

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/31.03.2022 T/FM.10.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI

JO‘RAYEVA NOZIMA BOBOMUROD QIZI

ASTROFIZIK QORA O‘RALAR ATROFIDA ZARRALAR

**01.04.02 – Nazariy fizika
01.03.01-Astronomiya**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI
(PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent - 2023

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertasiyasi
avtoreferati mundarijasi**

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

**Table of Contents of Doctor of Philosophy (PhD) Dissertation in Physical and
Mathematical Sciences**

Jo'rayeva Nozima Bobomurod qizi Astrofizik qora o'ralar atrofida zarralar	3
Жураева Нозима Бобомурод қизи Частицы в окрестности астрофизических черных дыр	17
Juraeva Nozima Bobomurod qizi Particles around astrophysical black holes	31
E'lon qilingan ishlar ro'yxati List of published works Список опубликованных работ.....	38

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/31.03.2022 T/FM.10.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI

JO‘RAYEVA NOZIMA BOBOMUROD QIZI

ASTROFIZIK QORA O‘RALAR ATROFIDA ZARRALAR

**01.03.01-Astronomiya
01.04.02 – Nazariy fizika**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI
(PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent –2023

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.3.PhD/FM756 raqami bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Fundamental va amaliy tadqiqotlar institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning internet sahifasida (www.ifar.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Abdujabbarov Ahmadjon Adiljanovich
Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponenlar:

Shaymatov Sanjar Ruzimurotovich
Fizika-matematika fanlari doktori, k.i.x.

Xugayev Avas Vasilyevich
Fizika-matematika fanlari nomzodi

Yetakchi tashkilot:

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti

Dissertatsiya "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti huzuridagi DSc.03/31.03.2022 T/FM.10.04 raqamli Ilmiy kengashning 2023-yil "____" _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100000, Toshkent shahri, Qori Niyoziy ko'chasi 39-uy, Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti, 108-katta majlislar zali; tel.: 71 237-09-61.; e-mail: info@ifar.uz)

Dissertatsiya bilan "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100000, Toshkent shahri, Qori Niyoziy ko'chasi, 39-uy, Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti, 108-katta majlislar zali; tel.: 71 237-09-61)

Dissertatsiya avtoreferati 2023-yil "____" _____ kuni tarqatildi.
(2023-yil "____" _____ dagi _____ raqamli reestr bayonnomasi)

A.R. Hayotov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash raisi o'rinbosari f.-m.f.d., professor

E. X. Karimbayev

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash ilmiy kotibi f.-m.f. bo'yicha PhD

B. M. Narzilloyev

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi
f.-m.f.d.

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati. Dunyoda qora o‘ralar yaqinidagi turli astrofizik jarayonlarning matematik modellarini ishlab chiqish va takomillashtirish zamonaviy relyativistik astrofizikaning dolzarb vazifalaridan biridir. So‘nggi o‘n yil ichida kuzatilishi mumkin bo‘lgan astronomiyadagi inqilobiy kashfiyotlar kompakt gravitatsiyaviy ob‘ektlar yaqinidagi astrofizik hodisalarning nazariy va matematik modellarining rivojlanish sur‘atlarini tezlashtirdi. Boshqa tomondan, umumiy nisbiylik nazariyasi va kvant nazariyasi o‘rtasida fundamental kelishmovchiliklarning mavjudligi tortishishning yangi alternativ va o‘zgartirilgan nazariyalarini ishlab chiqishni talab qiladi. Shu sababli, ishlab chiqilgan matematik modellar yordamida nazariy natijalarni tahlil qilish va eksperimental ma’lumotlar bilan solishtirish, shuningdek, yangi nazariyalar va yechimlar parametrlari uchun cheklovchi qiymatlarni olish mumkin.

Gravitatsiyaning alternativ va modifikatsiyalangan nazariyalarini ishlab chiqishga urinishlar, xususan, koinotda qora materiya va qora energiya mavjudligi bilan bog‘liq bo‘lgan kosmologik sabablar xisoblanadi. Shu bilan birga, bu nazariyalar shunday qurilganki, umumiy nisbiylik nazariyasi gravitatsiyaning standart nazariyasi sifatida asosiy nazariya bo‘lib qoladi. Shunday qilib, egri bo‘shliqning kompakt ob‘ektlar yaqinidagi astrofizik jarayonlarga va shunga mos ravishda astronomik kuzatishlar natijalariga ta’sirini o‘rganish va modellashtirish dolzarbdir.

Mamlakatimizda so‘ngi yillarda fundamental va amaliy tadqiqotlarning dolzarb yo‘nalishlarini rivojlantirishga tobora ko‘proq e’tibor berilmoqda. Xususan, istiqbolli yo‘nalishlardan biri bo‘lgan astrofizik tadqiqotlarni rivojlantirish bugungi kunning muhim masalasidir. Yurtimizda ilm-fanning muvaffaqiyatli rivojlanishi uchun fundamental tadqiqotlar va ishlanmalarning asosiy yo‘nalishlari va ularni amaliy qo‘llash O‘zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo‘yicha 2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Strategiyasida¹ o‘z aksini topgan. Buni isboti o‘laroq, shuni aytib o‘tish mumkinki, oxirgi yillarda relyativistik astrofizikada kompakt ob‘ektlar atrofida magnitlangan va zaryadlangan zarralarning harakati, ularning qora o‘ra tomonidan tutib qolinishi, zarralarning fizik xususiyatlari, kompakt ob‘ektlar atrofidagi tashqi magnit maydon va ularning tabiati chuqur o‘rganildi.

Dissertatsiya tadqiqoti 2018 yil 29 noyabrda O‘zbekiston Respublikasi Hukumati tomonidan chop etilgan “2019-2021 yillarda O‘zbekistonda tuzilmali islohotlarning asosiy yo‘nalishlarining yo‘l xaritasi”, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi PQ-4947- sonli “O‘zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo‘yicha Harakatlar strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni va ilm-fanni rivojlantirish to‘g‘risidagi boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda ko‘rsatilgan vazifalarni bajarishga ma’lum darajada xizmat qiladi.

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 1-yanvardagi № PF-60 son farmoni “2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Ushbu dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnikasini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishi II. “Energiya, energiya va resurslarni tejash”.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi.

Tashqi magnit maydondagi qora o‘ralar atrofida elektromagnit maydonning matematik modelini qurish va zaryadlangan zarrachalar dinamikasi ko‘plab olimlar, jumladan, ingliz (R.Vold, J.Petterson), rus (A.Zaxarov), V. Frolov, I. Novikov), nemis (C. Laemmerzah, J. Kunz, A. Grezenbach), argentinalik (L. Amarilla, E. Eiroa), chex (M. Kolos, J. Vrba), hindistonlik (N. Dadxich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) va boshqalar tomonidan o‘rganib chiqilgan. Ammo parametrlangan metrikada deformatsiyalangan qora o‘ra uchun elektromagnit maydon modeli o‘rganilmagan. Shuningdek, zaryadlangan zarrachalarning doiraviy orbitalarining modelini yaratish akkretsion disklari uchun o‘rganilmagan.

Umumiy nisbiylik nazariyasi doirasidagi elektromagnit maydon va magnitlangan zarracha harakatining matematik modeli mahalliy olimlar B.J.Ahmedov, D.R.Rayimboev, B.A.Toshmatov va B.M.Narzilloev, hamda xorijlik olimlar R.Vald, F.de Felitse, F.Sorge va boshqalar tomonidan o‘rganilgan. Biroq, markaziy ob‘ekt deformatsiyalangan qora o‘ra yoki magnit va elektr zaryadi nolga teng bo‘lmagan holatlar uchun matematik modelni takomillashtirish masalasi ochiqlicha qolmoqda.

Regular qora o‘ra atrofidagi astrofizik jarayonlarga qora materiyaning ta‘siri ham o‘rganilmagan. Bunday ob‘ektlar atrofidagi zarrachalar dinamikasini tavsiflovchi matematik modellarni ishlab chiqish va takomillashtirish modernizatsiyalangan va alternativ gravitatsiya nazariyalarining parametrlari uchun cheklovchi qiymatlarni olishga yordam beradi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Innovatsion rivojlanish vazirligi tomonidan moliyalashtirilgan F-FA-2021-510-sonli “Modifikatsiyalangan gravitatsiyalar doirasida neytron yulduzlari yadro muhitini tadqiq etish ” loyihasi doirasida amalga oshirilgan.

Tadqiqot maqsadi qora o‘ralar yaqinidagi zarrachalar dinamikasini tavsiflash uchun matematik modellar va hisoblash algoritmlarini ishlab chiqish va takomillashtirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

tashqi asimptotik bir jinsli magnit maydonda aylanuvchi non-Kerr qora o‘ra atrofidagi elektromagnit maydon uchun aniq analitik yechimlarni izlash;

zaryadlangan zarrachalarning aylanuvchi non-Kerr qora o‘ra atrofida harakatini tashqi bir jinsli magnit maydon mavjudligida tahlil qilish;

deformatsiya parametrining doiraviy orbitalar radiusi qiymatiga ta‘sirini o‘rganish;

magnit va elektr zaryadlari nolga teng bo‘lmagan qora o‘ra yaqinidagi magnitlangan zarrachalar dinamikasini tavsiflash uchun matematik modelni ishlab chiqish;

magnitlangan zarrachalarning to‘qnashuv jarayonini o‘rganish va massa markazining energiyasi uchun ifodalarni olish;

qora materiya mavjudligida regulyar qora o‘ra atrofidagi neytral zarralar dinamikasini o‘rganish;

sinov zarralarining qora o‘ralar atrofidagi orbital harakatiga kvintessensiya parametrining ta‘sirini o‘rganish.

Tadqiqotning ob‘yekti astrofizik qora o‘ralar, elektr va magnit zaryadlari nolga teng bo‘lmagan sinov zarralari, qora materiya.

Tadqiqotning predmeti matematik modellar, elektromagnit va tortishish maydonlari uchun tenglamalarni yechishning raqamli va analitik usullari, kompakt gravitatsiya ob‘ektlari yaqinidagi sinov zarralari dinamikasini o‘rganish.

Tadqiqot usullari. Hisoblash matematikasi usullari, nazariy astrofizika usullari, matematik fizikaning zamonaviy usullari, maydon va zarralar harakati uchun differensial tenglamalarni hisoblashning analitik va raqamli usullari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

asimptotik bir jinsli tashqi magnit maydonda aylanuvchi non- Kerr qora o‘ra atrofidagi elektromagnit maydon uchun aniq analitik yechimlar olingan va elektr va magnit maydonlar qora o‘ra deformatsiya parametrining o‘zgarishiga sezgir ekanligi ko‘rsatilgan;

regulyar qora o‘ra atrofidagi neytral zarrachalar dinamikasini qora materiya mavjudligida tasvirlash uchun matematik model ishlab chiqildi;

deformatsiya parametrining musbat qiymatining oshishi aylana orbitalari radiusining pasayishiga olib kelishi ko‘rsatilgan. Qora o‘raning magnit maydoni va burchak impulsining oshishi barqaror doiraviy orbitalarining radiusini kamaytirishi aniqlangan va nolga teng bo‘lmagan magnit va elektr zaryadlari bo‘lgan Reissner-Nordström qora o‘ralari yaqinidagi magnitlangan zarrachalar dinamikasini tasvirlash uchun matematik model ishlab chiqildi;

doiraviy orbitalarda magnitlangan zarrachalarning energiyasi va burchak impulsi qora o‘ra zaryadi va tashqi magnit maydon mavjud bo‘lganda kamayishi ko‘rsatilgan. Bundan tashqari, magnitlangan zarrachalarning minimal barqaror doiraviy orbitasining radiusi qora o‘raning elektr zaryadi ortishi bilan kamayadi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

Kuzatish ma‘lumotlarini nazariy natijalar bilan qiyosiy tahlili deformatsiya parametrining yuqori chegarasi $\varepsilon < 22$ shaklda olingan.

Sgr A* obyektini atrofidagi magnitarning dinamikasiga uchta parametrning ta‘sirini qiyosiy tahlil qilish natijasida qora o‘raning magnit zaryadi qora o‘ra aylanish parametrining $a/M < 0.82$ qiymatigacha o‘xshashi mumkinligi aniqlandi.

Tashqi magnit maydon qora o‘raning magnit zaryadining $Q_m/M = 0.4465$ qiymatigacha o‘xshashligi ko‘rsatilgan. Qora o‘raning elektr zaryadi magnit zaryadining $Q_m/M = 0.5482$ qiymatigacha o‘xshashligi ham ko‘rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi. Matematik fizika, hisoblash matematikasi va relyativistik astrofizikaning zamonaviy isbotlangan usullarini qo‘llash bilan izoxlanadi. Natijalar qat‘iy ravishda gravitatsiyaning metrik nazariyalari va nazariy fizikaning matematik apparati doirasida olingan.

Hisoblashning zamonaviy raqamli va analitik usullari ham qoʻllanilgan va natijalar mavjud kuzatuv maʼlumotlari va boshqa mualliflarning natijalari bilan taqqoslangan. Dissertatsiya ishining xulosalari kompakt obʼektlar astrofizikasining asosiy qoidalariga mos keladi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, ishlab chiqilgan model qora oʻraning magnit va elektr zaryadlarining taʼsirini aylanuvchi qora oʻraning aylanish taʼsiridan ajratishning asosiy mexanizmlarini shakllantirish imkonini berishi bilan aniqlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ishlab chiqilgan matematik modellar va olingan natijalar LIGO, Virgo va EHT teleskoplarining kuzatuv maʼlumotlaridan foydalangan holda qora oʻralar parametrlari va tortishishning alternativ nazariyalari uchun aniqroq chegara qiymatlarini olish uchun ishlatilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Modernizatsiyalangan gravitatsiya nazariyasida elektromagnit maydon va zaryadlangan zarrachalar harakatining ishlab chiqilgan matematik modellari asosida:

magnitlangan zarrachalarning harakatlanish xususiyati va magnit effektlari xitoylik olimlar tomonidan Shanxaydagi Fudan universitetida (FU) ishlatilgan (Fu, Xitoy, 2023-yil 3-fevral). Natijasida, zarrachalarning magnit zaryadining qiymati va bu zarralar orbitalaridagi deformatsiyalangan fazo effektlari hisoblab chiqilgan;

zaryadlangan zarrachalar harakati boʻyicha natijalar xorijiy tadqiqotchilarning ishlarida qoʻllanilgan, magnitlangan zarrachalarning aylanadigan qora oʻra atrofidagi taʼsirini tavsiflash uchun yuqori impakt faktorli xorijiy jurnallarda chop etilgan 20 dan ortiq ilmiy maqolalarda (The Astrophysical Journal, 2022; V.940: id 166, Web-Sc, IF-5.874; Physics of Dark Universe, 2022, V.35: id100946, Web-Sc, IF-4.92; European Physical Journal Plus, 2022; V.137: id 176, Web-Sc, IF-3.758; Astrofizika jurnali, 2022; V.925: id 158, Web-Sc, IF-5.874 va boshqalar) foydalanilgan. Ilmiy natijalarning qoʻllanilishi, modernizatsiyalangan gravitatsiya nazariyalari doirasida elektromagnit maydon va magnitlangan zarralarning kompakt oʻbektlar atrofidagi harakati haqida maʼlumot olingan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqotning asosiy natijalari 4 ta xalqaro va 3 ta Respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyalarda maʼruzalar qilinib, tegishli muhokamalardan oʻtkazilgan.

Tadqiqot natijalarining eʼlon qilinganligi. Tadqiqot mavzusi boʻyicha jami 12 ta ilmiy ish, jumladan Oʻzbekiston Respublikasi Oliy taʼlim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etgan ilmiy nashrlar roʻyxatida 5 ta ilmiy maqola (1 ta respublika va 4 ta xorijiy jurnallarda) chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, toʻrt bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar roʻyxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 98 bet.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida mavzusining dolzarbligi, zarurati, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yoʻnalishlariga bogʻliqligi, muammoning oʻrganilganlik darajasi, dissertatsiya bajarilgan oliy taʼlim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bogʻliqligi va tadqiqotning maqsadi, vazifalari, obʻyekti, predmeti, usullari, ilmiy yangiligi, amaliy natijasi, ishonchliligi, natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati, natijalarining amaliyotga joriy qilinishi, natijalarining aprotatsiyasi, natijalarining eʼlon qilinishi hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi toʻgʻrisida qisqacha maʼlumotlar keltirilgan.

“**Qora oʻralar atrofida zarrachalar dinamikasi boʻyicha adabiyotlar sharhi**” deb nomlangan birinchi bobda zarrachalar dinamikasi va oʻralar yaqinidagi elektromagnit maydon sohasidagi tadqiqotlar haqida umumiy maʼlumot berilgan. Ushbu bobda non-Kerr qora oʻralari atrofida zarrachalarning harakati boʻyicha tadqiqotlar koʻrib chiqilgan. Shuningdek, Reissner-Nordström qora oʻraning atrofida fazo-vaqt tuzilishini oʻrganish boʻyicha adabiyotlar sharhi keltirilgan.

Umumiy nisbiylik nazariyasi yoki gravitatsiyaning alternativ nazariyalari doirasida kvazi-davriy tebranishlar (QPO) modellari boʻyicha tadqiqotlarni koʻrib chiqish amalga oshirilgan.

“**Zaryadlangan zarrachalarning parametrlangan qora oʻralar atrofida harakati**” deb nomlangan ikkinchi bobda Maxwell vakuum tenglamalarining aniq yechimlari va bir jinsli magnit maydonga joylashgan aylanadigan qora oʻraning fazo-vaqtidagi zaryadlangan zarrachalar dinamikasi oʻrganilgan.

Standart Boyer-Lindquist koordinatalarida aylanuvchi qora oʻra atrofidagi deformatsiyalangan fazo-vaqt metrikasi quyidagi koʻrinishda boʻladi

$$ds^2 = g_{00}dt^2 + g_{11}dr^2 + g_{33}d\varphi^2 + 2g_{03}dtd\varphi \quad (1)$$

$$g_{00} = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2}\right)(1 + h),$$

$$g_{11} = \frac{\Sigma^2(1 + h)}{\Delta + a^2h\sin^2\theta}, \quad g_{22} = \Sigma^2, \quad (2)$$

$$g_{33} = \sin^2\theta \left[\Sigma^2 + \frac{a^2(\Sigma^2 + 2Mr)\sin^2\theta}{\Sigma^2} (1 + h) \right],$$

$$g_{03} = -\frac{2aMr\sin^2\theta}{\Sigma^2} (1 + h)$$

$$\begin{aligned}\Sigma^2 &= r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \\ \Delta &= r^2 - 2Mr + a^2, \\ h &= \frac{\epsilon M^3 r}{\Sigma^4}.\end{aligned}\tag{3}$$

Deformatsiyalangan aylanuvchi qora o'ra atrofidagi elektromagnit maydonning 4- o'lchovli potentsiali A_m quyidagi ko'rinishga ega

$$\begin{aligned}A_0 &= -aB \frac{\Sigma^2 - 2Mr + Mr \sin^2 \theta}{\Sigma^2} (1 + h), \\ A_1 &= A_2 = 0, \\ A_3 &= \frac{1}{2} B \sin^2 \theta \times \left[\Sigma^2 + \frac{(2Mr + \Sigma^2) \sin^2 \theta - 4Mr}{\Sigma^2} a^2 (1 + h) \right]\end{aligned}\tag{4}$$

Bu yerda B - tashqi asimptotik bir jinsli magnit maydonning kattaligi.

Tashqi magnit maydondagi aksial- simmetrik qora o'ra atrofidagi zaryadlangan zarrachalar dinamikasi Gamilton-Jakobi tenglamasi bilan aniqlanadi

$$g^{\mu\nu} \left(\frac{\partial S}{\partial x^\mu} + eA_\mu \right) \left(\frac{\partial S}{\partial x^\nu} + eA_\nu \right) = -m^2\tag{5}$$

bu yerda e va m - zaryadlangan zarrachaning zaryadi va massasi, S - gravitatsiya maydonidagi zarra uchun ta'sir. t va φ Killing o'zgaruvchilari bo'lgani uchun biz ta'sirni quyidagi shaklda yozishimiz mumkin

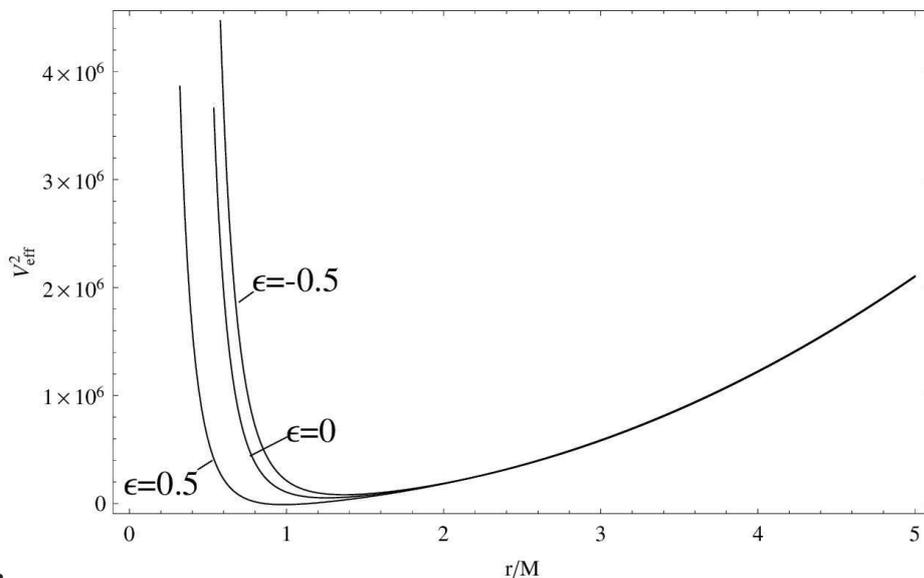
$$S = -\mathcal{E}t + \mathcal{L}_\varphi + S_{r\theta}(r, \theta)\tag{6}$$

bu yerda saqlanuvchan kattalilar E va L - miqdorlar cheksizlikdagi sinov zarrasining energiyasi va burchak momentidir. Bu tenglamadagi o'zgaruvchilarni ekvatorial tekislikda $\theta = \frac{\pi}{2}$ deb olib, radial harakat tenglamasini quyidagicha olishimiz mumkin

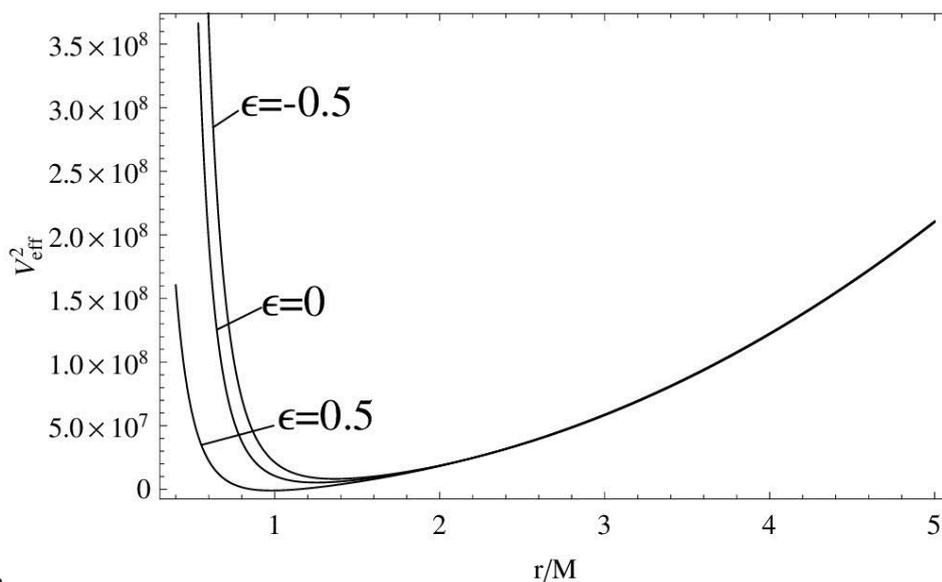
$$\left(\frac{d\rho}{ds} \right) = \mathcal{E}^2 - 1 - 2V_{eff}^2\tag{7}$$

1-rasmda keltirilgan effektiv potentsialning radial bog'liqligi bizga kuchli magnit maydon va deformatsiya parametri mavjudligida zaryadlangan zarrachaning ekvatorial tekislikda radial harakatining o'zgarishini ko'rsatadi. Magnit parametr zaryadlangan zarrachalarning minimal markaziy obyektga siljitadi. Deformatsiya parametrining ta'siri o'rganildi markaziy ob'ekt yaqinida

kuchayadi, bu radial koordinata ortishi bilan fazo-vaqt metrik tensorining kuchli parchalanish bilan bog‘liq.



a.



b.

1-rasm. Zaryadlangan zarrachaning ekvatorial tekislikda aylanuvchi Kerr qora o‘ra atrofidagi radial harakatining effektiv potensialiga bog‘liqligi. a -rasm $b = 10^3$ va $a = 0.99$ bo‘lganda deyarli qora o‘ra holatiga mos keladi, b-rasm esa $b = 10^4$ bo‘lgan holatda mos keladi.

Shuningdek, ushbu bobda aylanuvchi non-Kerr qora o‘ra atrofida zaryadlangan zarrachalarning barqaror doiraviy orbitalarining radiusiga magnit, aylanish va deformatsiya parametrlarining ta’siri o‘rganiladi. Qora o‘raning magnit maydoni va burchak momentumining oshishi barqaror aylana orbitalarining radiusini kamaytiradi. Deformatsiya parametrining qiymati manfiy bo‘lsa, sinov zarralarining doiraviy orbitalarining radiusi deformatsiyalanmagan holat uchun

birdan kattaroq bo'ladi. Deformatsiya parametrining musbat qiymatlari uchun doiraviy orbitalarning radiusi kamayadi.

Qora o'ralar atrofidagi akkretsiya disklarida ichki barqaror doiraviy orbitalarning radiusini o'lchash deformatsiya parametrining raqamli qiymatlari bo'yicha alternativ cheklovlarni ham ta'minlashi mumkin. Akkretsiya diskining kuzatilgan xususiyatlari bilan bog'liq barcha astrofizik miqdorlarni qora o'raning fazo-vaqt metrikasidan olishimiz mumkin. Yaqin infraqizil yoki rentgen diapazonlarida kuzatuvlar qora o'ralarning aylanishi haqida muhim ma'lumotlarni taqdim etadi. Ichki barqaror doiraviy orbitalarning kuzatilgan radiuslarini $V_{eff}''(r) < 0$ tengsizlikka $a = 0$ shart bilan almashtirish va yuqori chegarani olish uchun uni deformatsiya parametri ε bo'yicha sonli yechishimiz mumkin va $\varepsilon < 22$ deformatsiya parametri ko'rinishda.

“Modernizatsiyalangan gravitatsiya maydonida magnitlangan zarrachalarning qora o'ra atrofida harakati” deb nomlangan uchinchi bobda magnitlangan zarrachalarning Reissner-Nordström qora o'ra atrofida harakatlanish dinamikasi o'rganildi. Zaryadlangan qora o'raning elektromagnit maydonining magnitlangan zarrachalar orbitalariga ta'siri ham o'rganilib, olingan natijalar Kerr qora o'rasining atrofidagi zarrachalar dinamikasi bilan taqqoslandi. Bundan tashqari, magnitlangan zarrachalarning magnit va elektr zaryadlangan Reissner-Nordström qora o'ralari atrofida to'qnashuvi o'rganildi.

Elektr zaryadlangan Reissner-Nordström qora o'ra holatida qora o'raning elektr zaryadi va magnitlangan zarrachalarning dipol momenti o'rtasida o'zaro ta'sir yo'qligi sababli, qora o'ra tashqi asimptotik bir jinsli magnitga maydonda o'rganildi. Doiraviy orbitalar uchun magnitlangan zarrachalarning solishtirma energiyasi va burchak impulsi qora o'ra zaryadi va tashqi magnit maydon mavjud bo'lganda kamayishi ko'rsatilgan. Bundan tashqari, magnitlangan zarrachalarning aylana orbitalarining radiusi Reissner-Nordström qora o'raning elektr zaryadining ortishi bilan kamayadi, musbat magnit ulanish parametri esa aylana orbitalari radiusining oshishiga olib keladi.

Magnitlangan zarrachalarning magnit zaryadlangan Reissner-Nordström qora o'ra atrofidagi harakati o'rganilgan. Ichki barqaror doiraviy orbitasining radiusi magnit zaryadning ham, magnit parametrning ham o'zaro ta'sirining yuqori chegarasigacha kamayib borishi ko'rsatilgan, bu esa magnit maydon o'zaro ta'sirlashganda, Lorents kuchi oshgani sababli magnit zarralarini doiraviy orbitadan chiqib ketishiga olib keladi.

Reissner-Nordström qora o'raning elektr va magnit zaryadlarining magnitlangan zarrachalar dinamikasiga Kerr qora o'ralari aylanishining ta'siri o'rtasidagi farq ham ko'rib chiqildi. Supermassiv qora o'ra Sgr A* atrofida aylanadigan magnetar SGR (PSR) J1745-2900 magnit o'zaro ta'sir parametri $b = 0.716$ va parametr $b = 10.2$ bo'lgan sinov magnitlangan zarracha sifatida qaraldi.

Sgr A* atrofidagi uch parametrning magnit dinamikasiga ta'sirini taqqoslash shuni ko'rsatdiki, Reissner-Nordström qora o'raning magnit zaryadi aylanayotgan Kerr qora o'raning aylanish parametrini $a/M < 0.82$ qiymatigacha o'xshashi mumkin. Tashqi magnit maydon Reissner-Nordström qora o'rasining

magnit zaryadi $Q_m/M = 0.4465$ qiymatigacha o'xshashi mumkin. Qora o'raning elektr zaryadi qora o'raning magnit zaryadi $Q_m/M = 0.5482$ qiymatigacha o'xshashligi ham ko'rsatilgan.

Qora o'raning elektr zaryadi fazo-vaqt magnitlangan zarrachaning dinamikasiga bog'liq bo'ladi, magnit zaryadning ta'siri esa fazodan ham, elektromagnit o'zaro ta'sirdan ham kelib chiqadi. Biroq, neytral zarrachaning harakati holatida, Reissner-Nordström qora o'ralarining magnit va elektr zaryadlarining ta'siri butunlay ekvivalentdir.

Shunday xulosaga kelamizki, magnit maydonning magnitlangan zarrachaning magnit dipol momenti bilan o'zaro ta'siri qora o'ra aylanish parametrining simulyatsiya qilingan qiymatining oshishiga qarshi ta'sir qiladi va SgrA * ning yaqin muhitida kuzatiladigan radiopulsarlar. Qora o'ra parametrlari va alternativ gravitatsiya bo'yicha yaxshiroq chegaralarni olish uchun ishlatilishi mumkin.

“Qora materiya bilan o'ralgan regulyar qora o'ra atrofidagi astrofizik jarayonlar” deb nomlangan to'rtinchi bobda asimptotik bir jinsli tashqi magnit maydonda regulyar Bardeen-Kiselev qora o'rasi (RBKBH) atrofida neytral va elektr zaryadlangan sinov zarralarining dinamikasi ko'rsatilgan va soyalar, kvazi-normal modlar (QNM) va kvazi-davriy tebranishlarni (QPO) o'rganish orqali tahlil qilindi.

Bardeening yechimi kuchsiz energiya holatni taminlaydigan muntazam qora o'rasifatida ifodaladi va Einstein gravitatsiyasini chiziqli bo'lmagan elektrdinamika bilan minimal bog'lash orqali olinadi

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4 x \sqrt{-g} (R - \mathcal{L}(F) + \mathcal{L}_m) \quad (8)$$

$$F = \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad F_{\mu\nu} = 2\nabla_{[\mu} A_{\nu]}, \quad (9)$$

$$\mathcal{L}(F) = \frac{3}{2sg^2} \left(\frac{\sqrt{2g^2 F}}{1 + \sqrt{2g^2 F}} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (10)$$

Regulyar Bardeen-Kiselev qora o'ralari uchun yechim quyidagi shaklga ega:

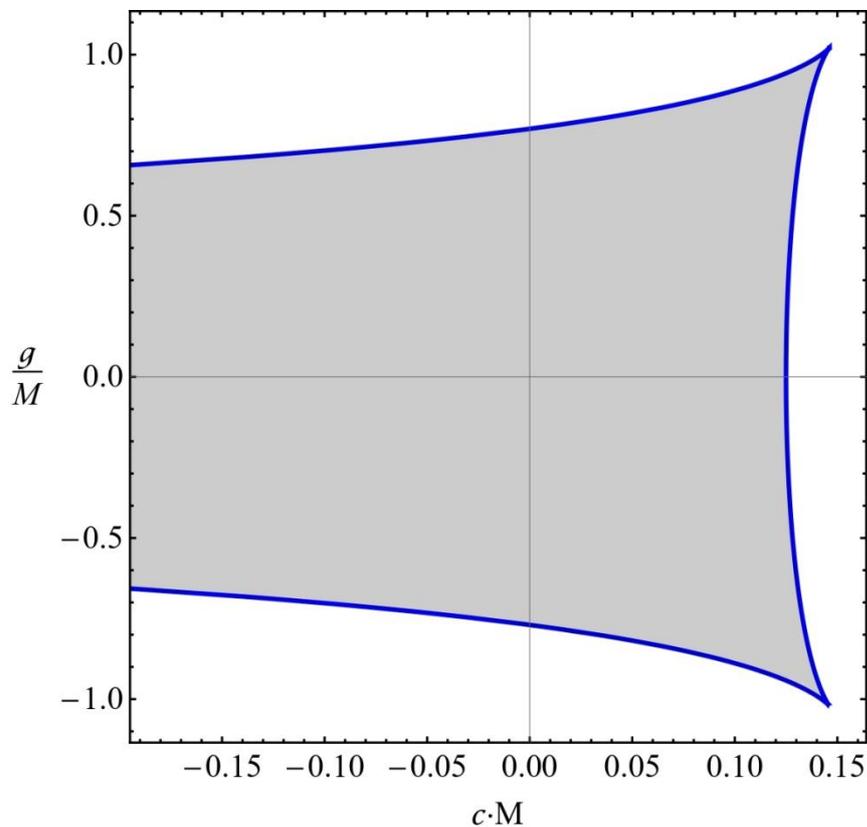
$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{1}{f(r)}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (11)$$

$$f(r) = 1 - \frac{2Mr^2}{(r^2 + g^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{c}{r^{3\omega_q+1}} \quad (12)$$

Bu yerda M - qora o'raning umumiy massasi, ω_q - holat parametri $-1 < \omega_q < -1/3$ va ρ_q - zichlik, har doim musbat va $\rho_q = -3\omega_q(c/2)/r^{3(1+\omega_q)}$ va $c > 0$ - normalizatsiya faktor. $g = c = 0$ uchun Schwarzschild

yechimiga, $c = 0$ uchun esa regulyar Bardeen yechimiga aylanadi. $\omega_q = -1$ parametr bilan fazo $\Lambda = 3c$ bo'lgan anti-de Sitter hisoblanadi.

2-rasmda, qora o'ra magnit zaryadining qiymatlari va $\omega_q = -\frac{2}{3}$ parametri keltirilgan. Bo'yalgan maydon magnit zaryadining qiymatlariga va $\omega_q = -\frac{2}{3}$ ga mos keladigan c parametriga mos keladi, bunda qora o'ra gorizonti mavjudligini ko'rish mumkin. Bo'yalgan maydondan tashqarida (tashqi yoki kvintessensial yoki kosmologik)gorizont yo'q. $g = 0$ da c ning ekstremal qiymati $c_{extr} = 1/8$,ga teng va bu qiymat magnit zaryadning o'sishi bilan bir oz ortadi va $c = 0.15$ qiymatiga yetadi. Xuddi shunday, Bardeen qora o'ra magnit zaryadining ekstremumi kvintessensial maydon bo'lmaganda $g = (4M)/(3\sqrt{3}) \approx 0.7698M$ ga teng. Parametr c o'zining ekstremal qiymatiga oshishi bilan ekstremal magnit zaryad $g = M$ qiymatiga ega bo'ladi.



2-rasm. Qora o'ra gorizontining mavjudligi uchun magnit zaryad va kvintessensial maydon parametrlari o'rtasidagi bog'liqlik. Kulrang maydon magnit zaryadning qiymatlarini va qora o'ra gorizonti mavjudligining kvintessensial parametrlarini ko'rsatadi. Chiziqlar g va c parametrlarining ekstremal qiymatlariga mos keladi.

Shuningdek, ushbu bobda biz RBKBH atrofida harakatlanadigan neytral zarralar dinamikasini o'rgandik. Normalizatsiya parametri c , Bardeen qora o'ra magnit zaryadi g va holat parametri ω_q tenglamasining zarrachalar dinamikasiga ta'siri o'rganildi. Qora o'ra metrikasi uchun skalyar invariantlarni (Ricci va Kretschman skalyarlari) hisoblash amalga oshirilib, RBKBH yaqinidagi fazo-vaqt strukturasi tahlil qilindi. Qayd etilishicha, bu skalyarlarning barchasi qora o'ra markazida

yaxshi aniqlangan, shuning uchun egrilik singulyarligi yo‘q va c qiymati oshgani sayin qora o‘ra markazidagi skalyar invariantlar ham ortadi.

Qora o‘raning gorizontining tuzilish tahlili ham o‘tkazildi. Normalizatsiya parametri c qiymati oshishi bilan qora o‘ra gorizonti kattalashdi. Bundan tashqari, qora o‘ra magnit zaryadining katta qiymatlarida uning gorizonti kichikroq bo‘ldi. Xususiyy energiya va burchak momentining radial harakati tahlil qilish shuni ko‘rsatdiki, normalizatsiya parametrining ortishi (kamayishi) bilan zarrachaning o‘ziga xos burchak momenti ortadi (kamayadi), c ning ortishi zarrachaning o‘ziga xos burchak momenti ham oshadi. Shuningdek, c qiymatining ortishi (pasayishi) bilan zarrachaning solishtirma energiyasi kamayishi (ortishi) ko‘rsatilgan.

Qora o‘ra atrofida harakatlanuvchi zarrachalarning ISCO radiusi metrikaning parametrlariga bog‘liqligi o‘rganildi. c ning katta qiymatlari uchun ISCO radiusi ortadi. Bundan tashqari, g ning qiymati ortishi bilan ISCO radiusi kamayadi, ya‘ni g gravitatsiya kuchi manbai kabi ta‘sir, zarrachani markaziga yaqinlashtiradi. Bundan tashqari, $-1 < \omega_q < -1/3$ katta qiymatlari uchun ISCO radiusi kichikroq bo‘ladi. Bu shuni ko‘rsatadiki, kvintessensial skalyar maydon qora o‘ra markaziga zarralarni tortadi.

XULOSALAR

“Astrofizik qora o‘ralar atrofida zarralar” mavzusidagi falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Birinchi marta tashqi asimptotik bir jinsli magnit maydonda aylanuvchi non-Kerr qora o‘ra atrofidagi elektromagnit maydon uchun aniq analitik yechimlar olindi. Elektr va magnit maydonlar deformatsiya parametrining o‘zgarishiga tasiri, induktsiyalangan elektr maydoni esa deformatsiya parametriga chiziqli bog‘liqligi va magnit maydon kvadratik ekanligi ko‘rsatildi.
2. Ko‘rsatilgandek, deformatsiya parametrining musbat qiymatining ortishi doiraviy orbitalari radiusining pasayishiga olib keladi. Kuzatish ma‘lumotlarini nazariy natijalar bilan qiyosiy tahlil qilishdan deformatsiya parametrining yuqori chegarasi $\varepsilon < 22$ shaklda aniqlangan.
3. Magnit va elektr zaryadlari nolga teng bo‘lmagan qora o‘ra yaqinidagi magnitlangan zarrachalarning dinamikasini tasvirlash uchun matematik model ishlab chiqildi. Doiraviy orbitalarda magnitlangan zarrachalarning energiyasi va burchak impulsi qora o‘ra zaryadi va tashqi magnit maydon mavjud bo‘lganda kamayishi ko‘rsatildi.
4. Magnitlangan zarrachalar to‘qnashuvida massa markazining energiyasi qora o‘raning elektr hamda magnit zaryadlari ortishi bilan ortib borishi ko‘rsatildi. To‘qnashayotgan ikkita magnitlangan zarrachaning magnit dipol momentlari qarama-qarshi yo‘nalganida, massa markazining energiyasi markaziy qora o‘radan uzoqlashgan sari kamayib boradi.
5. Regulyar qora o‘ra atrofidagi neytral zarrachalar dinamikasini qorong‘u materiya ishtirokida tasvirlash uchun model ishlab chiqildi. Kvintessensiya

parametrining ortishi (kamayishi) bilan zarrachaning energiyasi va burchak momenti ortishi (kamayishi) ko'rsatilgan. Kvintessens skalyar maydoni regulyar qora o'raning gravitatsion maydoni tabiati uchun muhim ekanligi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ТИИИМСХ".**

**ИНСТИТУТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

ЖУРАЕВА НОЗИМА БОБОМУРОД ҚИЗИ

ЧАСТИЦЫ В ОКРЕСТНОСТИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЧЕРНЫХ ДЫР

**01.03.01-Астрономия
01.04.02 – Теоретическая физика**

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

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № В2022.3.PhD/FM756.

Диссертация выполнена в институте фундаментальных и прикладных исследований при НИУ "ТИИМСХ".

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

Научный руководитель: **Абдужаббаров Ахмаджон Адилжанович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шайматов Санжар Рузимуротович**
доктор физико-математических наук, снс

Хугаев Аваз Васильевич
кандидат физико-математических наук

Ведущая организация: Самаркандский государственный университет имени Шарафа Рашидова

Защита диссертации состоится «__» _____ 2023 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 при Института фундаментальных и прикладных исследований национального исследовательского университета "ТИИМСХ". Адрес: 100000, г.Ташкент, улица Кори Ниязова 39, Тел.: +998 71 237-09-61; e-mail: info@ifar.uz

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Института фундаментальных и прикладных исследований Национального исследовательского университета "ТИИМСХ". (регистрационный номер ____). С диссертацией можно ознакомиться в [Библиотеке](#) Института фундаментальных и прикладных исследований Национального исследовательского университета "ТИИМСХ". Адрес: 100000, г.Ташкент, улица Кори Ниязова 39, Тел.: +998 71 237-09-61

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2023 г.

(протокол рассылки № __ от «__» _____ 2023 г.)

А.Р. Хаётов
Заместитель председателя Научного совета
по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Э. Х. Каримбаев
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней
доктор философии (PhD) ф.-м.н.

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Разработка и усовершенствование математических моделей различных астрофизических процессов в окрестности черных дыр является одной из самых востребованных задач современной релятивистской астрофизики. Революционные открытия за последние десять лет в наблюдаемой астрономии ускорили темп развития теоретических и математических моделей астрофизических явлений в окрестности компактных гравитационных объектов. С другой стороны, наличие фундаментальных разногласий между общей теорией относительности и квантовой теории требует разработку новых альтернативных и/или модифицированных теорий гравитации. Следовательно, с помощью разработанных математических моделей можно осуществить сравнение теоретических результатов с наблюдательными и экспериментальными данными, а также получить предельные значения на параметры новых теорий и решений.

Попытки разработать альтернативные и модифицированные теории гравитации обоснованы, в частности, космологическими причинами, связанные, например, наличием тёмной материи и тёмной энергии во Вселенной. При этом эти теории строятся так, что общая теория относительности как стандартная теория гравитации остаётся как базовой теорией, но при предполагаемом отклонении от нее в ранней Вселенной и в режиме сильного поля. Таким образом, исследование и моделирование влияния искривленного пространства на астрофизические процессы вблизи компактных объектов, и соответственно, на результаты астрономических наблюдений является актуальным.

В последние годы в нашей стране все больше внимания уделяется развитию актуальных направлений фундаментальных и прикладных исследований. В частности, важным вопросом на сегодняшний день является развитие астрофизических исследований, являющихся одним из перспективных направлений. Основные направления фундаментальных исследований и разработок и их практическое применение для успешного развития науки в нашей стране отражены в Стратегии¹ дальнейшего развития Республики Узбекистан на 2022-2026 годы.

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.

¹ Указ № ПФ-60 Президента Республики Узбекистан от 1 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы.

Построения математической модели электромагнитного поля вокруг черных дыр во внешнем магнитном поле и изучение динамики заряженных частиц были рассмотрены многими учеными, в том числе, английскими (R. Wald, J. Petterson), российскими (А. Захаров, В. Фролов, И. Новиков), немецкими (С. Laemmerzahl, J. Kunz, A. Grezenbach), аргентинскими (L. Amarilla, E. Eiroa), чешскими (M. Kolos, J. Vrba), индийскими (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) и др. Однако, модель электромагнитного поля для деформированной черной дыры в параметризованной метрике не изучена. Также отсутствует исследование круговых орбит заряженных частиц с целью построения модели для аккреционных дисков.

Математическая модель для электромагнитного поля и движения намагниченной частицы в рамках общей теории относительности были изучены такими отечественными учеными, как Б.Ж. Ахмедов, Д.Р. Райимбаев, Б.А.Тошматов и Б.М. Нарзиллоев, и зарубежными авторами такими как R. Wald, F. de Felice, F. Sorge и др. Однако открытым остается вопрос усовершенствования математической модели на случай когда центральный объект является деформированной черной дырой и/или с ненулевым магнитным и электрическим зарядом.

Также остается неизученным влияние темной материи на астрофизические процессы вокруг регулярной черной дыры. Разработка и усовершенствование математических моделей, описывающих динамику частиц вокруг таких объектов, способствуют получению предельных значений для параметров модифицированных и/или альтернативных теорий гравитации.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проекта финансируемого Министерством инновационного развития № F-FA-2021-510 “Исследование ядерного вещества внутри нейтронных звезд в рамках модифицированных моделей гравитации”.

Целью исследования диссертационной работы является разработка и усовершенствование математических моделей и вычислительных алгоритмов для описания динамики частиц в окрестности черных дыр.

Задачи исследования:

поиск точных аналитических решений для электромагнитного поля вокруг вращающейся некерровской черной дыры во внешнем асимптотически однородном магнитном поле;

анализ движения заряженных частиц вокруг вращающейся некерровской черной дыры при наличии внешнего однородного магнитного поля;

исследовать влияние параметра деформации на величину радиуса круговых орбит;

разработать математическую модель для описания динамики намагниченных частиц в окрестности черной дыры с ненулевым магнитным и электрическим зарядами;

исследовать процесс столкновения намагниченных частиц и получить выражения для энергии центра масс;

изучение динамики нейтральных частиц вокруг регулярной черной дыры при наличии темной материи;

исследовать влияние параметра квинтэссенции на орбитальное движение пробных частиц вокруг черных дыр.

Объектом исследования являются астрофизические черные дыры, пробные частицы с ненулевым электрическим и магнитным зарядами, темная материя.

Предметом исследования являются математические модели, численные и аналитические методы решения уравнений для электромагнитного и гравитационного полей, исследование динамики пробных частиц в окрестности компактных гравитационных объектов.

Методы исследования являются методы вычислительной математики, методы теоретической астрофизики, современные методы математической физики, аналитические и численные методы исчисления дифференциальных уравнений для поля и движения частиц.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

получены точные аналитические решения для электромагнитного поля вокруг вращающейся некерровской черной дыры во внешнем асимптотически однородном магнитном поле и показано, что электрическое и магнитное поля чувствительны к изменению параметра деформации;

разработана математическая модель для описания динамики нейтральных частиц вокруг регулярной черной дыры при наличии темной материи;

показано, что увеличение положительного значения параметра деформации приводит к уменьшению радиуса круговых орбит. Обнаружено, что увеличение магнитного поля и углового момента черной дыры уменьшает радиус стабильных круговых орбит и разработана математическая модель для описания динамики намагниченных частиц в окрестности черной дыры Райснера-Нордстрёма с ненулевым магнитным и электрическим зарядами;

показано, что энергия и угловой момент намагниченных частиц на круговых орбитах уменьшаются при наличии заряда черной дыры и внешнего магнитного поля. Более того, радиус минимальной стабильной круговой орбиты намагниченных частиц уменьшается с увеличением электрического заряда черной дыры.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Из сравнительного анализа наблюдательных данных с теоретическими результатами получен верхний предел для параметра деформации в виде $\varepsilon < 22$.

Из сравнительного анализа влияния трех параметров на динамику магнитара вокруг объекта Sgr A* получено, что магнитный заряд черной дыры может имитировать эффект параметра вращения черной дыры до $a/M < 0.82$.

Показано, что внешнее магнитное поле может имитировать магнитный заряд черной дыры до $Q_m/M = 0.4465$. Также показано, что электрический заряд черной дыры может имитировать магнитный заряд до $Q_m/M = 0.5482$.

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием современных апробированных методов математической физики, вычислительной математики и релятивистской астрофизики. Результаты получены строго в рамках математического аппарата метрических теорий гравитации и теоретической физики. Также использованы современные численные и аналитические методы расчета и результаты сравнены с имеющимися данными наблюдений и результатами других авторов. Сформулированные выводы диссертационной работы соответствуют основным положениям астрофизики компактных объектов.

Научная и практическая значимость результатов исследования научная значимость результатов исследования определяется тем, что разработанная модель дает возможность сформулировать основные механизмы разделения эффектов магнитного и электрического зарядов черной дыры от эффектов спина вращающейся черной дыры.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные математические модели и полученные результаты могут быть использованы для получения более точных предельных значений на параметры черных дыр и альтернативных теорий гравитации, используя наблюдательные данные от телескопов LIGO, Virgo и EHT.

Внедрение результатов исследования.

На основе разработанных математических моделей электромагнитного поля и движения заряженных частиц в модифицированной теории гравитации:

свойство движения намагниченных частиц и магнитные эффекты были использованы китайскими учеными Фуданьского университета (ФУ) в городе Шанхай (справка ФУ, Китай, от 3 февраля 2023 г.). В результате рассчитаны значение магнитного заряда частиц и эффекты деформированного пространства, к орбитам этих частиц;

результаты по движению заряженных частиц использованы в работах зарубежных исследователей, в более 20 научных работах, опубликованных в зарубежных журналах с высоким импакт фактором, использованы для характеристики эффектов намагниченных частиц вокруг вращающейся черной дыры, а также для расчета скорости аккрецирующего вещества (The Astrophysical Journal, 2022; V.940: id 166, Web-Sc, IF-5.874; Physics of the Dark Universe, 2022, V.35: id 100946, Web-Sc, IF-4.92; European Physical Journal

Plus, 2022; V.137: id 176, Web-Sc, IF-3.758; The Astrophysical Journal, 2022; V.925: id 158, Web-Sc, IF-5.874 и др).

В результате получены информации об электромагнитном поле и движении намагниченных частиц вокруг компактных объектов в рамках модифицированных теорий гравитации.

Апробация результатов исследования.

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

Опубликованность результатов исследования.

По теме диссертационной работы опубликованы 5 научных работ в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 4 зарубежных.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 98 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации указывается актуальность и необходимость темы, соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и техники республики, степень изученности проблемы, ее связь с планами исследований высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация, и цель, задачи, объект исследования, краткие сведения о предмете, методах, научной новизне, практическом результате, достоверности, научной и практической значимости результатов, введении результатов на практике, утверждение результатов, публикация результатов, а также структура и объем диссертации.

В первой главе под названием **“Литературный обзор динамики частиц в окрестности черных дыр”** приводится обзор исследований в области динамики частиц и электромагнитного поля в окрестности черных дыр. В данной главе приведены обзоры исследований по движению частиц вокруг вращающейся некерровской черной дыры. Также обзор по изучение структуры пространство-времени вокруг черной дыры Райснера - Нордстрёма.

Проведен обзор исследований по моделям квазипериодических осцилляций (КПО) в рамках общей теории относительности или альтернативных теорий гравитации.

Во второй главе под названием **“Движение заряженных частиц вокруг параметризованных черных дыр”** исследованы точные решения вакуумных уравнений Максвелла и динамика заряженных частиц в пространстве-времени невращающейся черной дыры, погруженной в однородное магнитное поле.

Деформированная метрика пространства-времени вокруг вращающейся черной дыры в стандартных координатах Бойера-Линдквиста имеет вид

$$ds^2 = g_{00}dt^2 + g_{11}dr^2 + g_{33}d\varphi^2 + 2g_{03}dtd\varphi \quad (1)$$

где

$$g_{00} = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2}\right)(1+h),$$

$$g_{11} = \frac{\Sigma^2(1+h)}{\Delta + a^2h\sin^2\theta}, \quad g_{22} = \Sigma^2,$$

$$g_{33} = \sin^2\theta \left[\Sigma^2 + \frac{a^2(\Sigma^2 + 2Mr)\sin^2\theta}{\Sigma^2} (1+h) \right], \quad (2)$$

$$g_{03} = -\frac{2aMr\sin^2\theta}{\Sigma^2}(1+h)$$

с

$$\Sigma^2 = r^2 + a^2\cos^2\theta,$$

$$\Delta = r^2 - 2Mr + a^2,$$

$$h = \frac{\epsilon M^3 r}{\Sigma^4}.$$

(3)

4-хмерный потенциал A_μ электромагнитного поля вокруг деформированной вращающейся черной дыры имеет следующий вид

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

$$A_1 = A_2 = 0,$$

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

где B – величина внешнего асимптотически однородного магнитного поля. Динамика заряженных частиц в окрестности аксиально-симметричной черной дыры во внешнем магнитном поле определяется уравнением Гамильтона-Якоби

$$g^{\mu\nu} \left(\frac{\partial S}{\partial x^\mu} + eA_\mu \right) \left(\frac{\partial S}{\partial x^\nu} + eA_\nu \right) = -m^2 \quad (5)$$

где e и m – заряд и масса заряженной частицы, S – действие для частицы в гравитационном поле. Поскольку t и φ являются переменными Киллинга можно записать действие в виде

$$S = -\mathcal{E}t + \mathcal{L}_\varphi + S_{r\theta}(r, \theta) \quad (6)$$

где сохраняющиеся величины E и L – это энергия и угловой момент пробной частицы на бесконечности. Можно легко разделить переменные в этом уравнении в экваториальной плоскости $\theta = \frac{\pi}{2}$ и получить уравнение для радиального движения

$$\left(\frac{d\rho}{ds}\right)^2 = \mathcal{E}^2 - 1 - 2V_{eff}^2 \quad (7)$$

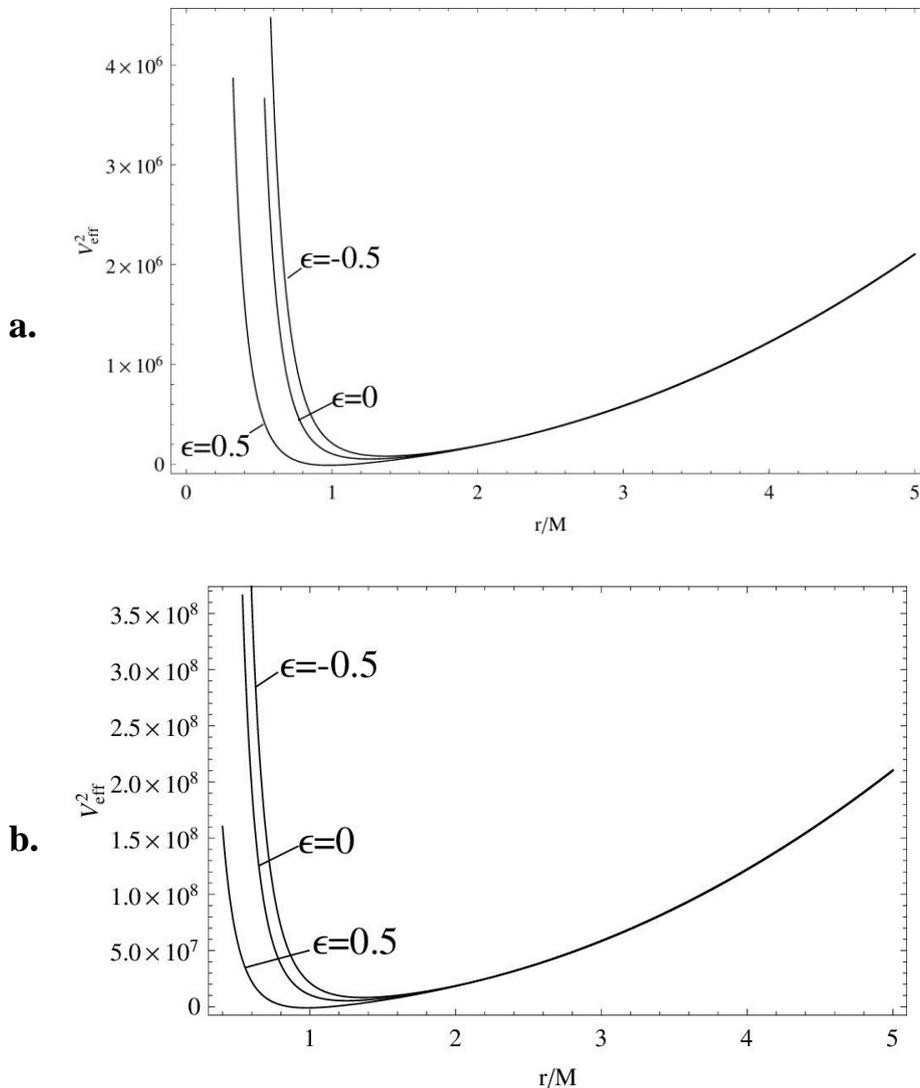


Рис.1. Радиальная зависимость эффективного потенциала радиального движения заряженной частицы вокруг вращающейся некерровской черной дыры в экваториальной плоскости. Рисунки соответствуют случаю почти экстремальной черной дыры, когда $a = 0.99$. Рисунок а соответствует случаю, когда $b = 10^3$, а рисунок б соответствует случаю $b = 10^4$.

Радиальная зависимость эффективного потенциала, представленная на Рис. 1, указывает на модификацию радиального движения заряженной частицы в экваториальной плоскости в присутствии сильного магнитного поля и параметра деформации. Магнитный параметр отвечает за смещение минимального расстояния заряженных частиц к центральному объекту. Влияние деформационного параметра сильно вблизи центрального объекта, что связано с сильным распадом пространственно-временного метрического тензора как $1/r^3$ с увеличением радиальной координаты.

Также в этой главе подробно изучено влияние магнитных, вращательных и деформационных параметров на радиус стабильных круговых орбит заряженных частиц вокруг вращающейся некерровской черной дыры. Увеличение магнитного поля и углового момента черной дыры уменьшает радиус стабильных круговых орбит. При отрицательном значении параметра деформации отрицательным, радиус круговых орбит пробных частиц становится больше единицы для недеформированного случая. При положительных значениях параметра деформации радиус круговых орбит уменьшается.

Измерения радиуса внутренних стабильных круговых орбит в аккреционных дисках вокруг черных дыр также могут дать альтернативные ограничения на численные значения параметра деформации. Все астрофизические величины, связанные с наблюдаемыми свойствами аккреционного диска, могут быть получены из метрики пространства-времени черной дыры. Наблюдения в ближнем инфракрасном или рентгеновском диапазонах дали важную информацию о вращении черных дыр. Можно подставить наблюдаемые значения радиуса внутренних стабильных круговых орбит в неравенство $V''_{eff}(r) < 0$ с условием $a = 0$ и численно решить его относительно параметра деформации ε для того, чтобы получить верхний предел для параметра деформации в виде $\varepsilon < 22$.

В третьей главе под названием “**Движение намагниченных частиц вокруг черной дыры в условиях модифицированной гравитации**” исследована динамика движения намагниченных частиц вокруг черной дыры Райснера-Нордстрёма. Также исследовано влияние электромагнитного поля заряженной черной дыры на орбиты намагниченных частиц и проведено сравнение полученных результатов с динамикой частиц вокруг черной дыры Керра. Кроме того, изучены столкновения намагниченных частиц вокруг как магнитно, так и электрически заряженных черных дыр Райснера-Нордстрёма.

В случае электрически заряженной черной дыры Райснера - Нордстрёма из-за отсутствия взаимодействия между электрическим зарядом черной дыры и дипольным моментом намагниченных частиц предположено, что черная дыра погружена во внешнее асимптотически однородное магнитное поле. Показано, что удельная энергия и угловой момент намагниченных частиц для круговых орбит уменьшаются при наличии заряда черной дыры и внешнего магнитного поля. Более того, радиус круговых орбит намагниченных частиц уменьшается с увеличением электрического

заряда черной дыры Райснера - Нордстрёма, в то время как положительный параметр магнитной связи приводит к увеличению радиуса круговых орбит.

Сформулировано движение намагниченных частиц вокруг магнитно заряженной Райснера - Нордстрёма черной дыры. Показано, что радиус внутренней стабильной круговой орбиты уменьшается с увеличением как магнитного заряда, так и магнитного параметра вплоть до верхнего предела их взаимодействия, который достигается при взаимодействии магнитного поля, из-за преобладания сил Лоренца, которые заставляют намагниченную частицу сходиться с круговых орбит.

Также рассмотрено различие эффектов электрического и магнитного зарядов черной дыры Райснера - Нордстрёма и спина керровских черных дыр на динамику намагниченных частиц. Рассмотрен магнетар SGR (PSR) J1745-2900, вращающийся вокруг сверхмассивной чёрной дыры Sgr A*, как пробную намагниченную частицу с параметром магнитного взаимодействия $b=0.716$ и параметром $\beta=10.2$. Сравнение влияния трех параметров на динамику магнетара вокруг Sgr A* показало, что магнитный заряд черной дыры Райснера - Нордстрёма может имитировать параметр спина вращающейся черной дыры Керра вплоть до $a/M < 0.82$. Внешнее магнитное поле может имитировать магнитный заряд черной дыры Райснера - Нордстрёма до $Q_m/M = 0.4465$. Показано, что электрический заряд черной дыры может имитировать магнитный заряд черной дыры вплоть до $Q_m/M = 0.5482$.

Влияние электрического заряда черной дыры на динамику намагниченной частицы исходит только из пространства-времени, а влияние магнитного заряда исходит как из пространства-времени, так и из электромагнитного взаимодействия. Однако в случае движения нейтральной частицы эффекты магнитного и электрического зарядов черной дыры Райснера - Нордстрёма полностью эквивалентны. Можно сделать вывод, что взаимодействие магнитного поля с магнитным дипольным моментом намагниченной частицы действует против увеличения имитируемого значения параметра спина черной дыры, и радиопульсары, которые будут наблюдаться в близком окружении SgrA*, могут быть использованы для получения лучших ограничений на параметры черной дыры и альтернативной гравитации.

В четвертой главе под названием «**Астрофизические процессы в окрестности регулярной черной дыры окруженной темной материей**» обсуждены динамики как пробных нейтральных, так и электрически заряженных пробных частиц вокруг регулярной черной дыры Бардина-Киселева (РЧДБК), погруженного в асимптотически однородное внешнее магнитное поле, и проведен анализ путем изучения теней, квазинормальных мод (КНМ) и квазипериодических осцилляций (КПО).

Решение Бардина представляется как регулярная черная дыра, удовлетворяющая условию слабой энергии, и получается при минимальном соединении Эйнштейновской гравитации с нелинейной электродинамикой.

(8)

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4 x \sqrt{-g} (R - \mathcal{L}(F) + \mathcal{L}_m)$$

где

$$F = \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad F_{\mu\nu} = 2\nabla_{[\mu} A_{\nu]}, \quad (9)$$

и

$$\mathcal{L}(F) = \frac{3}{2sg^2} \left(\frac{\sqrt{2g^2 F}}{1 + \sqrt{2g^2 F}} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (10)$$

Решение для регулярной черной дыры Бардина-Киселева имеет следующий вид:

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{1}{f(r)}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (11)$$

где

$$f(r) = 1 - \frac{2Mr^2}{(r^2 + g^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{c}{r^{3\omega_q+1}} \quad (12)$$

Здесь M - полная масса черной дыры, ω_q - параметр состояния с $-1 < \omega_q < -1/3$ и ρ_q - плотность, которая всегда положительна $\rho_q = -3\omega_q(c/2)/r^{3(1+\omega_q)}$ и $c > 0$ - нормировочный фактор. При $g = c = 0$ решение переходит в Шварцшильдовское, а при $c = 0$ - в регулярное решение Бардина. При параметре $\omega_q = -1$ пространство представляет собой анти-де-Ситтера с $\Lambda = 3c$.

На рис. 2, представлены значения магнитного заряда ЧД и параметра $\omega_q = -2/3$. Заштрихованная область соответствует значениям магнитного заряда и параметра c , соответствующим $\omega_q = -2/3$, при котором допускаются существование горизонта ЧД. За пределами заштрихованной области не существует (внешнего или квинтэссенциального или космологического) горизонта. Экстремальное значение c при $g = 0$ имеет $c_{\text{extr}} = 1/8$, и это значение немного увеличивается с ростом магнитного заряда и достигает значения $c = 0.15$. Аналогично, экстремум магнитного заряда ЧД Бардина составляет $g = \frac{4M}{3\sqrt{3}} \approx 0,7698M$ в отсутствие квинтэссенциального поля. С увеличением параметра c до своего экстремального значения, экстремальный магнитный заряд достигает значения $g = M$.

Также в этой главе изучена динамика нейтральных частиц, движущихся вокруг РЧДБК. Исследовано влияние параметра нормировки c , магнитного заряда g ЧД Бардина и параметра уравнения состояния ω_q на динамику частиц. Проведены расчеты скалярных инвариантов (скаляров

Риччи и Кретсчмана) для метрики ЧД и проанализирована структура пространства-времени в окрестности РЧДБК. Отмечено, что все эти скаляры хорошо определены в центре ЧД, поэтому сингулярность кривизны отсутствует, а с увеличением значения c скалярные инварианты в центре ЧД также увеличиваются.

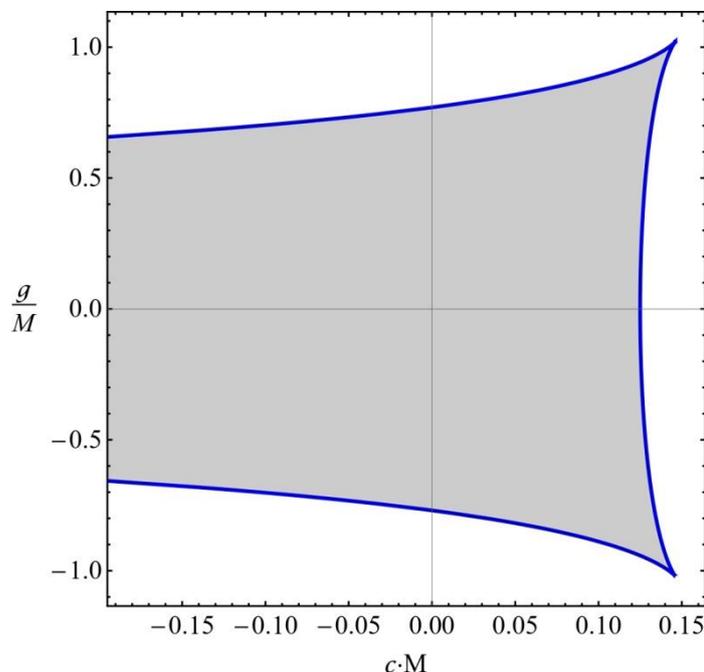


Рис.2. Связь между магнитным зарядом и квинтэссенциальными параметрами поля для существования горизонта ЧД. Область серого цвета показывает значения магнитного заряда и квинтэссенциальных параметров для существования горизонта ЧД. линии соответствуют экстремальным значениям параметров g и c .

Также проведен анализ структуры горизонта ЧД. Горизонт ЧД становится больше с увеличением значения параметра нормировки c . Кроме того, при больших значениях магнитного заряда ЧД его горизонт становится меньше. Анализ радиального профиля удельной энергии и углового момента показывает, что с увеличением (уменьшением) параметра нормировки удельный угловой импульс частицы увеличивается (уменьшается), также с увеличением значения c удельный угловой импульс частицы увеличивается. Также показано, что с увеличением (уменьшением) значения c удельная энергия частицы уменьшается (увеличивается).

Исследована зависимость радиуса ВСКО частиц движущейся вокруг ЧД от параметров метрики. Отмечено, что при больших значениях c радиус ВСКО увеличивается. Кроме того, при увеличении значения g радиус ВСКО уменьшается, что означает, что g действует как источник гравитационной силы и приближает частицу к центральному объекту. Также, при больших значениях $-1 < \omega_q < -\frac{1}{3}$ радиус ВСКО становится меньше. Это показывает,

что скалярное поле квинтэссенции также ответственно за притяжение частиц к центру ЧД.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, выполненных в рамках диссертационной работы «Частицы в окрестности астрофизических черных дыр», сделаны следующие выводы:

1. Впервые получены точные аналитические решения для электромагнитного поля вокруг вращающейся некерровской черной дыры во внешнем асимптотически однородном магнитном поле. Показано, что электрическое и магнитное поля чувствительны к изменению параметра деформации, при этом, индуцированное электрическое поле зависит от параметра деформации линейно, а магнитное поле квадратично.
2. Показано, что увеличение положительного значения параметра деформации приводит к уменьшению радиуса круговых орбит. Из сравнительного анализа наблюдательных данных с теоретическими результатами получен верхний предел для параметра деформации в виде $\varepsilon < 22$.
3. Разработана математическая модель для описания динамики намагниченных частиц в окрестности черной дыры с ненулевым магнитным и электрическим зарядами. Показано, что энергия и угловой момент намагниченных частиц на круговых орбитах уменьшаются при наличии заряда черной дыры и внешнего магнитного поля.
4. Показано, что энергия центра масс при столкновениях намагниченных частиц возрастает с увеличением как электрического, так и магнитного зарядов черной дыры. Установлено, что когда магнитные дипольные моменты двух сталкивающихся намагниченных частиц направлены противоположно, энергия центра масс уменьшается по мере удаления от центральной черной дыры.
5. Разработана модель для описания динамики нейтральных частиц вокруг регулярной черной дыры при наличии темной материи. Установлено, что с увеличением (уменьшением) параметра квинтэссенции энергия и угловой момент частицы увеличиваются (уменьшаются). Обнаружено, что скалярное поле квинтэссенции ответственно за притягательный характер гравитационного поля регулярной черной дыры.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREE AT INSTITUTE OF FUNDAMENTAL AND
APPLIED RESEARCH “TIHAME” NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY**

INSTITUTE OF FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH

JURAEVA NOZIMA BOBOMUROD QIZI

PARTICLES AROUND ASTROPHYSICAL BLACK HOLES

01.03.01 – Astronomy

01.04.02 – Theoretical Physics

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

Tashkent – 2023

The theme of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered by Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2022.3.PhD/FM756.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out the Institute of Fundamental and applies research under "TIAMEE" National Research University.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council (www.ifar.uz) and on the information and education portal at "Zionet" (www.zionet.uz).

Scientific consultant: **Abdujabbarov Ahmadjon Adiljanovich**
Doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents: **Shaymatov Sanjar Ruzimurotovich**
Doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher

Khugaev Avas Vasilyevich
Candidate of physical and mathematical sciences

Leading organization: **Samarkand State University**

The defense of the dissertation will be held on "___" _____ 2023 at ___ in the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/31.03.2022 T/FM.10.4 at the Institute of Fundamental and Applied Research under the National Research University "TIAME" (Address: 100000, Tashkent city, Qori Niyazov Street 39, Institute of Fundamental and Applied Research, Hall 108; tel.: 71 237-09-61.; e-mail: info@ifar.uz)

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the Institute of Fundamental and Applied Research under the National Research University "TIAME" (registered under № ____). (Address: 100000, Tashkent city, 39 Qori Niyazov str., Institute of Fundamental and Applied Research, hall 108; ph.: 71 237-09-61)

The Abstract of the dissertation was distributed on "___" _____, 2023.

(Registry record № ___ dated "___" _____, 2023)

A. R. Hayotov
Vice Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D. Ph.-M.S., Professor

E. Kh. Karimbayev
Scientific Secretary of Scientific Council
on Award of Scientific Degrees
PhD in Ph.-M.S.

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

INTRODUCTION (Annotation of PhD dissertation)

Topicality and demand of the theme of the dissertation. Development and improvement of mathematical models of various astrophysical processes in vicinity of black holes is one of the most demanded tasks of modern relativistic astrophysics. Revolutionary discoveries during last ten years in observable astronomy have accelerated the rate of development of theoretical and mathematical models of astrophysical phenomena in vicinity of compact gravitational objects. On the other hand, the search for a unified field theory in fundamental physics requires the development of new alternative energy or modified gravity theories to the existing general relativity. Comparison of these theories with observational and experimental data and obtaining critical values for parameters of new theories is carried out using mathematical modeling of optical-energetic processes near astrophysical black holes.

Attempts to develop alternative and modified theories of gravity are justified, in particular, by being cosmologically comprehensive, related, for example, to the presence of dark matter and dark energy in the Universe. At the same time, this theory is constructed in such a way that the general theory of relativity as a standard theory becomes the initial one as the initial theory, but when calculating the deviation from it in the early Universe and in the strong field regime. Thus, the study and analysis of the study of curved space in astrophysical research approaches compact objects, and, therefore, the results of astronomical observations are relevant.

In recent years, in our country, more and more attention has been paid to the development of current directions of fundamental and applied research. In particular, the development of astrophysical research, which is one of the promising areas, is an important issue today. The main directions of fundamental research and development and their practical application for the successful development of science in our country are reflected in the Strategy¹ for the further development of the Republic of Uzbekistan from 2022-2026. Therefore, the research of scalarized solutions in higher curvature gravity theories remains one of the urgent issues in the field of fundamental research.

This dissertation work corresponds to the tasks by the following state regulatory documents: Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PD-4947 "On the Strategy of Actions for the Further Development of the Republic of Uzbekistan" dated February 07, 2017, Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PR-2789 "On measures for further improvement of the activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of research activities" dated February 18, 2017 and others.

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

¹ Decree No. PF-60 of the President of the Republic of Uzbekistan dated January 1, 2022 "On the Development Strategy of New Uzbekistan for 2022-2026"

The degree of knowledge of the problem. The construction of a mathematical model of the electromagnetic field around black holes in an external magnetic field and the study of charged particle dynamics have been considered by many scientists, including British (R. Wald, J. Petterson), Russian (A. Zakharov, V. Frolov, I. Novikov), German (C. Laemmerzahl, J. Kunz, A. Grezenbach), Argentinian (L. Amarilla, E. Eiroa), Czech (M. Kolos, J. Vrba), Indian (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil), etc. However, the electromagnetic field model for a deformed black hole in parametrized metric has not been studied. Also there is no study of circular orbits of charged particles to build a model for accretion disks.

The mathematical model of the electromagnetic field and the movement of magnetized particles in it was developed within the general theory of relativity by local scientists B.J. Ahmedov, A.A. Abdujabbarov, B.A. Toshmatov, and others, and Western scientists R. Wald, S.R., F. de Felice, F. Sorge, and others. However, the question of improving the mathematical model for the case when the central object is a deformed black hole and/or with a non-zero magnetic and electric charge remains open.

The influence of dark matter on the astrophysical processes around a regular black hole also remains unexplored. The development and improvement of mathematical models describing the dynamics of particles around such objects contribute to obtaining limit values for the parameters of modified and/or alternative theories of gravity.

Connection of the topic of the dissertation topic to the scientific works of higher education and research institutions, where the dissertation is carried out. The dissertation was done in the framework of the scientific projects funded by the Ministry of Innovative Development. F-FA-2021-510 "Investigations of nuclear matter of neutron stars in modified gravity".

The aim of the research is the development and improvement of mathematical models and computational algorithms for describing the dynamics of particles in the vicinity of black holes.

The tasks of the research:

search for exact analytical solutions for the electromagnetic field around a rotating non-Kerr black hole in an external asymptotically homogeneous magnetic field;

analysis of the motion of charged particles around a rotating non-Kerr black hole in the presence of an external uniform magnetic field;

to study the influence of the deformation parameter on the value of the radius of circular orbits;

develop a mathematical model to describe the dynamics of magnetized particles in the vicinity of a black hole with non-zero magnetic and electric charges;

explore the process of collision of magnetized particles and obtain expressions for the energy of the center of mass;

studying the dynamics of neutral particles around a regular black hole in the presence of dark matter;

study the effect of the quintessence parameter on the orbital motion of test particles around black holes.

The object of the research are astrophysical black holes, test particles with nonzero electric and magnetic charges, dark matter.

The subject of the research are mathematical models for studying test particle dynamics near compact gravitational objects, numerical and analytical methods for solving differential equations.

The methods of the research are methods of computational mathematics, methods of theoretical astrophysics, modern methods of mathematical physics, analytical and numerical methods of calculating differential equations for field and particle motion.

The scientific novelty of the research is the following:

exact analytical solutions are obtained for the electromagnetic field around a rotating non-Kerr black hole in an asymptotically homogeneous external magnetic field and it is shown that the electric and magnetic fields are sensitive to changes in the strain parameter;

a mathematical model has been developed to describe the dynamics of neutral particles around a regular black hole in the presence of dark matter;

it is also shown that an increase in the positive value of the deformation parameter leads to a decrease in the radius of circular orbits. It is found that an increase in the magnetic field and angular momentum of a black hole reduces the radius of stable circular orbits and a mathematical model has been developed to describe the dynamics of magnetized particles in the vicinity of a Reissner-Nordström black hole with non-zero magnetic and electric charges;

it is shown that the energy and angular momentum of magnetized particles in circular orbits decrease in the presence of a black hole charge and an external magnetic field. Moreover, the radius of the minimum stable circular orbit of magnetized particles decreases as the electric charge of the black hole increases.

The practical results of the research are the following:

from a comparative analysis of observational data with theoretical results, an upper limit for the strain parameter in the form $\varepsilon < 22$ was obtained;

from a comparative analysis of the influence of three parameters on the dynamics of the magnetar around the object Sgr A*, it was found that the magnetic charge of a black hole can imitate the effect of the black hole rotation parameter up to $a/M < 0.82$;

it is shown that an external magnetic field can imitate the magnetic charge of a black hole up to $Q_m/M = 0.4465$. It is also shown that the electric charge of a black hole can imitate the magnetic charge up to $Q_m/M = 0.5482$. A model of the electromagnetic field around a black hole is built, and solutions of Maxwell's equations are obtained for this model.

The reliability of the research results provided by applying modern proven methods of mathematical physics, computational mathematics, and relativistic astrophysics. The results were obtained strictly within the mathematical apparatus of general relativity and theoretical physics. Modern numerical and analytical methods of calculation are also used, and the results are compared with available

observational data and the results of other authors. The structured conclusions of the thesis correspond to the basic rules of astrophysics of compact objects.

The scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the research results is found that the analysis of parameterized metrics and comparison with specific solutions for black holes can be a useful tool for studying various mathematical models of gravity.

The practical significance of the research results is that they can play a role in the construction of dynamic and stationary space-time constraints of the black hole with the observations of the LISA and EHT telescopes.

Application of the research results. Based on the developed mathematical models of the electromagnetic field and the motion of charged particles in the modified theory of gravity:

scientific results obtained on the motion of magnetized particles and magnetic effects were used by scientists from Fudan University (FU) in Shanghai (FU, China, July 15, 2022 reference);

the magnetic value of the particles and the influence of the deformed space on the orbits of these particles were calculated. Results on the movement of charged particles in the works of foreign researchers, in foreign journals with a high impact factor (Physical Review D, 2022; V.94: Issue 8, Web-Sc, IF-4,804; Astrophysics and Space Science, 2016, V.361: id91, Web-Sc, IF- 1495; 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 and others) are used in more than 20 published scientific papers to describe the effects of magnetized particles around a rotating black hole;

as a result, it is possible to obtain information about the movement of magnetized particles around compact bodies within the framework of modified gravity theories.

Testing of the research results. The research results were reported and discussed at 4 international conferences and 3 local scientific conferences.

Publication of research results. 5 research papers were published on research results, 4 of them – in the international scientific journals recommended by Supreme Attestation Commission at the Ministry of higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and references, all in 98 pages.

CONCLUSIONS

The following conclusions were presented on the basis of research carried out on the topic of “Particles around astrophysical black holes” for the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation:

1. For the first time, exact analytical solutions are obtained for the electromagnetic field around a rotating non-Kerr black hole in an external asymptotically homogeneous magnetic field. It is shown that the electric and

magnetic fields are sensitive to changes in the strain parameter, while the induced electric field depends linearly on the strain parameter, and the magnetic field is quadratic.

2. It is shown that an increase in the positive value of the deformation parameter leads to a decrease in the radius of circular orbits. From a comparative analysis of observational data with theoretical results, an upper limit for the deformation parameter was obtained in the form $\varepsilon < 22$.

3. A mathematical model has been developed to describe the dynamics of magnetized particles in the vicinity of a black hole with nonzero magnetic and electric charges. It is shown that the energy and angular momentum of magnetized particles in circular orbits decrease in the presence of a black hole charge and an external magnetic field.

4. It is shown that the energy of the center of mass in collisions of magnetized particles increases with an increase in both the electric and magnetic charges of the black hole. It has been established that when the magnetic dipole moments of two colliding magnetized particles are directed oppositely, the energy of the center of mass decreases with distance from the central black hole.

5. A model has been developed to describe the dynamics of neutral particles around a regular black hole in the presence of dark matter. It has been established that with an increase (decrease) in the quintessence parameter, the energy and angular momentum of the particle increase (decrease). The quintessence scalar field is found to be responsible for the attractive nature of the gravitational field of a regular black hole.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (part I; I часть)

1. Abdujabbarov A.A., Ahmedov B.J., Jurayeva N.B., Charged-particle motion around a rotating non-Kerr black hole immersed in a uniform magnetic field// Physical Review D, 2013, Vol. 87, Issue 6, id. 064042 (№ 1. Web of Science: IF=5.296).
2. Rayimbaev J.R., Rakhmatov A.S., Jurayeva N.B., Plasma magnetosphere of deformed magnetized neutron star// Astrophysics and Space Science, 2015, Vol.356, pp. 301–308 (№ 1. Web of Science: IF=1.83).
3. Juraeva N., Rayimbayev J., Abdujabbarov A., Ahmedov B., Palvanov S., Distinguishing magnetically and electrically charged Reissner-Nordstrom black holes by magnetized particle motion// European Physical Journal C, 2021, Vol. 81, id 70 (№ 1. Web of Science: IF=4.991).
4. Fattoyev F.J., Tadjimuratov P.S., Jurayeva N.B., On Time Evolution of Force-Free Magnetospheres around a Slowly Rotating Compact Object// Uzbek Journal of Physics, Vol. 23 Iss. 1 pp. 1-7 (2021) (01.00.00 No 5)
5. Juraeva N., Rayimbaev J., Haydarov K., Umaraliyev M., Abdujabbarov A., Constraining spacetime deformation based on astrophysical observations from radio pulsars // Arabian Journal of Mathematics. – Berlin Heidelberg: Springer (Germany), 2022, Vol. 11, pp. 133-139. (№ 1. Web of Science: IF=1.18)

II bo'lim (part II; II часть)

6. Rayimbayev J., Juraeva N., Dynamics of magnetized particles around Reissner-Nordstrom black holes // Proceedings of RAGtime 19-23 October, Opava, Czech Republic S. Hled'ík and Z. Stuchlík, editors, Silesian University in Opava, 2020, pp. 1–11
7. Xudoyberdieva M, Juraeva N.B., Can conformal gravity mimic Kerr black holes // Proceedings of Ingenious Global Thoughts An International Multidisciplinary Scientific Conference Hosted from San Jose, California, November 29th, 2020, pp. 23-24.
8. Juraeva N.B., Xudoyberdieva M., Dependence of critical of radius of stable orbits on particle charge // Proceeding of Global Congress of Contemporary Study-A Multidisciplinary International Scientific Conference Hosted from Pune, M.S. India on 7 th November, 2020, pp. 3-4.
9. Xudoyberdieva M, Juraeva N.B., Kerr-Taub-NUT fazo-vaqtida Penrouse jarayoni // 3rd International Congress of Human and Social Science Researches, Turkey,19-23 November, 2020, pp. 297-300.
10. Juraeva N., Xudoyberdiyeva M., Qora o'raning buzilish jarayoniga magnit maydonning tasiri // Urganch davlat universiteti, O'zbekistonda uchinchi

renesans poydevorini mustahkamlashda yoshlarning o‘rni va roli, ilmiy –amaliy onlayn konferensiya, 2020-yil, 16-dekabr, 114-116 betlar.

11. Juraeva N., Xudoyberdiyeva M., Kurbonov N., Charged particles orbits around regular black holes in magnetic field // O‘zbekiston Milliy universiteti, Fizika fanining rivojida istedadli yoshlarning o‘rni, RIAK-XIII- 2020, Respublika ilmiy anjumani materiali, 2020-yil, 19-may, 174-178 betlar.
12. Жураева Н., Худойбердиева М., Могут ли конформные параметры гравитации имитировать параметр вращения черной дыры кеппа//O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi “Fan va ta’limning rivojlantirishda yoshlarning ” mavzusida Respublika ilmiy va amaliy anjumani, 2020 yil 30-oktabr,33-35 betlar.

“Fan va innovatsiyalar” xalqaro ilmiy jurnali (International scientific journal “Science and Innovation”) tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, ingliz va rus tillaridagi matnlari o‘zaro muvofiqlashtirildi (15.03.2023).

***Bosishga ruxsat etildi 16.03.2023. Qog‘oz o‘lchami 60x84 – 1/16
Hajmi 2,75 b.t. 55 nusxa. Buyurtma № 0074.
TIQXMMI bosmaxonasida chop etildi.
Toshkent 100000, Qori-Niyoziy ko‘chasi 39 uy.***

