

**АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР  
БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ**

**РАХИМОВ ОЗОДБЕК ҒУЛОМОВИЧНИНГ**

**УМУМИЙ НИСБИЙЛИК НАЗАРИЯСИДА БУРЧАК МОМЕНТИГА  
ЭГА БЎЛГАН ЗАРЯДЛИ ВА МАГНИТЛАНГАН ЗАРРАЛАРНИНГ  
ҲАРАКАТИ**

**01.03.01-Астрономия**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ  
(PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент - 2021**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси**

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

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по  
физико-математическим наукам**

**Рахимов Озодбек Гуломович**

Умумий нисбийлик назариясида бурчак моментига эга бўлган зарядли ва магнитланган зарраларнинг ҳаракати.....

3

**Рахимов Озодбек Гуломович**

Движение заряженных и намагниченных частиц с угловым моментом в общей теории относительности.....

19

**Rakhimov Ozodbek Gulomovich**

Motion of charged and magnetized particles with angular momentum in general theory of relativity.....

34

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

List of published works

Список опубликованных работ.....

работ.....

38

**АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР  
БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ**

**РАХИМОВ ОЗОДБЕК ҒУЛОМОВИЧ**

**УМУМИЙ НИСБИЙЛИК НАЗАРИЯСИДА БУРЧАК МОМЕНТИГА  
ЭГА БЎЛГАН ЗАРЯДЛИ ВА МАГНИТЛАНГАН ЗАРРАЛАРНИНГ  
ҲАРАКАТИ**

**01.03.01-Астрономия**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ  
(PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2021

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2018.2.PhD/FM240 рақами билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Астрономия институти институтида бажарилган.

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

**Илмий раҳбар:** **Ахмедов Бобомурат Жўраевич,**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Нуритдинов Салохитдин Насритдинович,**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Муждабаев Исмет Шевкетович**  
физика-математика фанлари номзоди, доцент

**Етақчи ташкилот:** **Ал-Фаробий номидаги Қозоғистон Миллий Университети,**  
**Олмаота, Қозоғистон**

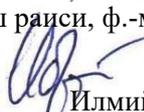
Диссертация ҳимояси Астрономия институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил 21 май соат 11<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100052 Тошкент шаҳри, Астрономия кўчаси, 33-уй, Астрономия институти. Тел. (+998 71) 235-81-02; факс (+998 71) 234-48-67; e-mail: [info@astrin.uz](mailto:info@astrin.uz)).

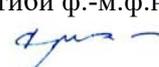
Диссертация билан Астрономия институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (№ 01-21 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100052 Тошкент шаҳри, Астрономия кўчаси, 33-уй, Астрономия институти. Тел. (+998 71) 235-81-02.

Диссертация автореферати 2021 йил « 28 » апрель куни тарқатилди.  
(2021 йил “ 28 ” апрелдаги №1- 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

  
**С.П. Ильясов**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Ҳозирги кунда дунёда илғор илмий марказлар томонидан актив ядроли галактикаларнинг марказларини тадқиқ қилиш ва қора туйнукларни аниқлаш асосий вазифага айланиб улгурди. Галактикалар марказини кузатишда эса, айнан марказдаги қора туйнук атрофида содир бўлаётган ҳодисаларни кузатиш ва тадқиқ этиш ҳал қилувчи аҳамиятга эгадир. Айниқса, улкан галактикалар марказидаги массив қора туйнукларни тадқиқ этиш орқали олимлар қора туйнук атрофидаги турли энергетик, иссиқлик, рентген ва радио нурланиш каби жараёнларни ўрганмоқдалар. Бу каби зарраларни кузатиш учун улкан ишлар амалга оширилаётган бўлсада, уларни кузатишнинг имкони бўлганича йўқ. Шунинг учун, массив ва ўтамассив объектлар атрофида магнитланган ва зарядли зарраларнинг ҳаракатини тадқиқ этиш астрофизиканинг энг асосий масалаларидан биридир.

Ушбу диссертация ишида тадқиқ этилган магнит момент эффектларидан дунёнинг етакчи обсерваториялари ва илмий марказларида кузатилаётган объектлардан олинган сигналларни спектрал таҳлил этишда фойдаланилган. Жумладан, бунга мисол қилиб, 2019 йилда галактикамиз марказидаги, массаси 4,3 миллион Қуёш массасига тенг бўлган Sogitarius A\* қора туйнугидан тахминан бир ярим ёруғлик йили масофадаги магнитарнинг ҳаракати кузатилганлигини келтириш мумкин. Кузатиш натижаларига мисол сифатида яна қуйидагиларни келтириш мумкин: 2019 йилда Воқеалар горизонти телескопи биринчи марта M87 қора туйнугининг тасвирини олди; 2018 йили IceCube нейтрино обсерваториясида блазардан чиқаётган юқори энергияли нейтринолар кузатилди. Айниқса, қора туйнук тасвирининг таҳлиллари шуни кўрсатмоқдаки, бу ерда айнан зарраларнинг ҳаракатини ўрганиш орқали ушбу қора туйнук тасвирини кузатиш имкониятига эга бўлди. Кўплаб кашфиётлар бўлганлигига қарамасдан, магнит момент эффектларининг кучли магнит майдонларида пайдо бўлиш механизмлари тўлиқ ўрганилган эмас. Юқорида келтирилган мисоллардан шу нарсани айтиш мумкинки, магнитланган ва зарядли зарраларнинг ҳаракатини тадқиқ этиш мавзуси замонавий астрофизикада муҳим аҳамиятга эга экан.

Мамлакатимизда релятивистик астрофизика соҳасида экспериментал ва назарий ишлар олиб боришга катта эътибор қаратилмоқда, шунингдек, жаҳон миқёсидаги фундаментал тадқиқотларни олиб боришга ҳам. Республикамиз Президенти томонидан илгари сурилган 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясида<sup>1</sup> мамлакатимизда илм-фаннинг юксалиши, фундаментал тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари ва уларнинг натижаларини ҳаётга татбиқ қилиш йўллари кўрсатиб берилган. Буни исботи ўлароқ, шуни айтиб

---

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги № ПФ-4947 сонли Фармони «2017—2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси».

Ўтиш мумкинки, охирги йилларда релятивистик астрофизикада компакт объектлар атрофида магнитланган ва зарядланган зарраларнинг ҳаракати, уларнинг қора туйнук томонидан тутиб қолиниши, зарраларнинг физик хусусиятлари, компакт объектлар атрофидаги ташқи магнит майдон ва уларнинг табиати чуқур ўрганилди. Қора туйнукларни кузатишда қанчалик улкан ишлар бажарилганлигига қарамасдан, бу борадаги айрим масалаларга ҳали жавоб топилганча йўқ.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПҚ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармонида, 2018 йил 29 ноябрда Ўзбекистон Республикаси Ҳукумати томонидан чоп этилган “2019-2021 йилларда Ўзбекистонда тузилмали ислохотларнинг асосий йўналишларининг йўл харитаси”да ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъерий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.**

Зарраларнинг магнит хусусиятлари, шу жумладан, ташқи магнит майдон билан, қора туйнукнинг айланиш параметри билан, бран заряди ва ҳусусий бурчак моменти билан таъсири кўплаб олимлар томонидан ўрганилган бўлиб, уларга италиялик (F. de Felice, Ф.Sorge, A. Vecchiato, G.Preti, С. Bambi, R.Luciano, M.Daniele)ларни, россиялик (О. Цупко, А. Захаров, В. Фролов, И. Новиков)ларни, голландиялик (J. van Holten, Н. Falcke), чилилик (S.Nojman, F.Asenjo)ларни, германиялик (С.Laemmerzahl, J.Kunz)ларни, англиялик (G.Gibbons, R.Rietdijk<sup>2</sup>)ларни, америкалик (J. Bardeen), аргентиналик (L. Amarilla, E. Eiroa)ларни, чехиялик (Z. Stuchlik, J. Schee)ларни ва ҳиндистонлик (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil)лар ва бошқаларни келтириб ўтишимиз мумкин. Аммо, магнит моментининг қора туйнук атрофидаги бран параметр ва ташқи магнит майдони билан ўзаро таъсири, қора туйнук атрофида ҳаракатланаётган магнитланган зарра сифатида қаралаётган пульсарлар каби кокрет объектлар учун батафсил ўрганилмаган.

Республикада умумнисбийлик назариясида қора туйнуклар атрофидаги вақт-фазо хусусиятлари ва уларнинг электродинамикаси Б.Ж.Ахмедов, А.А.Абдужаббаров, Б.А.Тошматов ва С.Р.Шайматовлар томонидан, галактикалараро муҳит ва актив ядроли галактикалар эса С.Н.Нуритдинов, Т.А.Ахунов ва К.Т.Миртаджиевалар томонидан тадқиқ этилган.

Қора туйнукларнинг кўплаб хусусиятлари тадқиқ қилинган бўлсада, айнан улар атрофида пайдо бўладиган кучли магнит майдонларининг пайдо бўлиш механизмлари, аккреция дискида ёки унга яқин масофаларда

ҳаракатланиши мумкин бўлган юлдузсимон объектларнинг орбиталари ва хусусиятлари, ўта массив қора туйнук атрофидаги магнит майдонида ҳаракатланаётган пульсар ёки магнитларнинг магнит майдон билан таъсирлашуви тўлиқ ўрганилмаган. Бундан ташқари ўта массив қора туйнук атрофида ҳаракатланаётган пульсар магнит моментининг унинг орбиталарига таъсири ҳисобга олинмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Астрономия институти илмий-тадқиқотлар режасининг №ФЕ2-ФА-Ф113 “Релятивистик астрофизика ва космологияда гравитацион ва электромагнит жараёнлар, қуйи ҳароратлардаги бозонлар тизимлари”, №ЕФ2-ФА-О-25046 “Гравитацион компакт объектлар яқинидаги айланишга эга зарралар ҳаракати ва электромагнит тўлқинларнинг тарқалиши”, №ВА-ФА-Ф2-008 “Турғун ва динамик релятивистик гравитацион объектларда астрофизик жараёнлар”, №MRB – AN – 2019 – 29 “РТ-70 телескопи ва россиянинг Гамма-400 орбитал телескопи параметрлари учун компакт астрофизик объектларни моделлаштириш ва уларнинг кузатув ҳоссаларини ҳисоблаш” илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** ўта кучли гравитацион майдонлардаги магнитланган зарраларнинг ҳаракатини тадқиқ этиш, ички айланма барқарор орбиталарнинг бран параметр ва магнит моментига боғлиқ аналитик ечимларини олиш, қора туйнук майдонида магнитланган зарраларнинг камраб олинишининг эффектив кесим юзасини ҳисоблашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

ташқи магнит майдонида жойлашган қора туйнуклар атрофида мавжуд бўлган ички айланма барқарор орбиталарда магнитланган зарраларнинг эффектларини ўрганиш;

бран моделида ташқи магнит майдонидаги қора туйнук атрофида магнитланган зарраларнинг ҳаракат тенгламасининг аниқ аналитик ечимларини олиш;

магнитланган зарраларнинг қора туйнук томонидан камраб олинишини тадқиқ этиш;

бранда жойлашган айланмайдиган қора туйнук атрофида ҳаракатланувчи синов зарраларнинг барқарор айланма орбиталари учун бран параметрига боғлиқ бўлган аналитик ечимларни олиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида магнитланган зарралар, релятивистик компакт гравитацион объектлар – юлдузсимон ва ўта массив қора туйнуклар танланган.

**Тадқиқотнинг предмети** сифатида қора туйнук атрофида ҳаракатланаётган магнитланган зарраларнинг ички барқарор стабил орбиталари, зарраларнинг қора туйнук томонидан камраб олинишининг кесим юзаси, заррачанинг магнит momenti, бран параметрининг барқарор айланма орбиталар соҳасига таъсири ва эффектлари қаралган.

**Тадқиқотнинг усуллари** сифатида умумий нисбийлик назариясида ўта кучли гравитацион майдонда вақт-фазони ифодаловчи Эйнштейн тенгламаси ечимларидан, компакт объектлар атрофидаги магнит майдонни тавсифловчи Максвелл тенгламалари ечимларидан ва ҳаракат тенгламасини топиш учун Гамильтон-Якоби формализмидан фойдаланилган. Бундан ташқари, зарралар ҳаракати ва майдонлар учун дифференциал тенгламаларнинг аналитик ва сонли ҳисоблаш усулларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

илк бора қора туйнук томонидан магнитланган зарраларни қамраб олиниши эффектив кесим юзасининг магнит моментга боғлиқлиги ва улар учун аналитик ифодалар топилган;

илк бора бран моделида айланмайдиган қора туйнук атрофидаги магнитланган зарралар учун барқарор айланма орбиталар мавжуд бўлган соҳанинг кенглиги ҳисоблаб чиқилган;

заррачанинг магнит моменти мавжудлиги унинг қора туйнук томонидан гравитацион қамраб олиниш эффектив кесими юзасининг кичрайишига олиб келиши аниқланган;

заррачаларнинг ҳусусий ва радиал йўналишлари орасидаги бурчакнинг критик қиймати унинг магнит моментига боғлиқ равишда камайиши аниқланган;

илк бора бран моделида қора туйнук атрофида ҳаракатланувчи магнитланган зарраларнинг барқарор айланма орбита радиуслари учун аниқ аналитик ечимлар топилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

илк бора ташқи магнит майдонида жойлашган қора туйнук атрофидаги магнитланган заррача траекториясининг шакли ва барқарор айланма орбиталарининг радиуслари магнит параметрга боғлиқлиги аниқланган;

ташқи магнит майдонида жойлашган қора туйнук атрофидаги магнитланган заррачанинг бурчак моменти ва энергиясининг магнит параметрга боғлиқлиги олинган;

бран дунёси моделида қора туйнук томонидан қамраб олинувчи магнитланган зарраларнинг эффектив кесими учун аналитик ифодалар топилган;

илк бора магнит параметр ҳисобига ташқи магнит майдонда жойлашган қора туйнукнинг гравитацион қамровидан чиқиб кета оладиган магнитланган заррачалар учун ҳусусий ва радиал ҳаракат йўналишлари орасидаги критик бурчакнинг ортиши кўрсатилган;

бран моделидаги қора туйнук атрофида ички барқарор айланма орбиталарида ҳаракатланадиган заррачанинг энергетик ҳолати учун ифодалар олинган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** қуйидагилар билан таъминланади: диссертация ишининг натижалари умумий нисбийлик назарияси усулларидан фойдаланилган ҳолда олинди; замонавий сонли методлар ва алгоритмлар қўлланилди; олинган натижалар замонавий

астрономик кузатув натижалари билан бир қаторда бошқа муаллифларнинг илмий ишларининг натижалари билан ҳам таққосланилди; олинган натижаларнинг хулосалари компакт гравитацион объектларнинг умумий тамойилларига тўлиқ мос келади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларнинг илмий аҳамияти компакт астрофизик объектлар атрофида магнитланган зарраларнинг ҳаракатланишини батафсил тушунтириш ва қора туйнуклар деб тахмин қилинган массив ёки ўта массив жисмлардан келган сигналларни ҳар тарафлама таҳлил қилиш имконияти мавжудлиги билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, олинган натижалар ёрдамида кузатилган компакт объектнинг бир қатор хусусиятларини, масалан, спини, магнит моменти, аккрецион дискидаги зарраларнинг орбитаси, уларнинг энергетик ҳолати ва нурланиш спектри текширилиши мумкин. Натижалар галактика марказларидан келадиган космик нурларни, шу соҳалардаги магнит ва гравитацион майдонларни таҳлил қилишда, шунингдек, магнитланган заррача ролини ўйнайдиган пулсарларни кузатиш учун фойдали бўлиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Бурчак моментига эга бўлган зарядли ва магнитланган зарраларнинг умумий нисбийлик назариясидаги ҳаракати бўйича олинган натижалар асосида:

магнитланган зарраларнинг ҳаракати ва магнит эффектларидан Хиндистоннинг Пуна шаҳридаги Университетлараро астрономия ва астрофизика марказида (УААМ) фойдаланилган (УААМ маълумотномаси, Хиндистон, 4-декабр, 2020 йил). Натижада, деформацияланган фазосида зарраларнинг магнитланиши ва уларнинг орбитасига деформацияланган фазонинг таъсири эффектлари ҳисоблаб топилди;

бран дунёси моделида магнитланган зарраларнинг энергетик хусусиятларидан Хитойнинг Чжецзян технология университети олимлари томонидан фойдаланилган (Хитой Халқ Республикаси, Ханчжоу шаҳри, Чжецзян технологиялар университети маълумотномаси, 2020 йил 7-декабр). Натижада, зарядли зарраларнинг барқарор орбиталари радиуслари ҳисоблаб топилди;

зарядланган зарраларнинг бран дунёси моделидаги ҳаракати бўйича натижалар дунё тадқиқотчилар томонидан олиб борилаётган ишларда фойдаланилган бўлиб, жами 80 дан ортиқ ҳорижий импакт фактори юқори журналларда чоп этилган илмий ишларда айланувчи қора туйнук атрофида ташқи зарядларнинг эффектлари тавсифлаш, шунингдек аккрецияланувчи модданинг тезлигини ҳисоблашда фойдаланилган (Physical Review D, 2016; V.94: Issue 8, Web-Sc, IF-4,804; Astrophysics and Space Science, 2016, V.361: id91, Web-Sc, IF-1,495; The European Physical Journal C, 2020; V.80: Issue 11, Web-Sc, IF-4,389; Physica Scripta, 2020; V.95: Issue 8, id085008, Web-Sc, IF-1.866 ва ҳ). Натижада, зарядли зарраларнинг бран дунёсидаги

ҳаракати, айланувчи қора туйнук атрофида ташқи зарядларнинг эффектлари тўғрисида маълумотлар олиш имконини берган.

#### **Тадқиқот натижаларининг апробацияси**

Диссертация натижалари 3 та халқаро 4 та республика илмий анжуманларида муҳокама қилинган.

#### **Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши**

Диссертация мавзуси бўйича жами 24 та илмий ишлар чоп қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиянинг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 6 та илмий мақола, шу жумладан 4 таси хорижий журналларда нашр этилган.

#### **Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми**

Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан ташкил топган. Диссертация ҳажми 97 бетни ташкил этади.

### **ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ**

**Диссертациянинг кириш қисмида** илмий тадқиқотнинг долзарблиги, аҳамияти келтирилган, мақсади ва вазифалари аниқланган, илмий янгилиги ҳамда амалий натижалари кўрсатилган, олинган натижаларнинг ишончлилиги исботланган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти борасида сўз юритилган, тадқиқот натижалари ва диссертация тузилиши берилган.

I боб **“Релятивистик астрофизикада қора туйнук атрофидаги зарралар ва майдонлар”** деб номланган бўлиб, супермассив ва юлдуз массасидаги қора туйнукларни, уларга номзод объектларни, улар атрофидаги зарралар ва майдонларни ўрганишга бағишланган.

Умуман олганда, биз юлдуз массали қора туйнуклар коинотдаги юлдузларнинг космологик "қолдиқлари" деб айта оламиз. Яъни, юлдузлар нур тарқатиб, ёруғликни сарф этиб, ўз ҳаётларини яшайдилар ва охир-оқибат тортиш кучларининг таъсирда ўз ҳаётини тугатадилар. Бундан ташқари, бошланғич массасига қараб, юлдуз қора туйнук ёки нейтрон юлдузи ёки ок митти бўлиши мумкин. Шунини таъкидлаш керакки, ушбу объектлар орасида қора туйнуклар ўзига хос хусусиятларига эга бўлган энг қизиқарли объектлар бўлиб, ўз навбатида уларни бир неча турга бўлиш мумкин: супермассив қора туйнуклар, ўртача массали қора туйнуклар, юлдуз массаси бўлган қора туйнуклар ва бошланғич қора туйнуклар. Қора туйнук номини фанга ким киритгани номаълум. Аммо бу атама йигирманчи асрнинг ўрталарида Жон Уилер маърузаларида ишлатилган ва оммалашганлиги ҳақиқатдир. Шу вақтгача бундай объектлар коллапсланган юлдузлар, коллапсарлар ёки совуган юлдузлар деб номланган. Эйнштейннинг умумий нисбийлик назариясидан маълумки, юлдуз массасидаги қора туйнуклар юлдузнинг тортишиш кучи натижасида коллапсланиши натижасида ҳосил бўлади, яъни ички ёқилғиси тугагач, юлдуз тортишиш кучларига дош беролмайди. Шундай қилиб, ўз тортишиш кучи юлдуз материални босади ва улкан масса бир нуқтага сиқилади. Аммо қора туйнук пайдо бўлиши учун юлдуз массаси

Оппенгеймер-Волков чегараси билан белгиланадиган критик қийматдан кам бўлмаган қийматга эга бўлиши керак. Оппенгеймер-Волков чегараси  $M_{\text{юл}} \geq 3.2M_{\odot}$ . Бу ерда  $M_{\odot}$  Қуёш массаси. Шу муносабат билан "юлдуз номзоди" нинг аниқ массасини аниқлаш жуда муҳим вазифадир. Қоида тариқасида, юлдуз массаси қора туйнук номзодларининг массаси табиий йўлдошнинг орбитал ва радиацион хусусиятлари билан аниқланиши мумкин. Кўпгина ҳолларда, деярли барча бизга маълум юлдуз массали қора туйнукка номзодлар рентген кўшалок тизимларининг таркибий қисмларидан бири ҳисобланади. Шундай қилиб, юлдуз массали қора туйнукка номзодларни тизимда иккинчи йўлдош юлдуз атрофида аккрецион тўпланиш жараёни натижасида ҳосил бўлган рентген нурлари ёрдамида аниқлаш мумкин.

1-жадвалда кўшалок тизимлардаги юлдуз массали қора туйнуқларга номзод объектларнинг бир канчаси келтирилган.

1-жадвал

№	Номи	ҚТ массаси	Юлдуз массаси	Ергача бўлган масофа	Айла-ниш даври	Аниқланган вақти
1.	HR 6819	$5 M_{\odot}$	$08 M_{\odot}$	340 pc	40 d	2020
2.	LB-1	$70 M_{\odot}$	$9 M_{\odot}$	2,3 kpc	78.9 d	2019
3.	GW170104	$31.2 M_{\odot}$	$19.4 M_{\odot}$	880 Mpc	-	2017
4.	GW151226	$14.2 M_{\odot}$	$7.5 M_{\odot}$	440 Mpc	-	2015
5.	GW150914	$36 M_{\odot}$	$29 M_{\odot}$	410 Mpc	-	2015
6.	XTE J1650-500	$5.1 M_{\odot}$	-	4.46 kpc	0.32 d	2008

2-жадвалда шу пайтгача аниқланган ўта оғир қора туйнуқларнинг айримлари келтирилган.

2-Жадвал

№	Номи	Массаси	Галактика тури	Ергача бўлган масофа	Спини	Аниқланган вақти
1.	NGC 3783	$8,7 \cdot 10^6 M_{\odot}$	Сейферт	36 Mpc	$a \geq 0.88$	
2.	NGC 5548	$65 \cdot 10^6 M_{\odot}$	Сейферт	75 Mpc	$a \geq 0.8$	
3.	Mrk 231	$15 \cdot 10^7 M_{\odot}$	Сейферт	173 Mpc		2015
4.	OJ 287	$18 \cdot 10^9 M_{\odot}$	Лацертида	1 Gpc	$a \geq 0.3$	2018
5.	NGC 4151	$40 \cdot 10^6 M_{\odot}$	Сейферт	15.8 Mpc	$a \geq 0.9$	2014
6.	3C 66B	$2 \cdot 10^9 M_{\odot}$	Радио-галактика	92 Mpc		2010

II боб “Шварцшильд қора туйнуғи атрофида магнитланган зарраларнинг ҳаракати” деб номланган бўлиб, бу бобда магнит моментига эга зарраларнинг кучли гравитация ва магнит майдонлардаги ҳаракати тадқиқ этилади.

Шубҳасиз, қора туйнуқлар атрофида тортишиш майдонидан ташқари ички электромагнит майдонлар мавжуд емас. Бироқ, қора туйнук ташқи

асимптотик бир жинсли магнит майдонга жойлаштирилган деб фараз қилиниши мумкин.

Шварцшильд қора туйнуғи атрофидаги электромагнит майдоннинг потенциали қуйидаги шаклга эга:

$$A_\mu = \frac{1}{2} \delta_\mu^\varphi B r^2 \sin^2 \theta. \quad (1)$$

Фарадай электромагнит майдон тензорининг нолга тенг бўлмаган компоненталари қуйидаги кўринишга эга:

$$F_{r\varphi} = B_0 r \sin^2 \theta, \quad (2)$$

$$F_{\theta\varphi} = B_0 r^2 \sin \theta \cos \theta. \quad (3)$$

Магнитланган заррачанинг ҳаракат тенгламасини олиш учун қуйидаги метрикадан фойдаланамиз:

$$ds^2 = -A^2 dt^2 + H^2 dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \varphi, \quad (4)$$

бу ерда  $A^2 = H^{-2} = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)$  бўлиб,  $M$  эса қора туйнук массаси.

Ҳаракат тенгламасини ёзиш учун Гамильтон-Якоби тенгламасидан фойдаланамиз. Магнитланган заррача ҳолати учун Гамильтон-Якоби тенгламасининг кўриниши қуйидагича бўлади:

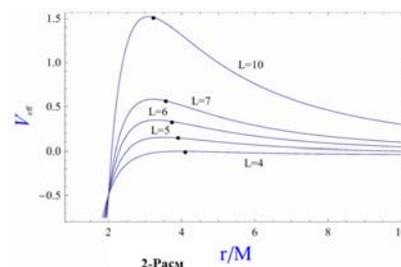
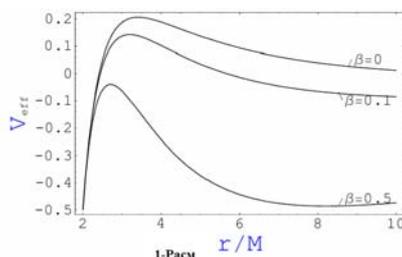
$$g^{\alpha\beta} \frac{\partial S}{\partial x^\alpha} \frac{\partial S}{\partial x^\beta} + m^2 + 2mU = 0. \quad (5)$$

Бу ерда  $U = D^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$  бўлиб, бу ҳад заррачанинг магнит хусусиятларини тўлиқ ифодалайди. Аниқроғи  $D^{\mu\nu}$  зарранинг спин моментини ўз ичига олади ва қутубланиш тензори деб аталади.  $F_{\mu\nu}$  эса электромагнит майдон тензори.

Зарранинг эффектив потенциали қуйидагича бўлади:

$$V_{eff} = \frac{1}{2} \left( \frac{l^2}{r^2} - \eta \right) \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) - \frac{M}{r}. \quad (6)$$

Бу ифодадаги  $\eta$  – заррачанинг магнит хусусиятларига боғлиқ катталиқ. Бу ифоданинг физик маъносини қуйидаги график кўринишидаги 1-расм орқали ифодалашимиз мумкин:



1- ва 2- расмлардан кўришиб турибдики, магнитланган заррачалар марказий объектга яқинроқ масофаларда ҳаракатланиши мумкин экан.

3- жадвалда ички барқарор орбиталарнинг магнит параметрга боғлиқлиги қийматлари келтирилган:

3-Жадвал

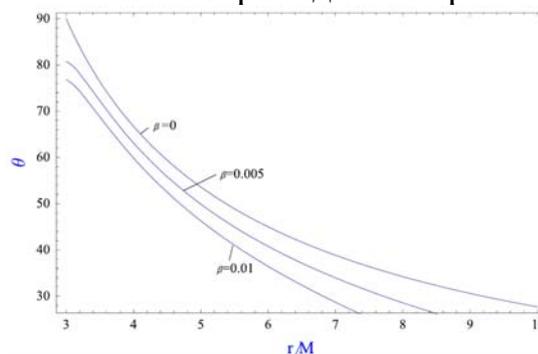
$\beta$	0	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$r_{ISCO}/M$	6	5.99	5.95	5.64	5.50	4.94	4.34
$l_{cr}/M$	4	3.95	3.91	3.85	3.80	3.73	3.69

Бу ерда  $r_{ISCO}$  – Innermost Stable Circular Orbits, яъни Энг Ички Барқарор айланма Орбиталарни билдиради. Юқорида айтиб ўтканимиздек, жадвалдаги келтирилган маълумотлар магнитланган зарралар магнитланмаган зарраларга қараганда анча барқарор эканлигини билдиради.

Заррачанинг радиал ва ҳусусий йўналишлари орасидаги бурчак  $\theta_{cr}$  эса, унинг радиал ва тангенциал тезликлари нисбатидан қуйидагича топилади:

$$\theta_{cr} = \arcsin \left[ 3M \sqrt{3 \left(1 - \frac{2M}{r}\right) \left(\frac{1}{r^2} - \beta \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{\frac{1}{2}}\right)} \right]. \quad (7)$$

(13) формуланинг физик маъноси 3-расмда келтирилган.



3-расм

Кўришиб турибдики, магнит момент мавжуд бўлганда, бурчакнинг критик қиймати кмаяди. Бу шундан далолат берадики, магнит момент туфайли эффектив кесими юзаси камаяди. Бу ерда спинга эга заррачаларининг классик зарралардан фарқли ўлароқ, қора туйнукдан ажралиб чиқиши осонроқ деб тахмин қилишимиз мумкин.

III боб “Магнитланган зарраларнинг бран қора туйнуги атрофидаги ҳаракати” деб номланган бўлиб, бу бобда магнитланган зарраларнинг бран қора туйнуги атрофидаги ҳаракати тадқиқ этилади.

Бран дунёси моделидаги қора туйнук атрофидаги вақт-фазо метрикаси қуйидаги шаклга эга:

$$ds^2 = -A^2 dt^2 + H^2 dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \varphi, \quad (8)$$

бу ерда  $A^2 = H^{-2} = \left(1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^*}{r^2}\right)$  каби белгилаш киритилган ва  $Q^*$  - бран параметрини билдиради.

Биз бу ерда куйидаги алмаштиришларни малга оширдик. Яъни тенгламалар кўринишини соддалаштириш мақсадида, “Геометрик бирликлар системаси”га ўтамиз. Бу системада фундаментал константалар  $G = c = 1$  кўринишга эга.

Бу метрикага ҳос бўлган ҳаракат тенгламаси куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$2M \frac{dt}{d\sigma} - \left(1 - \frac{1}{\rho} + \frac{Q^*}{\rho^2}\right)^{-1} e, \quad (9)$$

$$4M^2 \left(\frac{d\rho}{d\sigma}\right)^2 = e^2 - V(\rho, \lambda, e, Q^*), \quad (10)$$

$$2M \frac{d\varphi}{d\sigma} = \frac{\lambda}{\rho^2 \sin^2 \theta'} \quad (11)$$

Куйидаги тенгламаларни ечиб, ичкибарқарор айланма орбитааларни топишимиз мумкин:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = 0 \quad \text{ва} \quad \frac{\partial \beta(\rho, e, \ell, Q^*)}{\partial \rho} = 0. \quad (12)$$

Бу тенгламаларнинг тахлили натижасида магнит параметрига нисбатан кватрат тенгламага эга бўламиз. Бу тенгламанинг ечими иккита ва ҳақиқий бўлиб, улар куйидаги кўринишга эга:

$$\rho_+ = \frac{4\beta^2 - 27 - 3\sqrt{81 - 8\beta^2 - 288Q^*}}{4(\beta^2 - 9)} \quad \text{ва} \quad \rho_- = \frac{2\beta^2 - 3 - \sqrt{9 - 12\beta^2 - 32Q^*}}{2(\beta^2 - 2)}. \quad (13)$$

Уларнинг айирмаси бизга заррачанинг барқарор айланма орбиталарининг мавжудлик соҳасини беради. Уни куйидагича топамиз:

$$\Delta\rho(\beta, Q^*) = \rho_+ - \rho_- = \frac{\beta^2(4\beta^2 - 29 + 56Q^*)}{6(18 - 11\beta^2)}. \quad (14)$$

Энди эса, киритилган белгилашларни нормал катталикларга қайта алмаштирамиз, яъни:  $\rho = \frac{r}{2M}$ ,  $\beta = \frac{2\mu B_0}{m}$ , заррачанинг магнит моменти учун эса  $\mu \simeq \mu_{\text{Bohr}} = 5.27 \times 10^{-21}$  Эрг  $G^{-1}$  (Бор магнетони), массаси учун  $m \simeq m_p = 1.67 \times 10^{-24}$ g (протона массаси), магнит майдонни  $B_0 \simeq 10^{12}$ G кўринишида ва қора туйнук массасини  $M \simeq 10^3 M_\odot$  деб ҳисобласак олсак, магнит ўзаро таъсир параметрини  $\beta \simeq 7 \times 10^{-6}$  кўринишда оламиз. Ушбу

қийматдан фойдаланиб, заррачанинг ички барқарор айланма орбиталарининг қийматини бран параметрга боғлиқлигини жадвал кўринишида келтирамиз:

**4-Жадвал**

$Q$	0	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$r_{\text{prop}}$	100	150	151	152	153	155	160

Келтирилган қийматлардан кўринадик, бран параметр барқарор орбиталарнинг мавжуд бўлиш соҳасини кенгайтирар экан.

IV боб “Эйнштейн-Гаусс-Боннетнинг 4-D қора туйнуғи атрофида магнитланган зарралар динамикаси” деб номланган.

Эйнштейн-Гаусс-Боннет ечимида фазо-вақт геометрияси қуйидагича бериледи:

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{dr^2}{f(r)} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2. \quad (15)$$

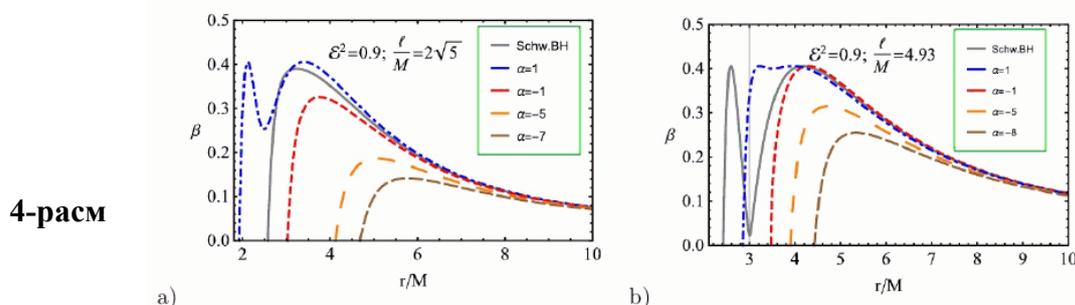
Бу ерда  $f(r)$  метрик функция бўлиб, унинг кўриниши қуйидагича:

$$f(r) = 1 + \frac{r^2}{2\alpha} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{8\alpha M}{r^2}} \right). \quad (16)$$

Заррачанинг ушбу метрикага ҳос бўлган ҳаракат тенгламасини ёзиш учун, юқорида айтиб ўтилгайдек, магнитланган зарралар учун Гамильтон-Якоби формализмидан фойдаланамиз. У ҳолда ҳаракат тенгламаси қуйидаги кўринишни олади:

$$\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = \epsilon^2 - 1 - \left[ f(r) \left( 1 + \frac{\ell^2}{r^2} - \eta \right) - 1 \right], \quad (17)$$

Қуйидаги 5- а ва б расмларда магнит параметрнинг Гаусс-Боннет боғланиш параметри билан таъсирлашиши кўрсатилган.



Расмдан кўриниб турибдики, Гаусс-Боннет параметрининг қиймати ортиши билан, магнит таъсир параметрининг қиймати камайиб кетмоқда. 5- а ва б расмларда заррачанинг бурчак моменти фарқ қилади. Буни расмга қараб

пайқаш мумкин. Чунки, бурчак моменти ошган сари унинг объектдан узоклашиши камайиб бормокда.

Энди зарядли зарранинг ЭГБ 4-D қора туйнуги атрофидаги ҳаракатини караб чиқамиз. Бу ерда ҳаракат динамикаси шундан иборатки, қора туйнук майдонида икки заррача ўзаро тўқнашувда иштирок этади. Бу ҳолда зарраларнинг бири магнитланган, иккинчиси зарядли деб ҳисобланади. Тўқнашув кучли гравитация ва ташқи магнит майдонида содир бўлишини айтиб ўтамиз. Масала бироз соддалашиши учун тўқнашувни абсолют ноэластик деб қараймиз. Яна шуни таъкидлаш жойизки, тўқнашув пайтида зарралар бир чизик бўйлаб бир-бири томон ҳаракатланмокда.

У ҳолда зарралар ҳаракати учун лагранжиан қуйидаги кўринишни олади:

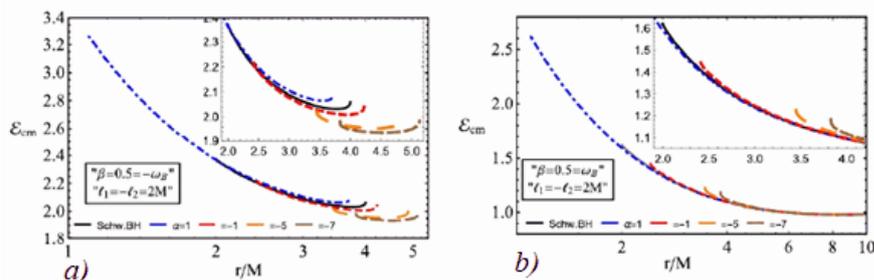
$$L = \frac{1}{2} m g_{\mu\nu} u^\mu u^\nu + e u^\mu A_\mu. \quad (18)$$

Бу ерда  $e$  заррачанинг электр зарядини ифодалайди. Агар ҳаракат учун Лагранжианни билсак, бу ҳолатдаги сақланиш қонунларини, яъни системанинг тўлиқ энергияси ва бурчак моментини ёза оламиз. Улар қуйидагича ёзилади:

$$E = m g_{tt} \dot{t}, \quad (19)$$

$$L = m g_{\phi\phi} \dot{\phi} + e A_\phi. \quad (20)$$

Қуйидаги 6- *a* ва *b* расмларда бири зарядли, иккинчиси эса магнитланган зарралардан иборат системанинг масса маркази энергияси график кўринишда келтирилган. *a* расмда заррачанинг заряди мусбат, *b* расмда эса манфий ҳисобланади.



5-расм

6- *a* расмдан шуни кўришимиз мумкинки, магнит момент билан манфий зарядли зарранинг таъсирлашувида масофа етарлича узок бўлса тўқнашув содир бўлмайди. Бу ерда зарядли зарраларга таъсир қилувчи Лорентц кучининг бир-ҳил ишорали зарядлар ҳолатида итарувчи характериға эға эканлигини инобатға олиш керак. Эътибор берсак, тўқнашув натижасида ажраладиган масса маркази энергиясининг максимал қиймати *a* ва *b* расмларда фарқ қилади. Бунинг сабаби, юқорида айтиб ўтилганидек Лорентц кучининг муҳим аҳамиятға эға эканлигидан. Яъни, бир ҳил ишораи зарядлар

ҳолида Лоренц кучининг итарувчи, бир ҳил қийматларда тортишувчи табиатли эканлигидандир.

## ХУЛОСА

"Умумий нисбийлик назариясида бурчак моентга эга магнитланган ва зарядланган заррачаларнинг ҳаракати" мавзусидаги диссертация иши бўйича куйидаги хулосалар олинди:

1. илк бор, магнитланган зарраларнинг қора туйнук томонидан гравитацион қамраб олинишини тадқиқ қилиш орқали заррачанинг ҳусусий ва радиал ҳаракатланиш йўналиши ўртасидаги критик бурчакни ҳисоблаш учун умумий формула олинди. Классик ҳолатда бурчак  $90^0$ ни ташкил этади, магнитланган заррача ҳолатида  $85^0$  га камайиши ва бу, ўз навбатида, тугулишдан қутулиб кетадиган зарралар сонининг кўпайишига олиб келади;
2. илк бор, қора туйнук томонидан заррачанинг қамраб олинишини ўрганишда, бран параметрни магнитланган заррача ҳаракатининг критик бурчагига таъсири аниқланди. Бран параметр ва магнит момент ҳисобига критик бурчакнинг қиймати сезиларли даражада камайиши аниқланди;
3. заррачанинг умумий энергияси ва бурчак моментининг магнит параметрга боғлиқлиги топилди, бу эса ташқи магнит майдон билан ўзаро таъсирлашувда муҳим аҳамиятга эга. Нолга тенг бўлмаган магнит параметрга эга бўлган заррача классик зарраларга қараганда кўпроқ энергияга эга эканлиги аниқланди (яъни  $\beta = 0$  да);
4. магнитланган заррача бурчак моментини критик қийматининг магнит параметрига боғлиқлиги топилди. Магнит параметрнинг ортиши билан заррачанинг бурчак momenti қиймати сезиларли даражада пасайиши аниқланди;
5. илк бор, магнит параметрнинг ортиши билан ички барқарор айлана орбиталар Шварцшильд радиусининг  $r=4M$  қийматида пайдо бўлиши аниқланди, классик ҳолатда бундай орбиталар  $r=6M$  дан бошланади;
6. илк бор, бран моделида айланмайдиган қора туйнук атрофида магнитланган зарралар учун энг ички барқарор айлана орбиталарнинг мавжудлик соҳасини кенгайтириши аниқланди, натижа тахминан  $\Delta\rho \leq 160m$  эканлиги ҳисобланди. Агар  $Q = 0$  бўлса, у  $\Delta\rho \leq 100m$  бўлган.

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

---

**АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**РАХИМОВ ОЗОДБЕК ГУЛОМОВИЧ**

**ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ И НАМАГНИЧЕННЫХ ЧАСТИЦ  
С УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ  
В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

**01.03.01- Астрономия**

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ФИЗИКО –МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2021**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № B2018.2.PhD/FM240.**

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.inp.uz](http://www.inp.uz)) и Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

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

**Официальные оппоненты:** **Нуритдинов Слехитдин Насритдинович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Муждабаев Исмет Шевкетович**  
кандидат физико-математических наук, доцент

**Ведущая организация:** **Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби**

Защита диссертации состоится «21» мая 2021 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 при Астрономическом институте. Адрес: 100052, г.Ташкент, Астрономическая 33, АИ. Тел.: (+99871) 235-81-02; факс: (+99871) 234-48-67; e-mail: [info@astrin.uz](mailto:info@astrin.uz).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Астрономического института (регистрационный номер № 01-21). С диссертацией можно ознакомиться в [Библиотеке](#) АИ АН РУз. Адрес: 100052, г.Ташкент, Астрономическая 33, АИ. Тел.: (+99871) 235-81-02.

Автореферат диссертации разослан «28» апреля 2021 г.  
(протокол рассылки №1 от 28 апреля 2021 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

  
**С.П. Ильясов**  
председатель научного семинара при  
Научном совете по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** На сегодняшний день изучение центров активных ядерных галактик и открытие черных дыр передовыми научными центрами мира стало одной из важнейших задач. При наблюдении за центром галактик очень важно наблюдать и изучать события, происходящие вокруг центральной черной дыры. В частности, исследуя массивные черные дыры в центре огромных галактик, ученые изучают различные энергетические, тепловые, рентгеновские и радиоизлучательные процессы вокруг черной дыры. Хотя ведутся масштабные работы по отслеживанию таких частиц, отследить их пока невозможно. Поэтому исследование движения намагниченных и заряженных частиц вокруг массивных и сверхмассивных объектов является одной из важнейших задач астрофизики.

Эффекты магнитного момента, изучаемые в данной диссертации, были использованы при спектральном анализе сигналов, полученных от объектов, наблюдаемых в ведущих обсерваториях и исследовательских центрах мира. Например, в 2019 году наблюдалось движение магнитара в центре нашей галактики, примерно в полтора световых годах от черной дыры Sogitarius A\* массой 4,3 миллиона солнечных масс. В качестве примера еще можем называть следующие события: в 2019 году телескоп Event Horizon впервые сделал снимок черной дыры M87; В 2018 году нейтринная обсерватория IceCube наблюдала нейтрино высоких энергий, испускаемых блазарами. В частности, анализ изображения черной дыры показывает, что именно здесь благодаря изучению движения частиц мы смогли наблюдать это изображение черной дыры. Хотя было сделано много открытий, механизмы, с помощью которых возникают эффекты магнитного момента в сильных магнитных полях, полностью не изучены. Из вышеперечисленного можно заключить, что изучение движения намагниченных и заряженных частиц имеет большое значение в современной астрофизике.

В нашей стране большое внимание уделяется экспериментальным и теоретическим работам в области релятивистской астрофизики, а также проведению фундаментальных исследований в глобальном масштабе. Стратегия действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы, выдвинутая Президентом Республики Узбекистан, направлена на развитие науки в нашей стране, реализацию важных направлений фундаментальных исследований и их полученные результаты. Об этом свидетельствует тот факт, что в последние годы в релятивистской астрофизике широко изучаются движение намагниченных и заряженных частиц вокруг компактных объектов, их захват черной дырой, физические свойства частиц, внешнее магнитное поле вокруг компактных объектов и их природа. Несмотря на огромную работу, проделанную в наблюдении черных дыр, на некоторые вопросы пока нет ответов.

Данная диссертационная работа в определенной мере служит реализации задач, утвержденных в государственных нормативных

документах, в Указах Президента Республики Узбекистана за № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, а также в «Дорожной карте основных направлений структурных реформ в Узбекистане на 2019-2021 годы», опубликованной правительством Республики Узбекистан 29 ноября 2018 года.

### **Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.**

Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

### **Степень изученности проблемы**

Магнитные свойства частиц, в том числе взаимодействие с внешним магнитным полем, параметром вращения черной дыры, бран зарядом и собственным угловым моментом частицы, были исследованы многими учеными, в том числе, итальянскими (F. de Felice, Ф. Sorge, A. Vecchiato, G.Preti, С. Vambi, R.Luciano, M.Daniele), российскими (О. Цупко, А. Захаров, В. Фролов, И. Новиков), голландскими (J. van Holten, H. Falcke), чилийскими (S.Hojman, F.Asenjo), немецкими (C.Laemmerzahl, J.Kunz), английскими (G.Gibbons, R.Rietdijk<sup>2</sup>) американскими (J. Bardeen), голландскими (H. Falcke), аргентийскими (L. Amarilla, E. Eiroa), чешскими (Z. Stuchlik, J. Schee), индийскими (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) и др. Однако, влияние магнитного момента с бран параметром и внешним магнитным полем вокруг черной дыры детально не изучено для конкретных объектов, таких как, пульсары, которые рассматриваются в качестве намагниченной частицы, движущейся вокруг черной дыры.

Свойства пространства-времени в общей теории относительности и ее электродинамика были изучены такими отечественными учеными, как Б.Ж.Ахмедов, А.А.Абдужаббаров, Б.А.Тошматов и С.Р.Шайматов, а межгалактическая среда и галактики с активными ядрами были исследованы С.Н. Нуритдиновым, Т.А. Ахуновым и К.Т. Миртаджиевой.

Несмотря на то, что исследованы многие свойства черных дыр, точные механизмы возникновения магнитных полей вокруг черных дыр, орбиты и свойства астрофизических объектов, движущихся в аккреционном диске или вблизи него, взаимодействие пульсаров или магнитаров с магнитным полем сверхмассивной черной дыры изучено не полностью. Помимо этого, влияние магнитного момента пульсара, движущегося вокруг сверхмассивной черной дыры, на его орбиту не было рассмотрено ранее.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация**  
Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов Астрономического института №ФЕ2-ФА-Ф113 “Гравитационные и электромагнитные процессы в релятивистской астрофизике и космологии, системы бозонов при низких температурах, №ЕФ2-ФА-О-25046 “Движение частиц со спином и распространение электромагнитных волн в окрестностях

компактных гравитационных объектов”, №ВА-ФА-Ф2-008 “Астрофизические процессы в статических и динамических релятивистских гравитационных объектах”, №MRB – AN – 2019 – 29 «Моделирование компактных астрофизических объектов и расчеты их наблюдательных характеристик к параметрам телескопа РТ-70 и российского орбитального телескопа Гамма-400».

**Целью исследования** диссертационной работы является исследование движения намагниченных частиц в сверхсильных гравитационных полях, получение точных аналитических решений для зависимости радиуса внутренних стабильных круговых орбит (ISCO) от бран параметра и магнитного момента, определение эффективного сечения гравитационного захвата намагниченных частиц в поле черной дыры.

**Задачи исследования:**

изучить магнитные эффекты в областях, в которых существуют внутренние стабильные круговые орбиты намагниченных частиц вокруг черной дыры, находящейся во внешнем магнитном поле;

получить точные аналитические решения уравнения движения намагниченных частиц в окрестности черной дыры, помещенной во внешнее однородное магнитное поле в модели мира на бранах;

исследовать сечение гравитационного захвата намагниченных частиц черной дырой;

получить точные аналитические решения для зависимости радиуса стабильной круговой орбиты (СКО) от бран параметра для движения пробной частицы вокруг невращающейся ЧД на бранах.

**Объектом исследования** являются намагниченные частицы, релятивистские компактные гравитирующие объекты – астрофизические и сверхмассивные черные дыры.

**Предметом исследования** являются внутренние стабильные круговые орбиты частиц вокруг черной дыры, сечение гравитационного захвата частиц черной дырой, магнитный момент частицы, эффекты и влияния бран-параметра на область существования стабильных круговых орбит.

**Методами исследования** является применение решений уравнений Эйнштейна, которые описывают пространство-время в сверхсильном гравитационном поле, решений уравнений Максвелла, описывающие внешнее магнитное поле вокруг компактных объектов и формализма Гамильтона-Якоби для определения уравнения движения. Кроме этого использованы аналитические и численные методы исчисления дифференциальных уравнений для поля и движения частиц.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые получена зависимость эффективного сечения захвата намагниченных частиц от магнитного момента и получены аналитические выражения для сечения захвата частиц черной дырой;

впервые рассчитана ширина области существования внутренних стабильных круговых орбит для намагниченных частиц в модели мира на бранах вокруг не вращающейся черной дыры;

установлено, что магнитный момент частицы сужает эффективное сечение гравитационно захватывающихся частиц черной дырой;

выявлено, что критическое значение угла между радиальным и собственным движением частицы уменьшается за счет ее магнитного момента;

впервые найдены точные аналитические решения для стабильных круговых орбит намагниченных частиц, движущихся вокруг черной дыры, в модели мира на бранах.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

впервые получена зависимость формы траектории и радиусов стабильных круговых орбит намагниченной частицы от магнитного параметра вокруг черной дыры, находящейся во внешнем магнитном поле;

получена зависимость углового момента и энергии намагниченной частицы от магнитного параметра вокруг черной дыры, находящейся во внешнем магнитном поле;

найжены аналитические выражения для эффективного сечения гравитационного захвата намагниченных частиц в поле черной дыры в модели мира на бранах;

впервые с учетом магнитного параметра показано увеличение критического угла между собственным и радиальным направлениями движения намагниченных частиц, которые смогут оторваться от захвата черной дыры, находящейся во внешнем магнитном поле;

получены выражения энергетического состояния частицы, которая движется во внутренних круговых стабильных орбитах вокруг черной дыры, в модели мира на бранах.

**Достоверность результатов исследования** обеспечена следующим: результаты диссертации получены с помощью математического аппарата общей теории относительности и теоретической физики; использованы современные численные методы и алгоритмы; полученные результаты сопоставлены имеющимися экспериментальными данными наблюдений и результатами других ученых; выводы результатов диссертации вполне соответствуют основным положениям гравитирующих компактных объектов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования** определяется возможностью детального объяснения движения намагниченных частиц вокруг компактных астрофизических объектов и всестороннего анализа сигналов от массивов или сверхмассивов, которые предполагаются черными дырами.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они могут быть использованы для проверки ряда свойств наблюдаемого компактного объекта, таких как спин, магнитный момент, орбита частиц в аккреционном диске, их энергетическое состояние и спектр излучения.

Результаты могут быть полезны при анализе космических лучей из центров галактик, магнитных и гравитационных полей в этих областях, а также при наблюдении пульсаров, играющих роль намагниченных частиц.

#### **Внедрение результатов исследования.**

На основе полученных результатов по движению намагниченных и заряженных частиц с угловым моментом в общей теории относительности:

свойство движение намагниченных частиц и магнитные эффекты были использованы Индийскими учеными в городе Пуна, из Межуниверситетского центра астрономии и астрофизики (МЦАА) (справка МЦАА, Индия, от 4 декабря 2020 г.). В результате рассчитаны магнитные значение частиц и эффекты деформированного пространство, к орбитам этих частиц;

энергетические свойство намагниченных частиц в модели мира на бранах были использованы китайскими учеными из технологического университета Чжецзян в исследованиях сверхмощных магнитных полей вокруг черных дыр, находящихся в центрах галактик (справка технологического университета Чжецзян, город Ханчжоу, Китайская Народная Республика, от 7 декабря 2020 г.). В результате рассчитаны значение стабильных круговых орбит заряженных частиц;

результаты по движению заряженных частиц в модели мира на бранах использованы в работах зарубежных исследователей, в более 80 научных работах, опубликованных в зарубежных журналах с высоким импакт фактором, использованы для характеристики эффектов заряженных частиц вокруг вращающейся черной дыры, а также для расчета скорости аккрецирующего вещества (Physical Review D, 2016; V.94: Issue 8, Web-Sc, IF-4,804; Astrophysics and Space Science, 2016, V.361: id91, Web-Sc, IF-1,495; The European Physical Journal C, 2020; V.80: Issue 11, Web-Sc, IF-4,389; Physica Scripta, 2020; V.95: Issue 8, id085008, Web-Sc, IF-1.866 и др). В результате получена возможность получить информацию о движении заряженных частиц в модели мира на бранах и эффектах внешних зарядов вокруг вращающейся черной дыры.

#### **Апробация результатов исследования**

Результаты исследований были представлены на 3 международных и 4 республиканских научных конференциях.

#### **Опубликованность результатов исследования**

По теме диссертационной работы опубликованы 24 научных работ, из них 6 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 4 зарубежных.

#### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Объем диссертации 97 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

## Глава 1. Частицы и поля вокруг черных дыр в релятивистской астрофизике

В общем можно говорить, что черные дыры звездной массой являются космологическими "остатками" звезд во вселенной. То есть, звезды приходят в свет, распространяя свет проводят свою жизнь и в конце концов коллапсируя гравитационными силами умирают. При этом в зависимости от своей исходной массы, звезда может стать либо черной дырой, либо нейтронной звездой или белым карликом. Можно отметить, среди этих объектов черные дыры самые интересные объекты со своими уникальными свойствами и в свою очередь их можно разделить на несколько типов: сверхмассивные черные дыры, черные дыры средней массой, черные дыры звездной массой и первичные черные дыры. Кто ввел в науку само название черной дыры неизвестно. Но известен факт о том, что этот термин был использован и стал популярным в середине двадцатого века в лекциях Джона Уиллера. До этого времени, такие объекты назывались сколлапсировавшимися звёздами, коллапсарами или застывшими звёздами. Как нам известно из общей теории относительности Эйнштейна, черные дыры звездной массой образуются в результате гравитационного коллапса звезды, то есть, когда у них заканчивается внутреннее топливо, звезда не сможет противостоять гравитационным силам. Таким образом, собственная гравитация подавляет вещество звезды и огромная масса сжимается в точку. Но, для того чтобы появилась черная дыра, масса звезды должна иметь значение не меньше критического, которая определяется пределом Опенгеймера-Волкова. Предел Опенгеймера-Волкова равен  $M_{\text{ov}} \geq 3,2M_{\odot}$ . Здесь  $M_{\odot}$  является массой Солнца. В этом отношении, определить точную массу "кандидата звезды" является очень важной задачей. Как правило, массы кандидатов в черные дыры звездной массы могут определяться свойствами орбитальных и радиационных свойств спутника. Во многих случаях, почти все известные кандидаты в черные дыры звездной массы, являются одними из компонентов рентгеновских двойных систем. Таким образом, кандидаты в черные дыры звездной массы могут быть обнаружены в двойных системах рентгеновским излучением, которое вызывается аккреционным процессом вокруг второй звезды-компаньона.

В таблице 1 представлены объекты, которые являются кандидатами на черные дыры звездной массы в двойных системах.

**Таблица 1**

№	Название	Масса	Масса компонента звезды	Расстояние до Земли	Период вращения	Год открытия
1.	HR 6819	5 $M_{\odot}$	08 $M_{\odot}$	340 pc	40 d	2020
2.	LB-1	70 $M_{\odot}$	9 $M_{\odot}$	2,3 kpc	78.9 d	2019
3.	GW170104	31.2 $M_{\odot}$	19.4 $M_{\odot}$	880 Mpc	-	2017
4.	GW151226	14.2 $M_{\odot}$	7.5 $M_{\odot}$	440 Mpc	-	2015
5.	GW150914	36 $M_{\odot}$	29 $M_{\odot}$	410 Mpc	-	2015

6.	XTE J1650-500	5.1 M <sub>⊙</sub>	-	4.46 кpc	0.32 d	2008
----	---------------	--------------------	---	----------	--------	------

В таблице 2 приведены некоторые сверхмассивные черных дыр, выявленных на данный момент.

Таблица 2

№	Название	Масса	Тип галактики	Расстояние до земли	Спин	Год открытия
1.	NGC 3783	8,7·10 <sup>6</sup> M <sub>⊙</sub>	Сейферт	36 Мpc	$a \geq 0.88$	
2.	NGC 5548	65·10 <sup>6</sup> M <sub>⊙</sub>	Сейферт	75 Мpc	$a \geq 0.8$	
3.	Mrk 231	15·10 <sup>7</sup> M <sub>⊙</sub>	Сейферт	173 Мpc		2015
4.	OJ 287	18·10 <sup>9</sup> M <sub>⊙</sub>	Лацертида	1 Gpc	$a \geq 0.3$	2018
5.	NGC 4151	40·10 <sup>6</sup> M <sub>⊙</sub>	Сейферт	15.8 Мpc	$a \geq 0.9$	2014
6.	3C 66B	2·10 <sup>9</sup> M <sub>⊙</sub>	Радиогалактика	92 Мpc		2010

## Глава 2. Движение намагниченных частиц вокруг черной дыры Шварцшильда

Очевидно, что нет никаких собственных электромагнитных полей вокруг черных дыр, за исключением гравитационного поля. Однако, черная дыра может быть асимптотически помещена во внешнее однородное магнитное поле.

4 потенциал электромагнитного поля вокруг черной дыры Шварцшильда имеет вид:

$$A_{\mu} = \frac{1}{2} \delta_{\mu}^{\psi} B r^2 \sin^2 \theta. \quad (1)$$

Получим компоненты тензора Фарадея:

$$F_{r\varphi} = B_0 r \sin^2 \theta, \quad (2)$$

$$F_{\theta\varphi} = B_0 r^2 \sin \theta \cos \theta. \quad (3)$$

Магнитланган заррачанинг ҳаракат тенгламасини олиш учун куйидаги метрикадан фойдаланамиз:

$$ds^2 = -A^2 dt^2 + H^2 dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \varphi, \quad (4)$$

где  $A^2 = H^{-2} = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)$ ,  $M$  является общей массой черной дыры, полярная ось выбрана в направлении  $B$ . Таким образом, можно предположить, что движение частиц происходит в экваториальной плоскости.

Из канонического формализма следует  $H = 0$ . Теперь, предполагая  $H = -m/2$ , можно получить Уравнение Гамильтона-Якоби

$$g^{\alpha\beta} \frac{\partial S}{\partial x^{\alpha}} \frac{\partial S}{\partial x^{\beta}} + m^2 + 2mU + U^2 = 0. \quad (5)$$

Здесь  $U = D^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$ , этот член полностью характеризует магнитные свойства частицы.  $D^{\mu\nu}$  является тензором поляризации и он пропорционален спину частицы  $D^{\mu\nu} = \frac{q}{m} S^{\mu\nu}$ .

Эффективный потенциал для радиального движения намагниченной пробной частицы

$$V_{eff} = \frac{1}{2} \left( \frac{l^2}{r^2} - \eta \right) \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) - \frac{M}{r} \quad (6)$$

зависит от момента импульса, радиуса движения и от безразмерного параметра  $\beta$ , который характеризует влияние взаимодействия магнитного диполя с внешним магнитным полем на движение намагниченных частиц.

На рис.1 показана радиальная зависимость эффективного потенциала для движения намагниченной частицы для разных значений безразмерного параметра  $\beta$ . Легко увидеть, что орбиты частицы становятся более устойчивыми с увеличением параметра  $\beta$ . Как видно из рисунка, потенциал несет отталкивающий характер, т.е. стабильные круговые орбиты становятся ближе к черной дыре.

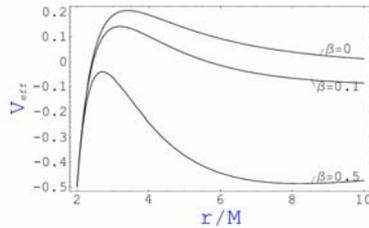


Рис.1

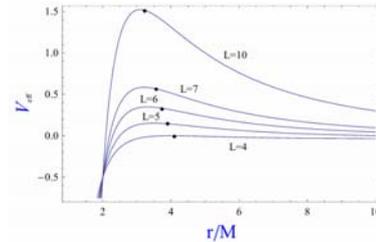


Рис.2

Видно, что круговые орбиты, соответствующие постоянному значению энергии и импульса пробной частицы смещаются к центральному объекту с увеличением параметра  $\beta$ .

Численный анализ этих уравнений нам позволяет узнать о конкретных значениях:

Таблица 3.

$\beta$	0	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$r_{isco}/M$	6	5.99	5.95	5.64	5.50	4.94	4.34
$l_{cr}/M$	4	3.95	3.91	3.85	3.80	3.73	3.69

Здесь  $r_{isco}$  – Innermost Stable Circular Orbits, т.е. означают самые внутренние круговые стабильные орбиты. Как упоминалось выше, данные, приведенные в таблице 1, показывают, что магнитные частицы более стабильны, чем немагнитные.

Можно найти угол  $\theta_{gr}$  между направлением распространения и радиальным направлением частиц:

$$\theta_{gr} = \arcsin \left[ 3M \sqrt{3 \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) \left( \frac{1}{r^2} - \beta \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \right] \quad (7)$$

Физический смысл критического угла  $\theta_{cr}$  можно объяснить с помощью схемы, приведенной на рис.3. Частицы направленные под углом меньше, чем  $\theta_{cr}$  захватываются центральной черной дырой, в противном случае частицы могут оторваться от черной дыры.

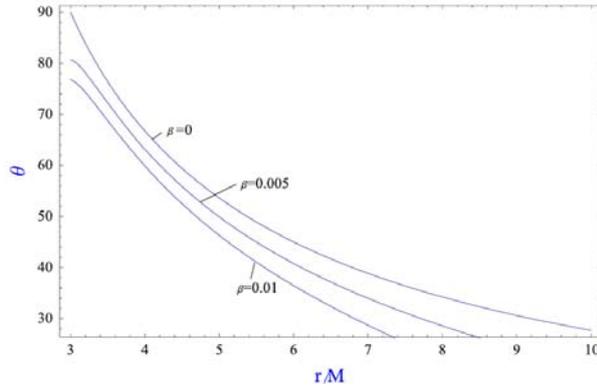


Рис.3

Из рис.3 видно, что в присутствии магнитного момента критическое значение угла  $\theta$  уменьшается. Таким образом, сечение захвата уменьшается за счет магнитного момента.

### Глава 3. Движение намагниченных частиц в модели мира на бранах

#### Геометрия пространства-времени в модели мира на бранах

Метрика пространства-времени вокруг черной дыры в модели мира на бранах имеет следующий вид

$$ds^2 = -A^2 dt^2 + H^2 dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \varphi, \quad (8)$$

где  $A^2 = H^2 = \left(1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^*}{r^2}\right)$ ,  $Q^*$  является параметром брана,  $M$  является общей массой черной дыры, полярная ось выбрана в направлении  $E$ .

Уравнение движения имеет следующий вид:

$$2M \frac{dt}{d\sigma} = \left(1 - \frac{1}{\rho} + \frac{Q^*}{\rho^2}\right)^{-1} \epsilon, \quad (9)$$

$$4M^2 \left(\frac{d\rho}{d\sigma}\right)^2 = \epsilon^2 - V(\rho, \lambda, \epsilon, Q^*). \quad (10)$$

$$2M \frac{d\varphi}{d\sigma} = \frac{\lambda}{\rho^2 \sin^2 \theta}, \quad (11)$$

$V(\rho, \lambda, \epsilon, Q^*)$  является эффективным потенциалом, и он имеет следующий вид:

Круговые орбиты частиц находим одновременным решением следующих двух уравнений:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial V(\rho, \epsilon, \lambda, Q^*)}{\partial r} = 0. \quad (12)$$

Анализируя уравнение (21), получим квадратную уравнению относительно  $\rho$ . И решив эту уравнению, находим минимальное и максимальное значение  $\rho$ :

$$\rho_+ = \frac{4\beta^2 - 27 - 3\sqrt{81 - 8\beta^2 - 288\hat{Q}^*}}{4(\beta^2 - 9)} \quad (22) \quad \text{и} \quad \rho_- = \frac{2\beta^2 - 3 - \sqrt{9 - 12\beta^2 - 32\hat{Q}^*}}{2(\beta^2 - 2)}. \quad (13)$$

Разность этих выражений дает нам область существования устойчивых круговых орбит частицы. Находим это следующим образом:

$$\Delta\rho(\beta, \hat{Q}^*) = \rho_+ - \rho_- = \frac{\beta^2(4\beta^2 - 29 + 56\hat{Q}^*)}{6(19 - 11\beta^2)}. \quad (14)$$

Затем сделаем преобразования  $\rho = \frac{r}{2M}$ ,  $\beta = \frac{2\mu B_0}{m}$  и принимая во внимание частицы с  $\mu \simeq \mu_{\text{Bohr}} = 5.27 \times 10^{-21}$  Эрг Г<sup>-1</sup> (магнетон Бора),  $m \simeq m_p = 1.67 \times 10^{-24}$  г (масса протона) и магнитное поле  $B_0 \simeq 10^{12}$  Г получим [61]  $\beta \simeq 7 \times 10^{-6}$ . Предполагая, что  $M \simeq 10^3 M_\odot$ , производим необходимые вычисления и приведем результаты в таблице (2):

Таблица 4.

$\hat{Q}$	0	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$\eta_{\text{гор}}$	100	150	151	152	153	155	160

Из приведенных значений видно, что параметр отруби расширяет область существования устойчивых орбит.

#### Глава 4. Динамика намагниченных частиц вокруг 4-D черной дыры Эйнштейна Гаусса – Боннета

Метрика стационарной черной дыры Эйнштейна-Гаусса-Боннета имеет следующую форму:

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{dr^2}{f(r)} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2. \quad (15)$$

Ввели следующее обозначение:

$$f(r) = 1 + \frac{r^2}{2\alpha} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{8\alpha M}{r^2}} \right). \quad (16)$$

Соответствующее уравнение движения получается из уравнения (89) и выглядит так

$$\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = \epsilon^2 - 1 - 2V_{\text{eff}}(r; \alpha; \ell; \beta). \quad (17)$$

На рисунках 5 а и б приведено связь магнитного параметра с параметром Гаусс-Бонне.

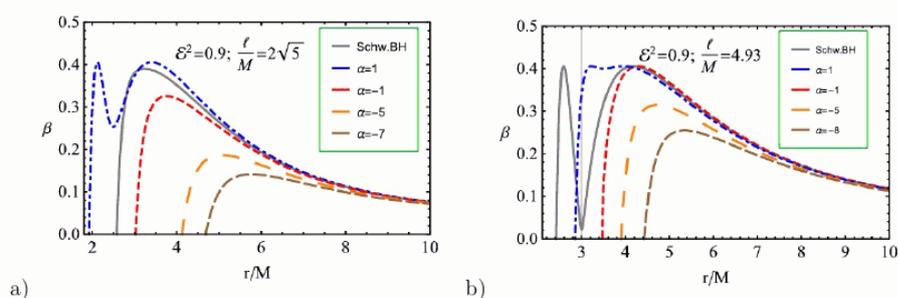


Рис.4

Из рисунка 5 приведены радиальные зависимости минимального значения удельного углового момента для различных значений параметра  $\alpha$ . Из рисунка видно, что с увеличением параметра  $\alpha$  значение минимального углового момента увеличивается. Однако, при положительных значениях параметра  $\alpha$  уменьшается расстояние, на котором значение углового момента максимально.

Теперь рассмотрим движение заряженной частицы вокруг 4-D черной дыры ЭГБ. Динамика движения здесь такова, что две частицы в поле черной дыры участвуют в столкновении. В этом случае одна из частиц считается магнитной, а другая заряженной. Обратите внимание, что столкновение происходит под действием сильной гравитации и внешнего магнитного поля. Чтобы упростить дело, считаем столкновение абсолютно неупругим. Также стоит отметить, что при столкновении частицы движутся навстречу друг другу по прямой.

Лагранжиан для частицы записывается в виде:

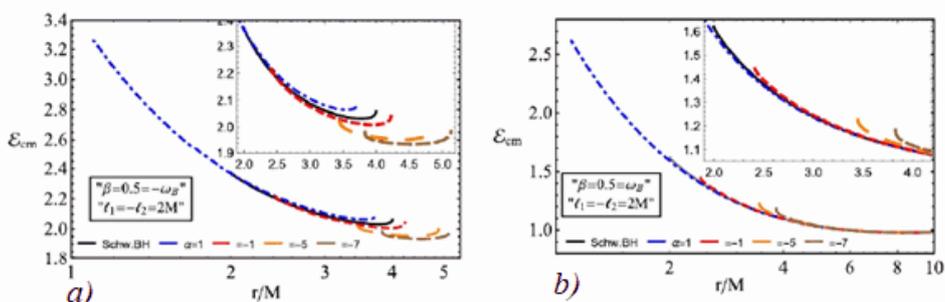
$$L = \frac{1}{2} m g_{\mu\nu} u^\mu u^\nu + \epsilon u^\mu A_\mu \quad (18)$$

здесь  $\epsilon$  электрический заряд частицы. Если мы знаем лагранжиан системы, то можем найти сохраняющиеся величины, такие как, энергия и угловой момент, которые возникают за счет однородности времени и изотропности пространства. Они записываются следующим образом:

$$E = m g_{tt} \dot{t}, \quad (19)$$

$$L = m g_{\phi\phi} \dot{\phi} + \epsilon A_\phi. \quad (20)$$

На рисунках 5 *a* и *b* представлены радиальные зависимости энергий центра масс сталкивающихся намагниченных и заряженных частиц вокруг 4-D ЧД ЭГБ. Значения удельного углового момента частиц выбраны  $\ell_1 = 2M$ ,  $\ell_2 = -2M$ , а безразмерные параметры магнитной связи и циклотрона имеют значения  $\beta = \omega_B = 0.5$ .



### Рис.5

Из рис.6 а видно, что при большем значении  $r$  энергия центра масс исчезает из-за сил отталкивания Лоренца, что означает, что при большем значении  $r$  столкновение не происходит. Речь идет о случае столкновения намагниченных частиц с положительным и отрицательно заряженными частицами. Однако в случае столкновения намагниченной и отрицательно заряженной частицы расстояние, на котором исчезает энергия центра масс, меньше, чем в случае столкновения намагниченной частицы с положительно заряженными частицами из-за ориентации магнитного поля: в первом случае сила Лоренца имеет отталкивающую природу, а во втором - притягивающую. Причем в обоих случаях значение энергии центра масс увеличивается с увеличением параметра  $\alpha$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме диссертации «Движение заряженных и намагниченных частиц с угловым моментом в общей теории относительности», представлены следующие выводы:

1. впервые получена формула для расчета критического угла между направлением движения частицы и радиальным направлением при исследовании гравитационного захвата намагниченных частиц черной дырой. Показано, что критический угол составляющий  $90^0$  в классическом случае уменьшается до  $85^0$  в случае с намагниченной частицей и это в свою очередь приводит к росту числа частиц, освобождающихся от захвата.
2. впервые обнаружено влияние бран параметра на критический угол намагниченной частицы, при исследовании гравитационного захвата частиц черной дырой. С учетом магнитного момента и бран параметра критический угол существенно уменьшается.
3. найдена зависимость полной энергии частицы от магнитного параметра и параметра барана, которые играют важную роль при взаимодействии с внешним магнитным и гравитационным полями. Обнаружено, что частица имеющая не нулевой магнитный параметр, имеет большую энергию, чем классические частицы (т.е. при  $\beta=0$ ).
4. вычислено критическое значение углового момента намагниченной частицы, которое зависит от магнитного параметра. Выявлено, что с увеличением магнитного параметра существенно уменьшается значение углового момента частицы.
5. впервые выявлено, что с увеличением магнитного параметра, внутренние стабильные круговые орбиты появляются в Шварцшильдском радиусе  $r=4M$ , а в классическом случае такие орбиты начинаются с  $r=6M$ .
6. впервые рассчитано значение ширины области существования внутренних круговых стабильных орбит намагниченных частиц в модели мира на бранах вокруг не вращающейся черной дыры и получен результат  $\Delta\rho \leq 160m$ . В случае  $Q = 0$  было  $\Delta\rho \leq 100m$ .

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM.15.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE ASTRONOMICAL INSTITUTE**

---

**ASTRONOMICAL INSTITUTE**

**RAKHIMOV OZODBEK GULOMOVICH**

**MOTION OF CHARGED AND MAGNETIZED PARTICLES WITH  
ANGULAR MOMENTUM  
IN GENERAL RELATIVITY**

**01.03.01 - Astronomy**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2021**

**The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2018.2.PhD/FM240.**

The doctoral (PhD) 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 (resume)) languages on the website of the Scientific Council at the address of [www.inp.uz](http://www.inp.uz) and on the website of “Ziyonet” information and educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

<b>Scientific consultant:</b>	<b>Ahmedov Bobomurat Juraevich</b> doctor of sciences in physics and mathematics, professor
<b>Official opponents:</b>	<b>Nuritdinov Salokhitdin Nasritdinovich</b> doctor of physical and mathematical sciences, professor
	<b>Mujdabaev Ismet Shevketovich</b> Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor
<b>Leading organization:</b>	<b>Al-Farabi Kazakh National University Almaty, Kazakhstan</b>

The defense of the dissertation will be held on “21<sup>th</sup>” may 2021 at 11<sup>00</sup> 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 city. ph.: (+99871) 2358102; fax: (+99871) 2344867; e-mail: [info@astrin.uz](mailto:info@astrin.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the Astronomical Institute (registered under No.01-21). Address: UBAI, 33 Astronomicheskaya street, 100052, Tashkent city. ph.: (+99871) 2358102.

The Abstract of dissertation was distributed on “ 28 ” april 2021.  
(Registry record No.1 dated “28” april 2021.)



  
**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

  
**S. P. Ilyasov**  
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees,  
D.Ph.-M.S., senior researcher

## INTRODUCTION (Annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research dissertation** is to study of the motion of magnetized particles in superstrong gravitational fields, obtaining exact analytical solutions for the dependence of the radius of internal stable circular orbits (ISCO) on the parameter branes and magnetic moment, determining the effective cross section of the gravitational capture of magnetized particles in the field of a black hole..

**The objects of the research** are magnetized particles, relativistic compact gravitating objects - astrophysical and supermassive black holes.

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

for the first time, dependence of the effective cross section for the capture of magnetized particles on the magnetic moment is found and analytical expressions are obtained for the cross section for the capture of particles by a black hole;

for the first time, width of the region of existence of internal stable circular orbits for magnetized particles was calculated in the model of the world on branes around a non-rotating black hole;

it was found that the magnetic moment of a particle narrows the effective cross section of gravitationally captured particles by a black hole;

obtained dependence of the angle between the proper and radial directions of particles on the magnetic moment, and it is revealed that, taking into account the magnetic moment, the value of the angle decreases, which leads to an increase in the cross-sectional area of particles released from the capture of a black hole;

for the first time, exact analytical solutions were found for stable circular orbits of magnetized particles moving around a black hole in a brane-based model of the world.

### **Applications of the research results**

Based on the results obtained on the motion of magnetized and charged particles with angular momentum in the general theory of relativity:

the results of assessing the magnetic parameter of polarized particles and the effect of deformed Schwarzschild space on the orbit of particles were used by Indian scientists in the city of Pune, from the Interuniversity Center for Astronomy and Astrophysics (ICAA) (reference ICAA, India, dated December 4, 2020);

the energy effects of magnetizing particles in the brane-based model of the world and the dependence of the angular momentum of a particle on an external magnetic field were used by Chinese scientists from Zhejiang University of Technology in studies of super-powerful magnetic fields around black holes located in the centers of galaxies (reference from Zhejiang University of Technology, Hangzhou, People's Republic of China , dated December 7, 2020);

the results on the motion of charged particles in the brane-based world model are used in the works of foreign researchers, in more than 80 scientific papers published in foreign journals with a high impact factor, are used to characterize the effects of charged particles around a rotating black hole, as well as to calculate the velocity of accreting matter (Physical Review D, 2016; V.94: Issue 8, Web-Sc, IF-4,804; Astrophysics and Space Science, 2016, V.361: id91, Web-Sc, IF-1,495; The

European Physical Journal C, 2020; V.80: Issue 11, Web-Sc, IF-4,389; Physica Scripta, 2020; V.95: Issue 8, id085008, Web-Sc, IF-1.866 и др). As a result, it is possible to obtain information about the motion of charged particles in the brane-based model of the world and the effects of external charges around a rotating black hole.

#### **Volume and structure of the dissertation**

The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, annexes and a list of references. The volume of the dissertation is 97 pages.

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

**I бўлим (part I; I часть)**

1. Turimov B., Rahimov O., Ahmedov B., Zdenek S. and Boymurodova Kh. Dynamical motion of matter around a charged black hole // International Journal of Modern Physics D. -World Scientific (Singapore), 2021. – Vol. 30. -doi: 10.1142/S0218271821500371, (№ 1. Web of Science; IF =2.004).

2. Rahimov O.G. Magnetized Particle Motion Around Black Hole in Braneworld // Modern Physics Letters A. -World Scientific (Singapore), 2011. – vol. 26, – pp. 399-408 (№ 1. Web of Science; IF =1.17).

3. Rahimov O.G., Ahmedov B.J., Abdujabbarov A.A. Capture Cross Section for Braneworld Black Hole // Astrophysics and Space Science. – Berlin Heidelberg: Springer (Germany), 2011. – vol. 335. – pp. 499-504 (№ 1. Web of Science; IF = 1.622).

4. Abdujabbarov A.A., Ahmedov B.J., Rahimov O.G., Salikhbaev U.S., Magnetized particle motion and acceleration around a Schwarzschild black hole in a magnetic field // Physica Scripta. -IOP Publishing (United Kingdom) 2014. №. 89, pp.084008. (№ 1. Web of Science; IF = 2.151).

5. Rahimov O.G., The dependence of capture cross section from magnetic moment of magnetic particles in the field of Schwarzschild black hole // Ҳисоблаш ва амалий математика муаммолари –Тошкент, 2019. -№ 3(21). – PP. 94-101. (01.00.00. № 9)

6. Рахимов О.Г., Устойчивость намагниченных частиц от захвата черной дыры Шварцшильда, находящейся во внешнем однородном магнитном поле // Бухоро Давлат университети илмий ахбороти –Бухоро (Ўзбекистон), 2018. -№ 4. – PP. 60-63. (01.00.00. № 3)

**II бўлим (part II; II часть)**

7. Aleksandra Demyanova, Ozodbek Rakhimov, Yunus Turaev, Nuriddin Kurbonov and Javlon Rayimbaev, Characteristic orbits of charged particles around charged black holes, Proceedings of RAGtime 20–22, 2020, pp.19-28, Czech Republic Z. Stuchlířk, G. Torok and V. Karas, editors, Silesian University in Ořava.

8. О.Г.Рахимов, Р.К.Джапарова, Гравитационный захват намагниченных частиц вокруг черной дыры Шварцшильда в однородном магнитном поле // Материалы международной конференции в честь 70-летия академика НАН РК Такибаева Нургали Жабагаевича, Национальная академия наук Республики Казахстан –Алма-ата, март-апрель 2014г. №– 2(294), –pp. 42-45.

9. Рахимов О.Ғ., Компакт объект атрофидаги стабил орбиталарда харакатланаётган зарраларнинг энергияси //РИАК -2020 "Фан ва таълимни

ривожлантиришда ёшларнинг ўрни".СЕКЦИЯ-Физика-математика, 55-б.

10. Рахимов О.Г., Природа и динамика намагнитных частиц вокруг 4-D черных дыр Эйнштейна-Гаусса-Бонне // РИАК -2020 "Ядерная физика и ядерные технологии", Ташкент, Узбекистан, стр. 27-31.

11. Rahimov O.G., The observation of shadow of rotating wormhole in plasma // XXI асп – интеллектуал ёшлар асри, РИАК, ЎзРФА, 2019, Тошкент, Ўзбекистон, 160-162 бетлар.

12. Рахимов О.Г., Рахматов А.С., Незахватывающиеся намагнитные частицы в поле черной дыры Шварцшильда // Физика фанининг ривожда истедодли ёшларнинг ўрни, РИАК, ЎзМУ, 2018, Тошкент, Ўзбекистон, 134-136 бетлар.

13. Рахимов О.Г., Влияния магнитного параметра частиц на стабильные круговые орбиты при движении вокруг черной дыры Шварцшильда // Эл. журн. Современные научные исследования и инновации –Россия, 2016. № 2.

14. Рахимов О.Г., Юлдашев Н.К., Влияния магнитного параметра частиц на стабильные круговые орбиты при движении вокруг черной дыры Шварцшильда // Физика фанининг муаммолари ва унинг ривожда истедодли ёшларнинг ўрни, РИАК, ЎзМУ, 2016, Тошкент, Ўзбекистон, 76-79 бетлар.

15. Рахимов О.Г., Влияния НУТ параметра на движение намагнитной частицы в аксиально-симметричном гравитационном поле // Физика фанининг ривожда истедодли ёшларнинг ўрни, РИАК, ЎзМУ, 2015, Тошкент, Ўзбекистон, 281-286 бетлар.

16. Rahimov O.G., Raimov X., Magnetized capture cross section for braneworld black hole // Назарий ва ядро физикасининг долзарб муаммолари, РИАК, ЎзМУ, 2015, Тошкент, Ўзбекистон, 81-83 бетлар.

17. Рахимов О.Г., Абдужаббаров А.А, Сечение гравитационного захвата намагнитных частиц в поле черных дыр в однородном магнитном поле // Республиканская конференция молодых физиков, НУУз, 2014, Ташкент, Узбекистан, Ташкент, С. 83-88.

18. Rahimov O.G., Mamadjanov A.I., Particle motion and collisions around rotating regular black hole // Республиканская конференция посвященной 100-летию академика С. Азимова, ст.17-19 Ташкент- 2014.

19. Rahimov O.G., Djaparova R.K., Releasing of magnetized particles from capture cross of Schwarzschild black hole // Улугбековские чтения, Республиканская конференция молодых физиков, НУУз, Ташкент, Узбекистан, Ташкент- 2014, Ст. 98-101.

20. Рахимов О.Г., Абдужаббаров А.А, Сечение гравитационного захвата намагнитных частиц в поле черных дыр в однородном магнитном поле // «Физика фанининг ривожда истедодли ёшларнинг ўрни», РИАК, ИЯФ, 2011, Ташкент, Узбекистан, Ташкент, С. 13-16.

21. Рахимов О.Г., Движение пробной намагнитной частицы вокруг черной дыры на бранах в однородном магнитном поле // III Республиканская

конференция молодых физиков Узбекистана “Ядерная физика и ядерные технологии”, Сборник докладов, 1-2 декабря, 2010, Ташкент, С. 43-48.

22. Рахимов О.Г., Абдужаббаров А.А, Движение частиц вокруг черной дыры на бранах в однородном магнитном поле // «Актуальные пробл. современной физики» Школа-семинар для одаренных студентов и молодых ученых. Самарканд, 28-29 мая 2010, С. 51-57.

23. Рахимов О.Г., Абдужаббаров А.А, Рахматов А.С., Движение пробной намагниченной частицы в поле черной дыры на бранах в однородном магнитном поле // «Современная физика и ее перспективы» Материалы республиканской конференции Ташкент 12-13 ноября 2009, С. 274-276.

24. Рахимов О.Г., Движение пробной частицы в аксиально-симметричном гравитационном поле // II Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана “Ядерная физика и ядерные технологии”, Сборник докладов, 25-26 ноября, 2008, Ташкент, С.241-245.

---

Босишга рухсат этилди 23.04.2021. Қоғоз ўлчами 60x84 – 1/16  
Ҳажми 2,75 б.т. 100 нусха. Буюртма № 0074.  
ТИҚХММИ босмахонасида чоп этилди.  
Тошкент 100000, Қори-Ниёзий кўчаси 39 уй.

