности столкновений до ультравысоких энергий возможно за счет дополнительных электромагнитных явлений, влияющих на столкновение заряженных частиц;

показано, что извлечение энергии через процесс Пенроуза является более реалистичным процессом среди механизмов извлечения энергии из вращающейся черной дыры в сценарии Хоржава; кроме того, из-за поправок гравитационной модели Хоржава частицы предотвращаются от бесконечного ускорения;

показано, что эффект компактности странной звезды на потери мощности электромагнитной энергии релятивистской звезды является значительным;

установлено, что странная звезда теряет больше энергии в сравнении с аналогичной вращающейся нейтронной звездой в рамках общей теории относительности.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

найжены аналитические выражения для вакуумных электромагнитных полей вращающихся деформированных черных дыр во внешнем асимптотически однородном магнитном поле; выявлено, что индуцированное электрическое поле вокруг деформированной черной дыры зависит от параметра деформации линейно, а магнитное поле – квадратично;

найжены выражения для энергии и момента импульса, а также внутренних стабильных круговых орбит заряженных частиц в окрестности черной дыры при наличии гравитомагнитного заряда и внешнего магнитного поля; установлено, что из-за эффекта гравитомагнитного заряда частицы предотвращаются от бесконечного ускорения;

показано, что наблюдаемая форма и размер тени черной дыры изменяются в зависимости от параметров плазмы, параметра вращения черной дыры и угла наклона между плоскостью наблюдателя и осью вращения черной дыры.

получен верхний предел для параметра деформации вращающейся деформированной черной дыры путем сравнения наблюдаемых значений радиуса внутренних стабильных круговых орбит с теоретическими результатами в виде  $\varepsilon \leq 22$ ;

получены формы силуэтов тени вращающихся черных дыр при наличии неоднородной плазмы, которые могут быть использованы для выявления дополнительных асимметрий в форме силуэта и извлечения информации о параметрах плазмы и центрального компактного объекта.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается использованием современных методов общей теории относительности и теоретической физики, а также весьма эффективных численных методов и используемых алгоритмов; тщательной проверкой согласованности полученных теоретических результатов с данными астрономических и астрофизических наблюдений и результатами других авторов; соответствием выводов с основными положениями теории поля гравитационных компактных объектов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования определяется возможностью применения разработанного в диссертации формализма к анализу силуэтов черных дыр, полученных в миллиметровом диапазоне с помощью радиотелескопов нового поколения в ближайшем будущем, и получением информации о различных параметрах и свойствах сверхмассивных черных дыр в центре нашей галактики и галактики М87. Кроме того, анализ силуэтов с помощью нового формализма дает возможность проектирования новых тестов по проверке общей теории относительности и других альтернативных теорий гравитации.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что они могут быть использованы для получения оценок различных параметров черных дыр, таких как вращение, деформация, и гравитомагнитный заряд, а также параметра, появляющегося из-за поправок более высокого порядка в гравитационной теории Хоржава. Результаты могут быть также полезны для анализа характера и динамики гравитационного поля, в разработке наблюдательных экспериментов и критериев по обнаружению и выявлению странных звезд.

**Внедрение результатов исследования.** Высокоэнергетические столкновения частиц в окрестности экстремальных Кехагиас-Сфетсос голых сингулярностей и возможность их наблюдения удаленным наблюдателем были использованы для разработки модели аккреционных дисков в окрестности черных дыр в альтернативных теориях гравитации в рамках программы «Поддержка интеграции с Международной теоретической и наблюдательной сетью исследований в релятивистской астрофизике компактных объектов» (2010-2014) (поддержанной структурными фондами Европейского Союза и Государственного Бюджета Чешской Республики и зарегистрированной под номером CZ.1.07/2.3.00/20.0071) (справка Силезийского университета в Опаве, Чешская республика, от 23 апреля 2015 г.).

Силуэты черных и влияние плазмы использованы при вычислении траекторий фотонов вокруг компактных гравитационных объектов в рамках проектов Центрального университета Дели, Индия (справка Центрального университета Дели, Индия от 20 сентября 2016 г.). С помощью этих вычислений получены силуэты черных дыр в рамках гравитационной теории Борн-Инфельда.

Магнитосфера и замедления нейтронных звезд использованы при моделировании плазменной магнитосферы вокруг нейтронных звезд в рамках проектов Межуниверситетского центра астрономии и астрофизики (справка Межуниверситетского центра астрономии и астрофизики). Эти модели дали возможность получить оценки на значения магнитного поля на поверхности релятивистской звезды.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований представлены в виде устных докладов и апробированы на 16 международных и республиканских научно-практических конференциях, в частности: «Актуальные проблемы современной физики и астрономии» (Карши, 2010), «Актуальные проблемы современной физики» (Самарканд, 2010), «Fusion and Plasma Physics» (Triest, 2011), 39-COSPAR General Assembly (Mysore, 2012), «Ядерная наука и ее применение» (Самарканд, 2012), Международная школа по субядерной физике (Erice, 2013), «General Relativity and Gravitation» (Warsaw, 2013), «Prague Synergy 2013: Accreting relativistic compact objects» (Prague, 2013), «Synergy Olomouc 2014» (Olomouc, 2014), 40- COSPAR General Assembly (Москва, 2014), «International Congress of Mathematicians» (Seoul, 2014), “RAGTime – 2013” (Opava, 2013), “RAGTime – 2014” (Prague, 2014), “RAGTime – 2015” (Opava, 2015), “XII Marcel Grossman Meeting” (Rome, 2015), 41-COSPAR General Assembly (Istanbul, 2012).

Основные результаты диссертации представлены и обсуждены на научных семинарах Института ядерной физики (2010-2016), Астрономического института (2010-2016), Кафедры ядерной и теоретической физики Национального университета Узбекистана (2015-2016), Факультета философии и науки Силезского университета в Чехии (2013-2016), Франкфуртского университета Гёте (2013-2016), Института Макса Планка Гравитационной физики (2010-2016), Центра прикладных космических технологий и микрогравитации в Германии (2011), Института фундаментальных исследований Тата (2014-2015), Межуниверситетского центра астрономии и астрофизики (2010-2016), Центрального университета Дели в Индии (2010-2016), Международного центра теоретической физики в Италии (2011).

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, из них 15 научных статей в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем диссертации составляет 181 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

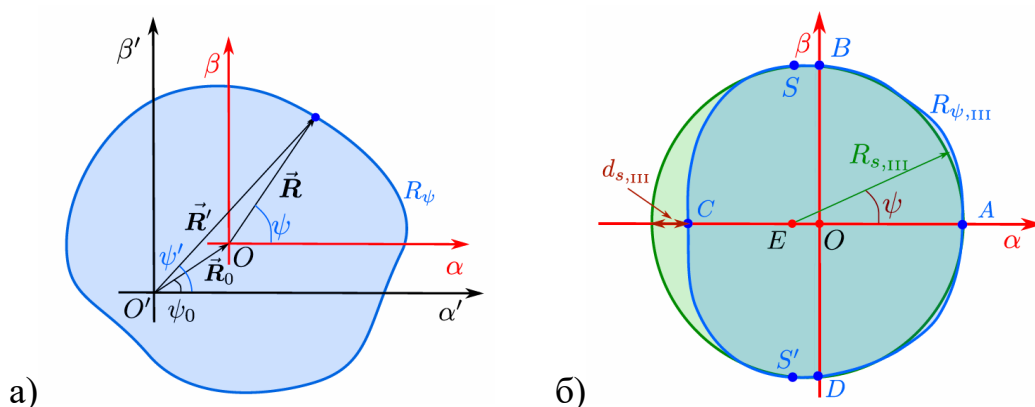
Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Движение фотонов и частиц в окрестности вращающейся черной дыры**», рассмотрены движение заряженных частиц и распределение электромагнитного поля вокруг вращающейся деформированной черной дыры и черной дыры с ненулевым гравитомагнитным зарядом, помещенной во внешнее асимптотически однородное магнитное поле. Также в этой главе разработан общий формализм для описания силуэта черной дыры. Форма силуэта рассматривается как замкнутая кривая в асимптотически плоском пространстве, в котором изображение получаемых радиоастрономических инструментов будет доступно для удаленных наблюдателей.

Предположим, что астрономические наблюдения дают силуэт черных дыр в качестве одномерной замкнутой кривой, заданной уравнением

$$R' = R'(\psi'), \quad (1)$$

где  $R'$  и  $\psi'$  – радиальная и угловая координаты в полярной системе координат с центром в точке  $O'$ . Схематическое представление полярной кривой показано на рис. 1а, где  $\alpha'$  и  $\beta'$  – небесные координаты наблюдателя, и представляют собой ортогональную систему координат с одной из единичных векторов, находящихся вдоль линии прямой видимости.



**Рис. 1. Схематическое изображение формы силуэта черной дыры:**  
**а) нахождение центра формы силуэта,**  
**б) определение опорного круга и параметра искажения**

Для нахождения удобной системы координат, в частности, в которой черная дыра Шварцшильда имеет форму силуэта в виде круга, определено положение эффективного центра кривой как

$$\vec{R}_0 := \frac{\int_0^{2\pi} \vec{e}_R(\psi') R' [g_{R'R'} (dR'/d\psi')^2 + g_{\psi'\psi'}]^{1/2} d\psi'}{\int_0^{2\pi} [g_{R'R'} (dR'/d\psi')^2 + g_{\psi'\psi'}]^{1/2} d\psi'} \quad (2)$$

где  $\vec{e}_R$  - единичный вектор радиальной координаты и  $g_{R'R'}$ ,  $g_{\psi'\psi'}$  - метрические функции в полярных координатах  $(R', \psi')$ .

Если значение вектора  $\vec{R}_0$  известно, то можно найти выражения для координат центра формы силуэта в виде

$$R_0 := \left( \int_0^{2\pi} R' d\psi' \right)^{-1} \left[ \left( \int_0^{2\pi} R'^2 \cos \psi' d\psi' \right)^2 + \left( \int_0^{2\pi} R'^2 \sin \psi' d\psi' \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\psi_0 := \tan^{-1} \left( \frac{\int_0^{2\pi} R'^2 \sin \psi' d\psi'}{\int_0^{2\pi} R'^2 \cos \psi' d\psi'} \right). \quad (4)$$

Введем новую полярную систему координат, начало которой совпадает с эффективным центром силуэта  $(R, \psi)$ . Координаты новой и старой полярной системы связаны следующим образом:

$$R := \left[ (R' \cos \psi' - R_0 \cos \psi_0)^2 + (R' \sin \psi' - R_0 \sin \psi_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\psi := \tan^{-1} \frac{R' \sin \psi' - R_0 \sin \psi_0}{R' \cos \psi' - R_0 \cos \psi_0}. \quad (6)$$

В новой системе координат можно определить опорную окружность, имеющую ту же площадь, заключенную внутри рассматриваемой кривой. Для заданной замкнутой параметрической кривой  $R = R(\psi)$  площадь задается в виде

$$A := \int_{\psi_1}^{\psi_2} d\psi \int_0^R \sqrt{g_{RR} g_{\psi\psi}} dR = \frac{1}{2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} R^2 d\psi = \frac{1}{2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^2(\lambda) \frac{d\psi}{d\lambda} d\lambda, \quad (7)$$

где использованы соотношения  $g_{RR} = 1$  и  $g_{\psi\psi} = R^2$ ,  $\lambda$  - некий параметр вдоль кривой, т.е.  $R = R(\psi(\lambda))$ . Если форма тени является замкнутой кривой, интегрирование ограничивается  $\lambda_{1,2}$ , значения которых можно найти из условия  $\psi(\lambda) = 0$  и  $\psi(\lambda) = 2\pi$ .

Можно определить радиус опорного круга в виде

$$R_A = \left( \frac{A}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Введем новые определения искажения формы силуэта относительно опорного круга, используя три точки на полярной кривой А, В и D, которые занимают точные угловые позиции  $\psi = 0$ ,  $\psi = \pi/2$  и  $\psi = 3\pi/2$ , соответственно

(см. диаграмму на рис. 1б). Соответствующие расстояния OA, OB и OD от центра координат O могут быть выражены как

$$R_A = R_\psi(\psi = 0) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=0} = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell = \tilde{A}, \quad (9)$$

$$R_B = R_\psi(\psi = \pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=\pi/2} = \sum_{\ell=0}^{\infty} (-1)^\ell \frac{(2\ell)!}{2^{2\ell}(\ell!)^2} c_\ell = \tilde{B}, \quad (10)$$

$$R_D = R_\psi(\psi = 3\pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=3\pi/2} = R_B. \quad (11)$$

Определена новая параметрическая кривая, для которой  $R_A = R_B = R_D$  и удовлетворяют следующему условию

$$c_{2\ell-1} = c_{2\ell} \left[ (-1)^\ell \frac{(2\ell)!}{2^{2\ell}(\ell!)^2} - 1 \right]. \quad (12)$$

Предполагая, что опорный круг проходит через точки A, B, и D можем найти отклонение параметрической кривой от опорного круга в любом угловом положении. Используя известный факт о том, что силуэт вращающейся черной дыры с осью вращения вдоль оси  $\beta$  имеет наибольшие отклонения по оси  $\alpha$ , можно определить разницу между этими кривыми при  $\psi = \pi$  как

$$d_{s,I} := R_{s,I} - R_{\psi,I}(\psi = \pi) = \tilde{B} - \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{2\ell} + \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1}, \quad (13)$$

или безразмерный параметр искажения

$$\delta_{s,I} := \frac{d_{s,I}}{R_{s,I}} = \frac{2 \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1}}{\tilde{B}}. \quad (14)$$

Второе возможное определение параметра искажения предполагает, что расстояния до точек A и B от начала координат необязательно равны между собой, т.е.  $R_A \neq R_B$ . В этом случае можно рассмотреть новую точку E на оси  $\alpha$  таким образом, что расстояния AE=EB, и которая могла бы служить центром опорного круга.

Параметр искажения в этом случае можно определить как

$$\delta_{s,I} := \frac{d_{s,II}}{R_{s,II}} = 2 \left( \frac{\tilde{B}^2 - \tilde{A}\tilde{C}}{\tilde{B}^2 + \tilde{A}^2} \right), \quad (15)$$

где  $d_{s,II}$  – отклонение кривой от круга и

$$\tilde{C} = R_\psi(\psi = 3\pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} (-1)^\ell c_\ell. \quad (16)$$

Третье и возможно, более оптимальное определение параметра предполагает, что форма тени, оставаясь зеркально симметричной по отношению оси  $\alpha$ , не пересекает ось  $\beta$  с нулевым наклоном, т.е. точка S, в которой кривая имеет нулевой наклон относительно горизонтальной оси не лежит на оси  $\beta$ .

Предполагая, что опорный круг с центром в точке E проходит через точки A и S, можно найти радиус круга и параметр искажения в виде

$$R_{s,III} = \frac{\tilde{A}^2 - 2x_s \tilde{A} \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) + \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right)^2}{2 \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} (1 - P_{\ell}(x_s) x_s)}, \quad (17)$$

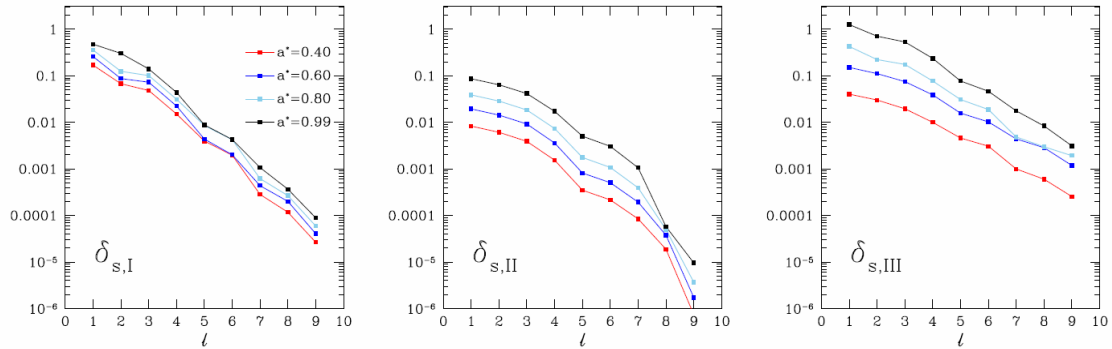
$$d_{s,III} = 2R_{s,III} - R_A + R_C = \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) \frac{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) - x_s \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1} - \tilde{A} \tilde{C}}{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} (1 - P_{\ell}(x_s) x_s)}, \quad (18)$$

$$\delta_{s,III} = \frac{d_{s,III}}{R_{s,III}} = 2 \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) \frac{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) - x_s \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1} - \tilde{A} \tilde{C}}{\tilde{A}^2 - 2x_s \tilde{A} \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) + \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right)^2}, \quad (19)$$

где  $x_s$  – решение уравнения

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x) x - \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} \frac{dP_{\ell}(x)}{dx} (1 - x^2) = 0 \quad (20)$$

На рис. 2 приведены значения безразмерных параметров искажения, вычисленных для силуэта вращающейся черной дыры Керра в зависимости от коэффициента разложения  $\ell$ . Три панели на рис. 2 соответствуют параметрам искажения  $\delta_{s,I}$ ,  $\delta_{s,II}$  и  $\delta_{s,III}$ , соответственно. Из зависимости видно, что члены разложения всех трех параметров искажения уменьшаются по мере увеличения степени разложения. Также наблюдается увеличение модуля параметра искажения с увеличением параметра вращения черной дыры.



**Рис. 2.** Зависимости параметров искажений от порядка разложения для различных значений параметра вращения черной дыры

Метрика, описывающая стационарное аксиально-симметричное, асимптотически плоское, вакуумное пространство-время деформированной черной дыры в стандартных координатах Бойер-Линдквиста имеет вид

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2} \right) (1+h) dt^2 - \frac{4aMr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h) dt d\varphi + \frac{\Sigma^2 (1+h)}{\Delta + a^2 h \sin^2 \theta} dr^2 + \Sigma^2 d\theta^2 + \left[ \Sigma^2 + \frac{a^2 (\Sigma^2 + 2Mr) \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h) \right] \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (21)$$



где  $S^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$ ,  $D = r^2 - 2Mr + a^2$ ,  $h = eM^3r/S^4$ , величина  $e$  – параметр деформации. Величина  $e > 0$  и  $e < 0$  соответствуют вытянутым или сплюснутым объектам относительно черной дыры Керра. При  $e = 0$  черная дыра сводится к стандартной черной дыре Керра в рамках общей теории относительности. 4-векторный потенциал  $A_\mu$  электромагнитного поля принимает следующий вид:

$$A_0 = -aB \frac{\Sigma^2 - 2Mr + Mr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h), \quad A_1 = 0, \quad A_2 = 0, \quad (22)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} B \sin^2 \theta \left[ \Sigma^2 + \frac{(2Mr + \Sigma^2) \sin^2 \theta - 4Mr}{\Sigma^2} a^2 (1+h) \right]. \quad (23)$$

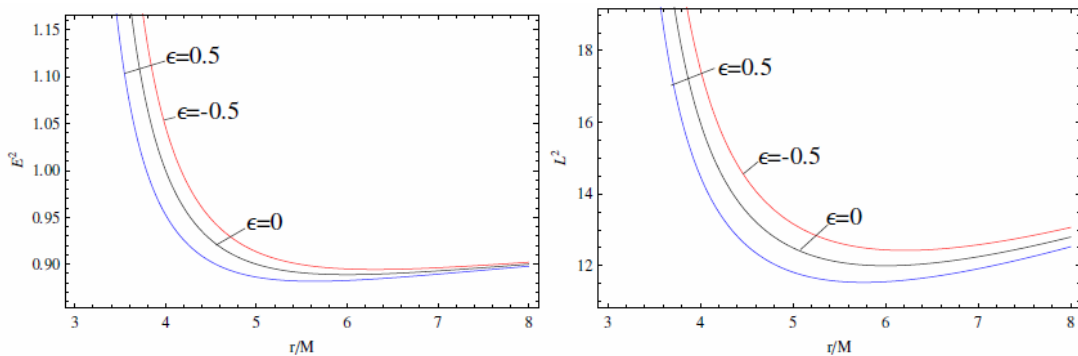
Движения заряженных частиц вокруг вращающейся деформированной черной дыры изучены с помощью уравнения Гамильтона-Якоби

$$g^{\mu\nu} \left( \frac{\partial S}{\partial x^\mu} - eA_\mu \right) \left( \frac{\partial S}{\partial x^\nu} - eA_\nu \right) = -m^2, \quad (24)$$

где  $e$  и  $m$  электрический заряд и масса пробной частицы, соответственно. Существование времениподобного и пространственноподобного векторов Киллинга позволяет записать действие для пробной частицы в сепарабельном виде

$$S = -Et + L\varphi + S_{r\varphi}(r, \varphi), \quad (25)$$

где сохраняющиеся величины  $E$  и  $L$  – энергия и момент импульса пробной частицы на бесконечности.



**Рис. 3. Радиальная зависимость энергии (слева) и углового момента (справа) частицы, движущейся вокруг вращающейся деформированной черной дыры по круговым орбитам для различных значений параметра деформации**

На рис. 3. показаны радиальные зависимости энергии и углового момента пробной частицы, движущейся по круговой орбите вокруг деформированной черной дыры в экваториальной плоскости. Из рисунка видно, что при отрицательных значениях параметра деформации пробная

частица должна иметь большую энергию и угловой момент для нахождения на круговой орбите. Это является следствием увеличения гравитационного потенциала вращающейся деформированной черной дыры при отрицательных значениях параметра деформации.

В работе найдены выражения для радиусов стабильных круговых пробных частиц  $\rho_{ISCO} = r_{ISCO} / M$ ,

$$\rho_{ISCO} = 6 - \frac{2\varepsilon}{9} + O(\varepsilon^2) \quad (26)$$

В астрофизических реализуемых ситуациях, когда магнитный параметр  $b = eVM/m \gg 1$ , аналитическое выражение для  $\rho_{ISCO}$  принимает вид:

$$\rho_{ISCO} = 1 + \frac{1 - 2a^2/M^2 - \varepsilon}{\sqrt{6b}} + O(b^{-2}, \varepsilon^2) \quad (27)$$

Также в первой главе рассматривается центральное столкновение двух частиц в окрестности черной дыры с ненулевым гравитомагнитным зарядом, предполагая, что одна из этих частиц имеет массу  $m$  и электрический заряд  $e$  и вращается по круговой орбите. Другая электрически нейтральная частица свободно падает на черную дыру из бесконечности. Энергия центра масс сталкивающихся частиц имеет следующий вид:

$$\frac{E_{c.m.}}{m} \cong 0.3 \sqrt{\frac{96 - l^2}{\sqrt{8 + l^2}}} b^{1/4}, \quad (28)$$

где  $l$  – гравитомагнитный заряд центральной черной дыры.

Во второй главе диссертации «**Оптические свойства черных дыр при наличии плазмы**», рассмотрены оптические свойства черных дыр при наличии плазмы.

Пространство-время вокруг вращающейся черной дыры описывается метрикой Керра

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2}\right) dt^2 - \frac{4aMr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} dt d\varphi + \frac{\Sigma^2}{\Delta} dr^2 + \\ + \Sigma^2 d\theta^2 + \left[ \Sigma^2 + \frac{a^2(\Sigma^2 + 2Mr) \sin^2 \theta}{\Sigma^2} \right] \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (29)$$

где  $M$  и  $a$  – масса и удельный угловой момент черной дыры.

Рассмотрена плазма вокруг аксиально-симметричной черной дыры. Показатель преломления плазмы –  $n = n(x^i, \omega)$ , где  $\omega$  – частота фотона измеряемой наблюдателем со скоростью  $u^\alpha$ . Эффективная энергия фотона имеет вид  $\hbar\omega = -p_\alpha u^\alpha$ . Показатель преломления плазмы как функция четырехмерного импульса имеет следующий вид:

$$n^2 = 1 + \frac{p_\alpha p^\alpha}{(p_\beta u^\beta)^2}, \quad (30)$$

при отсутствии плазмы показатель преломления равен  $n=1$ . Гамильтониан для фотона вокруг черной дыры при наличии плазмы, имеет следующий вид:

$$H(x^\alpha, p^\alpha) = \frac{1}{2} \left[ g^{\alpha\beta} p_\alpha p_\beta + (n^2 - 1) (p_\beta u^\beta)^2 \right]. \quad (31)$$

Для показателя преломления используем выражение

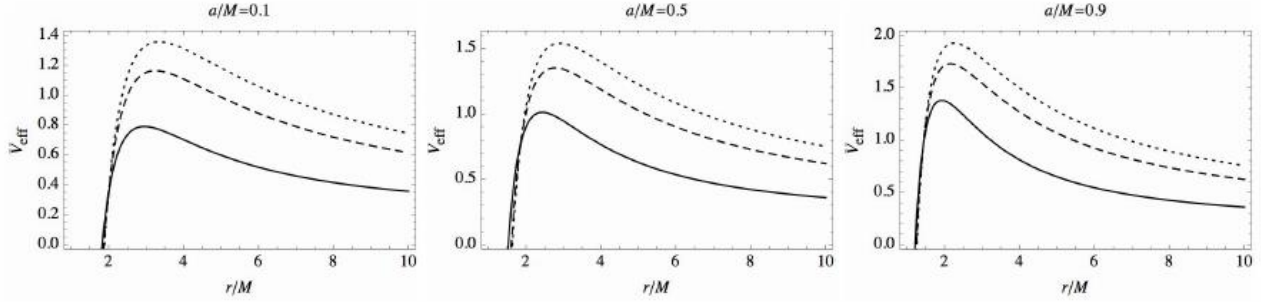
$$n^2 = 1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}, \quad (32)$$

где  $\omega_e$  – плазменная частота.

Использовано уравнение Гамильтона-Якоби для определения уравнения движения фотонов для заданной геометрии пространства-времени

$$\frac{\partial S}{\partial \sigma} = -\frac{1}{2} \left[ g^{\alpha\beta} p_\alpha p_\beta - (n^2 - 1) (p_0 \sqrt{-g^{00}})^2 \right], \quad (33)$$

где  $p_\alpha = \partial S / \partial x^\alpha$ .



**Рис. 4.** Радиальная зависимость эффективного потенциала радиального движения фотонов для различных значений параметра вращения и показателя преломления плазмы. Здесь эффективный потенциал  $V_{\text{eff}}$  нормируется на энергию фотона  $E$

На рис. 4 показана радиальная зависимость эффективного потенциала радиального движения фотонов при различных значениях показателя преломления плазмы и параметра спина черной дыры. В графиках, приведенных на рисунках  $n^2 = 0.2; 0.44; 0.89$  для точечных, пунктирных и сплошных линий, соответственно. Видно, что с уменьшением показателя преломления радиусы стабильных круговых орбит фотонов уменьшаются.

Рассмотрен силуэт тени черной дыры, окруженной плазмой. Если черная дыра, окруженная плазмой, находится между источником света и наблюдателем, то последний может наблюдать темное пятно на светлом фоне. Инструмент наблюдателя регистрирует световой поток вокруг темной области, откуда поток фотонов не доходит до наблюдателя за счет захвата последних черной дырой. Это пятно соответствует тени черной дыры, и ее граница может быть определена с помощью анализа уравнения движения фотонов вокруг черной дыры.

Для описания видимой формы черной дыры, окруженной плазмой, рассмотрены замкнутые круговые орбиты. Так как уравнения движения зависят от сохраняющихся величин – энергии  $E$ , углового момента  $L$  и константы интегрирования Картера  $K$ , использованы нормированные параметры  $\xi = L/E$  и  $\eta = K/E^2$ .

Силуэт тени черной дыры в присутствии плазмы можно найти, используя условия

$$u^r = 0, \quad \frac{du^r}{dr} = 0, \quad (34)$$

где  $u^r$  – радиальная скорость движения фотонов.

Граница силуэта тени черной дыры, наблюдаемой на «небесной плоскости» описывается небесными координатами

$$\alpha = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} \left( -r_0^2 \sin \theta_0 \frac{d\phi}{dr} \right), \quad \beta = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} \left( -r_0^2 \frac{d\theta}{dr} \right) \quad (35)$$

где  $r_0$  – расстояние между черной дырой и наблюдателем,  $\theta_0$  – угол наклона оси вращения черной дыры на плоскость наблюдения.

На рис. 5 представлены силуэты тени вращающейся черной дыры для различных значений параметра вращения черной дыры и угла наклона между плоскостью наблюдателя и осью вращения. Из рис. 5 видно, что изменение параметра вращения и угла наклона приводит к появлению искажений в форме силуэта. Физически это связано с эффектом гравитационного красного смещения фотонов в гравитационном поле черной дыры.

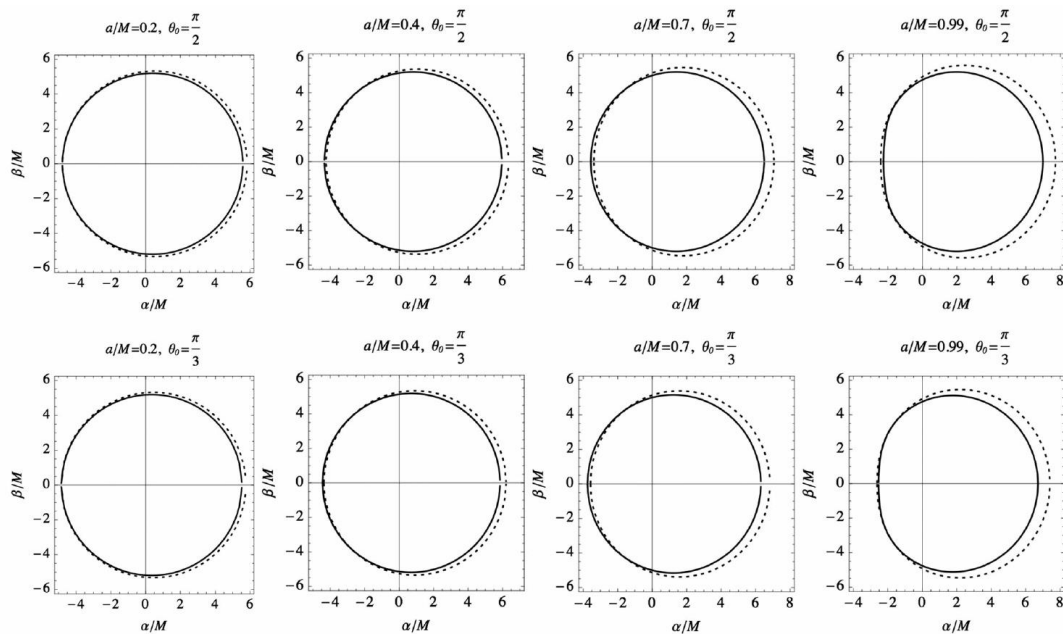


Рис. 5. Силуэты вращающейся черной дыры при отсутствии (сплошные линии) и наличии (пунктирные линии) плазмы

В третьей главе диссертации «Энергетические процессы вокруг черных дыр в гравитационной модели Хоржавы-Лифшица», рассмотрены энергетические процессы вокруг черной дыры в гравитационной модели

Хоржава. Приводится подробный анализ геометрии пространства-времени Кехагиса-Сфетсоса. Сферически симметричное решение в рамках модифицированной теории гравитации Хоржава, которое включает в себя пространство-время Шварцшильда как частный случай в предельном случае, так называемое пространство-время Кехагиса-Сфетсоса (КС) в стандартных сферических координатах имеет линейный элемент в виде

$$ds^2 = - \left( 1 + r^2 \omega \left[ 1 - \left( 1 + \frac{4M}{\omega r^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) dt^2 + \left( 1 + r^2 \omega \left[ 1 - \left( 1 + \frac{4M}{\omega r^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2), \quad (36)$$

где  $\omega$  – параметр, появляющийся за счет поправок теории гравитации Хоржава.

Получены уравнения движения фотонов и кеплеровские орбиты в пространстве-времени КС. Уравнения движения использованы для изучения высокоэнергетических столкновений частиц. Энергия центра масс для частиц вычислена для трех характерных случаев. Два из них соответствуют случаям, когда высокоэнергетические столкновения происходят в пространстве около-экстремальных геометрий КС, а именно, столкновения частиц свободно падающих из бесконечности ( $E = m$  и  $L = 0$ ) в радиальном направлении с частицами, движущимися по круговым орбитам, или с радиально движущимися частицами, имеющими  $E = m$  и  $L = 0$ . В третьем случае рассматриваются столкновения частиц, движущихся в экваториальной плоскости с противоположными угловыми моментами в точке поворота их радиального движения. Для простоты рассмотрены столкновения одинаковых частиц, имеющих одинаковую энергию покоя. Энергия центра масс частиц имеет вид

$$E_{c.m.} = 2m^2 \left( 1 - g_{\alpha\beta} u_1^\alpha u_2^\beta \right), \quad (37)$$

Радиальная зависимость энергии центра масс сталкивающихся радиально падающей и вращающейся по круговой кеплеровской орбите частиц представлена на рис. 6. Видно, что максимальное значение энергии центра масс уменьшается с уменьшением значения параметра  $\omega$ . Также наблюдается сдвиг расположения максимума в сторону больших значений радиуса с уменьшением значения параметра  $\omega$ .

Радиальная зависимость энергии центра масс для некоторых характерных значений магнитного параметра  $b$  и параметра  $\omega$  показаны на рис. 7, демонстрирующей важную роль магнитного поля в значительном увеличении ускорения частиц в сочетании гравитационного и электромагнитного полей в окрестности голой сингулярности КС во внешнем асимптотически однородном магнитном поле.

Также в этой главе приводится описание решения и эргосферы вращающейся черной дыры, и рассматривается процесс Пенроуза в эргосфере вращающейся черной дыры в гравитационной модели Хоржава. Проведен детальный анализ ускорения частиц в окрестности экстремально

вращающейся черной дыры в рамках альтернативной теории гравитации Хоржава.

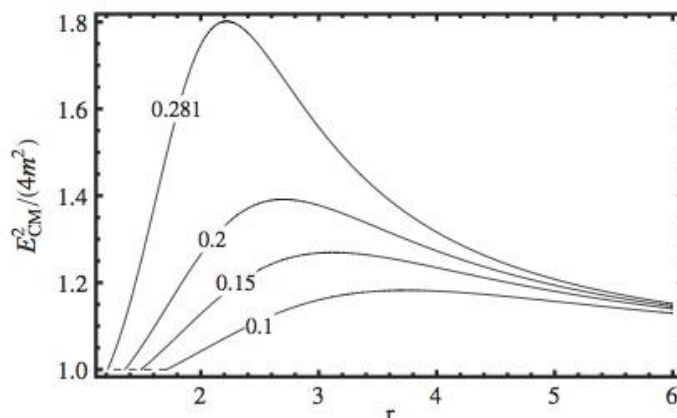


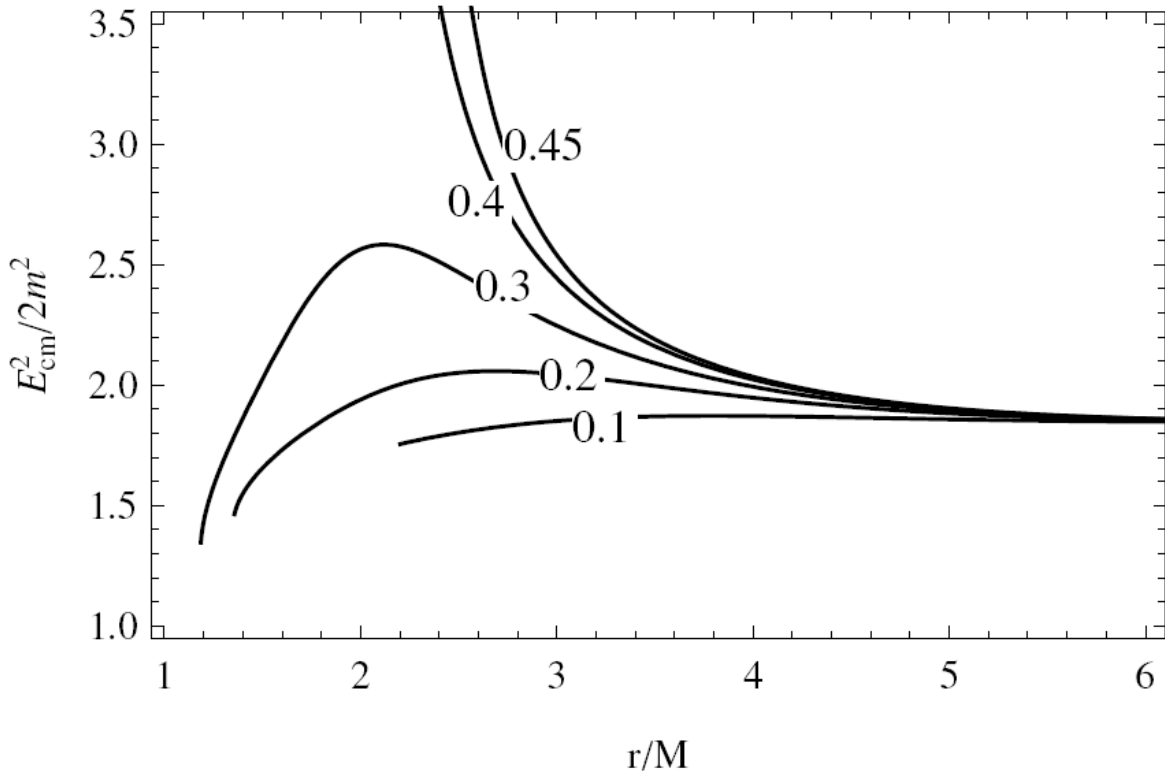
Рис. 6. Радиальная зависимость энергии центра масс сталкивающихся радиально падающих и вращающихся по круговой Кеплеровской орбите частиц для различных значений параметра  $\omega = 0,1, 0,15, 0,2, \text{ и } 0,281$

В четвертой главе диссертации «**Электродинамика и замедление вращения намагниченных релятивистских звезд**», рассмотрены общерелятивистские эффекты на электромагнитное излучение вращающейся и намагниченной нейтронной и странной звезды, которая производится за счет вращения нейтронной и странной звезды с углом наклона относительно магнитного поля дипольной конфигурации. Показано, что эффект компактности странной звезды в значительной мере влияет на потери кинетической энергии звезды за счет электромагнитного излучения звезды (может различаться на десятки процентов от потери энергии за счет электромагнитного излучения нейтронной звезды одинаковой массы) и может помочь в будущем различить странные звезды с помощью наблюдения замедления периода вращения пульсаров.

Рассмотрено замедление вращающейся странной звезды наблюдаемой как пульсар за счет электромагнитного магнитодипольного излучения. Светимость релятивистской звезды в случае чисто дипольного излучения или мощность, излучаемая в виде дипольного электромагнитного излучения, дается в виде

$$L_{em} = \frac{W_R^4 R^6 \tilde{B}_0^2}{6c^3} \sin^2 \chi, \quad (38)$$

где тильда обозначает общерелятивистское значение соответствующей величины, индекс  $R$  обозначает значение соответствующей величины при  $r=R$  и  $\chi$  – угол наклона между осями магнитного поля и вращения.



**Рис. 7.** Радиальная зависимость энергии центра масс центрально сталкивающихся элетрически заряженной частицы по круговой орбите и нейтральной частицы, падающей из бесконечности, для значений магнитного параметра  $b$ :  $b = 0.10$ .  
Угловой момент нейтральной частицы  $L = 1$

Если сравнить с аналогичным ньютоновским выражением для потерь энергии звезды через дипольное излучение:

$$(L_{em})_{Newt} = \frac{W^4 R^6 B_0^2}{6c^3} \sin^2 C, \quad (39)$$

то видно, что релятивистские поправки в выражении (18) появляются частично из-за усиления магнитного поля на поверхности звезды

$$\frac{\tilde{B}_0}{B_0} = \frac{\tilde{B}_0 R^3}{2\mu} = f_R = -\frac{3R^3}{8M^3} \left[ \ln N^2 R + \frac{2M}{R} \left( 1 + \frac{M}{R} \right) \right], \quad (40)$$

и частично за счет увеличения эффективной угловой скорости вращения, создаваемой гравитационным красным смещением

$$\Omega(r) = \Omega_R \frac{N_R}{N} = \Omega_R \sqrt{\left( \frac{R-2M}{r-2M} \right) \frac{r}{R}}. \quad (41)$$

Потери энергии можно записать в более удобном виде через наиболее важные наблюдаемые характеристики пульсара: период вращения  $P$  и его производную по времени  $\dot{P} = dP/dt$ . Из результатов, приведенных в табл. 1 видно, что странная звезда замедляется примерно в 5 раз быстрее, чем типичная нейтронная звезда. Астрофизические наблюдения показывают, что большинство пульсаров имеют периоды 1 с и производные периодов  $10^{-16}$  до  $10^{-14}$ . Так как производные периодов находятся в диапазоне около двух

порядков, можно заключить, что производная периода нейтронных звезд принимает меньшее значение по сравнению со странными звездами.

Таблица 1

Зависимость отношения  $(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$  от различных параметров компактного объекта: массы (в единицах массы Солнца), радиуса и момента инерции странных  $(R_{SS}, I_{SS})$  и нейтронных  $(R_{NS}, I_{NS})$  звезд.

$(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$	4,34463	4.53723	5.1094	6.16863
$M / M_{\odot}$	1.2	1.3	1.4	1.5
$R_{SS}, km$	7.48	7.62	7.69	7.68
$R_{NS}, km$	11.75	11.72	11.7	11.68
$I_{SS}, \times 10^{45} gm cm^2$	0.65	0.74	0.825	0.9
$I_{NS}, \times 10^{45} gm cm^2$	1.08	1.2	1.36	1.72

Предположено наличие плазменной магнитосферы вокруг вращающейся странной звезды и изучено ее замедление из-за магнитосферных потерь энергии за счет оттока плазмы вдоль открытых магнитных силовых линий.

Используя выражение для полной мощности потока релятивистских частиц можно рассчитать максимальное значение светимости:

$$(L_p)_{\max} = \frac{3}{2} \kappa (1 - \kappa) L_{em}, \quad (42)$$

где  $\kappa = 2I / R^3$  – параметр компактности звезды с моментом инерции  $I$ .

Используя данные для массы, радиуса, момента инерции нейтронных и странных звезд рассчитано соотношение замедлений нейтронной и странной звезд. Из результатов приведенных в табл. 2 видно, что странная звезда замедляется примерно в 5 раз медленнее, чем нейтронная звезда.

В качестве важного применения полученных результатов рассчитаны потери энергии медленно вращающейся странной звезды и обнаружено, что странная звезда теряет больше энергии, чем обычные вращающиеся нейтронные звезды в общей теории относительности. Полученная зависимость в сочетании с астрофизическими данными о замедлении пульсаров может быть полезной в дальнейших исследованиях по возможному обнаружению / выделению странных звезд.

Общая потеря энергии намагниченной звезды вызывается оттоком плазмы через полярную шапку и определяется суммированием по всей площади полярной шапки. Поэтому она зависит как от плотности кинетической энергии плазмы, так и площади поверхности полярной шапки. Хотя общерелятивистские эффекты приводят к некоторому увеличению плотности энергии истекающей плазмы (в связи с увеличением магнитного поля на поверхности звезды), площадь полярной шапки уменьшается в рамках общей теории относительности и увеличение плотности энергии



плазмы не может компенсировать сокращение размера полярной шапки. Суммарные потери энергии звезды значительно уменьшаются в общей теории относительности. Так как компактность у странных звезд имеет большее значение, чем у нейтронных звезд, потеря энергии странных звезд происходит гораздо медленнее.

Таблица 2

Зависимость отношения  $(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$  от различных параметров компактного объекта: массы (в единицах массы Солнца), радиуса и момента инерции странных ( $R_{SS}, I_{SS}$ ) и нейтронных ( $R_{NS}, I_{NS}$ ) звезд окруженных плазменной магнитосферой

$(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$	0,2053	0.2165	0.2199	0.2146
$M / M_{\square}$	1.2	1.3	1.4	1.5
$R_{SS}, km$	7.48	7.62	7.69	7.68
$R_{NS}, km$	11.75	11.72	11.7	11.68
$I_{SS}, \times 10^{45} gm cm^2$	0.65	0.74	0.825	0.9
$I_{NS}, \times 10^{45} gm cm^2$	1.08	1.2	1.36	1.72

В приложениях приведены точные выражения электромагнитного поля вокруг деформированной черной дыры во внешнем магнитном поле; выражения для электрического и магнитного полей вокруг невращающейся черной дыры с ненулевым гравитомагнитным зарядом; потенциалы электромагнитного поля голой сингулярности во внешнем магнитном поле; уравнения движения фотонов и частиц в окрестности голой сингулярности Кехагиаса-Сфетсоса во внешнем магнитном поле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме докторской диссертации «Частицы и электромагнитные поля в окрестностях аксиально-симметричных компактных гравитационных объектов» представлены следующие ниже выводы:

1. Разработан новый координатно-независимый формализм для описания формы силуэта черных дыр, где форма тени описывается как произвольная кривая, выраженная в полярных координатах полиномами Лежандра. Выявлено, что первые пять коэффициентов полинома при разложении достаточны для описания свойств силуэтов вращающихся черных дыр с точностью до 0,1%. Новый формализм не предполагает каких-либо знаний о свойствах силуэтов и предлагает ряд определений для характеристики свойств кривой. Показано, что предложенные определения искажения формы силуэта черных дыр являются устойчивыми на сигнальные шумы.

2. Найдены аналитические выражения для вакуумных электромагнитных полей вращающихся деформированных черных дыр во внешнем

асимптотически однородном магнитном поле. Выявлено, что индуцированное электрическое поле вокруг деформированной черной дыры зависит от параметра деформации линейно, а магнитное поле – квадратично.

3. Получен верхний предел для параметра деформации вращающейся деформированной черной дыры путем сравнения наблюдаемых значений радиуса внутренних стабильных круговых орбит с теоретическими результатами, полученными в диссертации в виде  $\epsilon \leq 22$ .

4. Получены формы силуэтов тени вращающихся черных дыр при наличии неоднородной плазмы, которые могут быть использованы для выявления дополнительных асимметрий в форме силуэта и извлечения информации о параметрах плазмы и центрального компактного объекта.

5. Найдены выражения для энергии и момента импульса, а также внутренних стабильных круговых орбит заряженных частиц в окрестности черной дыры при наличии гравитомагнитного заряда и внешнего магнитного поля. Установлено, что из-за эффекта гравитомагнитного заряда частицы предотвращаются от бесконечного ускорения.

6. Показано, что при наличии плазмы наблюдаемая форма и размер тени вращающейся черной дыры изменяется в зависимости от (а) плазменных параметров, (б) спина параметра черной дыры и (в) угла наклона между плоскостью наблюдателя и осью вращения черной дыры. Установлено, что под воздействием плазмы, наблюдаемый размер тени черной дыры уменьшается за счет преломления электромагнитного излучения в плазменной среде. Выявлено, что с увеличением безразмерного плазменного параметра максимальное значение интенсивности излучения энергии из черной дыры уменьшается за счет уменьшения размера тени.

7. Показано, что для высокой эффективности достижения сверхвысоких энергетических процессов относительно удаленного наблюдателя необходимо отсутствие горизонта событий и сильное вращение. Выявлено, что значительное увеличение эффективности столкновений до ультравысоких энергий возможно за счет дополнительных электромагнитных явлений, влияющих на столкновение заряженных частиц.

8. Показано, что извлечение энергии через процесс Пенроуза является более реалистичным процессом среди механизмов извлечения энергии из вращающейся черной дыры в сценарии Хоржава. Кроме того, из-за поправок гравитационной модели Хоржава частицы предотвращаются от бесконечного ускорения.

9. Показано, что эффект компактности странной звезды на потери мощности электромагнитной энергии релятивистской звезды является значительным, и может помочь в будущем обнаружить странные звезды через наблюдение синхронизации пульсаров. Установлено, что странная звезда теряет больше энергии в сравнении с аналогичной вращающейся нейтронной звездой в рамках общей теории относительности. Полученная зависимость может быть полезной в дальнейших исследованиях с целью возможного обнаружения странных звезд.

**SCIENTIFIC COUNCIL on AWARD of SCIENTIFIC DEGREE of  
DOCTOR of SCIENCES 14.07.2016.FM.01.05 at the NATIONAL  
UNIVERSITY of UZBEKISTAN**

---

**ASTRONOMICAL INSTITUTE**

**ABDUJABBAROV AHMADJON ADILJANOVICH**

**PARTICLES AND ELECTROMAGNETIC FIELDS AROUND  
AXIAL-SYMMETRIC COMPACT GRAVITATING OBJECTS**

**01.03.01- Astronomy,  
01.04.02 – Theoretical physics  
(physical and mathematical sciences)**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION**

**Tashkent – 2016**

**The subject of the doctoral dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number 28.04.2016/B2016.2.FM31.**

The doctoral dissertation has been carried out at the Institute of Nuclear Physics and Astronomical Institute.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian and English) is posted on the web page at the address of [www.inp.uz](http://www.inp.uz) and Information-educational portal "Ziyonet" ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific consultant:** **Ahmedov Bobomurat Juraevich**  
doctor of sciences in physics and mathematics, professor

**Official opponents:** **Musakhanov Mirzayusuf Mirzamakhmudovich**  
doctor of sciences in physics and mathematics, professor,  
academician of Uzbekistan Academy of Sciences

**Turakulov Zafar Yalkinovich**  
doctor of sciences in physics and mathematics

**Abishev Medeu Yerjanovich**  
doctor of sciences in physics and mathematics

**Leading organization:** **Institute of Physics in Opava**  
Opava, Czech Republic

Defense will take place on the 28<sup>th</sup> October 2016 at 11<sup>00</sup> at the meeting of Scientific council 14.07.2016.FM.01.05 at National University of Uzbekistan to address: Auditorium #122, Physics Faculty, NUUz, Vuzgorodok, Tashkent 100174, ph.: (+99871)289-31-18; fax: (+99871)289-38-21; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz).

The doctoral dissertation is registered at Information-resource center of National University of Uzbekistan, number \_\_\_\_\_. It is possible to review it in the IRC (NUUz, Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan, 100214), ph.: (+99871) 289-31-19).

Abstract of dissertation sent out on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 year  
(mailing report number \_\_\_\_\_ dated \_\_\_\_\_ 2016)

**Sh.A. Ehgamberdiev**  
Deputy Chairman of scientific council on award of scientific  
degree of doctor of sciences D.Ph.M.S., professor

**R. Yarmukhamedov**  
Scientific secretary of scientific council on award of  
scientific degree of doctor of sciences D.Ph.M.S., professor

**I.Khidirov**  
Chairman of scientific seminar under scientific  
council on award of scientific degree  
of doctor of sciences, D.Ph.M.S., professor

## INTRODUCTION (Annotation of doctoral dissertation)

**Topicality and demand of the theme of dissertation.** Modern astronomical observations on myrovom level on the ground and space telescopes, and recent discoveries have provided convincing evidence that black holes have a significant impact on nearby objects around, emitting powerful gamma-ray bursts, absorbing the next star, and stimulating the growth of newborn stars in the surrounding areas. Study the photons motion around rotating black holes, in particular, the discovery and analysis of the form of silhouettes of these objects, setting and effective implementation of relevant radioastronomical observations on the proof of the existence of the black hole horizon and retrieval of information events on the central object in our galaxy within the Black Hole Cam (BHC) and Event Horizon Telesop (EHT) international projects is one of the most important tasks of modern astrophysics.

In the years of Independence, huge attention is paid to the development of theoretical physics and astronomy and basic research in these areas on a global level. In this regard has been achieved significant results in the field of relativistic astrophysics, in particular, developping a model of the magnetosphere of a neutron star, the analysis of the space-time structure and motion of test particles around black holes.

The study astrophysical processes in the vicinity of compact objects and their comparison with observational data is now one of the most important tasks in astrophysics of compact objects. The most important tasks is to conduct solid research work, in particular studies on following directions: to find the exact solutions describing the space-time around a gravitational compact objects; analysis of space-time structures in the framework of these decisions and find the equation of motion of test particles, such as photons; determining the silhouettes of black holes in general relativity and alternative theories of gravity; determination of the influence of the central object parameters and the plasma environment on the form of a silhouette; identify energy loss dependence on the choice of the relativistic star of the gravity model. These objectives justify the topicality of the global level of scientific research.

This research work corresponds the tasks given by governmental regulatory documents, Orders of President of the Republic of Uzbekistan # UP-559 “Onhigh level astronomical observatories and complexes of their service” from February 11, 1993, # UP-4512 “On works further developing alternative sources of energies” from March 1, 2013.

**Conformity of the research to the main priorities of science and technology development of the republic.** The dissertation research has been carried out in accordance with the priority areas of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. “Power, energy and resource saving”.

### **Review of international scientific researches on dissertation subject<sup>3</sup>.**

The electromagnetic field configurations in the external asymptotically uniform magnetic field, as well as shadows of rotating black holes has been carried out by the world's leading research centers and institutions of higher education, in particular, Astronomical Institute, Albert Einstein Center and the Silesian University in Opava (Czech Republic), the University of Alberta (Canada), the Max Planck Institute for Gravitational Physics - Albert Einstein Institute and the Frankfurt University (Germany), Inter-University Centre of Astronomy and Astrophysics, Research Laboratory of Physics and Tata Institute of Fundamental Research (India), the Centre for Applied Space Technology and Microgravity and the Oldenburg University (Germany), State Astronomical Institute named after Sternberg of Moscow State University (Russia), Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute and National University of Uzbekistan (Uzbekistan).

On the study of particles motion and electromagnetic fields around the black hole in external magnetic field it has been obtained a large number of original scientific results in the globe, including obtaining and study the properties of rotating black holes shadow in the framework of General Relativity and modified alternative theories of gravity (Max Planck Institute for Gravitational Physics - Albert Einstein Institute, Frankfurt University, Germany; Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Physics Research Laboratory, Tata Institute of Fundamental Research, India; the Centre for Applied Space Technology and Microgravity, Germany; State Astronomical Institute named after Sternberg of Moscow State University, Russia, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan); it has been found the structure of the electromagnetic field around a rotating black hole and studied the equations of motion of charged particles around a rotating black hole in the presence of an external magnetic field (Astronomical Institute, Albert Einstein Center and the Silesian University in Opava, Czech Republic; University of Alberta, Canada; Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, India; Centre for Applied Space Technology and Microgravity and Oldenburg University, Germany); study of energetic processes in the vicinity of rotating black holes in the framework of General Relativity and alternative theories of gravity, in particular, study of the properties of space-time properties around a black hole in the gravity model of Horava have been carried out (Albert Einstein Center and Silesian University in Opava, Czech Republic; University of Alberta, Canada; Max Planck Institute for Gravitational Physics - Albert Einstein Institute, Frankfurt University, Germany; Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Physics Research Laboratory, Tata Institute of Fundamental Research, India; the Centre for Applied Space Technology and Microgravity, Germany; State Astronomical Institute named after Sternberg of Moscow State University, Russia, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan).

---

<sup>3</sup> Review of international scientific researches on dissertation subject composed on the basis of the following sources: <http://arxiv.org>; <https://webofknowledge.com>; <https://scholar/google.com>. J. Physical Review Letters; J. Physical Review D; J. Monthly Notices of Royal Astronomical Society; J. Astrophysical Journal; Ж. Astrophysics and Space Science; J. International Journal of Modern Physics D; and others.

Currently, in order to study shadows of rotating black holes, the particles motion and energetic processes in the vicinity of compact gravitational objects there have been carried out investigations in the world in a number of priority areas, including: the study of the photons motion and obtaining shadow of rotating black holes in the framework of general relativity and alternative theories of gravity and their analysis; theoretical modeling of electromagnetic fields around a compact gravitational objects and analysis of particle motion around these objects; study of energetic processes in the vicinity of rotating black holes in the presence of an external electromagnetic field; electromagnetic and gravitational radiation from compact gravitating objects.

**Degree of study of the problem.** Shadow of a rotating black hole with the various parameters of the central object, such as electric charge, brane charge, magnetic charge, in the framework of alternative theories of gravity have been studied by many scientists, for example from Japan (K. Hioki, K. Maeda), USA (J. Bardeen), Netherlands (H. Falcke), Germany (C. Laemmerzahl, V. Perlick, A. Grenzebach), Argentina (L. Amarilla, E. Eiroa), Italy (S. Bambi), Czech Republic (Z. Stuchlik, J. Schee), and others. However, all these works have been carried out in the framework of particular choice of solutions of compact objects and it does not exist a formalism describing shadows of black holes independent from the choice of the model of black holes, gravity theories and methods of measurement.

The solution of the electromagnetic field equations for rotating Kerr black hole in an external asymptotically uniform magnetic field, the study of charged particles motion around a rotating Kerr black hole immersed in an external uniform magnetic field, particles acceleration around a rotating black hole, the role of the magnetic field in the particles collision processes in the vicinity of slowly rotating black hole have been studied by many scientists, for example, from the USA (M. Banados, J. Silk, S.M. West et al.), the UK (R. Wald et al.), Russia (D.V. Gal'tsov, Frolov, A. Aliyev), Turkey (N. Ozdemir), and others. However, a detailed study of the motion of charged particles and energy processes, such as the particles collision near a rotating black hole in an external magnetic field with a nonzero gravitomagnetic charge and/or deformation parameter has not been yet considered. The study of these effects would make constraints on the values of the various parameters of the black hole, such as gravitomagnetic charge and deformation parameter.

Investigations related to the study of the plasma effect on the photon motion around the compact objects in the framework of general relativity have been studied by various authors, in particular from Russia (G.S. Bisnovaty-Kogan, O. Tsupko), Uzbekistan (B.J. Ahmedov, A.A. Tursunov, V.S. Morozov), Canada (A. Rogers), Germany (V. Perlick, J. Kunz), Dutch (H. Falcke), India (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) and others. In these studies, however, there is no investigation related to the study of the impact of inhomogenous plasma on the optical properties of rotating black hole, in particular form a shadow of rotating black hole in the presence of an inhomogenous plasma.

The properties of space-time metric and the motion of the particles in the vicinity of a black hole within the Horava gravity model have been studied by several authors, for example from Czech Republic (Z. Stuchlik, J. Schee), Poland (M. Abramowicz et al.), Portugal (F. Lobo, T. Harko, F. Eiroa), Germany (S. Laemmerzahl, J. Kunz, E. Hackmann et al.), India (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) and others. However, at this moment in the literature there is no research works addressed the study of the impact of the metric parameters of the gravity model on energetic processes and the role of the magnetic field in these processes.

**Connection of the topic of dissertation with the scientific works of scientific research organizations, where the dissertation was carried out.** The dissertation work was carried out in the framework of the scientific projects of the Institute of Nuclear Physics and Astronomical Institute: FA-F2-F079+F069 "Development of the equations of the electromagnetic and gravitational fields in relativistic astrophysics and cosmology, and phenomenological models of QCD in the description of hadrons and their interactions" (2007-2011); FA-F2-F058 "Study of Gravitational Lenses, Formed Galaxies and Generalized Gravitational Models" (2007-2011); FE2-FA-F134 "The particles motion and electromagnetic fields in the vicinity of relativistic stars and black holes in the alternative theories of gravity" (2012-2013); EF2-FA-0-12477 "Motion of particles with spin and propagation of electromagnetic waves in the vicinity of compact gravitational objects" (2014-2015); 1-10 "Particles and fields in the vicinity of relativistic gravitational objects from dark energy and wormholes" (2010-2011).

**The aim of the research** is the development of a theoretical formalism describing shadows of black holes and the identification of the physical laws of high-energetical processes in the vicinity of rotating black holes.

**The tasks of the research:**

to develop a new coordinate-independent formalism to describe the shadow of a black hole, and define new parameters of distortion of black hole shadow;

to make a comparative analysis of the distortion parameters of a black hole shadow, proposed in the framework of the new formalism and parameters obtained by other authors;

to study the electromagnetic field and the charged particles motion in the vicinity of a deformed rotating black hole immersed in an external uniform magnetic field;

to consider the collision of electrically charged particles around a black hole with a non-zero gravitomagnetic charge immersed in an external magnetic field;

to determine the influence of an inhomogeneous plasma to the form of rotating black hole shadow;

to analyze the charged and neutral particles motion and collisions around Kehagias Sfetsos naked singularity in the presence of an external magnetic field;

to obtain estimates of the value of extracted energy from rotating black holes in the gravity model Horava;

to compare electromagnetic fields and spin down of the rotating relativistic compact stars.



**The objects of the research** are the black holes, neutron and strange relativistic stars.

**The subjects of the research** are the electromagnetic fields around compact objects, innermost stable circular orbits of the test particles around black holes, black hole shadow in the presence of plasma, energetic processes around rotating black holes in the presence of external magnetic field.

**The methods of the research.** On the theoretical level, the research methods are mathematical apparatus of macroscopic electrodynamics in general relativity and metric affine differential geometry, analytical and numerical methods for solving differential equations of motion and field.

**The scientific novelty of the research** is the follows:

For the first time a new coordinate-independent formalism to describe the shape of the black holes shadow has been developed and it was revealed that the first five coefficients of the polynomial expansion is sufficient to describe the properties of rotating black holes shadow with the accuracy of  $\sim 0.1\%$ , it has been shown that the proposed definition of distortion of black holes shadow are stable under the signal noise;

it has been found that the observed size of the shadow of the black hole decreases due to the refraction of electromagnetic radiation in a plasma environment;

for the first time it was shown that for the high efficiency of the ultrahigh-energy processes relative to distant observers, both the non-existence of the horizon, and the strong rotational effects are necessary;

it was also shown that significant magnification of the efficiency of the ultrahigh energy collisions is possible due to additional electromagnetic phenomena influencing collisions of charged particles;

for the first time it was shown that energy extraction through Penrose process is more realistic process among the energy extraction mechanisms from the rotating black hole in Horava-Lifshitz scenario; moreover, due to the Horava-Lifshitz gravity correction particles could be prevented from the infinite acceleration.

for the first time it was shown that the effect of compactness of strange star on the electromagnetic power loss of the star is non-negligible;

it was found that the strange star will lose more energy than typical rotating neutron star in general relativity.

**Practical results** of the research are as follows:

The analytical expressions for the vacuum electromagnetic fields of deformed rotating black holes in the external asymptotically uniform magnetic field had been obtained and it has been revealed that the induced electric field around the deformed black hole depends on the deformation parameter linearly, and the magnetic field squared;

expressions for energy and momentum, as well as radii of innermost stable circular orbits of charged particles in the vicinity of a black hole with gravitomagnetic charge immersed in external magnetic field has been obtained. It

has been established that due to the existence of gravitomagnetic charge particles are prevented from acceleration to infinitely high energies;

it has been shown that the shape and size of the observed shadow of a black hole varies depending on the plasma parameters, the rotation parameter of the black hole and the inclination angle between the observer plane and the axis of rotation of the black hole;

an upper limit for the deformation parameter of a rotating non-Kerr black hole has been obtained in the form  $\varepsilon \leq 22$  using the comparison of the observation results on the radius of innermost stable circular orbits with the theoretical results;

it has been obtained the silhouettes of the rotating black holes shadow in the presence of an inhomogeneous plasma, which can be used to identify additional asymmetries in the shape of the shadow and retrieve information on the plasma parameters and the central compact object.

**Reliability of the research results** is provided by the followings: modern methods of general relativity and the theoretical physics and highly effective numerical methods and algorithms are used; careful check of a consistency of the received theoretical results with observational data and results of other authors is performed; conclusions are well consistent with the main provisions of the field theory of gravitational compact objects.

**Scientific and practical significance of the research results.** The scientific significance of the research results is determined by the ability of the developed formalism in the dissertation to analyze the black holes shadow obtained by a new generation of radiotelescopes in the millimeter diapason in the near future, and get an information on the various parameters and properties of the supermassive black holes at the center of our galaxy and galaxy M87. In addition, analysis of the silhouettes with the new formalism makes it possible to design new tests to verify the general relativity and other alternative theories of gravity.

The practical significance of the results of research lies in the fact that they can be used to obtain estimates of black holes of different parameters such as rotation, deformation, and gravitomagnetic charge, as well as the option that appears due to the higher-order corrections in Horava gravity model. Results can also be useful for the analysis of the nature and dynamics of the gravitational field, in the development of observational experiments and criteria for the detection and identification of strange stars.

**Application of the research results.** Ultra-high-energy collisions of particles in the field of near-extreme Kehagias-Sfetsos naked singularities and their appearance to distant observers have been studied in the frame of the program "Supporting Integration with the International Theoretical and Observational Research Network in Relativistic Astrophysics of Compact Objects" (2010-2014) (supported by the Operational Programme Education for Competitiveness funded by Structural Funds of the European Union and state budget of the Czech Republic and registered by number CZ.1.07/2.3.00/20.0071).

Shadows of the black holes and plasma influences have been used to obtain the trajectories of the photons around compact gravitating objects within the

projects of the Central University of Delhi, India (Letter of Central University of Delhi, India from September 20, 2016). These trajectories have been used to obtain the shadows of the black holes within the Born-Infeld gravity theory.

The magnetosphere and slow down of the neutron stars have been used to develop the model of the neutron stars within the projects of Inter University Centre for Astronomy and Astrophysics (Letter from Inter University for Astronomy and Astrophysics, Pune, India from September 21, 2016). The models of the neutron stars have been used to obtain the value of the magnetic field at the stellar surface.

**Approbation of the research results.** The research results were reported in the form of reports and tested at 16 international and local scientific conferences, in particular: «Modern Problems of Physics and Astronomy» (Karshi, 2010), «Modern Problems of Modern Physics» (Samarkand, 2010), «Fusion and Plasma Physics» (Triest, 2011), 39-COSPAR general Assembly (Mysore, 2012), «Nuclear Science and Its Application» (Samarkand, 2012), International school on subnuclear physics (Erice, 2013), «General Relativity and Gravitation» (Warsaw, 2013), «Prague Synergy 2013: Accreting relativistic compact objects» (Prague, 2013), «Synergy Olomouc 2014» (Olomouc, 2014), 40-COSPAR General Assembly (Moscow, 2014), «International Congress of Mathematicians» (Seoul, 2014), , “RAGTime - 2013” (Opava, 2013), “RAGTime - 2014” (Prague, 2014), “RAGTime - 2015” (Opava, 2015), “XII Marcel Grossman Meeting” (Rome, 2015), 41-COSPAR General Assembly (Istanbul, 2012).

The main results of the study were tested at the scientific seminars of the Institute of Nuclear Physics (2010-2016), Astronomical Institute (2010-2016), of the Department of Nuclear and Theoretical Physics of National University of Uzbekistan (2015-2016), Faculty of Philosophy and Science of Silesian University in Opava (Czech Republic, 2013-2016), Goethe University (Germany, 2013-2016), Max Planck Institute for Gravitational Physics (Germany, 2010-2016), Center for Applied Space Technology and Microgravity (Germany, 2011), Tata Institute for Fundamental Research (India, 2014-2015), Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics (India, 2010-2016), Delhi Central University (India, 2010-2016), International Centre for Theoretical Physics (Italy, 2011).

**Publication of the research results.** On the dissertation theme there were published 30 scientific works, including 15 scientific papers in international scientific journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing basic scientific results of doctoral theses.

**Volume and structure of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, one appendix and a bibliography. The size of the dissertation is 181 pages.

## THE MAIN CONTENTS OF THE DISSERTATION

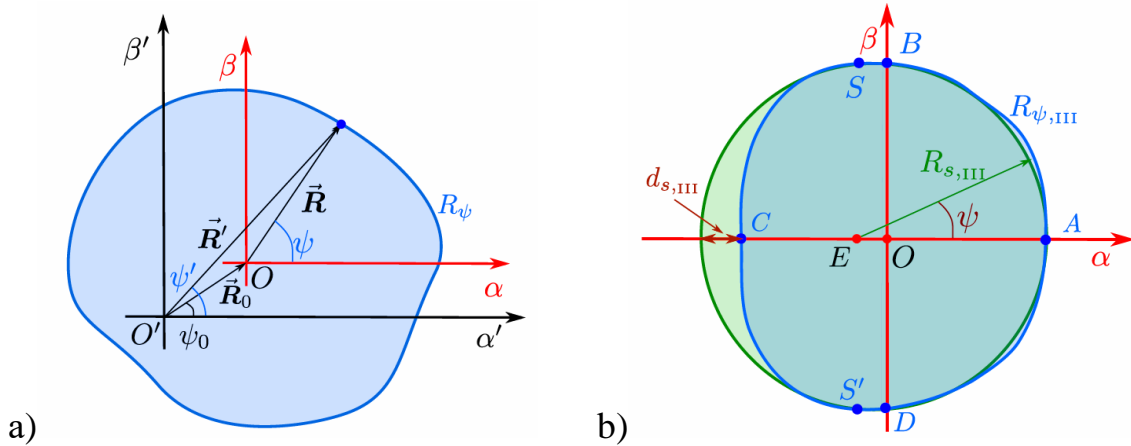
**In the introduction** the topicality and relevance of the dissertation theme were justified, the aims and objectives were formulated, the scientific novelty and the practical results of the study were set out, the reliability of the obtained results was proved and their theoretical and practical significance were disclosed, a summary of the application of the research results and the structure of the dissertation were given.

The first chapter of the thesis entitled “**Photon and particle motion around rotating black hole**” is devoted to study the charged particle motion and the electromagnetic field around rotating non-Kerr black hole and black hole with nonvanishing gravitomagnetic charge immersed in external uniform magnetic field. In this chapter we have developed new general formalism to describe the black hole shadow. The shadow is considered as a closed curve in a flat space, as the one in which the image will be available to us as distant observers.

Assume that the astronomical observations provide the shadow as an one-dimensional closed curve defined by the equation

$$R' = R'(\psi'), \quad (1)$$

where  $R'$  and  $\psi'$  can be thought of as the radial and angular coordinates in a polar coordinate system with origin in  $O'$ . A schematic example of the polar curve is shown in Fig. 1a, where  $\alpha'$  и  $\beta'$  are the so-called “celestial coordinates” of the observer, and represent an orthogonal coordinate system with one of the unit vectors being along the line of sight.



**Fig. 1. Schematic representation of the black-hole shadow:**  
**a) defining the center of the curve**  
**b) defining the reference circle and distortion parameter**

In order to find a better coordinate system, and, in particular, one in which a Schwarzschild black hole has a circular shadow, we define the effective center of the curve in strict analogy with the definition of the center of mass in a collection of point particles

$$\bar{R}_0 := \frac{\int_0^{2\pi} \bar{e}_{R'}(\psi') R' [g_{R'R'}(dR'/d\psi')^2 + g_{\psi'\psi'}]^{1/2} d\psi'}{\int_0^{2\pi} [g_{R'R'}(dR'/d\psi')^2 + g_{\psi'\psi'}]^{1/2} d\psi'}, \quad (2)$$

where  $\bar{e}_{R'}$  is the radial-coordinate unit  $g_{R'R'}$ ,  $g_{\psi'\psi'}$  are the metric functions of the polar coordinate system  $(R', \psi')$ .

From the knowledge of the vector  $\bar{R}_0$ , the coordinate position of the effective centre can be expressed explicitly in terms of the radial and angular coordinates as

$$R_0 := \left( \int_0^{2\pi} R' d\psi' \right)^{-1} \left[ \left( \int_0^{2\pi} R'^2 \cos \psi' d\psi' \right)^2 + \left( \int_0^{2\pi} R'^2 \sin \psi' d\psi' \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\psi_0 := \tan^{-1} \left( \frac{\int_0^{2\pi} R'^2 \sin \psi' d\psi'}{\int_0^{2\pi} R'^2 \cos \psi' d\psi'} \right). \quad (4)$$

Having determined the effective centre of the shadow, it is convenient to define a new polar coordinate system centred in it with coordinates  $(R, \psi)$ . The relation between the two coordinate systems is given by

$$R := \left[ (R' \cos \psi' - R_0 \cos \psi_0)^2 + (R' \sin \psi' - R_0 \sin \psi_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\psi := \tan^{-1} \frac{R' \sin \psi' - R_0 \sin \psi_0}{R' \cos \psi' - R_0 \cos \psi_0}. \quad (6)$$

A well-defined centre of coordinates allows us now to obtain a robust definition of the reference areal circle as the circle having the same area as the one enclosed by the shadow. In particular, given the closed parametric curve  $R = R(\psi)$  its area will in general be given by

$$A := \int_{\psi_1}^{\psi_2} d\psi \int_0^R \sqrt{g_{RR} g_{\psi\psi}} dR = \frac{1}{2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} R^2 d\psi = \frac{1}{2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^2(\lambda) \frac{d\psi}{d\lambda} d\lambda. \quad (7)$$

where in the second equality we have set  $g_{RR} = 1$  и  $g_{\psi\psi} = R^2$ , while in the third equality we consider the representation of the curve in terms of a more generic parameter  $\lambda$  i.e.  $R = R(\psi(\lambda))$ . If the shadow is a closed curve, the integration limits  $\lambda_{1,2}$  can be found from the conditions  $\psi(\lambda) = 0$  и  $\psi(\lambda) = 2\pi$ . We can then define the areal radius RA of the reference circle simply as

$$R_A = \left( \frac{A}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

We define the distortion parameters relatively the reference circle passing three points on the polar curve A, B and D, which occupy precise angular positions at  $\psi = 0$ ,  $\psi = \pi/2$  and  $\psi = 3\pi/2$ , respectively (see diagram in Fig. 1b). The corresponding distances OA, OB и OD from the centre of coordinates O can then be expressed as

$$R_A = R_\psi(\psi = 0) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=0} = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell = \tilde{A}, \quad (9)$$

$$R_B = R_\psi(\psi = \pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=\pi/2} = \sum_{\ell=0}^{\infty} (-1)^\ell \frac{(2\ell)!}{2^{2\ell}(\ell!)^2} c_\ell = \tilde{B}, \quad (10)$$

$$R_D = R_\psi(\psi = 3\pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} c_\ell P_\ell(\cos\psi) \Big|_{\psi=3\pi/2} = R_B. \quad (11)$$

Next, we define a new parametric curve for which  $R_A = R_B = R_D$  and thus that satisfies the following condition

$$c_{2\ell-1} = c_{2\ell} \left[ (-1)^\ell \frac{(2\ell)!}{2^{2\ell}(\ell!)^2} - 1 \right]. \quad (12)$$

We can now compute the deviation of the parametric curve from the corresponding background circle passing the points A, B and D at any angular position. However, as customary in this type of considerations, we can consider the shadow to be produced by a rotating black hole with spin axis along the  $\beta$  axis, so that the largest deviations will be on the axis of negative  $\alpha$ . More specifically, we can define the difference between the curves at  $\psi = \pi$  as

$$d_{s,I} := R_{s,I} - R_{\psi,I}(\psi = \pi) = \tilde{B} - \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{2\ell} + \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1}, \quad (13)$$

or for the dimensionless distortion parameter

$$\delta_{s,I} := \frac{d_{s,I}}{R_{s,I}} = \frac{2 \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1}}{\tilde{B}}. \quad (14)$$

A second possible definition of the distortion parameter is slightly more general and assumes that the radial distance of points A and B from the centre of coordinates is not necessarily the same, i.e.  $R_A \neq R_B$ . In this case, one can think of introducing a new point E on the  $\alpha$  axis, such that the distances  $AE=EB$  and which could therefore serve as the centre of the reference circle.

We can introduce the distortion parameter as

$$\delta_{s,I} := \frac{d_{s,II}}{R_{s,II}} = 2 \left( \frac{\tilde{B}^2 - \tilde{A}\tilde{C}}{\tilde{B}^2 + \tilde{A}^2} \right), \quad (15)$$

where  $d_{s,II}$  is the distortion of the curve from the reference circle and

$$\tilde{C} = R_\psi(\psi = 3\pi/2) = \sum_{\ell=0}^{\infty} (-1)^\ell c_\ell. \quad (16)$$

A third and possibly optimal definition of the distortion parameter is one that is meant to consider the case in which the shadow is still reflection symmetric relative to the  $\alpha$  axis, but does not cross the  $\beta$  axis with a zero slope, i.e. the point S, where curve has zero slope does not lie on axis  $\beta$ .

Assuming that reference circle passes the points A and S with the center at E, one can easily find the radius and distortion parameter in the form

$$R_{s,III} = \frac{\tilde{A}^2 - 2x_s \tilde{A} \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) + \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right)^2}{2 \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} (1 - P_{\ell}(x_s) x_s)}, \quad (17)$$

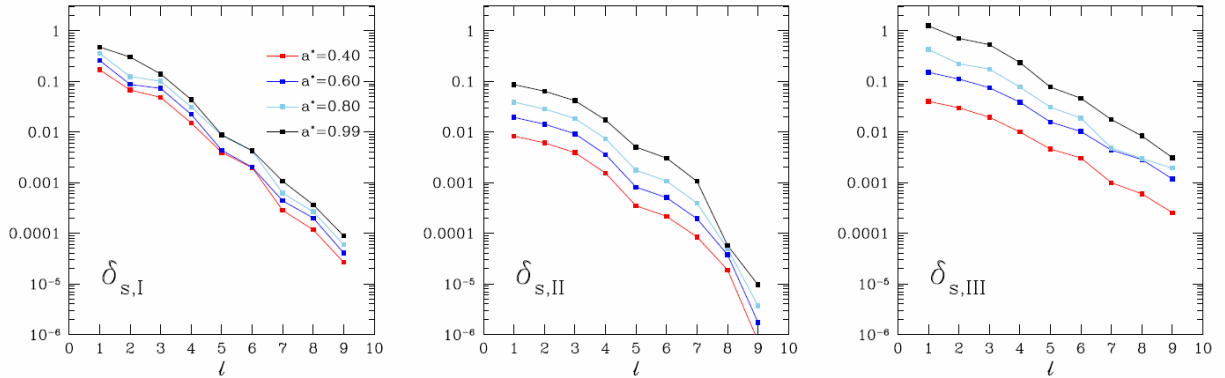
$$d_{s,III} = 2R_{s,III} - R_A + R_C = \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) \frac{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) - x_s \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1} - \tilde{A} \tilde{C}}{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} (1 - P_{\ell}(x_s) x_s)}, \quad (18)$$

$$\delta_{s,III} = \frac{d_{s,III}}{R_{s,III}} = 2 \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) \frac{\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) - x_s \sum_{\ell=1}^{\infty} c_{2\ell-1} - \tilde{A} \tilde{C}}{\tilde{A}^2 - 2x_s \tilde{A} \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right) + \left( \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x_s) \right)^2}, \quad (19)$$

where  $x_s$  is the solution of the equation

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} P_{\ell}(x) x - \sum_{\ell=0}^{\infty} c_{\ell} \frac{dP_{\ell}(x)}{dx} (1 - x^2) = 0. \quad (20)$$

In Fig. 2 the values of the dimensionless distortion parameters as computed for the shadow of a Kerr black hole and for increasing values of the expansion index  $\ell$ . The three different panels in Fig. 2 are relative respectively to the parameters  $\delta_{s,I}$ ,  $\delta_{s,II}$  и  $\delta_{s,III}$ , respectively. From the dependenc one can easily see that each of the three distortion parameters decreases as the expansion includes higher order terms. At the same time, because larger rotation rates introduce larger distortions in the shadow, they also lead to larger values of the distortion parameters for a fixed value of  $\ell$ .



**Fig. 2. Dependences of the distortion parameters from the expansion order for the different values of rotation parameter of the black hole**

The deformed Kerr-like metric which describes a stationary axisymmetric, and asymptotically flat vacuum spacetime, in the standard Boyer-Lindquist coordinates, can be expressed as

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2} \right) (1+h) dt^2 - \frac{4aMr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h) dt d\varphi + \frac{\Sigma^2 (1+h)}{\Delta + a^2 h \sin^2 \theta} dr^2 + \Sigma^2 d\theta^2 + \left[ \Sigma^2 + \frac{a^2 (\Sigma^2 + 2Mr) \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h) \right] \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (21)$$

where  $S^2 = r^2 + a^2 \cos^2 q$ ,  $D = r^2 - 2Mr + a^2$ ,  $h = eM^3 r / S^4$ , and the constant  $e$  is the deformation parameter. The quantity  $e > 0$  and  $e < 0$  corresponds to the cases in which the compact object is more prolate or oblate than the Kerr black hole,

respectively. As  $e=0$ , the black hole is reduced to the typical Kerr black hole known in general relativity. The the 4-vector potential  $A_\mu$  of the electromagnetic field will take the following form

$$A_0 = -aB \frac{\Sigma^2 - 2Mr + Mr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1+h), \quad A_1 = 0, \quad A_2 = 0, \quad (22)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} B \sin^2 \theta \left[ \Sigma^2 + \frac{(2Mr + \Sigma^2) \sin^2 \theta - 4Mr}{\Sigma^2} a^2 (1+h) \right]. \quad (23)$$

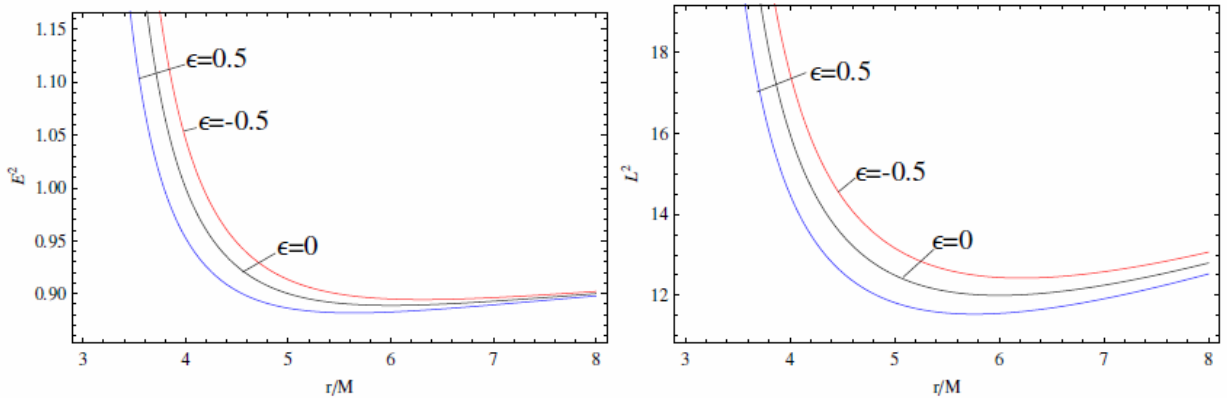
The motion of the charged particles around a rotating non-Kerr black hole can be studied using the Hamilton-Jacobi equation

$$g^{\mu\nu} \left( \frac{\partial S}{\partial x^\mu} - eA_\mu \right) \left( \frac{\partial S}{\partial x^\nu} - eA_\nu \right) = -m^2, \quad (24)$$

where  $e$  and  $m$  are the charge and the mass of a test particle, respectively. Due to the existence of the timelike and spacelike Killing vectors one can write the action in the form

$$S = -Et + L\varphi + S_{r\varphi}(r, \varphi). \quad (25)$$

where the conserved quantities  $E$  and  $L$  are the energy and the angular momentum of a test particle at infinity.



**Fig. 3. Radial dependence of the energy (left plot) and angular momentum (right panel) of the particles moving along circular orbits around rotating non-Kerr black hole for the different values of deformation parameter**

Fig 3 shows the radial dependence of both the energy and the angular momentum of the test particle moving on circular orbits around non-Kerr black hole in the equatorial plane. One can easily see that the presence of the negative deformation parameter forces a test particle to have bigger energy and angular momentum in order to be kept on its circular orbit. It is a consequence of the increase of the gravitational potential of the rotating non-Kerr black hole with the negative deformation parameter. In the case of positive deformation parameter the shape of graphs shifts towards the origin and means that the stable orbits shifts towards the central object.



In the dissertation it has been found the solution for the ISCO radius  $\rho_{ISCO} = r_{ISCO}/M$  in the limit of small  $\varepsilon$  in the following form

$$\rho_{ISCO} = 6 - \frac{2\varepsilon}{9} + O(\varepsilon^2), \quad (26)$$

In the astrophysical situation when  $b = eBM/m \gg 1$ , the analytic expression for ISCO has the form

$$\rho_{ISCO} = 1 + \frac{1 - 2a^2/M^2 - \varepsilon}{\sqrt{6}b} + O(b^{-2}, \varepsilon^2), \quad (27)$$

Consider the center-of-mass collision of two particles in the vicinity of a black hole with nonvanishing gravitomagnetic charge, when one of these particles has the mass  $m$  and charge  $q$  and rotates along the circular orbit. Another particle is neutral and freely falls from the rest at spatial infinity. The center of mass energy of the colliding particle has the following form:

$$\frac{E_{c.m.}}{m} \cong 0.3 \sqrt{\frac{96 - l^2}{\sqrt{8 + l^2}}} b^{1/4}, \quad (28)$$

where  $l$  is the gravitomagnetic charge of the central black hole.

The second chapter of the thesis entitled **“Optical properties of black hole in the presence of plasma”** is devoted to study the optical properties of the rotating black holes in the presence of the inhomogenous plasma.

The spacetime around rotating black hole is described by the metric

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2}\right) dt^2 - \frac{4aMr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} dt d\varphi + \frac{\Sigma^2}{\Delta} dr^2 + \Sigma^2 d\theta^2 + \left[\Sigma^2 + \frac{a^2(\Sigma^2 + 2Mr) \sin^2 \theta}{\Sigma^2}\right] \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (29)$$

where  $M$  and  $a$  are the total mass and the specific angular momentum of the black hole, respectively.

Consider the plasma surrounding the central axially symmetric black hole. The refraction index of the plasma will be  $n = n(x^i, \omega)$ , where the photon frequency measure by observer with velocity  $u^\alpha$  is  $\omega$ . In this case the effective energy of photon has the form  $\hbar\omega = -p_\alpha u^\alpha$ . The refraction index of the plasma as a function of the photon four-momentum has the following form:

$$n^2 = 1 + \frac{p_\alpha p^\alpha}{(p_\beta u^\beta)^2}, \quad (30)$$

and for the vacuum case one has the relation  $n = 1$ . The Hamiltonian for the photon around an arbitrary black hole surrounded by plasma has the following form:

$$H(x^\alpha, p^\alpha) = \frac{1}{2} \left[ g^{\alpha\beta} p_\alpha p_\beta + (n^2 - 1) (p_\beta u^\beta)^2 \right] \quad (31)$$

Assume that the refractive index has the general form

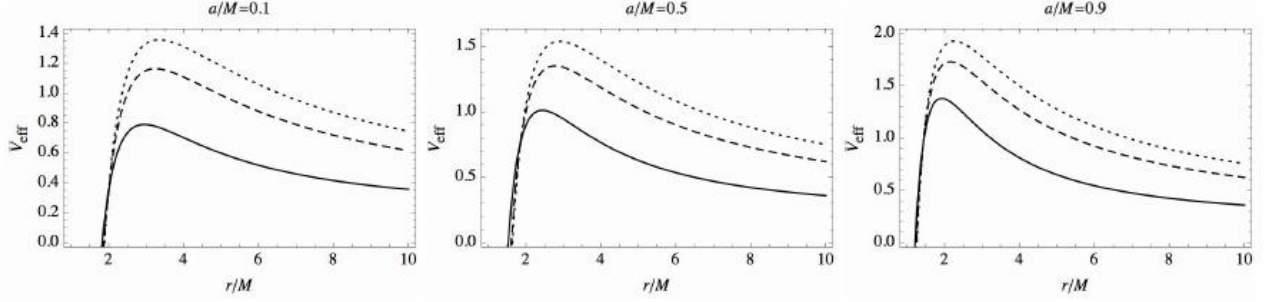
$$n^2 = 1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}, \quad (32)$$

where  $\omega_e$  is the plasma frequency.

We will use the Hamilton-Jacobi equation to define the equation of motion of the photons for a given space-time geometry

$$\frac{\partial S}{\partial \sigma} = -\frac{1}{2} \left[ g^{\alpha\beta} p_\alpha p_\beta - (n^2 - 1) (p_0 \sqrt{-g^{00}})^2 \right], \quad (33)$$

where  $p_\alpha = \partial S / \partial x^\alpha$ .



**Fig. 4.** The radial dependence of the effective potential of radial motion of photons for the different values of rotation parameter and refraction index of the plasma. Here the quantity  $V_{\text{eff}}$  is normalised by the energy of the photon

The radial dependence of the effective potential for different values of plasma refraction  $n$  and black hole spin  $a$  has been presented in Fig. 4. In the plots, in Fig. 4  $n^2 = 0.2; 0.44; 0.89$  for dotted, dashed and solid lines, respectively. One can easily see, that with the decrease the refraction parameter of the plasma the radius of the circular orbits also decrease.

Consider the shadow cast by black hole surrounded by plasma. If black hole surrounded by plasma originated between the light source and the observer, then the latter can observe the black spot on the bright background. The observer at the infinity can only observe the light beam scattered away and due to capturing of the photons by the black hole the shaded area on the sky would be appeared. This spot corresponds to the shadow of the black hole and its boundary can be defined using the equation of motion around black hole.

In order to describe the apparent shape of the the black hole surrounded by plasma we need to consider the closed orbits around it. Since the equations of motion depend on conserved quantities  $E$ ,  $L$  and the Carter constant  $K$ , it is convenient to parametrize them using the normalised parameters  $\xi = L/E$  and  $\eta = K/E^2$ .

The silhouette of the black hole shadow in the presence of the plasma can be found using the conditions

$$u^r = 0, \quad \frac{du^r}{dr} = 0, \quad (34)$$

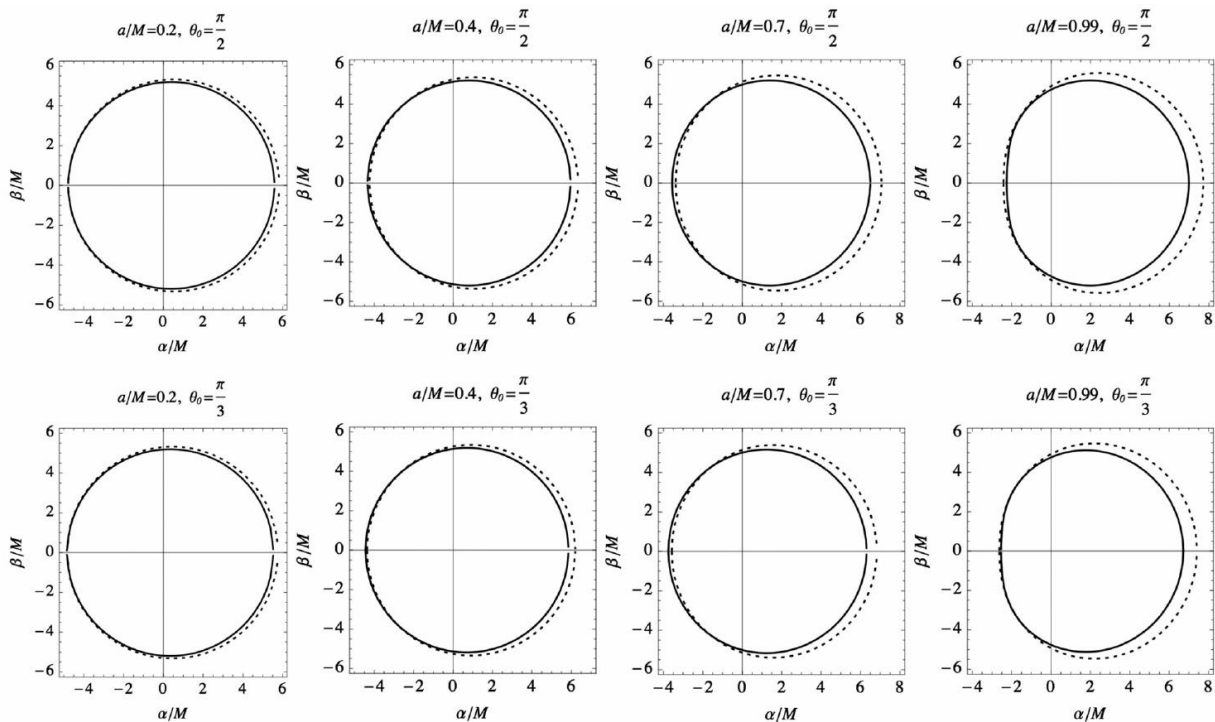
where  $u^r$  is the radial velocity of the photons.

The boundary of the black hole's shadow can be fully determined through the equation of motion of photons. However, the shadow will be observed at 'observer's sky', which can be referenced by the celestial coordinates related to the real astronomical measurements. The celestial coordinates are defined as

$$\alpha = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} \left( -r_0^2 \sin \theta_0 \frac{d\phi}{dr} \right), \quad \beta = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} \left( -r_0^2 \frac{d\theta}{dr} \right), \quad (35)$$

where  $r_0$  is the distance between black hole and observer,  $\theta_0$  is the inclination angle between axis of rotation and observer plane.

In Fig 5 the shadow of the rotating black hole for the different values of black hole rotation parameter, inclination angle between the observer and the axis of the rotation is represented. From the Fig. 5 one can observe the change of the size and shape of the rotating black hole surrounded by plasma. Physical reason for this is due to gravitational redshift of photons in the gravitational field of the black hole. The frequency change due to gravitational redshift affects on the plasma refraction index.



**Fig. 5. Shadow of rotating black hole in the absence (solid lines) and presence (dashed lines) of plasma**

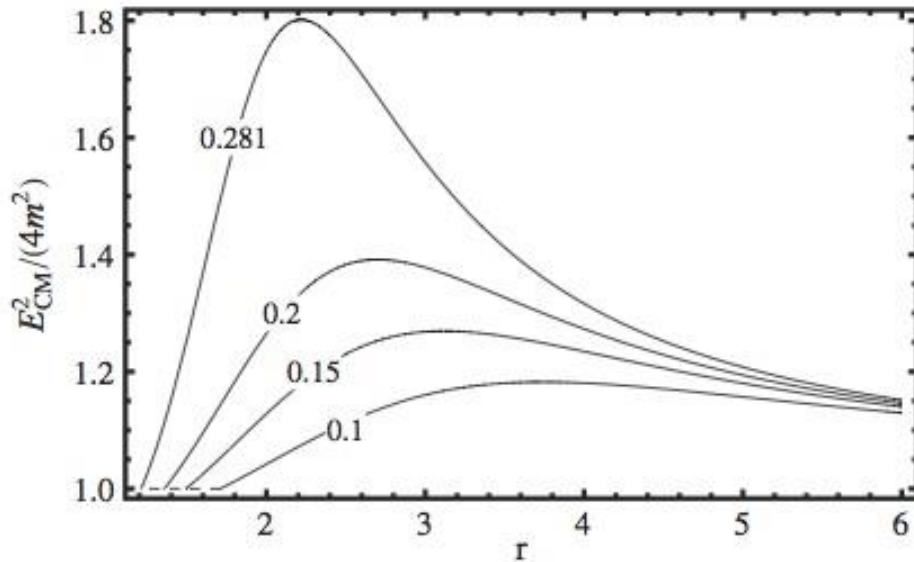
The third chapter of the thesis entitled “**Energetic processes around black hole in Horava-Lifshitz gravity**” is devoted to study the energetic processes around black hole in Horava-Lifshitz gravity. The geometry of the Kehagias-Sfetsos spacetime is analyzed. The spherically symmetric solution of the so called modified Horava gravity, allowing for the Schwarzschild spacetime as an appropriate limit, is the Kehagias-Sfetsos (KS) spacetime, described in the standard Schwarzschild coordinates and the geometric units by the line element

$$ds^2 = -\left(1+r^2\omega\left[1-\left(1+\frac{4M}{\omega r^3}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right)dt^2 + \left(1+r^2\omega\left[1-\left(1+\frac{4M}{\omega r^3}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right)^{-1}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (36)$$

We consider the photon motion and Keplerian orbits in KS spacetime. Ultra-high energy collision of the particles have been studied. We calculate the center of mass energy of colliding particles in three characteristic cases. Two of them correspond to the situations when the ultra-high-energy collisions were treated in the field of near-extreme superspinning Kerr geometry – namely the collisions of particles in radial free fall from infinity ( $E = m$  and  $L = 0$ ) with particles following geodesic circular orbits, or with radially escaping particles having  $E = m$  and  $L = 0$  that inverted their motion at  $r = 0$ . As the third case we consider collisions of particles moving in the equatorial plane with opposite angular momentum at the turning point of their radial motion. For simplicity, we consider collisions of identical particles, having the same rest energy. The CM energy reads

$$E_{c.m.} = 2m^2\left(1 - g_{\alpha\beta}u_1^\alpha u_2^\beta\right) \quad (37)$$

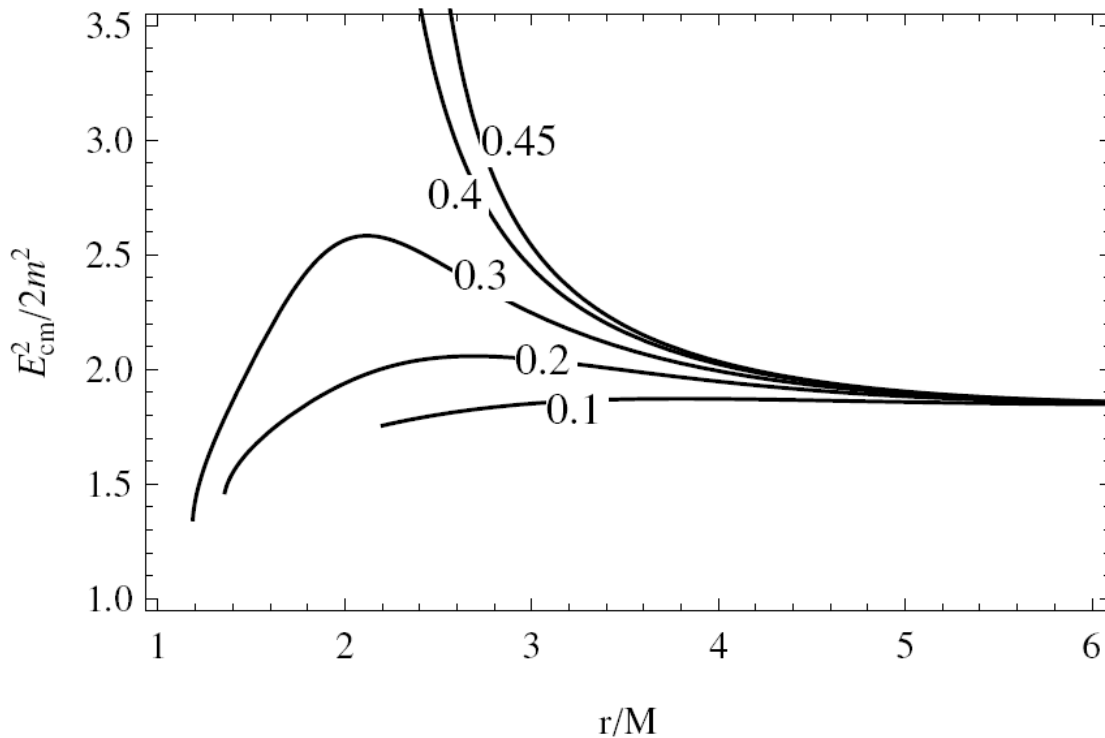
The behaviour of the CM energy of the collisions between radially falling particles and orbiting particles on Keplerian orbits is presented in Fig. 6. One clearly sees that the maximum of the collisional CM energy decreases with decreasing value of parameter  $\omega$ . The location of the maximum shifts to the larger values of the radius  $r$  with decreasing value of the parameter  $\omega$ .



**Fig. 6. The plots of the CM energy of the collisions between radially falling particles and orbiting particles on Keplerian orbits are given for five representative values of the parameter  $\omega = 0.1, 0.15, 0.2,$  and  $0.281$**

The results obtained for some characteristic values of the magnetic parameter  $b$  and KS parameter  $\omega$  are illustrated in Fig. 7. They are demonstrating a critical

role of the magnetic field enabling a significant enhancement of the acceleration of particles in the combined gravitational and electromagnetic fields of the KS naked singularities immersed in a uniform magnetic field.



**Fig.7. Centre of mass energy of head on collision of charged particle on circular orbit and neutral particle coming from infinity for the value of parameter  $b$ : the parameter  $b = 0.1$ . The angular momentum of the neutral particle is taken to be  $L = 1$**

The description of the rotating black hole solution and ergosphere around it has been considered. Penrose process in the ergosphere of the rotating black hole in Horava–Lifshitz gravity has been studied. Also in this chapter we study the particle acceleration mechanism near the black hole in Horava-Lifshitz gravity.

The third chapter of the thesis entitled “**Electrodynamics and spin down of magnetized neutron stars**” is devoted to study the general relativistic effects on the electromagnetic luminosity of a rotating magnetic strange star, which is produced due to the rotation of the strange star with the inclined dipolar magnetic field configuration. It is shown that the effect of compactness of strange star on the electromagnetic power loss of the star is non-negligible (may have the order of tens percents of the value for the neutron star) and may help in future in distinguishing the strange star model via pulsar timing observations.

We studied the spin-down of a rotating strange star due to magnetodipolar electromagnetic emission. Assume that the oblique rotating magnetized star is observed as radio pulsar through magnetic dipole radiation. Then the luminosity of the relativistic star in the case of a purely dipolar radiation, and the power radiated in the form of dipolar electromagnetic radiation, is given as

$$L_{em} = \frac{\Omega^4 R^6 \tilde{B}_0^2}{6c^3} \sin^2 \chi, \quad (38)$$

where tilde denotes the general relativistic value of the corresponding quantity, subscript  $R$  denotes the value of the corresponding quantity at  $r = R$  and  $\chi$  is the inclination angle between magnetic and rotational axes. We used the spacetime of slowly rotating relativistic star.

When compared with the equivalent Newtonian expression for the rate of electromagnetic energy loss through dipolar radiation

$$(L_{em})_{Newt} = \frac{\Omega^4 R^6 B_0^2}{6c^3} \sin^2 \chi, \quad (39)$$

it is easy to realize that the general relativistic corrections emerging in expression (19) are due partly to the magnetic field amplification at the stellar surface

$$\frac{\tilde{B}_0}{B_0} = \frac{\tilde{B}_0 R^3}{2\mu} = f_R = -\frac{3R^3}{8M^3} \left[ \ln N^2 + \frac{2M}{R} \left( 1 + \frac{M}{R} \right) \right], \quad (40)$$

and partly to the increase in the effective rotational angular velocity produced by the gravitational redshift

$$\Omega(r) = \Omega_R \frac{N_R}{N} = \Omega_R \sqrt{\left( \frac{R-2M}{r-2M} \right) \frac{r}{R}}. \quad (41)$$

Energy loss can be written in a more useful form in terms of the pulsar's most important observables: the period  $P$  and its time derivative  $\dot{P} = dP/dt$ . Results are summarized in the Table 1 from where one can see that the strange star is spinning down approximately 5 times faster than that of the neutron star.  $P$  is the period and dot denotes the time derivative. According to the astrophysical observations the majority of pulsars have the periods of 1 s and period derivatives of  $10^{-16}$  to  $10^{-14}$ . Since period derivatives are in the range of about two orders one may conclude that the neutron stars have less period derivative with compare to the strange stars.

Assume the presence of plasma magnetosphere around a rotating strange star and study the spin-down of it due to the magnetospheric energy losses through plasma outflow along the open field lines.

Using expression for the total power carried away by the relativistically moving particles one can calculate maximum value for luminosity:

$$(L_p)_{max} = \frac{3}{2} \kappa (1 - \kappa) L_{em}. \quad (42)$$

Where the parameter  $k = 2I/R^3$  is the compactness parameter of the star with moment of inertia  $I$ .

**Table 1**

**The dependence of the ratio  $(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$  from the different parameters of the compact object: mass (in units of solar mass), radii and moment of inertia of the Strange  $(R_{SS}, I_{SS})$  and Neutron  $(R_{NS}, I_{NS})$  stars.**

$(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$	4,34463	4.53723	5.1094	6.16863
$M / M_{\square}$	1.2	1.3	1.4	1.5
$R_{SS}, km$	7.48	7.62	7.69	7.68
$R_{NS}, km$	11.75	11.72	11.7	11.68
$I_{SS}, \times 10^{45} gm cm^2$	0.65	0.74	0.825	0.9
$I_{NS}, \times 10^{45} gm cm^2$	1.08	1.2	1.36	1.72

Using the data for the mass, the radius, the moment of inertia of neutron stars and strange stars we have calculated the ratio of spin down of neutron star to one of the strange star for the compact stars of the different masses. Results are summarized in the table 2 from where one can see that the strange star is spinning down approximately 5 times slower than the neutron star.

**Table 2**

**The dependence of the ratio  $(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$  from the different parameters of the compact object: mass (in units of solar mass), radii and moment of inertia of the Strange  $(R_{SS}, I_{SS})$  and Neutron  $(R_{NS}, I_{NS})$  stars surrounded by plasma magnetosphere**

$(\dot{P}\dot{P})_{SS} / (\dot{P}\dot{P})_{NS}$	0,2053	0.2165	0.2199	0.2146
$M / M_{\square}$	1.2	1.3	1.4	1.5
$R_{SS}, km$	7.48	7.62	7.69	7.68
$R_{NS}, km$	11.75	11.72	11.7	11.68
$I_{SS}, \times 10^{45} gm cm^2$	0.65	0.74	0.825	0.9
$I_{NS}, \times 10^{45} gm cm^2$	1.08	1.2	1.36	1.72

As an important application of the obtained results we have calculated energy losses of slowly rotating strange star and found that the strange star will lose more energy than typical rotating neutron star in general relativity. The obtained dependence may be combined with the astrophysical data on pulsar period slowdowns and be useful in further investigations of the possible detection/distinguish of the strange stars.

The total energy loss resulting from the magnetized star causing plasma outflow through the polar cap region, is determined through an integral over the whole polar cap area, and so it depends on both the kinetic energy density of the

outflowing plasma and the surface area of the polar cap. Although general relativistic effects lead to some increase in the energy density of the outflowing plasma (due to the increase in the surface magnetic field strength for a given magnetic moment), the area of the polar cap is smaller in general relativity and the increasing the energy density of the outflowing plasma cannot compensate for the shrinking in size of the polar cap. Therefore the total energy losses of the star are significantly smaller in general relativity than in Newtonian theory. Since strange stars have bigger compactness parameter than that of neutron stars the energy loss of the strange stars is much slower.

**In the appendices** we present the exact expressions for the electromagnetic field around rotating non-Kerr black hole immersed in external magnetic field; expressions for the electric and magnetic field around nonrotating black hole with nonvanishing gravitomagnetic charge; potential of electromagnetic field around Kehagias-Sfetsos naked singularity in external magnetic field; equation of motion of photons and particles around Kehagias-Sfetsos naked singularity in the external magnetic field.

## CONCLUSION

According to the results of the research carried out on the theme of the doctoral dissertation “Particles and electromagnetic fields around axial-symmetric compact gravitating objects”, the following conclusions are presented:

1. We have developed a new general and coordinate-independent formalism in which the shadow is described as an arbitrary polar curve expressed in terms of a Legendre expansion. It was revealed that the first five coefficients of the polynomial expansion is sufficient to describe the properties of rotating black holes shadow with the accuracy of  $\sim 0.1\%$ . Our formalism does not presume any knowledge of the properties of the shadow and offers a number of routes to characterize the properties of the curve. It has been shown that the proposed definition of distortion of black holes shadow are stable under the signal noise.

2. The analytical expressions for the vacuum electromagnetic fields of deformed rotating black holes in the external asymptotically uniform magnetic field has been obtained. It has been revealed that the induced electric field around the deformed black hole depends on the deformation parameter linearly, and the magnetic field squared.

3. An upper limit for the deformation parameter for the rotating non-Kerr black hole has been obtained through comparison of the observable values of the radius of innermost stable circular orbits with the theoretical results obtained in the dissertation as  $\varepsilon \leq 22$ .

4. It has been obtained the silhouettes of the rotating black holes shadow in the presence of an inhomogeneous plasma, which can be used to identify additional asymmetries in the shape of the shadow and retrieve information on the plasma parameters and the central compact object.



5. Expressions for energy and momentum, as well as radii of innermost stable circular orbits of charged particles in the vicinity of a black hole with gravitomagnetic charge immersed in external magnetic field has been obtained. It has been established that due to the existence of gravitomagnetic charge particles are prevented from acceleration to infinitely high energies.

6. It has been shown that In the presence of a plasma the observed shape and size of the shadow changes depending on (i) the plasma parameters, (ii) the black hole spin, and (iii) the inclination angle between the observer plane and the axis of rotation of the black hole. It has been found that the observed size of the shadow of the black hole decreases due to the refraction of electromagnetic radiation in a plasma environment. It was shown that with the increase of the dimensionless plasma parameter, the maximum value of the energy emission rate from the black hole decreases due to the decrease of the size of the black hole shadow.

7. It was shown that for the high efficiency of the ultrahigh-energy processes relative to distant observers, both the non-existence of the horizon, and the strong rotational effects are necessary; it was also shown that significant magnification of the efficiency of the ultra-high energy collisions is possible due to additional electromagnetic phenomena influencing collisions of charged particles.

8. It was shown that energy extraction through Penrose process is more realistic process among the energy extraction mechanisms from the rotating black hole in Horava-Lifshitz scenario; moreover, due to the Horava-Lifshitz gravity correction particles could be prevented from the infinite acceleration.

9. It was shown that the effect of compactness of strange star on the electromagnetic power loss of the star is non-negligible and may help in future in distinguishing the strange star model via pulsar timing observations. It was found that the relativistic strange star would lose more energy than typical rotating neutron star in general relativity. The obtained dependence may be useful in further investigations of the possible detection/distinguishment of the strange stars.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Abdujabbarov A.A., Ahmedov B.J. Test particle motion around a black hole in a braneworld // *Physical Review D.* – New York (USA), 2010. – vol. 81, N 4. – id.044022. – 9p. (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).

2. Morozova V.S., Ahmedov B.J., Abdujabbarov A.A., Mamadjanov A.I. Plasma magnetosphere of rotating magnetized neutron star in the braneworld // *Astrophysics and Space Science.* - Berlin Heidelberg: Springer (Germany), 2010. – vol. 330, N 2. – pp.257-266 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 2,263).

3. Abdujabbarov A.A., Ahmedov B.J., Ahmedov B.B. Energy extraction and particle acceleration around a rotating black hole in Horava-Lifshitz gravity // *Physical Review D.* -New York (USA), 2011. – vol. 84, N 4. – id.044044. – 6p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).

4. Ahmedov B.J., Ahmedov B.B., Abdujabbarov A.A. Spin Down of Rotating Compact Magnetized Strange Stars in General Relativity// *Astrophysics and Space Science.* – Berlin Heidelberg: Springer (Germany), 2012. – vol. 338. – pp. 157-161 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 2,263).

5. Ahmedov B.J., Abdujabbarov A.A., Fayzullaev D.B. Plasma magnetosphere and spin down of rotating magnetized strange stars in general relativity // *Astrophysics and Space Science* - Berlin Heidelberg: Springer (Germany), 2013. – vol. 346, N 2. – pp. 507-512 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 2,263).

6. Abdujabbarov A., Tursunov A., Ahmedov B., Kuvatov A. Acceleration of particles by black hole with gravitomagnetic charge immersed in magnetic field // *Astrophysics and Space Science.* – Berlin Heidelberg: Springer (Germany), 2013. – vol. 343, N 1. – pp. 173-179 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 2,263).

7. Abdujabbarov A., Ahmedov B., Jurayeva N. Charged-particle motion around a rotating non-Kerr black hole immersed in a uniform magnetic field// *Physical Review D.* –New York (USA), 2013. – vol. 87, N 6. – id.064042. – 8p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).

8. Abdujabbarov A., Dadhich N., Ahmedov B., Eshkuvatov H. Particle acceleration around a five-dimensional Kerr black hole // *Physical Review D.* – New York, 2013. – vol. 88, N 8. – id.084036. – 7p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).

9. Tursunov A.A., Kolos M., Abdujabbarov A., Ahmedov B., Stuchlik Z. Acceleration of particles in spacetimes of black string // *Physical Review D.* – New York (USA), 2013. – vol. 88, N 12. – id.124001. – 19p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).

10. Toshmatov B., Ahmedov B., Abdujabbarov A., Stuchlik Z. Rotating regular black hole solution // *Physical Review D.* –New York (USA), 2014. – vol. 89, N 10. – id.104017. – 8p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).

11. Stuchlik Z., Schee J., Abdujabbarov A. Ultra-high-energy collisions of particles in the field of near-extreme Kehagias-Sfetsos naked singularities and their appearance to distant observers // *Physical Review D*. -New York (USA), 2014. – vol. 89, N 10. – id.104048. – 19p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).
12. Toshmatov B., Abdujabbarov A., Stuchlik Z., Ahmedov B. Quasinormal modes of test fields around regular black holes // *Physical Review D*. -New York (USA), 2015. – vol. 91, N 8. – id.083008. – 13p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).
13. Toshmatov B., Abdujabbarov A., Ahmedov B., Stuchlik Z. Particle motion and Penrose processes around rotating regular black hole // *Astrophysics and Space Science - Berlin Heidelberg: Springer (Germany)*, 2015. – vol. 357, N 1. – pp.1-15 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 2,263).
14. Abdujabbarov A.A., Rezzolla L., Ahmedov B.J., A coordinate-independent characterization of a black-hole shadow // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – London (UK)*, 2015. – vol. 454, N 3, pp. 2423-2435. (№ 39. Impact Factor Search; IF =5,107)
15. Atamurotov F., Ahmedov B., Abdujabbarov A. Optical properties of black holes in the presence of a plasma: The shadow // *Physical Review D*. -New York (USA), 2015. – vol. 92, N 8. – id. 084005. – 7p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,643).

## **II бўлим (II часть; part II)**

16. Абдужаббаров А.А., Тожиев С.Р. Движение частицы в гравитационном поле черной дыры на бранах // В материалах республиканской конференции «Современная физика и ее перспективы». – 12-13 ноября, 2009 г., Ташкент. – с. 278-281.
17. Abdujabbarov A.A., Ahmedov B.J. Test particle motion around black hole in braneworld // 7-th Int. Conf. Modern Problems of Nuclear Physics, 22-25 Sep., 2009, Tashkent. – PP. 54-56.
18. Абдужаббаров А.А., Ахмедов Б.Б. Извлечение энергии вращающейся черной дыры в модели Хоравы-Лифшица // III Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии». – 1-2 декабря, 2010 г., Ташкент. – с. 7-10.
19. Abdujabbarov A.A. Energy extraction from black holes: Current status and perspectives // *Int. Conf. Nucl. Science and its application*. - 25-28 Sep., 2012, Samarkand. - P. 48.
20. Abdujabbarov A.A. Magnetized particle capture cross section for braneworld black hole // 9th COSPAR Scientific Assembly. – 14-22 July 2012. – Mysore, India. – Abstract C2.2-42-12, p.7.
21. Atamurotov F.Sh., Abdujabbarov A.A. Silhouette of the shadow by Horava-Lifshitz black hole // *Материалы международной конференции, посвященной 75-летию академика НАН РК Абдильдина М.М. «Актуальные проблемы современной физики»* - Алматы, 15-16 марта, 2013 г. – С. 24.

22. Abdujabbarov A.A. Charged-particle motion around a rotating non-Kerr black hole immersed in a uniform magnetic field // International Congress of Mathematicians – Seoul, Republic of Korea, 13-21 August, 2014. – P. 140.
23. Abdujabbarov A.A. Particle motion and electromagnetic fields of rotating compact gravitating objects with gravitomagnetic charge // International Congress of Mathematicians – Seoul, Republic of Korea, 13-21 August, 2014. – P. 140.
24. Abdujabbarov A.A. Shadow of rotating non-Kerr black hole // International Congress of Mathematicians – Seoul, Republic of Korea, 13-21 August, 2014. – P. 379.
25. Abdujabbarov A.A. Test particle motion around a black hole in a braneworld // International Congress of Mathematicians – Seoul, Republic of Korea, 13-21 August, 2014. – PP. 397-398.
26. Abdujabbarov A.A. Particle acceleration around five-dimensional Kerr black hole // International Congress of Mathematicians – Seoul, Republic of Korea, 13-21 August, 2014. – P. 398.
27. Abdujabbarov A.A. Acceleration of particles by black hole with gravitomagnetic charge immersed in magnetic field // 40th COSPAR Scientific Assembly. - 2-10 August 2014. - Moscow, Russia. – Abstract E1.5-86-14.
28. Abdujabbarov A., Juraeva N. Charged-particle motion around a rotating non-Kerr black hole immersed in a uniform magnetic field // 40th COSPAR Scientific Assembly. - 2-10 August 2014. - Moscow, Russia. – Abstract E1.5-83-14.
29. Abdujabbarov A.A. Particle acceleration around a five-dimensional Kerr black hole // 40th COSPAR Scientific Assembly. - 2-10 August 2014. - Moscow, Russia. – Abstract E1.5-76-14.
30. Abdujabbarov A.A. Shadow of rotating non-Kerr black hole // 40th COSPAR Scientific Assembly. - 2-10 August 2014. - Moscow, Russia. – Abstract E1.5-84-14.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида  
таҳрирдан ўтказилди (30.09.2016 йил)

Босишга рухсат этилди: \_\_\_\_\_ 2016 йил  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 5. Адади: 100. Буюртма: № \_\_\_\_\_.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,  
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ» ДУК