

АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ

ТОШМАТОВ БОБИР АБДУМАНОНОВИЧ

**РЕЛЯТИВИСТИК АСТРОФИЗИК ОБЪЕКТЛАР АТРОФИДА
ЭЛЕКТРОМАГНИТ, СКАЛЯР, ГРАВИТАЦИОН
ҒАЛАЁНЛАНИШЛАР ВА ЗАРРАЛАР ДИНАМИКАСИ**

01.03.01-Астрономия

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of sciences (DSc)
on physical and mathematical sciences**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора физико-математических наук (DSc)**

Тошматов Бобир Абдуманонович

Релятивистик астрофизик объектлар атрофида электромагнит, скаляр,
гравитацион ғалаёнланишлар ва зарралар динамикаси 4

Toshmatov Bobir Abdumanonovich

Dynamics of scalar, electromagnetic, gravitational perturbations and particles
around relativistic astrophysical objects 22

Тошматов Бобир Абдуманонович

Динамика скалярных, электромагнитных, гравитационных возмущений
и частиц вокруг релятивистских астрофизических объектов..... 42

Эълон қилинган ишлар рўйхати

List of published works

Список опубликованных работ..... 53

Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2019.4.DSc/FM149 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Астрономия институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, инглиз, рус (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.astrin.uz) ва «Ziynet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Ахмедов Бобомурат Жўраевич

физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Дымникова Ирина Гавриловна

физика-математика фанлари доктори, профессор

Бронников Кирилл Александрович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Нуритдинов Салохитдин Насритдинович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Опавадаги физика институти, Силезия университети
Чехия Республикаси

Диссертация ҳимояси Астрономия институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 рақамли Илмий Кенгашнинг 2022 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100052 Тошкент шаҳри, Астрономия кўчаси, 33-уй, Астрономия институти. Тел. (+998) 71-235-81-02; факс (+998) 71-234-48-67; e-mail: info@astrin.uz).

Диссертация билан Астрономия институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100052 Тошкент шаҳри, Астрономия кўчаси, 33-уй, Астрономия институти. Тел. (+998) 71-235-81-02.

Диссертация автореферати 2022 йил « ____ » _____ куни тарқатилди.
(2022 йил “ ____ ” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

Ш.А. Эгамбердиев

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор, академик

И.А. Ибрагимов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.н., катта илмий ходим

А.Б. Абдикамалов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д.

Кириш (фан доктори (DSc) диссертациясига автореферат)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ҳозирги кунда илғор илмий марказлар томонидан галактикаларнинг актив ядроли марказларини, қора ўраларни ва бошқа компакт объектларни тадқиқ қилиш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунга келиб, технологияларнинг ривожланиши натижасида астрономик кузатувлар нафақат астрофизик объектлардан келаётган электромагнит тўлқинлар воситасида ва яна улардан ажралган гравитацион тўлқинлар орқали ҳам амалга оширилмоқда. Ҳар бир астрофизик объект ғалаёнланиш натижасида фақатгина ўзига хос бўлган гравитацион тўлқин чиқаради ва у орқали бизга объект ва унинг физик хусусиятлари ҳақида маълумот олиш имконини беради. Шунинг учун ҳам ҳозирги кунда нафақат детекторларнинг аниқлигини ошириш ишлари олиб борилмоқда ва яна ҳар хил гравитация назарияларида компакт объектларнинг гравитацион тўлқинлари наъмуналари устида назарий ишларга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда электромагнит ва гравитацион тўлқинлар воситасида қора ўраларнинг физик хусусиятларини, улар атрофида кечаётган жараёнларнинг динамикасини ва кучли гравитацион майдонда бизга маълум физик қонуниятларнинг қанчалик ўринли эканлигини аниқлашга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, айниқса LIGO (Лазер Интерферометр Гравитацион Тўлқинлар Обсерваторияси) ва Вирго илмий ҳамкорлиги томонидан қайд этилган қора ўралар ва нейтрон юлдузларнинг қўшилишидан ажралган гравитацион тўлқинлар ва ЕНТ (Ҳодисалар Горизонти Телескопи) илмий гуруҳи томонидан кузатилган Сомон Йўли галактикамиз марказидаги ўтамассив қора ўра Ўқотар А* ва М87 галактикаси марказидаги қора ўра тасвирлари ушбу изланишларнинг асосини ташкил этмоқда. Шу билан бирга, қора ўраларнинг бирлашишидан ҳосил бўлган якуний объектнинг хусусиятларини шу жараёнда ажралган гравитацион тўлқиннинг квазинормал режимларини ўрганиш орқали аниқлаш мумкинлиги умумий нисбийлик назарияси ва унга муқобил назарияларнинг тўғрилигини текшириш ва қўллаш чегараларин белгилаш имконини бермоқда.

Республикамизда қора ўраларнинг релятивистик астрофизикаси соҳасидаги фундаментал тадқиқотларга катта эътибор бериб келинмоқда. Ҳусусан, Республикамиз Президенти томонидан илгари сурилган мамлакатимизда илм-фанни 2030 йилгача ривожлантириш концепцияси¹ ва физика соҳасини ривожлантиришга оид қарорида² мамлакатимизда илм-фаннинг юксалиши, фундаментал тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари ва

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 29 октябрдаги № ПФ-6097-сонли “Илм-фанни 2030 йилгача ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида”ги Фармони.

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2021 йил 19 мартдаги № ПК-5032-сонли “Физика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги Қарори.

уларнинг ҳаётга тадбиқ қилиш вазифалари кўрсатиб берилган. Бу вазифаларни бажаришда гравитацион компакт объектларнинг релятивистик астрофизикаси, жумладан, қора ўралар ва нейтрон юлдузларнинг энергетик, оптик хусусиятларини ўрганиш ва гравитацион тўлқинлар тутилиши натижасида яратилган астрономиянинг янги йўналиши, гравитацион тўлқин астрономиясининг мамлакатимизда пойдеворини қўйиш муҳим ҳисобланади.

Ушбу диссертация иши давлат меъёрий ҳужжатларида, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 29 октябрдаги ПФ-6097-сонли “Илм-фанни 2030 йилгача ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида”ги Фармонида, 2021 йил 19 мартдаги ПҚ-5032-сонли “Физика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги қарори, ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мос келади.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи³. Қора ўраларнинг квазинормал режимлари ва гравитацион тўлқин эффектларини ўрганиш билан боғлиқ кузатувлар, хусусан, қора ўраларнинг бирлашишидаги гравитацион нурланишлар, қора ўраларнинг кучли гравитацион майдонларидаги электромагнит ва скаляр нурланишлар ва қора ўраларнинг хусусиятларини ўрганишга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари, жумладан Калифорния Технология Институтини (АҚШ), Римнинг Ла Сапиенза университети (Италия), Макс Планк номидаги Гравитацион Физика институтини - Алберт Эйнштейн институтини (Германия), Лиссабон техника университети (Португалия), Университетлараро Астрономия ва Астрофизика Маркази (Ҳиндистон), Силезия университети (Чехия), Ломоносов номидаги Москва давлат университети (Россия), Фудан университети (Хитой), Назарбаев университети (Қозоғистон), Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг Астрономия институтини ва шулар каби бошқа етакчи тадқиқот марказлар томонидан амалга оширилмоқда.

Қўшалокдаги қора ўраларнинг бирлашишининг рингдаун босқичида иккита компакт объектнинг бирлашиши натижасида ҳосил бўлган қолдиқ объект частоталари квазинормал деб номланувчи гравитацион тўлқинлар нурлантириш орқали мувозанат ҳолатига келади. Квазинормал частоталар комплекс сонли бўлиб, улар фақат қора ўра параметрлари билан аниқланади. Шундай қилиб, уларнинг LIGO-Virgo ҳамкорлиги томонидан қора ўраларнинг бирлашишидан ажралган гравитацион тўлқинларда қайд этилиши бизга нафақат “сочсиз теорема” ни ва умумий нисбийлик назариясини, балки бошқа экзотик оқ ўралар, юмронқозиқ тешиклари, бозон юлдузлари,

³ www.caltech.edu, www.uniroma1.it, www.aei.mpg.de, <https://tecnico.ulisboa.pt>, www.iucaa.in, www.slu.cz, www.msu.ru, www.nu.edu.kz, www.astrin.uz

гравастарлар каби объектларни башорат қилувчи алтернатив назарияларни текшириб кўриш имкониятини беради.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Релятивистик астрофизик объектлар атрофидаги скаляр, электромагнит, гравитацион майдонлар ва зарралар динамикаси кўплаб олимлар, масалан, америкалик (К. Торн, К. Уилл, Э. Поиссон, Э. Берти), португалиялик (В. Кардосо, К. Ҳердейро, Х. Лемош), италиялик (П. Пани, Э. Барауссе, В. Феррари, Р. Руффини), чехиялик (З. Стухлик, Р. Конопля, Г. Лоукес-Геракопулос, Й. Бичак), германиялик (К. Коккотас, Л. Реццолла, Б. Шутц, А. Буонанно, Я. Штайнхоф), бразилиялик (Л. Криспино, С. Маседо, А. Жиденко), япониялик (К. Маеда, Ж. Сода, А. Ишибаши, Ҳ. Кодама), россиялик (Д. Гальцов, К. Бронников), канадалик (В. Фролов, Д. Кубизниак) ва бошқалар томонидан ўрганилган ва муҳокама қилинган. Бундан ташқари, компакт объектлар атрофида ўз айланиш моменти (спинига) эга бўлган зарранинг динамикаси кўплаб олимлар, жумладан, германиялик (Я. Штайнхоф, Ю. Кунц, Д. Пуецфелд, Д. Кунст), италиялик (Д. Бини, Э. Барауссе, Д. Малафарина), япониялик (Ш. Сузуки, К. Маеда), чехиялик (Г. Лукес-Геракопулос, Й. Коварж, О. Семерак), россиялик (Г. Бисноватий-Коган, О. Цупко, Ю. Обухов, А. Дериглазов) ва бошқалар томонидан ўрганилган.

Республикамизда қора ўраларнинг гравитацион ғалаёнланишлари, бунинг натижасида улардан ажралиб чиқадиган гравитацион тўлқиннинг хусусиятлари ва ўз айланиш моменти эга бўлган зарранинг кучли гравитацион майдондаги ҳаракатига оид илмий тадқиқотлар Б. Ахмедов, А. Абдужаббаров, А. Турсуновлар томонидан амалга оширилган.

Гарчи қора ўраларнинг жуда кўплаб хусусиятлари тадқиқ қилинган бўлсада, регуляр қора ўраларнинг кенг синфи шу жумладан, ночизиқли электродинамика (НЭД) билан умумий нисбийлик назариясининг биргаликдаги ечимларининг скаляр, электромагнит ва гравитацион ғалаёнланишларининг квазинормал частоталари ва эволюцияси ҳали тўлиқ ўрганилмаган. Шу билан бирга, айланиш моменти эга бўлган зарранинг ҳаракати фақат сферик ёки акциял симметрик, асимптотик текис фазовий вақтлар билангина чекланган ва асимптотик нотекис бўлган ва деформацияланган фазовий вақтларга ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Астрономия институтининг ЁФА-АТех-2018-8 рақамли «Релятивистик астрофизикада компакт объектлар яқинидаги гравитацион ва электромагнит майдонлар ҳамда зарралар» (2018–2019), ВА-ФА-Ф2-008 рақамли «Динамик ва стационар релятивистик гравитацион объектларда астрофизик жараёнлар» (2017–2020), ВА-ФА-Ф2-008а «Қора ўрани ўз ичига олган қўшалоқ тизимлардаги изоляция қилинган қора ўраларнинг релятивистик астрофизикаси» (2017–2020), Ўзбекистон–Белоруссия дастурининг MRB-AN-2019-29 рақамли «Астрофизик объектларни моделлаштириш ва уларнинг

кузатиш хусусиятларини РТ-70 телескопи параметрлари ва Гамма-400 рус орбитал телескопи параметрлари билан корреляциялаш» (2019–2021) мавзусидаги илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади умумий нисбийлик назариясидаги астрофизик қора ўралар кенг синфининг квазинормал частоталарининг батафсил тавсифи, уларнинг гравитацион тўлқинларининг хусусиятлари ва яшаш вақтлари, галактикалар марказидаги ўта массив қора ўраларнинг ҳосил бўлиш механизми, қора ўралар яқинидаги айланаётган зарралар ҳаракати каби бир қатор ҳодисаларни тавсифлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

НЭД билан биргаликда умумий нисбийлик назарияси доираси янги регулар ва сингуляр қора ўра ечимларини олиш;

қора ўранинг заряд турини унинг атрофидаги ёруғлик нури ҳаракати воситасида фарқлаш мумкинлигини аниқлаш;

қора ўраларнинг скаляр, электромагнит ва гравитацион ғалаёнланишларини ўрганиш ва уларнинг характерли тебраниш частоталарини ҳисоблаш;

зарядланган қора ўраларнинг ғалаёнланишларининг яшаш вақтларини баҳолаш ва уларни галактик ўтамассив қора ўраларга қўллаш;

галактикаларнинг марказида ўтамассив қора ўранинг пайдо бўлиши сабабини тушунтириш учун политропик сфера моделини ишлаб чиқиш;

зарралар спинининг унинг ҳаракатига таъсирини турли хил (деформацияланган, қоронғу энергия ҳисобга олинган) қора ўралар соҳасида тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида скаляр, электромагнит, гравитацион ғалаёнланишлар ва Ўқотар А*, М87* қора ўралари ва миллисекундли пулсар олинган.

Тадқиқотнинг предмети кучли гравитацион соҳада қора ўраларнинг скаляр, электромагнитик ва гравитацион ғалаёнланишларининг квазинормал тебранишларининг спектрлари ҳамда шу билан боғлиқ кузатув гравитацион тўлқинлар маълумотлари.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида Эйнштейн тенгламаларини ечишда аналитик, рақамли ҳисоблаш усулларида ва компакт объект фазо-вақтларининг ғалаёнланишларини ўрганишда ВКБ, Ливер, Фробениус усуллари, Бор-Зоммерфелд қоидаларидан ва тўлқин шаклини топиш учун дискретлаштириш усулидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Биринчи марта умумий нисбийлик назарияси ва НЭДнинг биргаликдаги электр ва магнит зарядланган Максвелл, Хайвард ва Бардин қора ўраларининг умумлашган ечимлари олинган;

НЭД ва умумий нисбийлик назариясидаги қора ўраларнинг электромагнит ғалаёнланишларини ўрганиш орқали нафақат ёруғлик нурлари, балки электромагнит тўлқинлар ҳам НЭДда фазо-вақтнинг нол геодезияси бўйлаб ҳаракат қилмаслигини кўрсатилган;

НЭДга қўшилган умумий нисбийлик назариясининг фазо-вақтлари ҳеч қачон йўқолиб кетмайдиган ёруғлик ҳалқаларига эга бўлиши исботланган;

НЭДга қўшилган умумий нисбийлик назариясидаги юқори зарядланган қора ўралар электромагнит ғалаёнланишларни сўндирмасдан тебратиши кўрсатилган;

электр (магнит) зарядли қора ўранинг жуфт-жуфтликли электромагнит ғалаёнланишлари ва магнит (электр) зарядли қора ўранинг тоқ-жуфтликли электромагнит ғалаёнланишлари изоспектрал, яъни бир хил частотали эканлиги кўрсатилган;

умумий нисбийлик назариясида политропик сферада кичик гравитацион ғалаёнланишларни тадқиқ қилиш орқали галактикалар марказида ўта массив қора ўралар пайдо бўлиш механизмини тушунтирувчи модел яратилган;

қоронғу энергиянинг мавжудлиги сабабли қора ўралар атрофида фақат чекланган соҳадагина айланма турғун орбиталар ҳосил бўлиши кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

зарядланган қора ўра атрофида ёруғлик нурлари ҳаракати орқали қора ўранинг заряд турини аниқлаб бўлмаслиги кўрсатилган ва бу натижа ЕНТ ҳамкорлиги учун қора ўралар зарядларини баҳолаш учун фойдали;

НЭДга қўшилган умумий нисбийлик назариясидаги қора ўралар ҳар доим йўқолиб кетмайдиган ёруғлик ҳалқасига эга эканлиги кўрсатилган ва бу кузатувчиларга қора ўра турини ажратиш учун хизмат қилади;

кузатувда қора ўранинг секин сўнадиган ёки ҳеч қачон сўнмайдиган электромагнит тўлқинларининг тутилиши унинг манбаси НЭДга боғланган умумий нисбийлик назариясидаги юқори зарядланган қора ўраларнинг электромагнит ғалаёнланишлари эканлиги кўрсатилган;

галактикалар марказида ўта массив қора ўра пайдо бўлиш сабаби ҳали ҳам тўлиқ тушуниб етилмаган ва ишлаб чиқилган политропик модел ушбу муаммони ҳал қилишда фойдаланилади.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги диссертация ишида математик ва назарий физиканинг стандарт усуллари, шу жумладан юқори самарали рақамли усуллар ва дастурлардан фойдаланилганлиги, олинган назарий натижаларнинг мавжуд назарий маълумотларга, кузатув маълумотларига ва бошқа олимларнинг натижаларига мувофиқлиги тўлиқ текширилганлиги билан таъминланди. Шунингдек, келтирилган ҳулосалар гравитацион компакт объектлар назариясининг асосий ҳолатларига мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти диссертацияда ишлаб чиқилган қора ўраларнинг электромагнит, гравитацион, скаляр ғалаёнланишларининг эволюциясини таҳлил қилиш формализмларининг ва астрофизик қора ўраларнинг гравитацион тўлқинлари кузатувларидан олинган маълумотлар асосида қора ўраларнинг турли параметрлари ва хусусиятлари тўғрисида маълумот олиш механизмлари билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти олинган натижалар ёрдамида қора ўралар ёки нейтирон юлдузларнинг бирлашиши натижасида ҳосил бўлган компакт объектларидан ажралган гравитацион тўлқинлар орқали умумий нисбийлик назариясига муқобил назарияларнинг параметрлари қийматларини ва қўлланиш чегараларини баҳолаш, ушбу ишда ҳисобланган майдонларнинг вақт эволюциясини таҳлил қилиш усуллари ҳисобга олиб, оғир сонли усулларга мурожаат қилмасдан, қора ўраларнинг кенг синфининг квазинормал режимини тез ва аниқлик билан олишга имкон бериши, қора ўралар атрофида ҳаракатланаётган ўзининг ҳусусий айланиш моментиға эға зарранинг орбиталари орқали марказий компакт объект параметрларини баҳолаш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Релятивистик астрофизик объектларнинг скаляр, электромагнит, гравитацион ғалаёнланишлар ва зарралар динамикасини тадқиқ қилиш асосида:

НЭД ва умумий нисбийлик назариясининг бирлашишидан олинган янги қора ўра ечимлари ва уларнинг ғалаёнланишлари ва шунингдек, галактика марказида ўтамассив қора ўра ҳосил бўлиш модели билан боғлиқ натижалар Чехия илм-фан жамғармасининг 19-03950S, Чехия Республикасининг Опава шаҳридаги Силезия университетининг SGS/12/2019, SGS/14/2016 ва Альберт Эйнштейн номидаги гравитация ва астрофизика марказининг 14-37086G рақамли грантлари доирасида (Чехия Республикасининг Опава шаҳридаги Силезия университети Физика институти хати илова қилинди) ва бир нечта хорижий тадқиқотчилар томонидан (Nature Astronomy, 2017; Journal of High Energy Physics, 2018; Living Reviews in Relativity, 2019; Physical Review D, 2019; Physics Letters B, 2019) фаол галактик ядроларда жойлашган ўтамассив қора ўралар билан боғлиқ турли хил ҳодисаларни ўрганишда фойдаланилган.

Деформация ёки қоронғу энергия ҳисобига турли хил физик ҳусусиятли астрофизик объектлар атрофида ҳаракатланаётган ўзининг ҳусусий айланиш моментиға эға бўлган заррачанинг динамикаси бўйича тадқиқотлар Қозоғистон Республикаси Таълим вазирлигининг мақсадли дастури доирасидаги “Фундаментал ва амалий физика ривожланиш маркази” номли IRN:BR05236454 ва Назарбоев университетининг факултетни ривожлантириш бўйича рақобатбардош илмий-тадқиқот грантлари 090118FD534, 090118FD5348 (Қозоғистон Республикаси Назарбоев университетининг хати илова қилинди) ва турли гравитация назарияларида қора ўралар ва улар атрофидаги акреция билан боғлиқ тадқиқотлар учун бир қатор хорижий тадқиқотчилар (Physical Review D, 2018; European Physical Journal C, 2019; Galaxy, 2020; Universe, 2020) томонидан ишлатилган.

Бир жинсли чангдан ясалган сферик шарнинг Эйнштейн-Гаусс-Боннет қора туйнугига коллапси бўйича тадқиқотлар натижалари Ҳиндистондаги Университетлараро грант қўмитаси лойиҳалари Ҳиндистоннинг Университетлараро грант қўмитаси дастурлари доирасида (Ҳиндистоннинг Университетлараро грант қўмитасининг 2021 йил 28 январдаги

маълумотномаси) ва шунингдек, хорижлик олимлар томонидан (Journal of High Energy Physics, 2020; Physics Letters B, 2020; Physics of the Dark Universe, 2020; European Physical Journal C, 2020) Эйнштейн-Гаусс-Боннет назариясидаги қора ўраларнинг физик хусусиятларини ўрганишда фойдаланилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 14 та ҳалқаро ва республика илмий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг чоп этилганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 33 та илмий ишлар нашр қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 19 та илмий мақола хорижий журналларда.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш қисми, бешта боб, хулоса, 200 та фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 224 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг кириш қисмида танланган мавзунинг долзарблиги ва зарурати асосланган бўлиб, олиб борилган тадқиқотнинг асосий 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 очиб берилган, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Қисқача астрофизик маълумотлар»** деб номланган биринчи бобида ҳозирги астрофизиканинг долзарб муаммолари ва уларнинг диссертация мавзусига доирлиги ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Умумий нисбийлик назарияси боғланган ночизиқли электродинамикада қора ўралар»** деб номланган иккинчи боби умумий нисбийлик ва ночизиқли электродинамика (НЭД) назарияларини боғлаган ҳолда янги қора ўраларнинг ечимларини олиш ва ушбу қора ўраларнинг зарядининг турини ёруғлик нури воситасида аниқлаш эҳтимолликларини тадқиқ этишга бағишланган. НЭДнинг умумий нисбийлик назариясидаги асосий аҳамиятларидан бири шундан иборатки, Максвелл (чизиқли) электродинамикаси ва умумий нисбийлик назарияси турли назариялар бўлишига қарамасдан, улар сингулярлик деб аталувчи умумий ҳали ҳам ҳал қилинмаган муаммодан азият чекади. Диссертациянинг биринчи бобининг биринчи ярмида биз электр, магнит ва дионик зарядланган қора ўра ечимларини олишни ва уларнинг хусусиятларини намоиш этамиз. НЭДга боғланган умумий нисбийлик назарияси қуйидаги таъсир билан тавсифланади:

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} (R - L) , \quad (1)$$

Бу ерда L НЭДнинг лагранж зичлиги бўлиб у электромагнит майдон кучланишининг функцияси. (1) учун энг қисқа таъсир тамойилини қўллаган ҳолда, $G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$, Эйнштейн майдон тенгламалари олинади, бу ерда $T_{\mu\nu}$ НЭДнинг энергия-импульс тензори. Эйнштейн ва НЭД учун Максвелл тенгламаларини статик, сферик симметрик интервал учун ечиб электр зарядли, магнит зарядли ва дйоник яъни бир вақтда электр ва магнит зарядли қора ўра ечимларини олдик. Масалан, бу ечимларнинг умумий қуйидаги кўринишга эга:

$$f(r) = 1 - \frac{2Mr^{\mu-1}}{(r^\nu + q^\nu)^{\mu/\nu}} \quad (2)$$

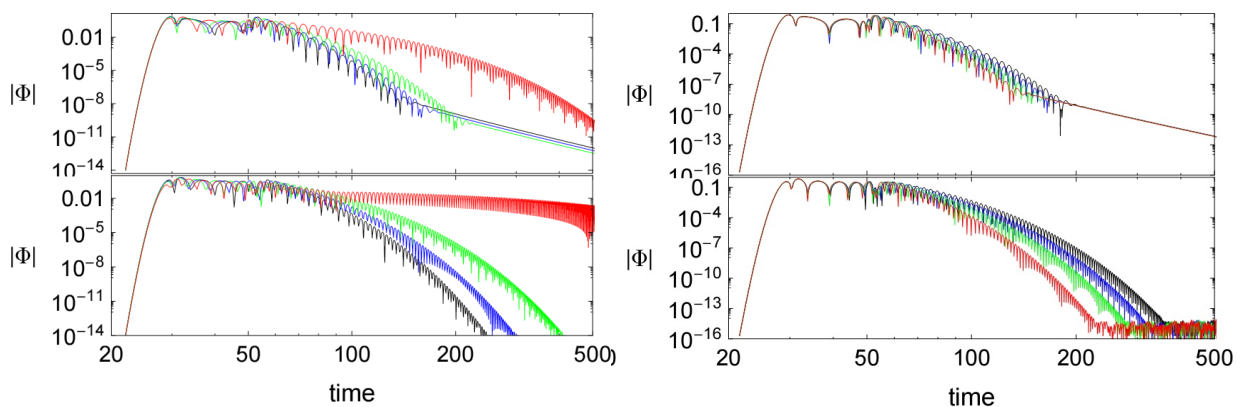
Агар бу тенгламалар чизиқли электродинамика учун ечилса, фазо-вақтнинг марказида сингулярлиги бўлган машҳур Рейсснер-Нордстром қора ўрасиечими олинади. Метрик функция (2) нафақат Бардин ($\mu=2$, $\nu=1$) ва

Хайвард ($\mu=3$, $\nu=1$) ечимларини умумлаштиради ва юқори тартибларигача тўлдиради, балки уларга қўшимча янги Максвелл типигаги ($\mu=1$) ечимларни ўз ичига олади. Шунинг учун, биз ушбу янги ечимни «Максвелл» қора ўра ечими деб номладик. Бу ечим электр зарядли бўлиши ҳам мумкин, аммо бу ҳолда унинг лагранж зичлиги магнит зарядлиниги нисбатан бошқа кўринишга эга бўлади. Бу НЭДнинг яна бир жуда муҳим хусусиятини очиб беради, яъни умумий нисбийлик назарияси ва чизиқли электродинамиканинг биргаликдаги ечимидаги ҳолатдан фарқли ўлароқ, НЭДда ҳар қандай лагранж зичлиги магнит ва электр зарядли фазо-вақтлар учун бир хил ечимларни бермайди.

Биринчи бобнинг иккинчи ярмида бизга аввалдан маълум бўлган илмий факт яъни электромагнит тўлқинлар вакуум ва чизиқли электродинамикада фазо-вақтнинг нол геодезияси бўйлаб тарқалади, аммо у НЭДда фазо-вақтнинг нол геодезияси бўйича тарқалмайди. Бундан ташқари, бўлимнинг биринчи ярмида НЭД билан боғланган умумий нисбийликдаги фазо-вақтлар электр ёки магнит зарядли бўлиши мумкинлиги, электр ва магнит зарядланган бир хил фазо-вақтларнинг лагранж зичликлари эса ҳар хил эканлиги кўрсатилди. Ушбу далилларни ҳисобга олган ҳолда, биз ёруғлик нурининг ҳаракати орқали қора ўранинг заряд турини фарқлаш мумкин ёки йўқлигини аниқладик. Ёруғлик нурларининг ҳаракатланиши иккала электр ва магнит зарядланган фазо-вақтлар учун эффектив потенциал ва ёруғлик 4-тезлигининг радиал компонентини топдик. Иккала ҳолатда ҳам фазо-вақтлардаги фотонсферанинг радиуслари бир хил эканлигини кўрсатдик. Кейинги ҳолатда биз ёруғлик нурларининг шу қора ўраларнинг яқинидан ўтганда гравитация таъсирида тўғри траекториядан четланишини ва шу четланиш натижасида унинг кузатувчига етиб келишидаги кечикишини баҳоладик ва шунга амин бўлдикки, улар ҳар иккала ҳолатда ҳам бир хил кўринишга эга ва шунинг учун, заряд турини улар орқали аниқлаш имконсиз. Шундай қилиб, диссертациянинг биринчи боби иккинчи қисмининг энг муҳим натижаларидан бири шундаки, фақат ёруғлик нури траекторияларини кузатиш орқали қора ўра заряди турини аниқлаб бўлмайди. Бу натижанинг энг долзарб амалий ахамияти шундан иборатки, ҳозирги кунда энг илғор кузатувлар олиб бораётган ЕНТ илмий лойихаси қора ўраларнинг зарядининг турини аниқлай олмайди.

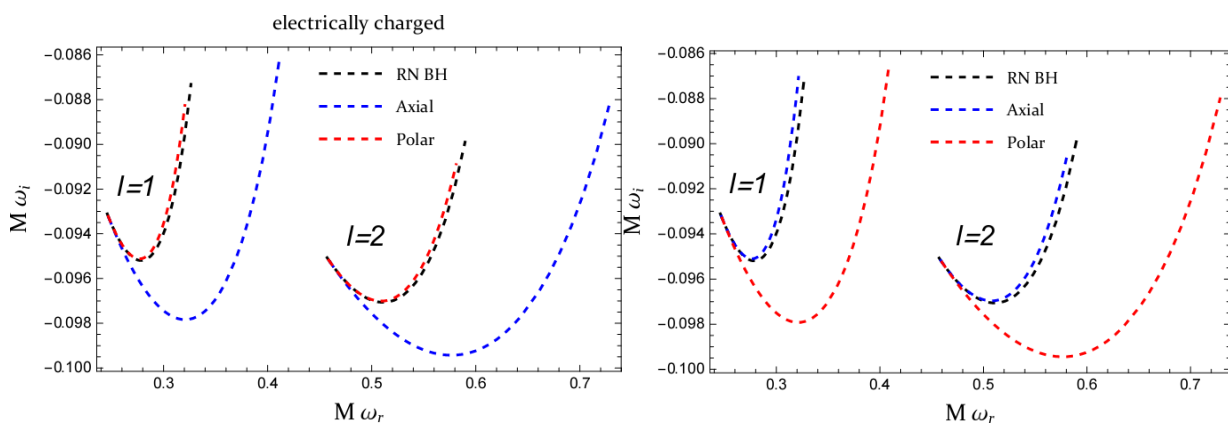
Диссертациянинг **“Умумий нисбийлик назарияси ва чизиқли электродинамикада қора ўраларнинг ғалаёнланишлари”** деб номланган учинчи боби, НЭДга боғланган умумий нисбийлик назариясидаги қора ўраларнинг скаляр, электромагнит ва гравитацион ғалаёнланишларини ўрганишга ва уларнинг характерли тебраниш частоталари яъни квазинормал модаларини ҳисоблашга бағишланган. Бизга маълумки, ғалаёнланган объект гравитацион тўлқинлар нурлатиш орқали мувозанат ҳолатига келади. Шу тўлқинларнинг частоталари квазинормал деб аталади, чунки улар комплекс сон билан ифодаланиб, объектнинг параметр-лари билан тўлиқ тавсифланади. Диссертациянинг иккинчи бобида биз олдинги бобда олинган

умумий нисбийлик назариясидаги электр ва магнит зарядланган қора ўраларга тоқ ва жуфт жуфтликли электромагнит ғалаёнланишларни киритдик ва ушбу ғалаёнланишларнинг динамикасини алоҳида ўрганиб чиқдик. Электр ва магнит зарядли ихтиёрий кўринишдаги қора ўраларнинг тоқ ва жуфт жуфтликдаги электромагнит ғалаёнланишларининг динамикасининг универсал формализмини ишлаб чиқдик ва кейинги босқичда биз ушбу формализмни аниқ бир қора ўра ечимига қўллаб, ғалаёнланишларнинг динамикасини ўргандик. Шу мақсадда биз аввалги бобда олинган Максвелл қора ўра ечими (2) ни мисол сифатида танладик. Биз электромагнит ғалаёнланишлар эволюциясини характерли интеграция усули ёрдамида ўргандик. 1-расмда биз НЭДдаги Максвелл қора туйнуғи ва чизиқли электродинамикадаги Рейсснер-Нордстром қора ўрасининг электромагнит ғалаёнланишларининг вақт бўйича эволюциясини олдик.



1-Расм. НЭДдаги Максвелл қора туйнуғи(чапда) ва чизиқли электродинамикадаги Рейсснер-Нордстром қора туйнуғининг электромагнит ғалаёнланишларининг вақт бўйича эволюцияси(ўнгда) заряднинг ҳар хил қуйидаги қийматларида $Q=0.2$ (қора), $Q=0.6$ (кўк), $Q=0.8$ (яшил), ва $Q=0.998$ (қизил).

1-расмдан кўриш мумкинки, чизиқли ва НЭДдаги қора ўраларнинг электромагнит ғалаёнланишлар эволюциясининг асосий фарқи шундаки, Максвелл регулар қора ўраларининг заряди қийматининг ошиши ғалаёнланишларнинг яшаш вақтини узайтиради, аммо чизиқли электродинамикада бу жараён аксинча қисқаради. Бундан ташқари, биз ғалаёнланишларнинг квазинормал частоталарини ҳисобладик. Бу частоталарнинг ҳақиқий қисми тебраниш частотасини, мавҳум қисми эса бу тебранишларнинг сусайишини ёки ўсишини англатади.



2-Расм. Электр (чапда) ва магнит (ўнгда) зарядли Максвелл ва Рейсснер-Нордстрем қора ўраларининг электромагнит ғалаёнланишларининг $l=1$ ва $l=2$ фундаментал квазинормал частоталари заряднинг $Q \in [0,1]$ интервалдаги қийматлари учун.

Бундан ташқари, юқори энергия лимитида НЭДдаги қора ўраларнинг электромагнит ғалаёнланишларини ўрганиш орқали биз илк марта электромагнит ғалаёнланишлар НЭДда нол геодезия бўйича юрмаслигини кўрсатдик. Ушбу таҳлилнинг энг муҳим натижаларидан яна бири шундаки, агар электр ва магнит зарядли қора ўраларнинг фазо-вақтлари бир хил бўлса, магнит (электр) зарядланган ва жуфт жуфтликли электромагнит ғалаёнланишлар электр (магнит) зарядли тоқ жуфтликли электромагнит ғалаёнланишлар бир хил спектрлидир.

Жорий бобнинг иккинчи ярмида биз НЭДдаги қора ўранинг $g_{\mu\nu}$ фазо-вақтига жуда кичик $h_{\mu\nu}$ ғалаёнланишни $g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ каби киритиб, ушбу ғалаёнланишнинг эволюциясини ўргандик. Гравитацион ғалаёнланишларни ҳам тоқ (аксиал) ва жуфт (кутбли) қисмларга $h_{\mu\nu} = h_{\mu\nu}^{odd} + h_{\mu\nu}^{even}$ каби ажратиш мумкин. Эйнштейн тенгламасини юқоридаги ғалаёнланишлар учун алоҳида ечиб, тегишли эффектив потенциалга эга бўлган тўлқин тенгламани олдик. Кейинчалик, биз буларни Бардин, Хайвард ва Максвелл қора ўраларига қўллаб уларнинг квазинормал частоталарини ҳисоблаб чиқдик.

Ва ниҳоят, ушбу бобнинг охириги қисмида биз зарядсиз (Шварцшилд), Рейсснер-Нордстром қора туйнуғи ва яланғоч сингулярлиги, Бардин, Хайвард ва Максвелл қора ўраларининг скаляр, электромагнит ва гравитацион ғалаёнланишларининг яшаш вақтларини баҳолаймиз. Бизнинг ҳисобларимиз шуни кўрсатдики, зарядланган фазо-вақтлар ҳодисалар горизонти йўқолгандан кейин ҳам заряднинг маълум қийматига қадар фотонсферага эга бўлади. Қизиғи шундаки, заряднинг экстрим қийматида ушбу фазо-вақтларнинг гравитацион ва скаляр ғалаёнланишлари ҳеч қачон сўнмайди. Бироқ, ушбу фазо-вақтларнинг электромагнит ғалаёнланишлари табиати бошқачароқ бўлиб, улар асосан фотонферада жойлашади. НЭДнинг фазо-вақтлари ҳеч қачон йўқ бўлиб кетмайдиган фотонсфераларга эга бўлиб, улар доимо электромагнит ғалаёнланишларни тарқатади. Қисқача айтганда, биз ғалаёнланишларнинг юқорида кўрсатилган фазо-вақтларда яшаш вақтларининг юқори ва пастки чегараларини унга мос келадиган заряд

қийматини 1-жадвал умумлаштирамиз.

Фазо-вақтлар	Энг қисқа грав.	Зар.	Энг узун грав.	Зар.	Энг қисқа ЭМ	Зар.	Энг узун ЭМ	Зар.
Шварцшилд	51.0262	0	51.0262	0	51.0262	0	51.0262	0
РН ҚЎ	50.0378	0.73	55.5503	1	50.0378	0.73	55.5503	1
РН ЯС	>55.5503	>1	∞	1.06	>55.5503	>1	∞	1.06
Максвелл ҚЎ	48.7728	0.62	57.5190	1	50.0385	0.52	53.4715	1
Максвелл НХ	>57.5190	>1	∞	1.07	20.1975	2.25	62.3036	1.2
Бардин ҚЎ	>51.0262	>0	63.0313	1	51.0262	0	58.3588	1
Бардин НХ	>63.0313	>1	∞	1.11	36.6051	2.4	63.1749	1.24
Ҳайвард ҚЎ	>51.0262	>0	61.0489	1	>51.0262	0	55.8758	1
Ҳайвард НХ	>61.0489	>1	∞	1.07	40.5379	2.35	58.4751	1.24

Table 1. Регуляр қора ўраларнинг гравитацион (ва скаляр) ва электромагнит галаёнланишларнинг яшаш вақтлари ва уларга мос келувчи заряд қийматлари $[M/M_{\odot} 10^{-6}]$ секунд бирлигида.

Тезиснинг “**Политропик сфералардаги гравитацион беқарорлиги ва унинг галактик галолардаги супермассив қора ўраларга татбиқ этилиши**” деб номланган тўртинчи боби, умумий нисбийлик назариясидаги политропик сфераларнинг умумий хусусиятларига ва унинг галактика марказларида ўта массив қора ўраларнинг вужудга келишини тушунтиришга бағишланган. Энергия-импульс тензори идеал суюқлик тенгламаси кўринишида олинади ва $\rho = \rho(r)$ энергия зичлиги ва $p = p(r)$ изотропик босим бир-бири билан қуйидаги политропик ҳолат тенгламаси орқали боғланади:

$$p = K\rho^{1+\frac{1}{N}}, \quad (3)$$

Бу ерда N политроп индекси бўлиб, $N = 3$ ва $N = 3/2$ ҳолатлар мос ҳолда релятивистик ва норелятивистик айниган Ферми газни ифодалайди. Таҳлиллар шуни кўрсатдики, политропик индекс N ва релятивистик параметр ξ_1 қийматларининг ортиши билан, политропик сферанинг ўлчамини ортади ва N нинг етарлича катта қийматлари учун барча политропик сфералар учун $\xi_1 \gg 1$, яъни улар жуда катта. Бошқа томондан, политропик сферанинг ўлчами катта бўлгани билан беқарор ёруғлик халқаси жойлашган радиус

$\xi_{phu}(N, \sigma) = 1$ деярли ўзгармайди. Ёруғликнинг ҳаракат тенгламаларини ечиш орқали биз (N, σ) параметрларнинг баъзи қийматлари учун иккита: турғун ξ_{phs} да ва беқарор ξ_{phu} да ($\xi_{phs} < \xi_{phu}$) ёруғлик халқалари борлигини аниқланди ва бундай политроплар тутувчи политроплар дейилади. Шунингдек, политропик сферанинг барқарорлигини аниқлаш мақсадида полипропик сферага кичик гравитацион ғалаёнланишларни киритдик. Бу ерда биз тутувчи политроплар ($2.1378 < N < 4$) учун квазинормал частоталар ва ғалаёнланишларнинг вақт бўйича ўзгаришини ҳисобладик. 3-расмда тутувчи политропларнинг эффектив потенциалнинг схематик кўриниши келтирилган.

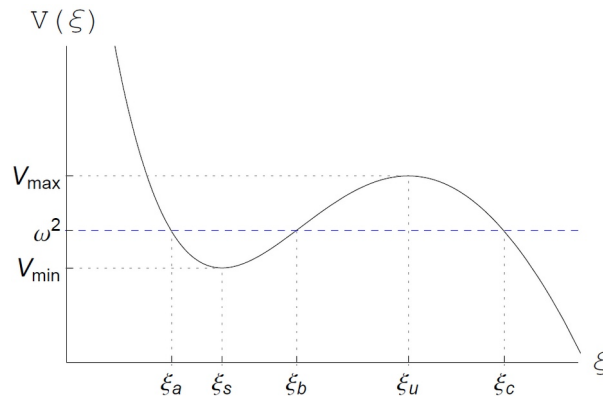
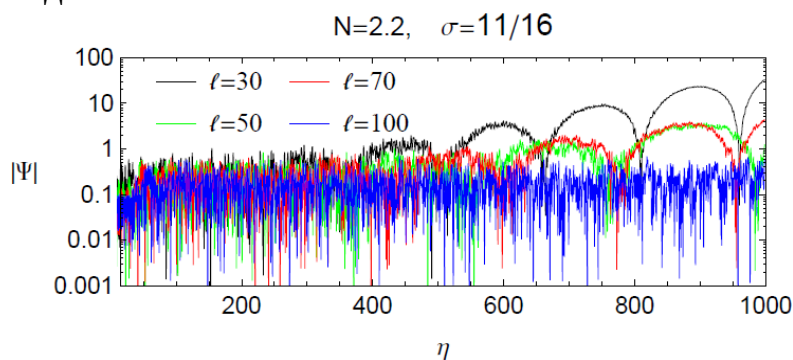


Fig. 3. Тутувчи политроп эффектив потенциали радиал боғлиқлигининг схематик кўриниши. Тутувчи соҳа потенциалнинг минимуми, V_{min} , ξ_s да, ва максимуми, V_{max} , ξ_u да томонидан бошқарилади.

Шуни таъкидлашимиз керакки, политропик сферанинг гравитацион ғалаёнланишлар потенциалнинг минимум ва максимум соҳаларининг мавжудлиги мултипол сон l , политропнинг характеристик параметрлари N ва σ нинг қийматларига боғлиқ. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, мултипол соннинг кичик қийматларида политропик юлдузлар барқарор ёруғлик халқаси атрофида ғалаёнланишларга нисбатан беқарор. Шу билан бирга, мултипол сонининг қиймати ортиши билан беқарорлик камая бошлайди ва юлдуз барқарорлаша бошлайди ва мултипол сонининг катта қийматларида гравитацион ғалаёнланишлар 4-расмда кўрсатилгандек жуда аста сунуш билан узоқ яшайди.



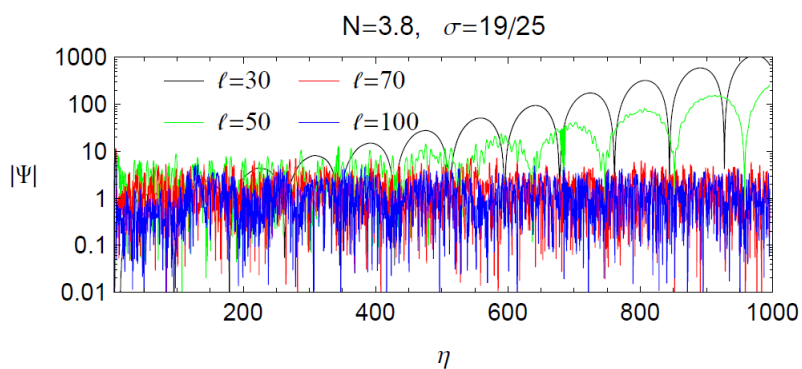


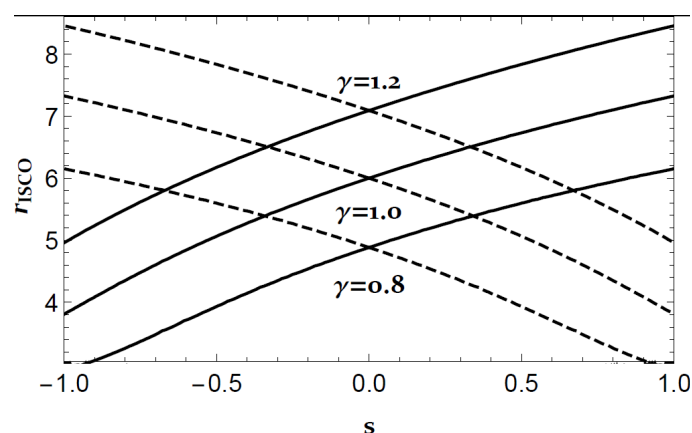
Fig. 4. $N = 2.2$ ихчам ва $N = 3.8$ кенгайган тутувчи политропик сферанинг барқарор ёруғлик халқаси соҳасида гравитацион ғалаёнланишларнинг вақт бўйича эволюцияси.

Юқорида политропик сфераларнинг тутилиш соҳасида узоқ яшовчи беқарор гравитацион ғалаёнланишлар мавжудлиги кўрдик. Энди унинг астрофизик оқибатларини таҳлил қилайлик. Ушбу беқарорлик туфайли тутилиш зонаси фазосининг эгрилиги ошиб кетади ва натижада шунинг ички соҳасидаги масса марказга қулаб қора ўрага ёки нейтрон юлдузга айланиши мумкин. Кутилаётган компакт объектнинг массасини баҳолаш учун биз тутилувчи соҳанинг нисбий жойлашиши, $R_\zeta[N, \sigma]$, ва ушбу зонагача бўлган массани политропик сферанинг тўлиқ массасига нисбатини ифодаловчи нисбий масса параметри, $R_\nu[N, \sigma]$, каби қуйидаги янги параметрлар киритамиз. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, тутувчи политропик сфера $N < 3.75$ ҳолда ихчам бўлиб, унинг нисбий жойлашиши $R_\zeta \leq 10^{-3}$ ва бундай система гравитацион беқарорлик натижасида ҳосил бўлган қора ўрака ютилиб кетади. $N > 3.75$ да $R_\zeta \leq 10^{-7}$ гача етади ва $R_\nu \leq 10^{-3}$ бўлган катта тутувчи политропик сфералар ҳосил бўлади ва бунда хатто тутувчи соҳада қора ўра ҳосил бўлса ҳам, бу соҳанинг массаси ва ўлчами кичик бўлганлиги учун, система тезда стабиллашишини ва натижада марказида қора ўра мавжуд бўлган катта политропик сферанинг ҳосил бўлишини кутишимиз мумкин. Энди олинган натижаларни галактик ғалога қўллаймиз. Биринчи ҳолда агар галактик ҳалонинг массаси $M_{halo} = [10^{12} \div 10^{14}] M_\odot$ бўлса, марказда ҳосил бўлган қора ўранинг массаси $M_{BH} = [10^8 \div 10^{10}] M_\odot$ бўлади. Бу натижалар бизнинг галактикаимиз Сомон Йўли ва қўшни М87 ва уларнинг марказларидаги ўтамассив қора ўраларнинг массаларнинг массалари билан мос келади. Бу эса биз таклиф этаётган модел галактикалар марказларида қора ўраларнинг ҳосил бўлиш сабабини тушунтирувчи номзод моделдир.

Ва ниҳоят, **“Акциял симметрик компакт объектлар атрофида айланадиган заррачанинг динамикаси”** деб номланган тезиснинг бешинчи боби компакт объектлар атрофида ҳаракатланувчи ўзининг хусусий айланиш моментига эга синов заррачасининг динамикасига бағишланган. Синов зарраси яқинлашишида биз айланаётган заррачанинг ҳаракатини "монополь-диполь" яқинлашувида ҳисоблаймиз. Спин-эгрилик ўзаро таъсирини туфайли, зарра энди геодезия бўйича ҳаракатланмайди. Бундай тавсифда ҳаракатланаётган зарралар ҳаракати Матиссон-Папапетру-Диксон (МПД) тенгламалари билан ифодаланади. Шундай қилиб,

ихтиёрий статик, аксиял симмерик копакт объект атрофида ҳаракатланаётган ўзининг ҳусусий айланиш импулсига эга зарранинг ҳаракат тенгламаларини келтириб чиқардик. Кейинги босқичда, биз бу формализмни турли хил фазо-вақтларда ҳаракатланаётган зарралар учун қўладик.

Зарранинг ҳаракатига фазо-вақт деформациясининг таъсирини аниқлаш учун биз Зипой-Ворхис фазо-вақти (яъни γ -метрика) ни танлаб олдик. $\gamma=1$ да фазо-вақт сферик курунишга келади ва Шварцшилд метрикасига айланади. $0<\gamma<1$ ва $\gamma>1$ ҳолатлари мос равишда чўзилган ва сиқилган деформацияларли манбаларни англатади. Кузатув нуқтаи назаридан энг муҳим орбиталардан бири бу энг ички барқарор айлана орбитасидир (ISCO). Қуйида берилган 5-расмда деформация параметрининг ҳар хил қийматлари учун γ фазо-вақтидаги айланувчи зарранинг ISCOси берилган.

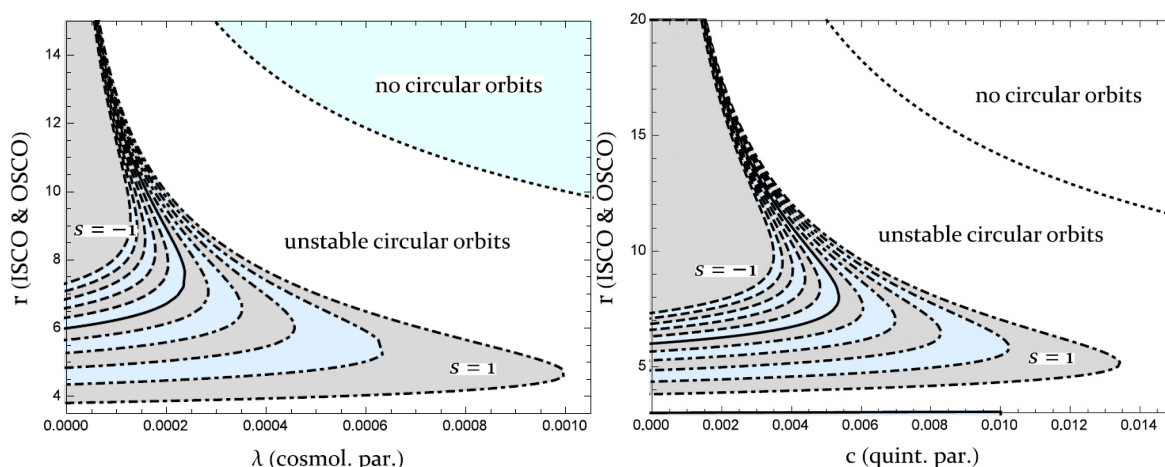


5-Расм. Деформация параметрининг ҳар хил қийматларида γ фазо-вақтидаги айланувчи зарранинг ISCOси. Чизикли ва нуқтали чизиклар мос равишда $L_{ISCO}>0$ ва $L_{ISCO}<0$ ҳолатларга тўғри келади.

Синов заррасининг спини s_0 ва бурчак моменти L_0 ишораларига қараб, 5-расмдан шуни кўраимизки, s ва L нинг берилган аниқ қиймати учун $r_{ISCO}(s_0, L_0 < 0) > r_{ISCO}(s_0, L_0 > 0)$ муносабат ўринли.

Бундан ташқари, ушбу бобнинг иккинчи ярмида биз қоронғу энергиянинг айланаётган зарралар ҳаракатига таъсирини ўргандик. Бундай фазо-вақтлардан иккитасида: космологик доимийни ўз ичига олган Шварцшилд де-Ситтер ва квинтессенсия параметрини ўз ичига олган фазо-вақтларда ҳаракатланаётган айланувчи зарранинг динамикасини ўргандик. Қизиғи шундаки, фазо-вақтлар асимптотик нотекис бўлганлиги сабабли, бундай фазо-вақтларда марказий массанинг тортишиш кучи космик итариш билан мувозанатлашган статик радиус (r_∞) мавжуд ва айланма орбиталар фақат статикрадиусгача бўлган масофаларда ҳосил бўлиши мумкин ($r < r_\infty$). Кейин, биз диққатимизни астрофизик жиҳатдан энг муҳим орбиталардан бирига, барқарор айлана орбиталарига қаратдик. Бу ҳолда, асимптотик текис фазо-вақтлардагидан фарқли ўлароқ, барқарор айланма орбиталар нафақат ISCO деб номланган ички радиус билан чегараланади, балки қоронғу энергиянинг итарувчи ҳусусияти туфайли улар OSCO деб номланган ташқи

радиус билан ҳам чегараланади. Уларнинг хусусиятлари 6-расмда кўрсатилган.



6-Расм. Шварцшилд де-Ситтер (чап панел) ва квинтессенс фазо-вақтларида ҳаракатланаётган айланувчи зарранинг ISCO ва OSCO радиусларининг қоронғу энергия параметрига боғлиқлиги. Бу ерда графикнинг пастги ва юқори қисмлари ISCO ва OSCOга тўғри келади. Нуқтали чизик статик радиусни билдиради.

Астрофизикада кузатиладиган объектларнинг аксарияти ўзларининг бурчак импульсларига (спинларига) эга бўлганлиги ва кузатишлар қоронғу энергиянинг коинотнинг кенгайишига таъсирини тасдиқлаганлиги сабабли, юқорида айтиб ўтилган ўрганишлар жуда муҳим эди. Келинг, энди галактикамиз марказида массаси $M \approx 10^6 M_{\odot}$ бўлган Ўқотар A^* ўтамассив қора туйнуғи атрофида ҳаракатланадиган миллисекунд пулсар учун ҳисоблашларимизни қўлайлик. Космологик доимийнинг қиймати $\Lambda = 10^{-46} \text{ k m}^{-2}$, $M = 1.2 M_{\odot}$ массали миллисекунд пулсарнинг спини $s \approx 0.45$ эканлигини ҳисобга олсак, ISCO галактика марказидан $r_{\text{ISCO}} \approx 10^7 \text{ км}$ масофада, OSCO $r_{\text{OSCO}} \approx 10^{17} \text{ км} = 10^4 \text{ парсек}$ масофада, яъни галактика билан бир хил радиусда бўлишини аниқладик.

Хулоса

Қуйида диссертацияда келтирилган илмий натижаларнинг асосийлари қисқача келтирилган.

1. Умумий нисбийлик назариясига НЭД қўшган холда электр ва магнит зарядли қора ўраларнинг янги ечимларини олиш формализмини намойиш этдик ва ушбу формализм доирасида янги ечимни намойиш этдик. Бу ечим нафақат бизга маълум бўлган Хейворд, Бардин қора ўралар ечимларини бирлаштиради, балки уларни юқори даражаларгача кенгайтиради. Шу билан бирга, у кучсиз майдон яқинлашишида Максвеллнинг чизиқли электромагнетик майдонига мос келувчи янги турдаги ечимларни ўз ичига олади. Бу ечимларнинг физик хусусиятлари ўрганилди.
2. Шу нарсга кўрсатилдики, агар қора ўра заряданган бўлса, унинг зарядининг тури, яъни электр ёки магнит зарядли эканлигини қора ўра атрофида ҳаракатланаётган ёруғликни кузатиш орқали аниқлаб бўлмайди.
3. НЭДдаги электр ва магнит зарядли қора ўраларнинг электромагнит ғалаёнланишларининг квазинормал режимлари спектрлари чизиқли электродинамикадагидан фарқли равишда изоспектрал эмаслигини кўрсатдик.
4. Электромагнит ғалаёнланишлар чизиқли бўлмаган электродинамикада ёруғлик нури фазо-вақтнинг нол геодезияси бўйича юрмаслик ҳодисасини тасдиқловчи кучли восита бўлиши мумкинлиги кўрсатдик. Бундан ташқари, электр (магнит) зарядли қора ўранинг жуфт-жуфтликли электромагнит ғалаёнланишлар спектри ва магнит (электр) зарядли қора ўранинг тоқ-жуфтликли электромагнит ғалаёнланишлар спектри изоспектрал эканлигини кўрсатдик.
5. НЭДга қўшилган умумий нисбийлик назариясининг компакт объектлари ҳеч қачон йўқолмайдиган фотонсфераларга эга.
6. Умумий нисбийлик назариясида политропик сфера ечимини олдик ва гравитацион ғалаёнланишларга нисбатан бу сфера беқарор эканлигини кўрсатдик. Қизиғи, бу беқарорлик беқарор фотонсферагача бўлган тутувчи соҳада бўлишини ва бу ўз навбатида шу ердаги масса марказга қулаб қора ўра ҳосил қилишини кузатдик. Политроп параметрининг $N \geq 3.75$ қийматларида агар галлактик галонинг массаси $M_{halo} = 10^{12} M_{\odot}$ бўлса, унинг марказида ҳосил бўладиган қора ўранинг массаси $M_{BH} = 10^7 M_{\odot}$ бўлишини ва хатто баъзи қийматларида унинг массаси $M_{BH} = 10^9 M_{\odot}$ гача етишини кўрсатдик. Бу натижалар бизнинг галлактикамиз Сомон Йўли ва қўшни М87 ва уларнинг марказларидаги ўтамассив қора ўраларнинг массалари билан мос келиши кўрсатилди.
7. Биз ҳусусий айланиш моментига эга зарранинг акциал симметрик, статик компакт объектлар атрофида ҳаракатига фазо-вақт деформациясининг ва қоронғу

энергиянинг таъсирларини алоҳида ўргандик. Олинган натижаларни галактикамиз марказида жойлашган Ўқотар A^* қора ўраси атрофида ҳаракатланаётган миллисекунд пулсар учун қўллаб шуни кўрсатдикки, пулсарнинг ISCOси марказдан $r_{ISCO} = 10^7$ км масофада, OSCОси эса $r_{OSCO} = 10^{17}$ км = 10^4 парсек масофада, яъни галактика билан бир хил радиусда бўлишини аниқладик.

ASTRONOMICAL INSTITUTE

TOSHMATOV BOBIR ABDUMANONOVICH

**DYNAMICS OF ELECTROMAGNETIC, SCALAR, GRAVITATIONAL
PERTURBATIONS AND PARTICLES AROUND RELATIVISTIC
ASTROPHYSICAL OBJECTS**

01.03.01- Astronomy

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2022

The theme of the dissertation of doctor of physical and mathematical sciences (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2019.4.DSc/FM149.

The doctoral (DSc) dissertation was carried out at the Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, English, Russian (synopsis)) languages on the website of the Scientific Council at the address of www.astrin.uz and on the website of “Ziyonet” information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Ahmedov Bobomurat Juraevich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents:

Irina Dymnikova

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Kirill Bronnikov

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Nuritdinov Salokhitdin

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Leading organization:

Institute of Physics in Opava, Silesian University

Czech Republic

The defense of the dissertation will be held on “___th” _____ 2022 at ___ in the meeting of the Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 at the Astronomical Institute (Address: UBAI, 33 Astronomicheskaya street, 100052, Tashkent. ph.: (+998) 712358102; fax: (+998) 712344867; e-mail: info@astrin.uz).

The doctoral (DSc) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the Astronomical Institute (registered under No. __). Address: UBAI, 33 Astronomicheskaya street, 100052, Tashkent. ph.: (+998) 712358102.

The Abstract of dissertation was distributed on “___” _____ 2022.

(Registry record No. _____ dated “___” _____ 2022.)

Sh.A. Ehgamberdiyev

Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., Professor, Academician

I.A. Ibragimov

Scientific Secretary of Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
C.Ph.-M.S., Senior Researcher

A.B. Abdikamalov

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S.

INTRODUCTION (Annotation of doctoral dissertation)

Topicality and demand of the theme of dissertation. Nowadays a research on active galactic nuclei in the center of galaxies has become one of the main targets by the leading research centers in the world. As a result of current development of technologies, astronomical observations are being carried out not only through the electromagnetic waves coming from the astrophysical objects, but also via the gravitational waves extracted from them. Every astrophysical object emits different gravitational wave as a result of merging or perturbation that allows us to distinguish it from other objects and estimate their properties. Therefore, a great efforts are put not only on increasing sensitivity of the current detectors, but also on the theoretical study of the gravitational waveforms of compact objects in different theories of gravity.

At present, scientific research on determining the physical properties of black holes by means of electromagnetic and gravitational waves, the dynamics of the processes taking place around black holes and how appropriate the physical laws known to us in a strong gravitational field. In this direction, a recent triumphant discoveries such as the detection of the gravitational waves from the coalescence of two black holes in binary by the LIGO (Laser Interferometer gravitation Wave Observatory) and Virgo scientific collaborations and the images of the supermassive black holes (SMBHs) Sagittarius A* (Sgr A*) in the center of the Milky Way and the center of the extragalactic elliptical galaxy M87 captured by the Event Horizon Telescope (EHT) group are guiding all these researches. At the same time, the fact that the properties of the final object formed from the merging of black black holes in binary can be determined by studying the quasinormal modes (QNMs) of the gravitational waves extracted in the process one can not only verify the General theory of relativity (GR) but also constrain the correctness of alternative theories gravity.

Our Republic pays great attention to fundamental research in the field of relativistic astrophysics of black holes. In particular, the the concept of the development of science in our country by 2030 and the decision on the development of physics in our country, put forward by the President of our Republic showed the important directions of fundamental research and the tasks of their implementation. In carrying out these tasks, it is important to study the relativistic astrophysics of gravitation compact objects, including the energetic, optical properties of black holes and neutron stars, and lay the foundation for the gravitation wave astronomy in our country which is a new direction of astronomy created as a result of the detection of the gravitational wave.

This dissertation work is aimed at implementing the tasks approved in state regulatory documents, in the Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-6097 "About approval of the concept of development of science till 2030" dated October 29, 2020, as well as Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-5032 "On measures to improve the quality of education and improve scientific research in the field of physics" dated March 19,

2021.

Conformity of the research to the main priorities of science and technology development of the republic. The dissertation research was carried out in accordance with the priority direction of the development of science and technology in the Republic of Uzbekistan II. “Energy, energy and resource saving”.

Review of international scientific researches on dissertation subject. The research of QNMs of black holes and associated observational gravitational wave effects, in particular, gravitational radiation from merging black holes, electromagnetic and scalar radiations of fields in the strong gravitational fields of black holes, and studies of the properties of black holes, are carried out by leading research centers and higher educational institutions, such as the California Institute of Technology (CalTech, USA), Max Planck Institute for Gravitational Physics - Albert Einstein Institute (Germany), Technical University Lisbon (Portugal), La Sapienza University of Rome (Spain), Inter University Center for Astronomy and Astrophysics (India), Silesian University in Opava (Czech Republic), State Astronomical Institute, P.K. Sternberg (Russia), Fudan University (China), Nazarbayev University (Kazakhstan), Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Uzbekistan) and others.

In the ringdown phase of coalescence of black holes in binary, the remnant resulting from the merger of two compact objects relaxes to its equilibrium state by radiating the gravitational waves whose frequencies are called QNMs, since they are complex and subject to decay through the imaginary part and they are determined solely by black hole parameters. Thus, their registration in gravitational radiation during the coalescence of black holes by the LIGO-Virgo collaboration gives us a chance to test not only the no-hair theorem, and hence GR, but also the alternative theories of gravity which predict more exotic objects such as white holes, wormholes, boson stars, gravastars their interpretation in various theories of gravity.

Degree of study of the problem. Since, in the linear approximation, the field equations in the vicinity of the black hole are reduced to the wave equation with some effective potential, the mathematical problem of calculating the QN frequencies is reduced to a problem on the eigenvalues of a linear differential operator. Most of the existing solution methods can be conditionally divided into semi-analytical and numerical. The choice of method for finding the QNMs depends on the context in which the QNMs are studied. For example, the methods developed on the basis of the Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) approach for effective potentials such as potential barriers are well applicable to astrophysical black holes and are the simplest, but approximate ones are not very accurate and in a number of cases the third order after the eikonal approximation is not sufficient for an adequate description of the QNMs.

The dynamics of scalar, electromagnetic, gravitational perturbations and particles around relativistic astrophysical objects have been studied and discussed by many scientists, among whom are, for example, Portuguese (V. Cardoso, C.

Herdeiro, J. Lemos), American (K. Thorne, C. Will, E. Poisson, E. Berti), Russian (D. Galtsov, K. Bronnikov), Canadian (V. Frolov, D. Kubizniak), Uzbek (B. Ahmedov and others), italian (P. Pani, E. Barausse, V. Ferrari, R. Ruffini), czech (Z. Stuchlík, R. Konoplya, G. Loukes-Gerakopoulos, J. Bičák), german (K. Kokkotas, L. Rezzolla, B. Schutz, A. Buonanno, J. Steinhoff), brazilian (L. Crispino, E. Abdalla, C. Macedo, A. Zhidenko), japanese (K. Maeda, J. Soda, A. Ishibashi, H. Kodama) and many others. However, the QNMs of scalar, electromagnetic, gravitational perturbations for a wide class of black holes, including regular ones in GR in combination with nonlinear electrodynamics (NED), have not yet been fully studied.

Moreover, dynamics of the particle possessing its own angular momentum (spin) around compact objects is one of the vital phenomena for astrophysical observations and measurements as most of the astrophysical objects have their own angular momenta. Therefore, this topic has also been studied and discussed by many scientists, among whom are, for example, german (J. Steinhoff, J. Kunz, D. Puetzfeld, D. Kunst), italian (D. Bini, E. Barausse, D. Malafarina), japanese (S. Suzuki, K. Maeda), czech (G. Lukes-Gerakopoulos, J. Kovař, O. Semerak), russian (G. Bisnovatyi-Kogan, O. Tsupko, Y. Obukhov, A. Deriglazov) and many others. However, these studies have only been restricted in spherically or axially symmetric, asymptotically flat spacetimes and not been extended to the asymptotically non-flat and deformed spacetimes.

Connection of the topic of dissertation with the scientific works of scientific research organizations, where the dissertation was carried out. The dissertation was performed within the framework of scientific projects of the Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan YFA-ATeh-2018-8 “Particles and strong gravitational and electromagnetic fields in the vicinity of compact objects in relativistic astrophysics” (2018–2019), VA-FA-F2-008 “Astrophysical processes in stationary and dynamic objects of relativistic gravity” (2017–2020), VA-FA-F2-008a “Relativistic astrophysics of isolated black holes in close binary systems containing black holes” (2017–2020); Belarusian-Uzbek project MRB-AN-2019-29 “Modeling of compact astrophysical objects and correlation of their observational characteristics with the parameters of the RT-70 telescope and the Russian orbital telescope Gamma-400” (2019–2021).

The aim of the research is a detailed description of the QNM behavior of a wide class of astrophysical black holes in GR, in particular, coupled to NED transforming into the Reissner-Nordström black holes in the linear electromagnetic field approximation, as well as the application of the results to the description of a number of observed phenomena, such as the frequency of gravitational waves and their decay times, characteristics of supermassive black holes at the center of specific galaxies, the motion of spinning particles in the vicinity of black holes, etc.

The tasks of the research:

Obtaining new regular and singular solutions for black holes in the framework of GR in combination with NED;

study of the possibility of distinguishing the type of charge of a black hole by the motion of photons in its immediate vicinity;

study of scalar, electromagnetic and gravitational perturbations of spacetime of black holes and calculation of their characteristic vibration frequencies (QNMs);

to estimate the upper and lower ranges of relaxation times of perturbations of charged black holes and apply them to the galactic SMBHs;

development of a polytropic star model to explain the possible formation of a SMBH in the center of the Galaxy;

to study the influence of the spin of particle on its motion in the field of various (deformed, spherically symmetric, in particular, including dark energy) black holes.

The objects of the research are the processes of evolution of scalar, electromagnetic and gravitational fields in the vicinity of regular black holes in NED and candidates Sgr A*, M87, millisecond pulsar.

The subjects of the research are the spectra of QN oscillations of the scalar, electromagnetic, and gravitational perturbations, which give the oscillation frequency and decay rate of QNMs of black hole under astrophysical conditions in the strong gravity regime, as well as the associated observational gravitational wave data.

The methods of the research. In the current research we encounter highly nonlinear partially differential equations that will be solved analytically, semi-analytically or fully numerically. Moreover, perturbations of the black hole spacetimes is described by the Schrödinger-like wave equation with complex eigen-frequencies that are to be found we use WKB, Leaver's and Frobenius' continued fraction methods, Bohr-Sommerfeld rule and to find the waveform we use the discretization method.

The scientific novelty of the research is in the followings:

for the first time correct, electrically and magnetically charged Maxwellian, Hayward and Bardeen black hole solutions in GR coupled to NED has been obtained;

for the first time we show by studying the electromagnetic perturbations of the black holes in NED that not only the light ray but also the electromagnetic waves do not follow the null geodesics of the spacetime in NED;

for the first time it is shown that the spacetimes of GR coupled to the NED have never vanishing light rings;

for the first time it is shown that highly charged black holes in NED oscillates electromagnetic perturbations with very small or even without damping rate;

for the first time it is shown that QNM spectra of the axial electromagnetic perturbations of magnetically (electrically) charged black hole and polar electromagnetic perturbations of the electrically (magnetically) charged black hole are isospectral;

for the first time we present a formalism by solving the Einstein equations for the polytropic equation of state and introducing small perturbation to this

spacetime that the formation of the SMBHs in the galactic center;

for the first time the effect of spin of the particle to its motion around black holes with deformation and dark energy is presented.

Practical results of the research are as follows:

obtained new analytic black hole solutions in GR coupled to the NED.

it has been shown that the through the motion of light ray around charged black hole, one cannot distinguish the type of charge the black hole possesses. These may be useful for the EHT collaborations to estimate parameters of two black hole candidates, M87 and Sgr A*, if these black holes are considered as charged.

it has been proven that the black hole in NED has always got nonvanishing lightning and this fact may also be used to distinguish the type of black hole from observations in the near future.

The electromagnetic perturbations of highly charged black holes in GR coupled to NED oscillates slowly or never damping electromagnetic waves. If such signal is detected in observation, one can easily extract information it on the source.

The formation of SMBH in the center of galaxy is still not solved problem and developed polytropic model could address this unresolved phenomenon.

Reliability of the research results ensured by the fact that in the dissertation work standard methods of mathematical and theoretical physics were used, including highly efficient numerical methods and programs, a thorough check of the correspondence of the obtained theoretical results with the available theoretical data in limiting cases, observational data and the results of other scientists was carried out, as well as the fact that the given the conclusions are in good agreement with the main provisions of the theory of the field of gravitational compact objects in the regime of strong gravity.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the research results is determined by the ability of the formalisms developed in the dissertation to analyze the temporal evolution of electromagnetic, gravitational, scalar fields and perturbations of astrophysical black holes and the mechanisms for extracting information from observations of gravitational waves from astrophysical black holes in order to obtain data on various parameters and properties of black holes. In addition, future observations of gravitational waves from mergers of black holes and neutron stars may provide observational constraints on the presence of electric and magnetic charges in a black hole, which play a decisive role in observational processes around black holes.

The practical significance of the results of the dissertation lies in the fact that they can be used to obtain the values of the parameters of alternative theories of gravity in a strong field regime and gravitational compact objects formed as a result of the merger of black holes and neutron stars. The results can be useful for analyzing the frequency and decay time of gravitational waves, in the development of observational tests, criteria for the detection and identification of various types of compact black holes. Taking into account the methods for analyzing the time

evolution of the fields calculated in this work makes it possible to quickly and with good accuracy obtain the QNM of a wide class of black holes without resorting to cumbersome numerical methods. The obtained characteristic spectra of gravitational perturbations in the vicinity of black holes can be useful in the analysis of experiments on the detection of gravitational radiation from black holes.

The practical significance of the results of research includes the followings: they can be used to estimate parameters of black holes via their electromagnetic and gravitational signals; they can serve as one of the serious models of the formation of the SMBHs in the galactic centres; they can also be used to estimate parameters of the central compact object through the orbits of the spinning particle around it.

Application of the research results. Based on the study of dynamics of scalar, electromagnetic, gravitational perturbations and particles around relativistic astrophysical objects:

the results related to the derived new black hole solutions in GR coupled to the NED and their perturbations as well as the model of formation of the SMBH in the galactic center have been used in the Silesian University Grants No. SGS/12/2019, No. SGS/14/2016, the Albert Einstein Centre for Gravitation and Astrophysics under the Czech Science Foundation Grant No. 14-37086G and Czech Science Foundation GAČR project No. 19-03950S (letter from Institute of Physics, Silesian University in Opava, Czech Republic) and were used by several foreign researchers (cited in highly ranked journals such as *Nature Astronomy*, 2017; *Journal of High Energy Physics*, 2018; *Living Reviews in Relativity*, 2019; *Physical Review D*, 2019; *Physics Letters B*, 2019; etc..) to study various phenomena related to the SMBHs hosted in active galactic nuclei;

the research on dynamics of the particle possessing angular momentum around astrophysical compact objects with various properties such as the one possessing deformation or dark energy, have been used in the frame of the Ministry of Education of the Republic of Kazakhstan's target program: "Center of Excellence for Fundamental and Applied Physics", IRN: BR05236454 and Nazarbayev University Faculty Development Competitive Research Grants No. 090118FD534, No. 090118FD5348 (letter from Nazarbayev University, Kazakhstan). They were also used by several foreign researchers (cited in refereed scientific journals as *Physical Review D*, 2018; *European Physical Journal C*, 2019; *Galaxy*, 2020; *Universe*, 2020; etc..) to study the orbits of the particles around and accretion of black holes in several gravity theories.

study on the gravitational collapse of a sphere made of homogeneous dust to black hole in the Einstein-Gauss-Bonnet gravity have been used in the frame of programs supported by the projects of the Indian Inter-University Grant Committee (letter from Indian Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics dated January 28, 2021), as well as foreign researchers (cited in refereed scientific journals as *Journal of High Energy Physics*, 2020; *Physics Letters B*, 2020; *Physics of the Dark Universe*, 2020; *European Physical Journal C*, 2020; etc..) to study the

physical properties of the black holes in the Einstein-Gauss-Bonnet theory.

Approbation of the research results. The research results were reported in the form of reports and tested at 9 international and local scientific conferences.

Publication of the research results. On the dissertation theme there were published 33 scientific works, including 19 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, five chapters, conclusion and 200 bibliography. The size of the dissertation is 224 pages.

THE MAIN CONTENTS OF THE DISSERTATION

In **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 dissertation entitled **“Brief Astrophysical Background”** is devoted to the main current observational astrophysical triumphs and their relation to the dissertation.

The second chapter of the thesis entitled **“Black holes in general relativity coupled to nonlinear electrodynamics”** is devoted to the construction of black hole solutions in GR coupled to NED and the effect of the type of charge of the spacetime to the propagation of light ray around them. Importance of the NED in GR is arose from the fact that despite the Maxwell (linear) electrodynamics and GR are completely different classical theories, they both suffer from common so-called singularity problem. The problem is more pronounced in GR, where the occurrence of curvature singularities disrupts the causal structure of the spacetime. The existence of curvature singularity is still one of the unsolved problems of the theory. Many approaches have been taken and several models have been proposed in the attempt to avoid this “spacetime pathology”. One of the methods to eliminate the singularity from the spacetime is coupling the GR to NED. In the first half of the first chapter of thesis, we demonstrate the formalism of constructions of electrically, magnetically and dyonically charged black hole solutions and present obtained new generic black hole solution. GR coupled to NED is described by the following action:

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} (R - L) , \quad (1)$$

where L is the lagrangian density of the NED. By solving the Einstein and Maxwell's equations in the NED for the static, spherically symmetric spacetime,

we presented a formalism in which one can obtain electrically, magnetically and dyonically charged black hole solutions. Afterwards, we obtained new regular black hole solution whose metric function is given by

$$f(r) = 1 - \frac{2Mr^{\mu-1}}{(r^\nu + q^\nu)^{\mu/\nu}} \quad (2)$$

The spacetime of the black hole with metric function (2) is regular at the center of the spacetime only for $\mu \geq 3$ and in absence of the charge it reduces to the Schwarzschild spacetime. The solution (2) not only generalizes the well-known Bardeen ($\mu=2$, $\nu=1$) and Hayward ($\mu=3$, $\nu=1$) regular black hole solutions in special cases to higher orders with arbitrary ν , but fills them with new solutions ($\mu=1$) that correspond to the Maxwell electrodynamics and behave like Reissner-Nordström black hole in a weak field regime. Therefore, we named the new solution as “Maxwellian” black hole solution. In the thesis we have shown with great details that the lagrangian density of the NED of the electrically charged solution is different to the magnetically charged counterpart. This reveals one very fundamental property of the NED that unlike the case in the linear electrodynamics in GR, in NED any lagrangian density does not give the same solutions for the magnetically and electrically charged spacetimes.

In the second half of the first chapter based on the well-known fact that the electromagnetic wave propagates along the null geodesics of the spacetime in vacuum and linear electrodynamics, but it does not follow the null geodesics in the NED, instead the paths of light can be described in terms of an effective spacetime metric which represents a modification of the original spacetime. Taking this fact into account we determined whether it is possible to distinguish the type of charge of the black hole via the motion of light ray in this spacetime. We have shown that despite the fact that the effective metrics of electrically and magnetically charged black holes in GR coupled to NED are different, photon follows the same trajectories and therefore, the observation of light propagation alone cannot distinguish the two kinds of charges. One of the most important results of the second part of the first chapter of the thesis, is that the observation of photon trajectories alone is not able to distinguish the two kinds of charges. Therefore, the EHT collaboration should simply give up the aim of determination of the type of charge black holes possess.

The third chapter of the thesis entitled **“Perturbations of black holes in general relativity coupled to nonlinear electrodynamics”** is devoted to study of the scalar, electromagnetic and gravitational perturbations of black holes in GR coupled to NED and calculations of their characteristic oscillation frequencies, so-called QNMs. It is well-known that perturbed object (or system) relaxes to its equilibrium state by radiating the gravitational (or scalar, electromagnetic) waves whose frequencies are called QNMs, since they are complex and subject to decay through the imaginary part and they are fully characterized by the spacetime parameters only. By solving the field equations we had derived the formalism for the odd-parity electromagnetic perturbations of electrically and magnetically

charged arbitrary black hole solution in GR coupled to NED, in the next stage we apply this formalism for the concrete black hole solutions and study the dynamics of the electromagnetic perturbations of it. In this purpose, we chose the Maxwellian black hole solution, derived in the previous chapter. We studied the evolution of the electromagnetic perturbations by using a characteristic integration method. In Fig. 1, we obtained the temporal evolutions of the electromagnetic perturbations of the Maxwellian black hole in the NED and Reissner-Nordström black hole in linear electrodynamics.

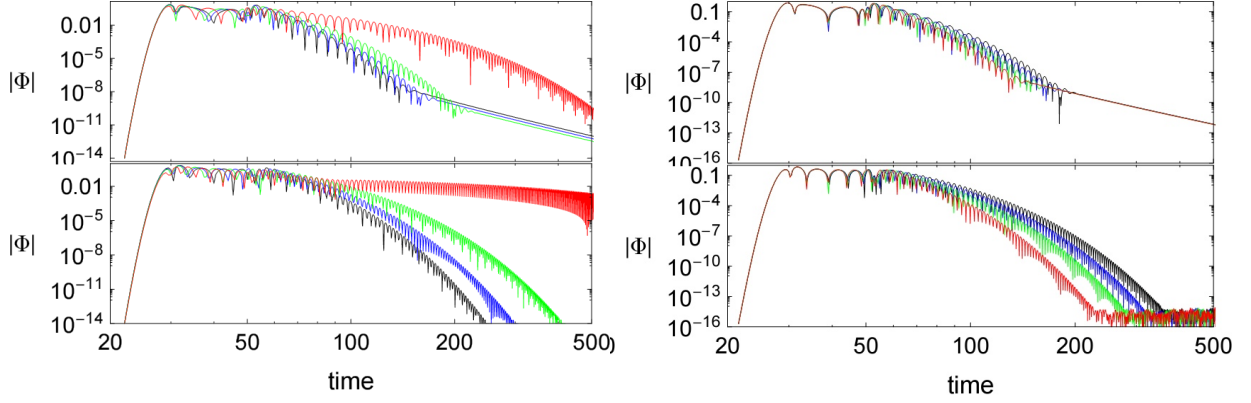


Fig. 1. Temporal evolution of $l=2$ (top panel) and $l=4$ (bottom panel) fundamental modes of the electromagnetic perturbations of the Maxwellian regular (left panel) and the Reissner-Nordström (right panel) black holes for the values $Q=0.2$ (black), $Q=0.6$ (blue), $Q=0.8$ (green), and $Q=0.998$ (red).

One can see from Fig. 1 that the main difference of the evolution of the electromagnetic perturbations in the black holes in the linear and NED is that an increase in the value of the charge parameter of the Maxwellian regular black holes prolongs perturbations, while in the linear electrodynamics, it shortens the life of the electromagnetic perturbations. Moreover, time domain profiles of the electromagnetic perturbations of the Maxwellian regular black holes show that they are stable against electromagnetic perturbations.

Moreover, we calculated the QNMs of the electromagnetic perturbations of these black holes by imposing the boundary condition that is in our case purely incoming and outgoing at the horizon and spatial infinity, respectively.

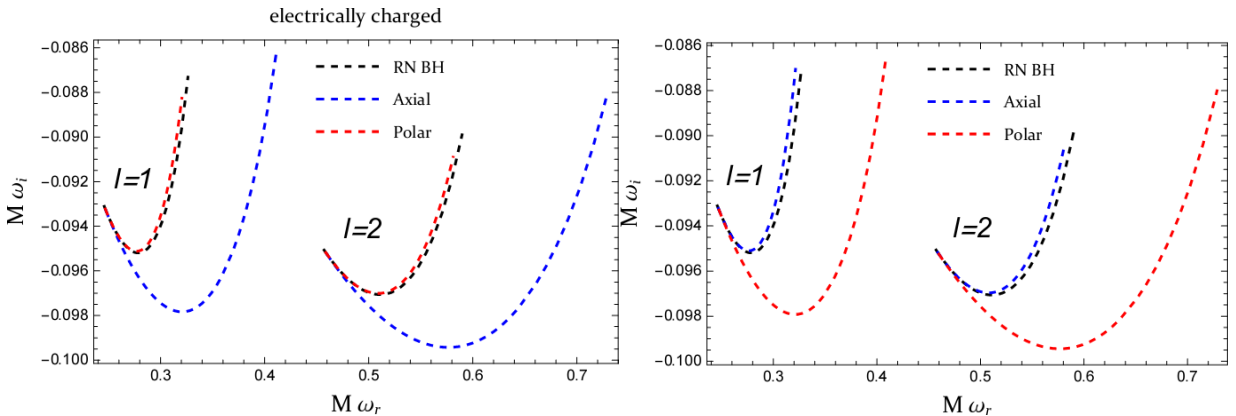


Fig. 2. $l=1$ and $l=2$ fundamental QNMs of the electromagnetic perturbations of the electrically and magnetically charged Maxwellian regular and Reissner-Nordström black hole for the whole range of the charge parameter $Q \in [0,1]$. Where junctions of the curves correspond to the ones of the Schwarzschild black hole ($Q=0$).

Moreover, by studying the electromagnetic perturbations of black holes in NED in high energy limit we showed for the first time that the electromagnetic perturbation does not follow the null geodesics in the NED. One of the momentous results of these analysis is that if the spacetime of the electrically and magnetically charged black holes are the same, the axial electromagnetic perturbations of the magnetically (electrically) charged and polar electromagnetic perturbations of the electrically (magnetically) charged black holes are isospectral, as in Fig. 2.

In the second half of current chapter we studied the gravitational perturbations of black holes in NED by introducing linear perturbation $h_{\mu\nu}$ to the fixed background of the black hole $\bar{g}_{\mu\nu}$ as $g_{\mu\nu} = \bar{g}_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, where $|\bar{g}_{\mu\nu}| \gg |h_{\mu\nu}|$. The gravitational perturbations can be decomposed into tensor spherical harmonics and separated into odd (axial) and even (polar) modes as $h_{\mu\nu} = h_{\mu\nu}^{\text{odd}} + h_{\mu\nu}^{\text{even}}$. By solving the Einstein equations for the odd and even parity gravitational perturbations, separately and simplifying them, we again obtained similar wave equation with the appropriate effective potentials. Then, we applied above formalism for the odd- and even-parity gravitational perturbations of generic regular black hole solution that combines Bardeen-like, Hayward-like and Maxwellian black holes and calculated fundamental QNMs of all these solutions. One can find the detailed full numerical results in the thesis, but here in Fig. 3 we present main features of them.

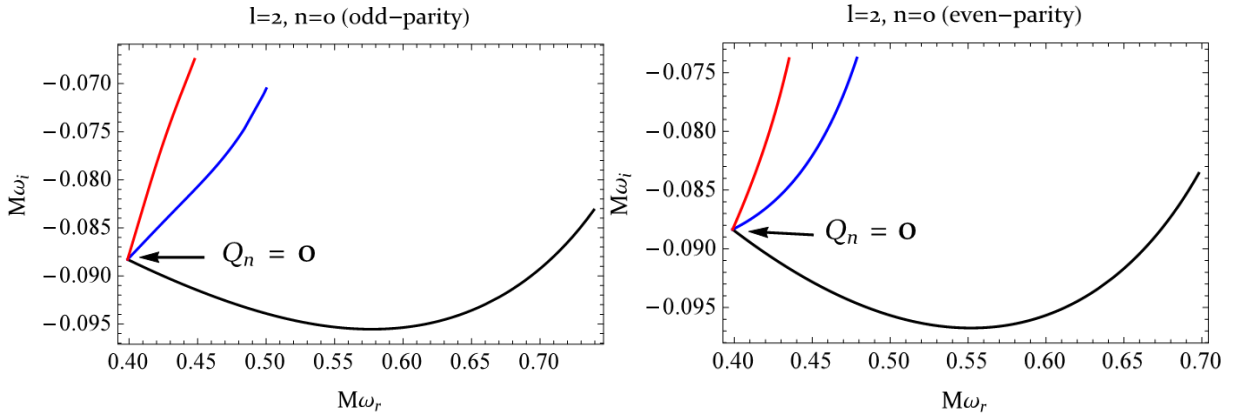


Fig. 3. $l=2$ fundamental QNM trajectories of the odd-parity (left panel) and even-parity (right panel) gravitational perturbations of Maxwellian (black), Bardeen (blue) and Hayward (red) black holes in the range of normalized charge parameter $Q_n \in [0,1]$.

Finally, in the last section of this chapter, we estimate relaxation times of the scalar, electromagnetic and gravitational perturbations of uncharged (Schwarzschild) black hole, Reissner-Nordström black hole and naked singularity, Bardeen, Hayward and Maxwellian black holes and no-horizon spacetimes studying their upper and lower ranges in the high energy regime. Our calculations had shown that charged spacetimes can have circular null geodesics even after the

horizon vanishes till critical values of charge parameter. Interestingly, at the extreme values of the charge parameters, the gravitational and scalar perturbations of these spacetimes never relax, i.e., the spacetime oscillate perturbations with normal modes and beyond these critical values they do not oscillate gravitational perturbations. However, in the case of the electromagnetic perturbations situation is different, as electromagnetic perturbations are mainly localized on the photonsphere, not circular null geodesics, and the spacetimes of NED posses never vanishing photonspeheres, they always oscillate electromagnetic perturbations. In short, we summarize upper and lower limits of the relaxation times of the above mentioned spacetimes in Table 1.

Spacetimes	shortest grav.	CC	longest grav.	CC	Shortest EM	CC	longest EM	CC
Schwarzschild	51.0262	0	51.026 2	0	51.0262	0	51.026 2	0
RN BH	50.0378	0.73	55.550 3	1	50.0378	0.73	55.550 3	1
RN NS	>55.550 3	>1	∞	1.06	>55.550 3	>1	∞	1.06
Maxwellian BH	48.7728	0.62	57.519 0	1	50.0385	0.52	53.471 5	1
Maxwellian NH	>57.519 0	>1	∞	1.07	20.1975	2.25	62.303 6	1.2
Bardeen BH	>51.026 2	>0	63.031 3	1	51.0262	0	58.358 8	1
Bardeen NH	>63.031 3	>1	∞	1.11	36.6051	2.4	63.174 9	1.24
Hayward BH	>51.026 2	>0	61.048 9	1	>51.026 2	0	55.875 8	1
Hayward NH	>61.048 9	>1	∞	1.07	40.5379	2.35	58.475 1	1.24

Table 1. Relaxation times of the gravitational (and scalar) and electromagnetic perturbations of the regular spacetimes in comparison with the ones of the RN and Schwarzschild spacetimes in units of $[M / M_{\odot} 10^{-6}]$ seconds. Where **CC**, **BH**, **NS** and **NH** stand for the acronyms of corresponding **charge**, **black hole**, **naked singularity** and **no-horizon**, respectively.

The fourth chapter of the thesis entitled “**Gravitational instability in polytropic spheres and its application to supermassive black holes in galactic halos**” is devoted to the formulation of polytropic spheres in the GR and its application for the explanation of existence of the SMBHs in the galactic centers. The first we considered that the polytropic sphere is spherically symmetric, static and this configuration is assumed to be constituted from a perfect fluid with the polytropic equation of state (EoS)

$$p = K\rho^{1+\frac{1}{N}}, \quad (3)$$

where constant N denotes the polytropic index and it is $N=3$ for the ultra-relativistic degenerate Fermi gas and $N=3/2$ for the non-relativistic degenerate Fermi gas. We constructed the polytropic star by solving the Einstein equations and the energy-momentum conservation law. Analysis have shown that with increasing values of the polytropic index N and relativistic parameter σ , the extension of the polytropic sphere increases. On the other hand, extension of the trapping zone given by the position of the unstable circular null geodesics is always restricted to the central region as $\xi_{ph|u}(N,\sigma) \approx 1$. By solving equations of motion for the massless particle (photon), we determined that for some values of parameters (N,σ) there are two: stable at $\xi_{ph|s}$ and unstable at $\xi_{ph|u}$ circular null geodesics inside the polytropic star with the relation $\xi_{ph|s} < \xi_{ph|u}$ and such polytropes are called trapping polytropes.

Moreover, in order to determine the stability of the polytropic star we introduced perturbations into the spacetime of the polytropic star. Simplifying the equations, we arrived at the wave equation with effective potential given in Fig. 4. Interesting information is obtained by solving the wave equation approximately at regions related to the local extrema of the effective potential. We studied the QNMs and evolution of the gravitational perturbations in the trapping polytropes for the value of the polytrope index $2.1378 < N < 4$.

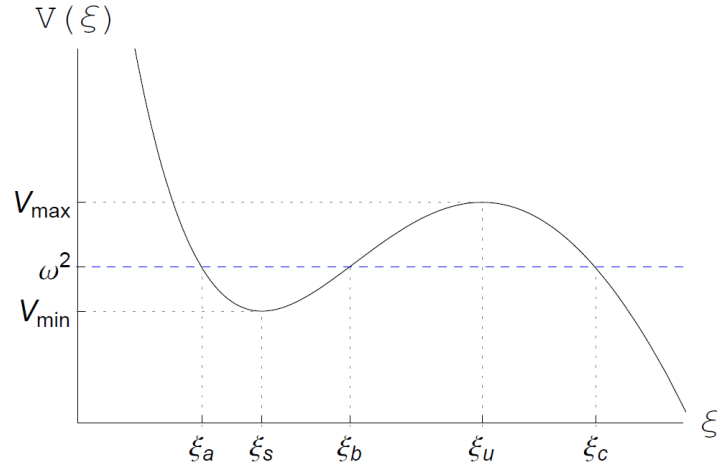


Fig. 4. Schematic radial profile of the effective potential of gravitational perturbations given for a trapping polytropic sphere. The region of the classical trapping is governed by the local minimum of the potential, V_{min} , at ξ_s , and the local maximum, V_{max} , at ξ_u . For $\omega^2 \in [V_{min}, V_{max}]$, the turning points ξ_a , ξ_b , ξ_c are governing the real and imaginary parts of the eigen-frequencies.

We have to stress that both the existence and character of the local minimum and maximum of the effective potential of the gravitational perturbations is dependent on the multipole number l , and the trapping polytrope properties in dependence on the values of the polytropic parameter N , the effective potential might not have

any local minimum and maximum for small values of multipole number. Calculations have shown that in small values of the multipole number trapping polytropic star is unstable against gravitational perturbations around the stable circular null geodesics of the spacetime. However, with increase value of the multipole number enhancing rate of the gravitational perturbations decreases and the star starts become more stable and in the big values of the multipole number gravitational perturbation becomes long-lived with very small damping rate, as shown in Fig. 5.

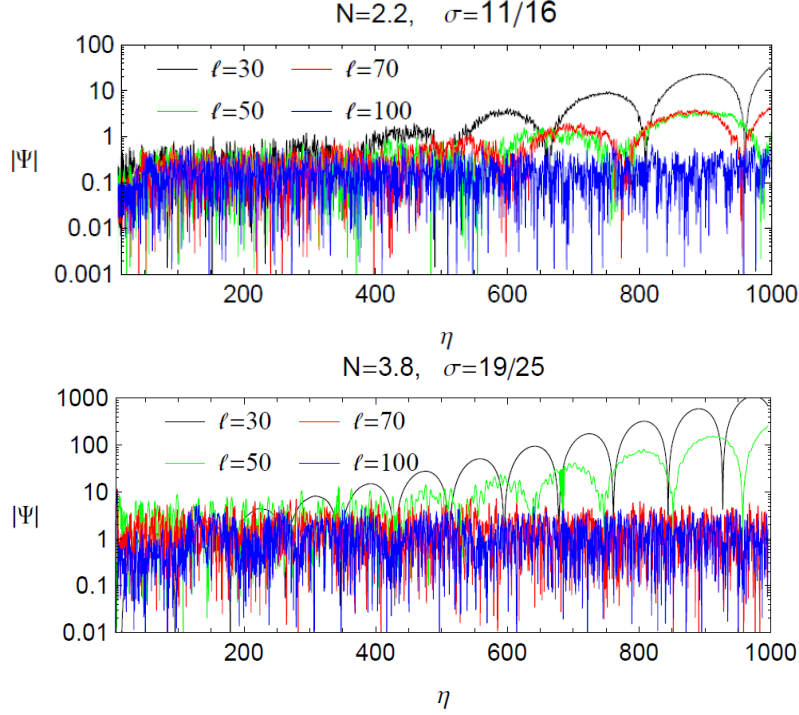


Fig. 5. Time evolution of the gravitational perturbations in the trapping polytropic spheres. The sphere with $N=2.2$ is a compact one, while those with $N=3.8$ is extremely extended. For small multipole numbers unstable modes occur, while in the eikonal, the long-lived (slowly damping) modes occur.

Finally, we estimated the astrophysical consequences of existence of the long-lived axial gravitational modes in the trapping zone of polytropic spheres, namely the possible consequences of the conversion of the trapping zone into a black hole due to the evolution of these unstable and long-lived modes in a subsequent curvature-enhancing nonlinear regime. In order to estimate the fate of the expected black hole creation, we should compare the relative extension parameter, $R_\xi[N, \sigma]$, and the relative mass parameter, $R_v[N, \sigma]$. The relative mass function determines the ratio of the mass of the black hole created by the gravitational instability and collapse of the trapping zone, to the whole mass of the polytropic sphere. Their calculations had shown that for $N < 3.75$ the trapping polytropes are relatively compact, with $R_\xi \leq 10^{-3}$, but for $N > 3.75$, there are very extended trapping polytropes with $R_\xi \leq 10^{-7}$. It can even be extremely extended for $N \approx 3.8$. For our discussion, the most relevant is the relative mass function R_v , reflecting the

relative mass content of the trapping zone, as related to the total mass of the polytrope that is crucial for the final fate of the polytropic sphere after expected collapse of the trapping region to a black hole. Clearly, for compact trapping polytropes, with mass of the black hole comparable to the total mass of the polytrope, we could expect that in relatively short time scales the whole polytrope mass could be captured by the created black hole. In the second branch, corresponding to the family of very extended trapping polytropic spheres that occurs for $N > 3.75$, there is always $R_v \leq 10^{-3}$ and $R_\xi \leq 10^{-7}$, and the stabilization of the trapping polytrope after collapse of its small trapping zone could be realistic and we can expect survival of the polytropic configuration after creation of the central black hole. Such trapping polytropic spheres can be expected to represent galactic halos. If such a halo has a mass $M_{halo} = [10^{12} \div 10^{14}] M_\odot$, we can expect a central SMBH with $M_{BH} = [10^8 \div 10^{10}] M_\odot$ corresponding to typical active galactic nuclei that perfectly match with the well-known galactic halos such as Milky Way and its central black hole Sgr A*, and the galaxy of M87 and its central SMBH with the same name.

Finally, the fifth chapter of the thesis entitled “**Dynamics of spinning particle around axially symmetric compact objects**” is devoted to the dynamics of the spinning test particle moving in the field of the compact objects. We solve the spinning particle’s motion in the “pole-dipole” approximation where expansion of the stress energy-momentum tensor mass is cut off at the second order where the first order term corresponds to the monopole mass while second order term corresponds to the spin that is dipole. In such description the motion of spinning particles is governed by the Mathisson-Papapetrou-Dixon (MPD) equations. By solving these equations, we derived the formalism for the spinning particle’s motion in any generic static, axially symmetric spacetime.

In order to determine the effect of the deformation on the motion of spinning particle we applied the generic formalism we derived, to Zipoy-Vorhees spacetime that is also known as the static, axially symmetric spacetimes γ -metric. When $\gamma = 1$, it reduces to the spherically symmetric Schwarzschild metric. The cases $0 < \gamma < 1$ and $\gamma > 1$ represent sources with prolate and oblate spheroidal deformations, respectively. It is important to stress that in these cases $\gamma \neq 1$, the line element does not represent a black hole. In the analysis we mainly focused our attention on circular orbits of the particle. One of the most important orbits from the observational point of view is innermost stable circular orbit (ISCO). In below given Fig. 7 the ISCO of the spinning particle in the γ spacetime for the different values of the deformation parameter is given.

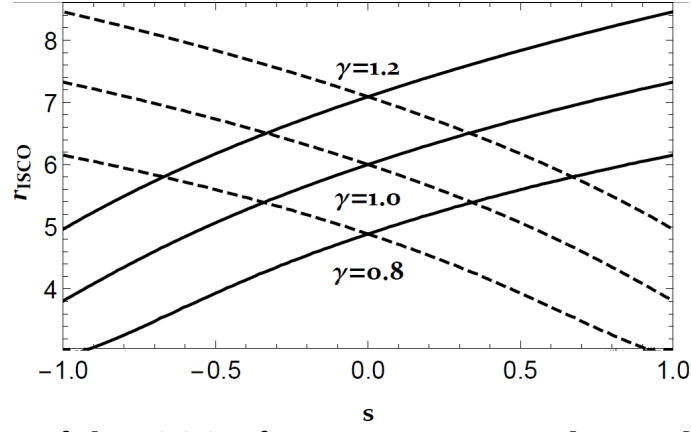


Fig. 7. Dependence of the ISCO of spinning test particles on the equatorial plane of the γ -metric on the particle's spin for different values of γ . From upper to lower crossed lines correspond to the cases of $\gamma=1.2$, $\gamma=1.0$ (Schwarzschild), and $\gamma=0.8$, respectively. Dashed and solid lines represent $L_{ISCO} > 0$ and $L_{ISCO} < 0$ cases, respectively.

Depending on the signs of the spin s and angular momentum L of the test particles, since the value of the ISCO depends on $s_0 L_0$, one can see from Fig. 9 that for fixed values of s and L , we have $r_{ISCO|s_0 L_0 < 0} > r_{ISCO|s_0 L_0 > 0}$.

Furthermore, in the second half of this chapter, we applied the formalism for the spinning particles motion in the static spacetimes that include a parameter that are arisen from the dark energy. Two of such spacetimes are the Schwarzschild de-Sitter (SdS) one that includes the cosmological constant, Λ , and the Schwarzschild in quintessence (Sq) spacetime that include the quintessence parameter, c . By using the beforementioned equations, we obtained the equations of motion of the spinning particle in the non-asymptotically flat spacetimes and studied circular orbits of the spinning particle. Interestingly, as the spacetimes are asymptotically non-flat, there exists so-called static radius limit (r_{st}) where the gravitational attraction of central mass is just balanced by the cosmic repulsion, defining thus a natural boundary of gravitationally bound systems in an expanding universe and the circular orbits can exist below the static radius ($r < r_{st}$) only. Then, we focused our attention on one of the most astrophysically relevant orbits, the marginally stable circular orbits. In this case also, unlike in the case of the asymptotically flat spacetimes, the stable circular orbits are bounded not only by the inner radius, called ISCO, but due to the repulsive behaviour of the dark energy they are bounded by the outer radius also, called outermost stable circular orbit (OSCO). For their behaviours, see Fig. 8.

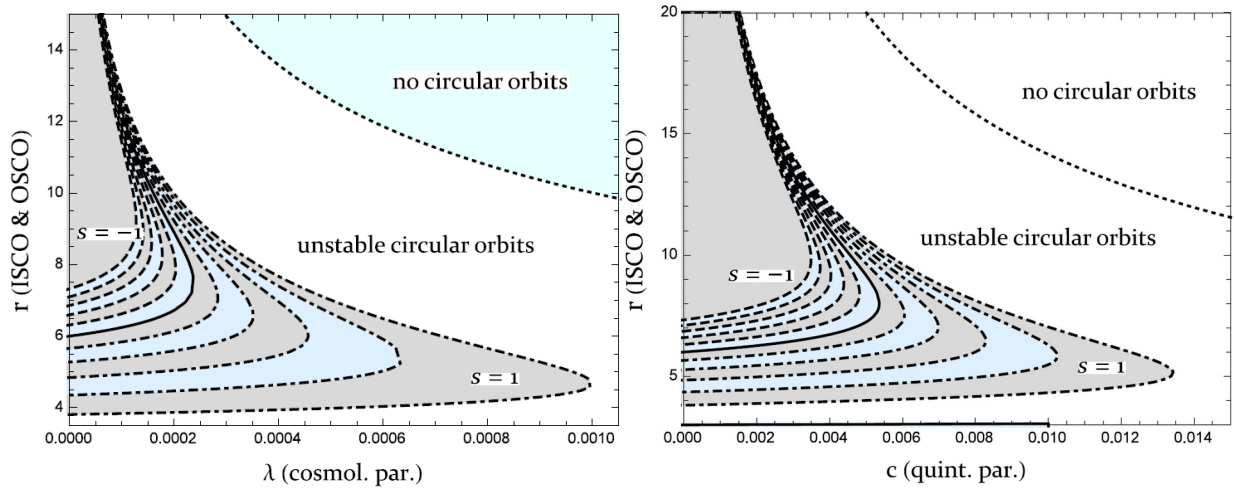


Fig. 8. Radii of marginally stable circular orbits of spinning particle in the SdS (left panel) and Sq (right panel) spacetimes as a function of the cosmological parameter $\lambda = \Lambda M^2/3$ and quintessence parameter c for different values of the spin. For a given values the lower (upper) part of the curve determines the ISCO (OSCO). The dotted curve represents the static radius. The shaded regions correspond to regions where stable circular orbits can exist, while in the white region between OSCO and the static radius circular orbits exist but are unstable. Beyond the static radius, circular orbits cannot exist.

Since the most astrophysical observed objects possess their own angular momenta (spin) and observations have confirmed the significant effect of the dark energy into the expansion of the universe, above mentioned study was very important. Now, let us apply our calculations for the millisecond pulsar moving around the Sgr A* supermassive black hole with mass $M \approx 10^6 M_\odot$ in the center of our galaxy. By taking into account $\Lambda = 10^{-46} \text{ km}^{-2}$, mass of the millisecond pulsar $M = 1.2 M_\odot$ with dimensionless spin parameter $s \approx 0.45$, the ISCO is located at $r_{\text{ISCO}} \approx 10^7 \text{ km}$ and the OSCO is located at $r_{\text{OSCO}} \approx 10^{17} \text{ km} = 10^4 \text{ parsec}$ that is at the same order of the galaxy.

CONCLUSION

Below we highlight the main results of the dissertation work.

1. We presented complete generic electrically and magnetically charged black hole solutions in GR coupled to the NED that not only generalizes well-known Hayward and Bardeen regular black hole solutions and extends them to higher orders, but also it includes one more very interesting solution that corresponds to the Maxwell one in the weak electromagnetic field regime.
2. It has been shown that if the spacetime being solution of GR coupled to the electrodynamics is charged, one cannot distinguish its type of charge (magnetic or electric) through the motion of light ray around it.
3. We have shown that the QNMs spectra of electromagnetic perturbations of the electrically and magnetically charged black holes in the NED are not isospectral, contrary to the case of the standard Reissner-Nordström black holes in the linear electrodynamics.
4. It has been shown that the electromagnetic perturbations can be a powerful tool to confirm the phenomenon that in the NED light ray does not follow the null geodesics of the spacetime. Moreover, it also has been shown that QNMs spectra of the odd-parity electromagnetic perturbations of magnetically (electrically) charged black hole and even-parity electromagnetic perturbations of the electrically (magnetically) charged black hole are isospectral.
5. We have shown that the black holes of GR coupled to NED have never vanishing circular photon orbits and on account of this fact, these spacetimes always oscillate the electromagnetic perturbations with QN frequencies.
6. We have shown that for small values of the multipole number, the polytropic star is unstable. The extremely extended trapping polytropes with $N \geq 3.75$, and the resulting central black hole representing maximally 10^{-3} or even for some close to critical values of (N, σ) , 10^{-5} of the total mass of system, in agreement with observation of the supermassive black hole in the active galactic nuclei: a typical supermassive black hole with gravitational mass $M_{BH} = 10^7 M_{\odot}$ can be related to a galaxy halo of mass $M_{Halo} = 10^{12} M_{\odot}$ - similar to the Milky Way galaxy halo. Or the supermassive black hole with mass $M_{BH} = 10^9 M_{\odot}$ that is located at the center of the galaxy M87 with mass $M_{Halo} = 10^{12} M_{\odot}$.
7. We have demonstrated the results of study of the spinning particle's motion around axially symmetric, static compact objects with inclusion the effects of deformation and dark energy, separately. By applying our equations for the millisecond pulsar moving around the Sgr A*, we have shown that the ISCO is located at $r_{ISCO} = 10^7$ km and the OSCO is located at $r_{OSCO} = 10^{17}$ km = 10^4 parsec that is at similar order of the galaxy.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ТОШМАТОВ БОБИР АБДУМАНОНОВИЧ

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ, СКАЛЯРНЫХ,
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ЧАСТИЦ ВОКРУГ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

01.03.01 – Астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ (DSc)
ДОКТОРА ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора (DSc) физико-математических наук зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2019.4.DSc/FM149.

Диссертация выполнена в Астрономическом институте Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, английский, русский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.astrin.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:

Ахмедов Бобомурат Жураевич
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ирина Дымникова Гавриловна
доктор физико-математических наук, профессор

Кирилл Бронников Александрович
доктор физико-математических наук, профессор

Нуритдинов Салохитдин Насритдинович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Институт физики в Опаве, Силезский Университете
Чешская Республика

Защита диссертации состоится «___» _____ 2022 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 при Астрономическом институте. Адрес: 100052, г. Ташкент, Астрономическая 33, АИ. Тел.: (+998) 71-235-81-02; факс: (+998) 71-234-48-67; e-mail: info@astrin.uz.

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Астрономического института (регистрационный номер ____). С диссертацией можно ознакомиться в Библиотеке АИ АН РУз. Адрес: 100052, г. Ташкент, Астрономическая 33, АИ. Тел.: (+998) 71-235-81-02.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2022 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2022 г.).

Ш.А. Эгамбердиев
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор, академик АН РУз

И.А. Ибрагимов
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

А.Б. Абдикамалов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н.

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация к диссертации доктора наук (DSc))

Целью исследования является детальное описание квазинормальных мод (КНМ) поведения широкого класса астрофизических черных дыр (ЧД), в частности, в НЭД, переходящие в ЧД Райсснера-Нордстрема в приближении линейного электромагнитного поля, а также применение полученных решений к описанию ряда наблюдаемых явлений, таких как частота гравитационных волн и времена их затухания, характеристики сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в центре конкретных галактик, движение частиц со спином в окрестности ЧД и т.д.

Задачи исследования:

Получение новых регулярных и сингулярных решений для ЧД в рамках ОТО в сочетании с НЭД;

исследование возможности различения типа заряда ЧД по движению фотонов в ее ближайшей окрестности;

изучение скалярных, электромагнитных и гравитационных возмущений пространства-времени ЧД и вычисление их характерных частот колебаний;

оценка верхнего и нижнего диапазонов времени релаксации возмущений заряженных ЧД и применение их для галактических СМЧД;

разработка модели политропной сферы, объясняющей возможное образование СМЧД в центре Галактики;

исследовать влияние спина частицы на ее движение в поле различных (деформированных, сферически-симметричных, в частности, включающих темную энергию) ЧД.

Объектом исследования являются процессы эволюции скалярного, электромагнитного и гравитационного полей в окрестности регулярных ЧД в НЭД (кандидатов Стрелец А*, М87) и движение миллисекундного пульсара.

Предметом исследования являются спектр КН осциллирующих скалярного, электромагнитного и гравитационного полей, который дает частоту осцилляций и скорость затухания КНМ ЧД в астрофизических условиях в режиме сильной гравитации, а также связанные с ними наблюдательные гравитационно-волновые данные.

Методы исследования. Методы математической физики для нахождения аналитических, полуаналитических или полностью численных решений сильно нелинейных дифференциальных уравнений. Исследованы решения двумерных волновых уравнений типа Шредингера с комплексными собственными значениями для возмущенных состояний пространства-времени ЧД. Для нахождения собственных значений использован метод непрерывных дробей ВКБ, Ливера и Фробениуса, а для нахождения формы волны используется метод дискретизации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- впервые получены решения уравнений Максвелла для электрически и магнитно заряженных регулярных ЧД Хайворда и Бардина в ОТО в сочетании с НЭД, имеющие правильные предельные значения;

- впервые показано на основе анализа электромагнитных возмущений ЧД в НЭД, что не только луч света, но и электромагнитные волны во всем спектре не следуют по нулевым геодезическим пространства-времени в НЭД;

- впервые показано, что ЧД в ОТО в сочетании с НЭД имеют никогда не исчезающие световые кольца;

- впервые показано, что для сильно заряженных ЧД в НЭД электромагнитные возмущения колеблются с очень малой скоростью затухания или даже без нее;

- впервые показано, что спектры КНМ аксиальных и полярных ЭМ возмущений магнитно (электрически) заряженных ЧД в ОТО связанные с НЭД являются неизоспектральными;

- впервые разработан формализм, приводящий путем решения уравнений Эйнштейна для политропного уравнения состояния при небольшом возмущении пространства-времени к формированию СМЧД в центре галактики;

- впервые рассчитан эффект влияния спина частицы на ее движение вокруг ЧД с деформацией и темной энергией.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: получены новые аналитические решения для регулярных ЧД в ОТО, связанные с НЭД.

показано, что при движении светового луча вокруг заряженной ЧД невозможно различить тип заряда, которым обладает ЧД. Они могут быть полезны для коллаборации Event Horizon Telescope (ЕНТ) для оценки параметров двух кандидатов в ЧД, М87 и Стрелец А *, если эти ЧД являются заряженными.

доказано, что ЧД в НЭД всегда имеет неисчезающее световое кольцо, и этот факт также может быть использован для выделения типа ЧД из астрономических наблюдений в ближайшем будущем.

Электромагнитные возмущения сильно заряженных ЧД в ОТО в сочетании с НЭД затухают медленно или никогда не затухают в виде электромагнитных волн. Если такой сигнал будет обнаружен при наблюдении, из него легко извлечь информацию.

Проблема образования СМЧД в центре галактики до сих пор не решена, и разработанная политропная модель может являться одним из подходов для решения этой проблемы.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования определяется способностью разработанного в диссертации формализма анализировать временную эволюцию электромагнитных, гравитационных, скалярных полей и возмущений астрофизических ЧД и механизмы извлечения информации из наблюдений гравитационных волн от астрофизических ЧД с целью получения данных об их различных параметрах и свойствах. Кроме того, будущие наблюдения гравитационных волн от слияния ЧД и нейтронных звезд могут обеспечить наблюдательные ограничения на наличие

электрического и магнитного зарядов ЧД, играющих решающую роль в физических процессах вокруг ЧД.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что их можно использовать для получения значений параметров альтернативных теорий гравитации в режиме сильного поля и гравитационных компактных объектов, образующихся в результате слияния ЧД и нейтронных звезд. Результаты могут быть полезны для анализа частоты и времени затухания гравитационных волн, при разработке наблюдательных тестов, критериев обнаружения и идентификации различных типов компактных ЧД. Использование разработанных в работе методов анализа эволюции полей во времени позволяет быстро и с хорошей точностью получить КНМ широкого класса ЧД, не прибегая к громоздким численным методам. Полученные в диссертации характеристические спектры гравитационных возмущений в окрестности ЧД могут быть полезны при анализе экспериментов по обнаружению гравитационного излучения от ЧД.

Внедрение результатов исследования. Результаты, связанные с полученными новыми решениями для ЧД в ОТО в сочетании с НЭД и их возмущениями, а также модель формирования СМЧД в центре галактики, были использованы в проектах Силезского университета № SGS/12/2019, No. SGS/14/2016, Центр гравитации и астрофизики имени Альберта Эйнштейна в рамках проекта Чешского научного фонда № 14-37086G и проекта Чешского научного фонда GAČR № 19-03950S (письмо Института физики, г. 2021). Эти результаты также использованы несколькими зарубежными исследователями при изучении различных явлений, связанных с СМЧД, находящимися в активных ядрах галактик (цитированы в престижных журналах, таких как *Nature Astronomy*, 2017; *Journal of High Energy Astrophysics*, 2018; *Living Reviews in Relativity*, 2019; *Physical Review D*, 2019; *Physics Letters B*, 2019; и т.д.).

Результаты исследований динамики частиц, обладающих собственным угловым моментом, вокруг астрофизических компактных объектов с различными свойствами, включая деформацию и темную энергию, были использованы в рамках целевой программы Министерства образования Республики Казахстан: «Центр передового опыта в области фундаментальной и прикладной физики », IRN: BR05236454 и Конкурсные исследовательские гранты на развитие факультета Назарбаев университета № 090118FD534, № 090118FD5348 (письмо Назарбаев университета). Они также использованы зарубежными исследователями (цитируются в реферируемых научных журналах *Physical Review D*, 2018; *European Physical Journal C*, 2019; *Galaxy*, 2020; *Universe*, 2020 и т.д.) для изучения орбит частиц и их аккреции вокруг ЧД в различных теориях гравитации.

Исследования гравитационного коллапса сферы из однородной пыли в ЧД в гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне использованы в рамках программ, поддерживаемых проектами Индийского межуниверситетского комитета по грантам (письмо Индийского межуниверситетского центра астрономии и

астрофизики от 28 января 2021 г.), а также зарубежными исследователями (цитируются в реферируемых научных журналах, как Journal of High Energy Physics, 2020; Physics Letters B, 2020; Physics of the Dark Universe, 2020; European Physical Journal C, 2020; и т. д.) для изучения физических свойств ЧД в теории Эйнштейна-Гаусса-Бонне.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 33 научные работы, в том числе 19 научных статей в международных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем составляет 224 страниц.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
LIST OF PUBLISHED WORKS
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Toshmatov B.. Circular orbits of particles around parameterized black hole // The Physics of the Dark Universe. – Elsevier (Netherlands), 2022. – Vol. 35. – id. 100992. – 8pp. (№ 3. Scopus: IF=4.473).
2. Toshmatov B., Mamadjanov A.. Quasinormal modes of an acoustic black hole // The European Physical Journal C. – Springer (Germany), 2022. – submitted. – 10pp. (№ 3. Scopus: IF=4.389).
3. Toshmatov B. and Abdukarimov A. Frequency shift of photon radiated from accretion disc of acoustic black hole // Annals of Physics. – ELSEVIER (Netherlands), 2022. – Vol. 440, – id. 168845 – 11pp. (№ 3. Scopus: IF=2.73).
4. Toshmatov B., Rahimov O., Ahmedov B. Circular orbits of particles around black hole with global monopole // Arabian Journal of Physics. – Springer (Germany), 2022. – in press – 10pp. (№ 1. Web of Science: IF=1.29).
5. Toshmatov B., Rahimov O., Ahmedov B., Ahmedov A.. Capture of massless and massive particles by parameterized black holes // Galaxies. – MDPI (Switzerland), 2021. – Vol. 9, – id. 65. – 10pp. (№ 1. Web of Science: IF=3.171).
6. Ahmedov B., Rahimov O., Toshmatov B.. Gravitational capture cross-section of particles by Schwarzschild-Tangherlini black holes // Universe. – MDPI (Switzerland), 2021. – Vol. 7, – id. 307. – 13pp. (№ 1. Web of Science: IF=3.763).
7. Toshmatov B., Ahmedov B., Malafarina D.. Can a light ray distinguish charge of a black hole in nonlinear electrodynamics? // Physical Review D. – American Physical Society (USA), 2021. – Vol. 103, – id. 024026. – 6pp. (№ 1. Web of Science: IF=4.833).
8. Malafarina D., Toshmatov B., Dadhich N.. Dust collapse in 4D Einstein-Gauss-Bonnet gravity // The Physics of the Dark Universe. – ELSEVIER (Netherlands), 2020. – Vol. 30. – id. 100598. – 5pp. (№ 3. Scopus: IF=4.473).
9. Toshmatov B., Rahimov O., Ahmedov B., Malafarina D.. Motion of spinning particles in non-asymptotically flat spacetimes // The European Physical Journal C. – Springer (Germany), 2020. – Vol. 80. – id. 675. – 11pp. (№ 3. Scopus: IF=4.389).
10. Toshmatov B., Malafarina D.. Spinning test particles in the γ spacetime // Physical Review D. – American Physical Society (USA), 2019. – Vol. 100, – id. 104052. – 11pp. (№ 1. Web of Science: IF=4.833).
11. Turimov B., Toshmatov B., Ahmedov B., Stuchlik Z.. Quasinormal modes of magnetized black hole // Physical Review D. – American Physical Society (USA), 2019. – Vol. 100. – id. 084038. – 8pp. (№ 1. Web of Science: IF=4.833).

- Science: IF=4.833).
12. Toshmatov B., Malafarina D., Dadhich N.. Harmonic oscillations of neutral particles in the γ -metric // *Physical Review D. – American Physical Society (USA)*, 2019. – Vol. 100. – id. 044001. – 11pp. (№ 1. Web of Science: IF=4.833).
 13. Toshmatov B., Stuchlik Z., Ahmedov B., Malafarina D.. Relaxations of perturbations of spacetimes in general relativity coupled to nonlinear electrodynamics // *Physical Review D. – American Physical Society (USA)*, 2019. – Vol. 99. – id. 064043. – 9pp. (№ 1. Web of Science: IF=4.833).
 14. Toshmatov B., Stuchlik Z., Ahmedov A.. Electromagnetic perturbations of black holes in general relativity coupled to nonlinear electrodynamics: Polar perturbations // *Physical Review D. – American Physical Society (USA)*, 2018. – Vol. 98. – id. 085021. – 11pp. (№ 1. Web of Science: IF=4.833).
 15. Stuchlik Z., Schee J., Toshmatov B., Hladik J., Novotny J.. Gravitational instability of polytropic spheres containing region of trapped null geodesics: a possible explanation of central supermassive black holes in galactic halos // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics – IOP Publishing (Great Britain)*, 2017. – Vol. 06. – id. 056. – 27pp. (№ 1. Web of Science: IF=5.210).
 16. Toshmatov B., Abdujabbarov A., Ahmedov B., Stuchlik Z.. Motion and high energy collision of magnetized particles around a Hořava-Lifshitz black hole // *Astrophysics and Space Science – Springer (Germany)*, 2015. – Vol. 360. – id. 19. – 10pp. (№ 3. Scopus: IF=1.430).
 17. Toshmatov B., Stuchlik Z., Ahmedov B.. Comments on “Casimir effect in the Kerr spacetime with quintessence” // *Modern Physics Letters A. – World Scientific (Singapore)*, 2017. – Vol. 32. – id. 1775001. – 6pp. (№ 1. Web of Science: IF=1.370).
 18. Toshmatov B., Bambi C., Ahmedov B., Abdujabbarov A., Stuchlik Z.. Energy conditions of non-singular black hole spacetimes in conformal gravity // *The European Physical Journal C. – Springer (Germany)*, 2017. – Vol. 77. – id. 542. – 10pp. (№ 3. Scopus: IF=4.389).
 19. Toshmatov B., Stuchlik Z., Ahmedov B.. Comment on “Construction of regular black holes in general relativity” // *Physical Review D. – American Physical Society (USA)*, 2018. – Vol. 98. – id. 028501. – 3pp. (№ 1. Web of Science: IF=4.833).

II бўлим (Часть II; Part II)

20. Toshmatov B., Tojiev S., Xomidjonov J.. Construction of Taub-NUT black hole solutions in general relativity coupled to nonlinear electrodynamics // *RAGtime 20-22: Workshop on Black Holes and Neutron Stars on 19-23 October, 2020. – Opava (Czech Republic), 2020. – Vol. 22. – pp. 327-336.*
21. Turimov B., Toshmatov B., Stuchlik Z.. On magnetized orbits around Schwarzschild black hole // *RAGtime 20-22: Workshop on Black Holes and*

- Neutron Stars on 19-23 October, 2020. – Opava (Czech Republic), 2020. – Vol. 22. – pp. 337-343.
- 22.Demyanova A.D., Toshmatov B.. Вращение тестовых частиц в γ -пространстве-времени // Фан ва таълимни ривожлантиришда ёшларнинг ўрни мавзусидаги Республика илмий ва илмий-техник анжумани, October 30, 2020. –Tashkent (Uzbekistan), 2020. – pp. 25-26.
 - 23.Kurbonov N., Toshmatov B.. Коллапс пыли в 4d гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне // Фан ва таълимни ривожлантиришда ёшларнинг ўрни мавзусидаги Республика илмий ва илмий-техник анжумани, October 30, 2020. –Tashkent (Uzbekistan), 2020. – pp. 41-43.
 - 24.Demyanova A.D., Toshmatov B.. Круговые орбиты вращающейся частицы в деформированном пространстве // Фан ва таълимни ривожлантиришда ёшларнинг ўрни мавзусидаги Республика илмий ва илмий-техник анжумани, October 30, 2020. –Tashkent (Uzbekistan), 2020. – pp. 26-27.
 - 25.Toshmatov B., Mamadjanov A.I.. Energy extraction from d-dimensional black hole // Известия – Национальной Академии Наук Республики Казахстан // 2014. – Vol. 2 (294). – pp.53-56.
 - 26.Toshmatov B., Stuchlik Z., Ahmedov B.. Note on the character of the generic rotating charged regular black holes in general relativity coupled to nonlinear electrodynamics // RAGtime 17-19: Workshop on Black Holes and Neutron Stars on December 2017. – Opava (Czech Republic), 2017. – Vol. 19. - 5pp. eprint: 1712.04763.
 - 27.Ahmedov B., Toshmatov B.. Scalar and electromagnetic perturbations of nonsingular nonrotating black holes in conformal gravity // 42nd COSPAR Scientific Assembly on 14-22 July, 2018. - Pasadena, California (USA), 2018. - Vol. 42. – pp. E1.15-29-18.
 - 28.Toshmatov B.. Collision of a magnetized particle with charged one around Horava-Lifshitz black hole // Workshop: UzR AS «Ёш олимлар конференцияси–2013» on 17-18 November, 2013. – Tashkent (Uzbekistan).
 - 29.Toshmatov B.. Energy extraction from d-dimensional black hole // Workshop: “Современные проблемы физики и новых технологий” посвященную 70-летию академика НАН РК, доктора физико-математических наук, профессора Такибаева Н.Ж., 21- 22 февраля, 2014. – Алматы (Казахстан).
 - 30.Toshmatov B., Atamurotov F.. Image of rotating Kerr-like black hole // Workshop: “Актуальные проблемы современной физики”, посвященную 75-летию академика НАН РК, доктора физико-математических наук, профессора Абдилдина М.М., 15- 16 марта, 2013. – Алматы (Казахстан).
 - 31.Toshmatov B., Rayimbayev J.. Spin-down of rotating compact magnetized stars // Workshop: “Актуальные проблемы современной физики”, посвященную 75-летию академика НАН РК, доктора физико-

математических наук, профессора Абдилдина М.М., 15- 16 марта, 2013. – Алматы (Казахстан).

32. Toshmatov B., Fayzullayev D., Mamadjanov A.. Particle motion and collision around rotating regular black hole // Workshop: “Актуальные проблемы современной физики”, посвященную 75-летию академика НАН РК, доктора физико-математических наук, профессора Абдилдина М.М., 15- 16 марта, 2013. – Алматы (Казахстан).
33. Toshmatov B.. Electromagnetic perturbations of black holes in general relativity coupled to nonlinear electrodynamics // Workshop: X Black Holes on 18-19 December, 2017. – Aveiro (Portugal), <http://gravitation.web.ua.pt/bhw10/index2a62.html?q=node/3>

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, унинг ўзбек, рус тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (04.07.2019 йил).