

**“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**

**MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI FUNDAMENTAL
VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI**

XUDOYBERDIYEVA MALIKA KAROMAT QIZI

**AKSIAL-SIMMETRIK QORA O‘RALAR ATROFIDA ASTROFIZIK
JARAYONLAR**

**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**

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

**Contents of dissertation abstract of Doctor of Philosophy (PhD) on Physical
and Mathematical Sciences**

Xudoyberdiyeva Malika Karomat qizi

Aksial-simmetrik qora o'ralar atrofida astrofizik
jarayonlar 3

Худойбердиева Малика Каромат қизи

Астрофизические процессы вокруг аксиально-симметричных чёрных
дыр 19

Khudoyberdieva Malika Karomat qizi

Astrophysical processes around axial-symmetric black
holes..... 35

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

List of published works
Список опубликованных работ..... 42

**“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**

**MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI**

XUDOYBERDIYEVA MALIKA KAROMAT QIZI

**AKSIAL-SIMMETRIK QORA O‘RALAR ATROFIDA ASTROFIZIK
JARAYONLAR**

**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) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.3.PhD/FM759 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:

Ahmedov Bobomurat Juraevich
Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponenlar:

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

Atamurotov Farrux Shuxratovich
Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori, PhD

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. Hozirgi vaqtda dunyoda turli fizik va astrofizik hodisalarning matematik modellarini ishlab chiqish va takomillashtirishga katta e'tibor berilmoqda. Xususan, Event Horizon teleskopi tomonidan olingan so'nggi kuzatuv ma'lumotlari galaktikalar markazida qora o'ralar soyasi mavjudligidan dalolat beradi. Boshqa tomondan, fundamental fizikada yagona maydon nazariyasini izlash, mavjud umumiy nisbiylik nazariyasiga yangi muqobil nazariyalarini ishlab chiqish jihatidan ham dolzarb mavzulardan hisoblanadi. Ushbu nazariyalarni kuzatuv va eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslash va yangi nazariyalarning parametrlari uchun chegaraviy qiymatlarni olish dolzarb muammo hisoblanadi.

Astrofizik kuzatuvlarning eksperimental texnikalari yordamida erishilayotgan zamonaviy yutuqlar ko'plab kundalik astronomik kuzatishlar natijalariga umumiy relyativistik va postrelyativistik ta'sirlarni hisobga olish talab qildi. Xususan, kuchli gravitatsiya maydonlariga ega kompakt massiv astrofizik ob'ektlarni kuzatish bilan bog'liq jarayonlar shular jumlasidandir. Modernizatsiyalangan gravitatsiya nazariyalarining tuzatishlarini hisobga olgan holda, kompakt ob'ektlar yaqinidagi astrofizik jarayonlarni tavsiflovchi yangi alternativ matematik modellarni ishlab chiqish ham dolzarb masala bo'lib hisoblanadi. Boshqa tomondan, kompakt ob'ektlar yaqinidagi geometriyaning Riemann tabiatining astronomik kuzatishlar natijalariga ta'sirini o'rganish va modellashtirish ham dolzarb masalalardandir.

Respublikamizda relyativistik astrofizika sohasida eksperimental va nazariy ishlar olib borishga shuningdek, jahon miqyosidagi fundamental tadqiqotlarni olib borishga katta e'tibor qaratilmoqda. Respublikamiz Prezidenti tomonidan ilgari surilgan 2017–2021 yillarda O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasida¹ mamlakatimizda ilm-fanning yuksalishi, fundamental tadqiqotlarning muhim yo'nalishlari va ularning natijalarini hayotga tatbiq qilish yo'llari ko'rsatib berilgan. 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. Qora o'ralarni kuzatishda qanchalik ulkan ishlar bajarilganligiga qaramasdan, bu boradagi ayrim masalalarga hali javob topilgancho yo'q.

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

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi № PF-4947 sonli Farmoni "2017—2021 yillarda O'zbekiston Respublikasini rivojlantirishning beshta ustuvor yo'nalishi bo'yicha harakatlar strategiyasi".

ilm-fanni rivojlantirish to'g'risidagi boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda ko'rsatilgan vazifalarni bajarishga ma'lum darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiya rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarini rivojlantirishning II –“Energetika, energiya va resurs tejamlorligi” ustuvor yo'nalishiga muvofiq amalga oshirildi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Parametrizatsiyalangan metrika doirasida turli astrofizik jarayonlarni tadqiq etish ko'plab olimlar, jumladan yapon olimlaridan K.Xioki, K.Maeda, rus olimlaridan A.Zaxarov, V.Frolov, I. Novikov, nemis olimlaridan C.Laemmerzahl, J.Kunz, A. Grezenbach, amerikalik olimlardan J. Psaltis, N. Yunes, chex olimlardan Z. Stuchlik, J. Schee, hind olimlaridan N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil va boshqalar tomonidan o'rganilgan. Ammo ushbu parametrizatsiyalangan metrika standart yechimlarni g'alayonlashtirish yo'li bilan olingan va keng qamrovga ega emas. Keng qamrovli parametrizatsiyalangan yechim modeli va formalizmi hozirgacha to'liq ishlab chiqilmagan.

Gravitatsiya nazariyasi doirasida kompakt ob'yektlar atrofidagi elektromagnit maydon va undagi magnitlangan zarracha harakatining tahlillari mahalliy olimlardan B.J.Ahmedov, A.A.Abdujabbarov, B.A.Toshmatov, J. Rayimbaev hamda horijiy olimlardan R.Wald, S.R. , F.de-Felice, F. Sorge va boshqalar shug'ullanishgan. Ushbu olimlar tomonidan zaryadlangan va magnitlangan zarralarning kompakt obyektlar atrofidagi harakati tadqiq etilgan. Ammo shunga qaramay, ushbu zarralarning harakatiga turli alternative gravitatsiya modellarning parametrlari va qorong'i moddani tavsiflovchi parametrlarning ta'siri o'rganilmaganligicha qolmoqda.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Astronomiya institutining F-FA-2021-432 “Sun'iy yo'ldoshlardan kichik massali rentgen qo'shaloq tizimlar uchun olingan ma'lumotlarni tahlil qilish va qayta ishlash”, №BA-ΦA-Φ2-008 sonli “Izolyatsiya qilingan qora o'ralarning relyativistik astrofizikasi va qora o'ralarga ega yaqin binar tizimlar”, №MRB – AN – 2019 – 29-sonli va “Kompakt astrofizik ob'yektlarni modellashtirish va ularning kuzatuv xarakteristikalarini RT-70 teleskopi va Rossiyaning Gamma-400 orbital teleskoplari parametrlari bo'yicha hisoblash” loyihalari doirasida amalga oshirilgan.

Tadqiqotning maqsadi:

Tadqiqot ishining maqsadi aksial-simmetrik kompakt ob'yektlar uchun umumlashgan yechim shakllantirish.

Tadqiqot vazifalari:

Gravitatsion maydon uchun yangi umumlashtirilgan parametrlangan aksial-simmetrik yechim topish;

magnitlangan zarrachalar dinamikasini tahlil qilish, xususan aylana orbitalarda zarrachalarning energiyasi va impuls momenti uchun ifodalar olish;

Rastall gravitatsiyasida CRNK (Zaryadlangan va aylanuvchi NUT Kiselov) qora o'rasi atrofida hosil bo'lgan foton sferasiga fazo-vaqt parametrlarining ta'sirini tahlil qilish;

Rastall gravitatsiyasi parametri qiymatining qora o'ra soyasi o'lchamlariga ta'sirini tadqiq etish;

CRNK (Zaryadlangan va aylanuvchi NUT Kiselov) fazo-vaqt parametrlarining qiymatlari ortishi bilan fotonlarning markaziy ob'yektga eng yaqin yaqinlashish radiusiga ta'sirini o'rganish.

Tadqiqot ob'yekti astrofizik qora o'ralar, parametrizatsiyalangan yechim, magnitlangan zarralar.

Tadqiqot predmeti kompakt gravitatsion ob'yektlar yaqinidagi astrofizik jarayonlar, differensial tenglamalarni yechishning sonli va analitik usullari, parametrizatsiyalangan yechim olish va ularni qo'llash mexanizmlari.

Tadqiqot usullari. Umumiy nisbiylik nazariyasida makroskopik elektrodinamika va metrik affin differensial geometriyaning matematik apparati, harakat va maydonning differensial tenglamalarini yechishning analitik va raqamli usullari qo'llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

Gravitatsion maydon uchun berilgan metrikaning beshta noma'lum funksiyasi yordamida ifodalangan yangi umumlashirilgan parametrlangan aksial-simmetrik yechim taklif etildi. Bu metrik funksiyalarning tegishli tanlovi asosida ma'lum bo'lgan relativistik yechimlarga mos kelishi ko'rsatildi.

Magnitlangan zarrachalar dinamikasini tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, aylana orbitalarda zarrachalarning energiyasi ham, impuls momenti ham magnitlangan zarrachaning qiymati ortishi bilan ortadi. Bundan tashqari, magnitlangan zarrachaning qiymati ortishi bilan zarralarning eng kichik doiraviy orbita radiusi ham ortib borishi ko'rsatildi.

Rastall gravitatsiyasida CRNK (Zaryadlangan va aylanuvchi NUT Kiselov) qora o'rasi atrofida hosil bo'lgan foton sferasiga fazo-vaqt parametrlarining ta'sirini tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, qora o'ra soyaning o'lchami NUT parametri ortishi bilan bir oz ortadi va elektromagnit parametrining oshishi bilan u kamayadi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

Rastall gravitatsiyasi parametri qiymatining kamayishi qora o'ra soyasining o'lchamini kattalashtirishi ko'rsatilgan.

Fotonlarning markaziy qora o'raga eng yaqin yaqinlashish radiusi va fotonlarning ta'sir parametri o'rtasidagi munosabatdan metrik parametrlarning kattaroq qiymatlari uchun bu munosabat taxminan chiziqli bo'lishi aniqlandi.

Impakt parametrining qat'iy qiymati uchun CRNK(Zaryadlangan va aylanuvchi NUT Kiselov) fazo-vaqt parametrlarining qiymatlari ortishi bilan fotonlarning markaziy ob'yektga eng yaqin yaqinlashish radiusi pasayishi ko'rsatilgan. Qolgan fazo-vaqt parametrlari qiymatlarining oshishi bilan eng yaqin doiraviy orbita radiusiga teskari ta'sir etishi ham kuzatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi ishda umumiy nisbiylik nazariyasi va nazariy fizikaning zamonaviy usullaridan hamda samarali raqamli usullar va algoritmlardan foydalanilgani; olingan nazariy natijalarni astronomik, astrofizik kuzatuvlar natijalari bilan hamda boshqa mualliflar tajribalari bilan solishtirilganligi; olingan xulosalarning gravitatsion kompakt ob'ektlar maydon nazariyalarining asosiy tamoyillari bilan mosligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati parametrlangan metrikani tahlil qilish va qora o‘ralar uchun maxsus yechimlar bilan taqqoslash gravitatsiyaning turli matematik modellarini o‘rganish uchun foydali vosita bo‘lishi mumkinligini anglatadi. Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundaki, ular LISA va EHT teleskoplari kuzatuvlari bilan qora o‘raning dinamik va statsionar fazo-vaqt cheklovlarini qurishda rol o‘ynashi mumkin. Shuningdek, magnitlangan zarrachalar harakatini o‘rganish, magnitlangan neytron yulduzlarning supermassiv qora o‘ralar atrofida harakatini tavsiflash uchun matematik modellarni yanada takomillashtirish uchun ishlatilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

Umumiy nisbiylik nazariyasida magnitlangan va zaryadlangan zarralarning impuls momenti o‘rganish bo‘yicha ishlab chiqilgan usullar asosida:

magnitlangan zarralar harakati va magnit effektlari bo‘yicha olingan ilmiy natijalar Shanxay shahridagi Fudan universiteti (FU) olimlari tomonidan foydalangan (Fudan Universiteti, Xitoy, 2023 yil 6-fevraldagi ma‘lumotnomasi). Magnitlangan zarrachalarning qiymati va deformatsiyalangan fazoning bu zarrachalarning orbitalariga ta‘siri hisoblab chiqildi.

Zaryadlangan zarrachalar harakati bo‘yicha natijalar xorijiy tadqiqotchilarning ishlarida, yuqori impakt faktorli xorijiy jurnallarda (The European Physical Journal C, Volume 82, Issue 12, article id.1110; The Astrophysical Journal, Volume 935, Issue 2, id.91, 31 pp; Universe, vol. 8, issue 3, p. 182; Physical Review D, Volume 102, Issue 12, article id.124078 va boshqalar) chop etilgan ilmiy ishlarda foydalanildi. Ular magnitlangan zarrachalarning aylanuvchi qora o‘ra atrofidagi ta‘sirini tavsiflash uchun ishlatiladi. Ilmiy natijalarning qo‘llanilishi modernizatsiyalangan gravitatsiya nazariyalar doirasida magnitlangan zarrachalarning kompakt ob‘yektlar atrofidagi harakati haqida ma‘lumot olish imkoni yaratildi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqotning asosiy natijalari 4 ta xalqaro va 4 ta Respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyalarda ma‘ruzalar qilinib, tegishli muhokamalardan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Tadqiqot mavzusi bo‘yicha jami 14 ta ilmiy ish, jumladan O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta‘lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxatida 6 ta ilmiy maqola (4 ta respublika va 2 ta xorijiy jurnallarda) chop etilgan.

Dissertatsiya tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rt bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 95 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.

Dissertatsiyaning birinchi bobi **“Qora oʻralar uchun astrofizik muammolar”** deb nomlanib, singulyarlikdan regulyarlikka oʻtish usullari oʻrganilgan va gravitatsion maydon uchun parametrizatsiya yechimi taklif qilingan.

Umumiy nisbiylik nazaryasida nochiziqli elektrodinamika (NED) hisobga olgan holda Lagrange zichligini quyidagi ifoda bilan aniqlanadi.

$$L = \frac{4\mu}{\alpha} \frac{(\alpha F)^{\frac{\nu+3}{4}}}{\left(1 + (\alpha F)^{\frac{\nu}{4}}\right)^{1+\frac{\mu}{\nu}}}, \quad (1)$$

Bu yerda $F = F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ Faradey skalyari. $\alpha > 0$ parametri nochiziqli taʼsir kuchini tavsiflaydi, $\mu > 0$ nochiziqli darajasini xarakterlaydi va $\nu > 0$ aniq yechim uchun elektromagnit maydon xarakterini boshqaruvchi erkin parametr. Faradey skalyari $F > 0$ boʻlganda magnitlangan umumiy qora oʻra yechimlari uchun NED nazariyasi yaxshi natijalarga ega. Umumiy sferik simmetrik qora oʻra fazo-vaqt metrikasi Schwarzschild metrikasiga oʻxshash shaklga ega va standart Schwarzschild kordinatalarida uning chiziq elementi quyidagi shaklga ega.

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2m(r)}{r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2M}{r}\right)} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2, \quad (2)$$

bu yerdagi $m(r)$ funksiyasi quyidagi koʻrinishga ega.

$$m(r) = \frac{Mr^\mu}{(r^\nu + q^\nu)^{\frac{\mu}{\nu}}}, \quad (3)$$

regulyar yechimlarga faqat $\mu \geq 3$ parametr uchun ruxsat beriladi. Tadqiqotimizda biz massa funksiyasi boʻlgan umumiy singulyar magnitlangan qora oʻralarni metrika doirasida koʻrib chiqamiz. Olib borilgan oʻrganishlar tufayli astrofizik jihatdan tegishli holatlar $\nu = 1$ parametri uchun roʻy berishi va Maxwell NED qora oʻralariga mos kelishi aniq. Shuning uchun oʻrganishlarimizda yuqoridagi fazo-vaqt holatini afzal koʻramiz.

Qora oʻra gorizontning holati quyidagi shart bilan belgilanadi.

$$f(r) = 1 - \frac{2m(r)}{r}. \quad (4)$$

Gravitatsion maydon uchun berilgan metrikaning beshta nomaʼlum funksiyasi yordamida ifodalangan yangi umumlashtirilgan parametrlangan aksial-

simmetrik yechim taklif etiladi. Bu metrik funksiyalarning tegishli tanlovi asosida ma'lum bo'lgan relativistik yechimlarga mos kelishi ko'rsatiladi.

$$ds^2 = -dt^2 + \mathcal{A}(dt + \mathcal{B}\sin^2\theta d\varphi)^2 + \mathcal{D}dr^2 + \mathcal{E}d\theta^2 + \mathcal{F}\sin^2\theta d\varphi^2, \quad (5)$$

noma'lum funksiyalar $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{D}, \mathcal{E}, \mathcal{F}$ faqat r va φ ga bog'liq.

Xususan, Kerr metrikasi ham bu ko'rinishga keltiriladi (Boyer va Lindquist, 1967)

$$ds^2 = -dt^2 + \frac{2Mr}{r^2 + a^2 \cos^2\theta} (dt + a \sin^2\theta d\varphi)^2 + \frac{r^2 + a^2 \cos^2\theta}{r^2 - 2Mr + a^2} dr^2 + (r^2 + a^2 \cos^2\theta) d\theta^2 + (r^2 + a^2) \sin^2\theta d\varphi^2. \quad (6)$$

Metrik tenzorning noldan farqli komponentalari shu formulalar bilan aniqlanadi.

$$\begin{aligned} g_{00} &= -(1 - \mathcal{A}), & g_{03} &= \mathcal{A}\mathcal{B}\sin^2\theta, & g_{11} &= \mathcal{D}, \\ g_{22} &= \mathcal{E}, & g_{33} &= (\mathcal{A}\mathcal{B}^2\sin^2\theta + \mathcal{F})\sin^2\theta, & g &= -\mathcal{H}\mathcal{E}\mathcal{D}\sin^2\theta, \\ g^{00} &= -\frac{1}{\mathcal{H}}(\mathcal{A}\mathcal{B}\sin^2\theta), & g^{03} &= \frac{1}{\mathcal{H}}\mathcal{A}\mathcal{B}, & g^{11} &= \frac{1}{\mathcal{D}}, \\ g^{22} &= \frac{1}{\mathcal{E}}, & g^{33} &= \frac{1}{\mathcal{H}\sin^2\theta}(1 - \mathcal{A}), & \mathcal{H} &\equiv \mathcal{A}\mathcal{B}^2\sin^2\theta + \mathcal{F}(1 - \mathcal{A}). \end{aligned} \quad (7)$$

Dissertatsiyaning ikkinchi bobi **“Zaryadlangan qora o'ra atrofida zaryadlangan zarralar harakati”** deb nomlanadi va Gamilton formalizmidan singulyar umumiy magnitlangan qora o'ralar yonida elektr zaryadlangan zarralar dinamikasini tavsiflash uchun foydalanamiz.

$$H = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} (\pi_\alpha - q_p A_\alpha) (\pi_\beta - q_p A_\beta) + \frac{m^2}{2}, \quad (8)$$

Gamilton harakat tenglamalari esa quyidagicha tavsiflanadi.

$$\frac{dx^\alpha}{d\lambda} = \frac{\partial H}{\partial \pi_\alpha}, \quad \frac{d\pi_\alpha}{d\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x^\alpha}. \quad (9)$$

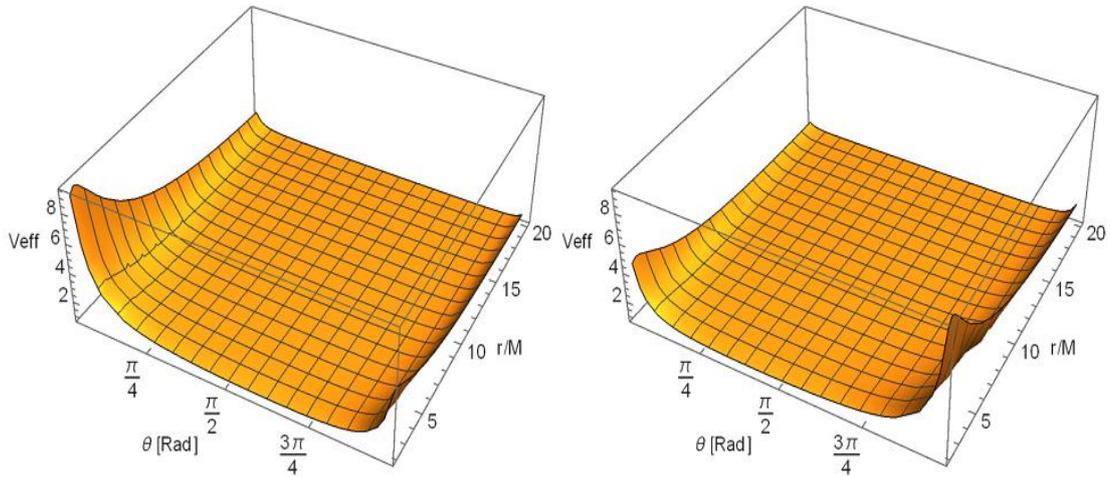
Bu yerda m - sinov zarrachasining massasi, π_α - kanonik 4-impuls, q_p - sinov zarra zaryadi va λ affine parametri bo'lib xususiy vaqt bilan quyidagicha bog'langan $\lambda/\tau = m$.

Effektiv potensial gravitatsion ta'sirni, impuls momenti va elektromagnit potensial energiyasi tomonidan berilgan markaziy kuch potensialini tavsiflaydi. Musbat impuls momenti $L > 0$ soat yo'nalishiga teskari aylantirilgan zarraga to'g'ri keladi. Elektromagnit va gravitatsiyaviy o'zaro bog'liqlikni tavsiflovchi parametr e quyidagicha kiritilgan.

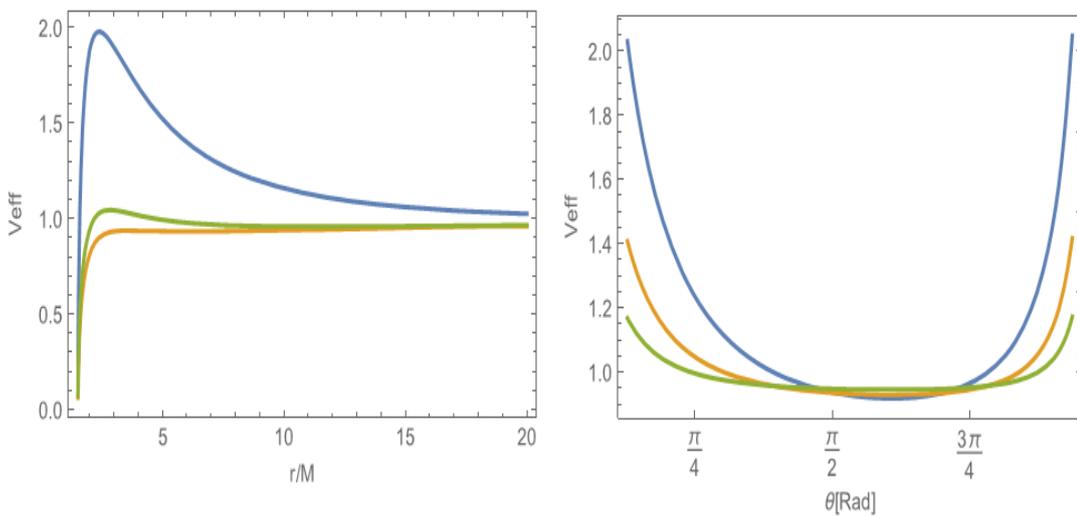
$$e = \frac{q_p Q_m GM}{mc^4}, \quad (10)$$

$$V_{eff}(r, \theta) = \sqrt{\left(1 - \frac{2m(r)}{r}\right) \left[\frac{(L - e \cos\theta)^2}{r^2 \sin^2\theta} + 1\right]}. \quad (11)$$

Effektiv potensial $V_{eff}(r, \theta)$ uchun e parametrning musbat va manfiy qiymatlarining ko‘rinishlari 1-rasmدا aks ettirilgan. Parametr e ga nisbatan effektiv potensialning muhim simmetriyasi mavjud bo‘lib, agar biz gravomagnet parametrning ishorasini va $\theta \rightarrow \pi - \theta$ larni bir vaqtda o‘zgartirishlarini bajarsak bir xil natijalar hosil bo‘ladi. Biz bu tasdiqni effektiv potensial ifodasidan osonlikcha ko‘rishimiz mumkin.



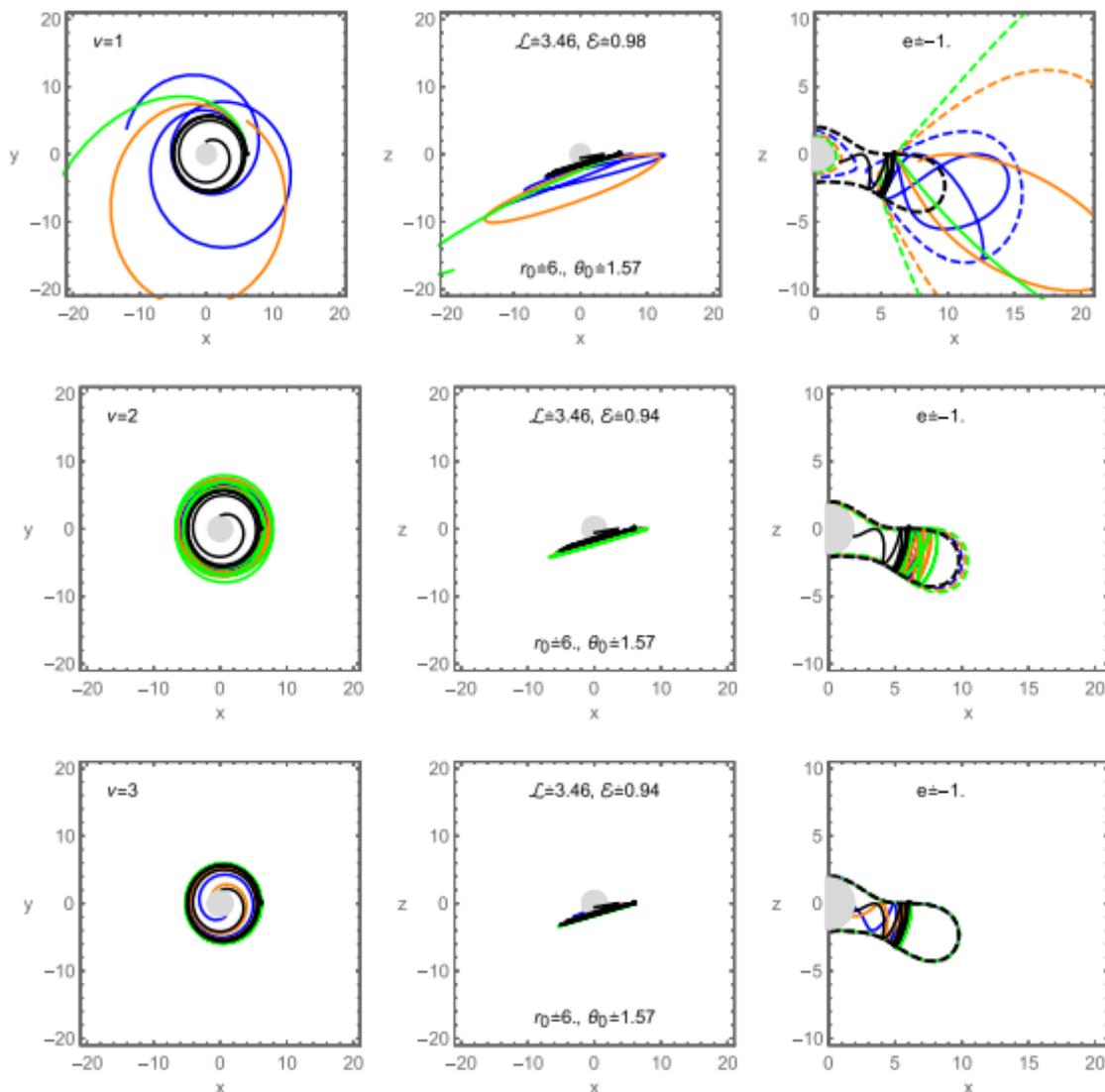
1-rasm. Umumiy qora o‘ra maydonidagi zaryadli zarraning effektiv potentsiali, parametrlari $\alpha=0.3$, $q = 0.5$, $\mu = 3$, $\nu = 1$ va $L = 3$ bo‘lgan qiymatlarda. Chap tomonda parametr $e = -1$, o‘ngda $e = 1$.



2-rasm. Parametrlari $\alpha=0.3$, $q = 0.5$, $\mu = 3$, $\nu = 1$, $L = 3$ va $e = -1$ va $L = 3$ bo‘lgan umumiy qora o‘ra maydonida zaryadlangan zarrachalarning effektiv potentsiali.

Biz effektiv potensialning $\theta = \text{const}$ va $r = \text{const}$ bo‘lgan qism kesimlarini ko‘rishimiz mumkin. Ushbu rasmlar effektiv potensialning ekvatorial tekislikka nisbatan $\theta = \pi/2$ simmetrik emasligini aniq ko‘rsatib beradi va bu e parametr mavjudligidan, elektr zaryadlangan zarrachaning qora o‘ra magnet monopol

zaryadi bilan elektromagnit o‘zaro ta’siri natijasiga muoffiqdir. Neytral zarralar uchun bu assimetriya yo‘qoladi.



3-rasm. Trayektoriyalar (qalin chiziqlar) va harakat cheklovlari (uzlukli egr chiziqlar) bilan aks ettirilgan turli parametrlar quyidagicha tanlab olingan $\alpha=0.3$, $q=0.5$, $v=1$, $e = -1$ va μ : $\mu = 2$ (ko‘k), $\mu=4$ (sariq) $\mu=6$ (yashil) va $v=1,2,3$. Qora chiziq magnit monopole maydonda joylashgan Schwarzschild geometriyasidagi zaryadlangan zarra harakatini tavsiflaydi.

Parametr v ni ortirib borish fonida zaryadli zarra orbitasining harakati magnit monopol maydonida joylashgan Schwarzschild qora o‘ra atrofidagi orbitalarga yaqinlashib boradi. Schwarzschild holati bilan taqqoslaganda zaryadlangan zarrachalar harakatidagi eng katta farqlar Maxwell NED magnitlangan qora o‘ralar bilan bog‘liq degan xulosaga kelishimiz mumkin. Ushbu farqlar Bardeen qora o‘ralari uchun ($v = 2$) kamroq, Hayward qora o‘ralarida esa deyarli to‘liq bartaraf etilgan ($v = 3$).

Dissertatsiyaning uchinchi bobi “**Episiklik harakat va magnitlangan qora o‘ra atrofida magnitlangan zarralar harakati**” deb nomlangan bo‘lib, magnitlangan qora o‘ra atrofidagi magnitlangan zarralar harakatini o‘rganishdan iborat.

Effektiv potensial quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi.

$$V_{eff}(r, L, B, q) = f(r) \left[\left(1 - \frac{B}{r^2}\right)^2 + \frac{L^2}{r^2} \right], \quad (12)$$

$\beta = \mu / (mM)$ - magnitlangan zarrachani xarakterlovchi o‘lchovsiz parameter.

Markaziy ob‘yekt atrofida magnitlangan zarrachaning doiraviy turg‘un orbitalari standart shartlar bo‘yicha quyidagicha aniqlanishi mumkin.

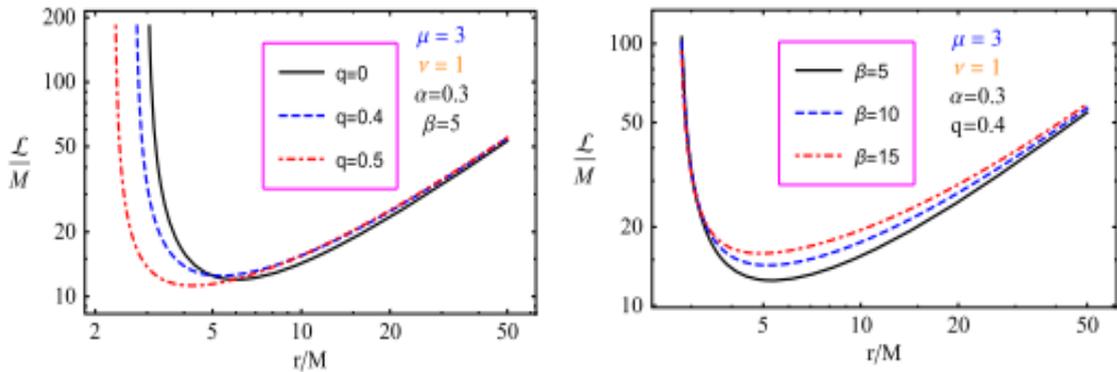
$$V'_{eff} = 0 \quad (13)$$

$$V''_{eff} \geq 0.$$

Magnitlangan zarrachaning doiraviy orbitalar bo‘ylab o‘ziga xos impuls momentiga energiyasini quyidagi ifodalar bilan aniqlash mumkin:

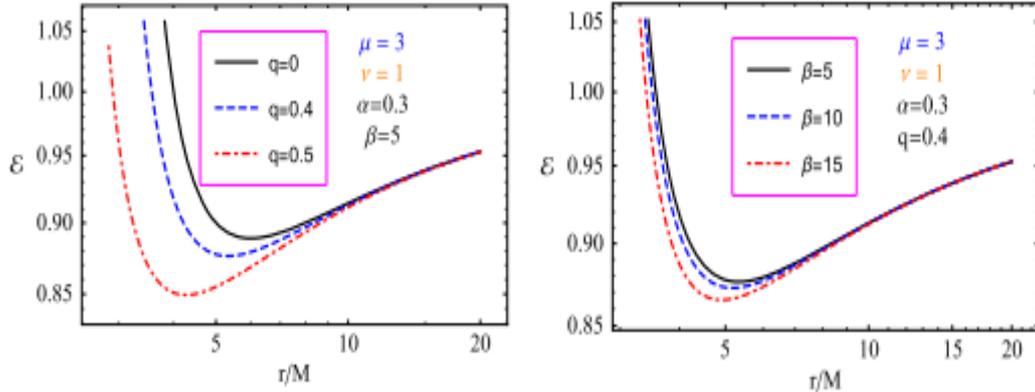
$$L^2 = \frac{(r^2 - B)(r(r^2 - B)f'(r) + 4Bf(r))}{r^2(rf'(r) - 2f(r))},$$

$$\varepsilon^2 = \frac{2f^2(r)(B^2 - r^4)}{r^4(rf'(r) - 2f(r))}. \quad (14)$$



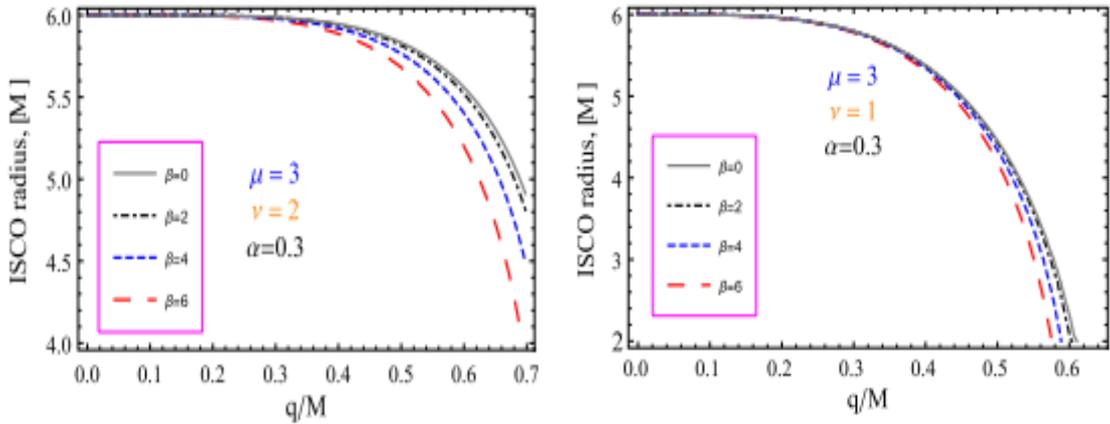
4 -rasm. Magnitlangan zaryad parametri va parametr β ning har xil qiymatlari uchun doiraviy orbitalarning o‘ziga xos burchak impulsining radiusga bog‘liqligi.

4-rasmdan ko‘rish mumkinki, qora o‘ra magnit zaryadining (parametr β) oshishi (kamayishi) magnitlangan zarrachaning o‘ziga xos impuls momentining minimal qiymatini pasaytiradi (oshiradi). Bundan tashqari, har ikkala magnitlangan zaryad parametri va parametr β ning oshishi bilan o‘ziga xos impuls momenti minimal bo‘lgan masofa qiymati kamayadi.



5-rasm. Doiraviy orbitalar uchun energiyaning magnitlangan zaryad parametri va β parametri uchun har xil qiymatlari uchun radial bog‘liqligi.

Magnitlangan zarrachaning solishtirma energiyasining b parametri va magnit zaryad parametrining turli qiymatlariga radial bog‘liqligi 4-rasmda ko‘rsatilgan. 5-rasmda q va b parametrlari ortishi bilan ISCO radiusi markaziy tomonga siljishini ko‘rsatadi. qora tuynuk va minimal energiya qiymatlari kamayadi.

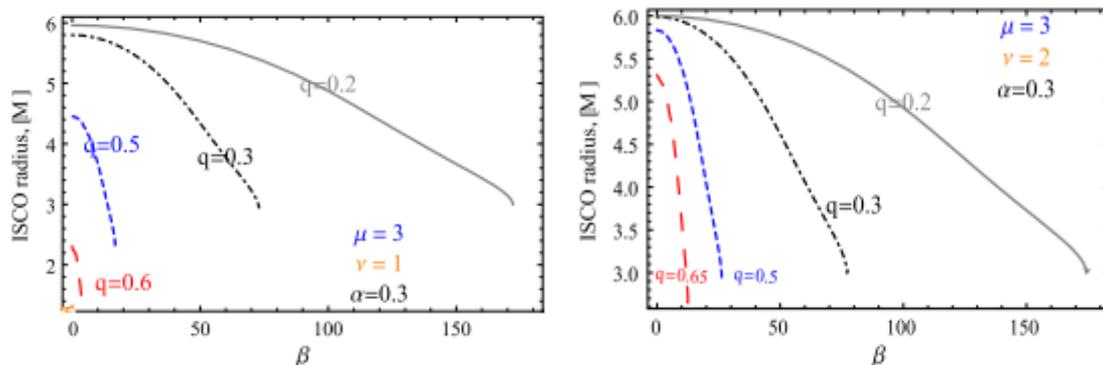


6-rasm. Umumiy qora o‘ralar atrofida magnitlangan zarrachaning ISCO radiusi $\nu=1$ va $\nu=2$ parametrlari uchun.

ISCO radiusining magnitlangan zaryad parametriga β va ν parametrlarining har xil qiymatlari uchun bog‘liqligi 6-rasmda keltirilgan, $\mu=3$, $\alpha=0.3$. Rasmlardan ko‘rish mumkinki, β parametrining o‘sishi ISCO radiusining pasayish tezligini oshiradi va $\nu=1$ va $\nu=2$ holatlarini taqqoslashda, parametrning $\nu=2$ bo‘lganida $\nu=1$ ga qaraganda ta’siri kuchliroq ekanligini ko‘rsatadi.

7-rasmda ISCO radiusining magnit zaryad parametri q va ν parametrlarining har xil qiymatlari uchun β parametrga bog‘liqligi namoyish etilgan, $\mu=3$, $\alpha=0.3$. Magnit zaryad parametri q va β parametrlari ortishi bilan ISCO radiusi kamayishini kuzatish mumkin. Bizning raqamli hisob-kitoblarimiz shuni ko‘rsatadiki, magnit zaryad parametrining maksimal qiymatida, magnitlangan zarracha uchun, β parametrning har qanday qiymatlari uchun ISCO yo‘qoladi.

Bundan tashqari, $q < q_{\max}$ da ISCO radiusi borligi uchun β parametri uchun yuqori chegara mavjud va bu yuqori chegara β qiymatining oshishi bilan q parametrning kamayishi ro‘y beradi. Bu magnitlangan zarrachalar orbitasi magnit maydon va zarrachaning magnit momenti o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlik tufayli nostabil (beqaror) bo‘lib qoladi degan ma’noni anglatadi.

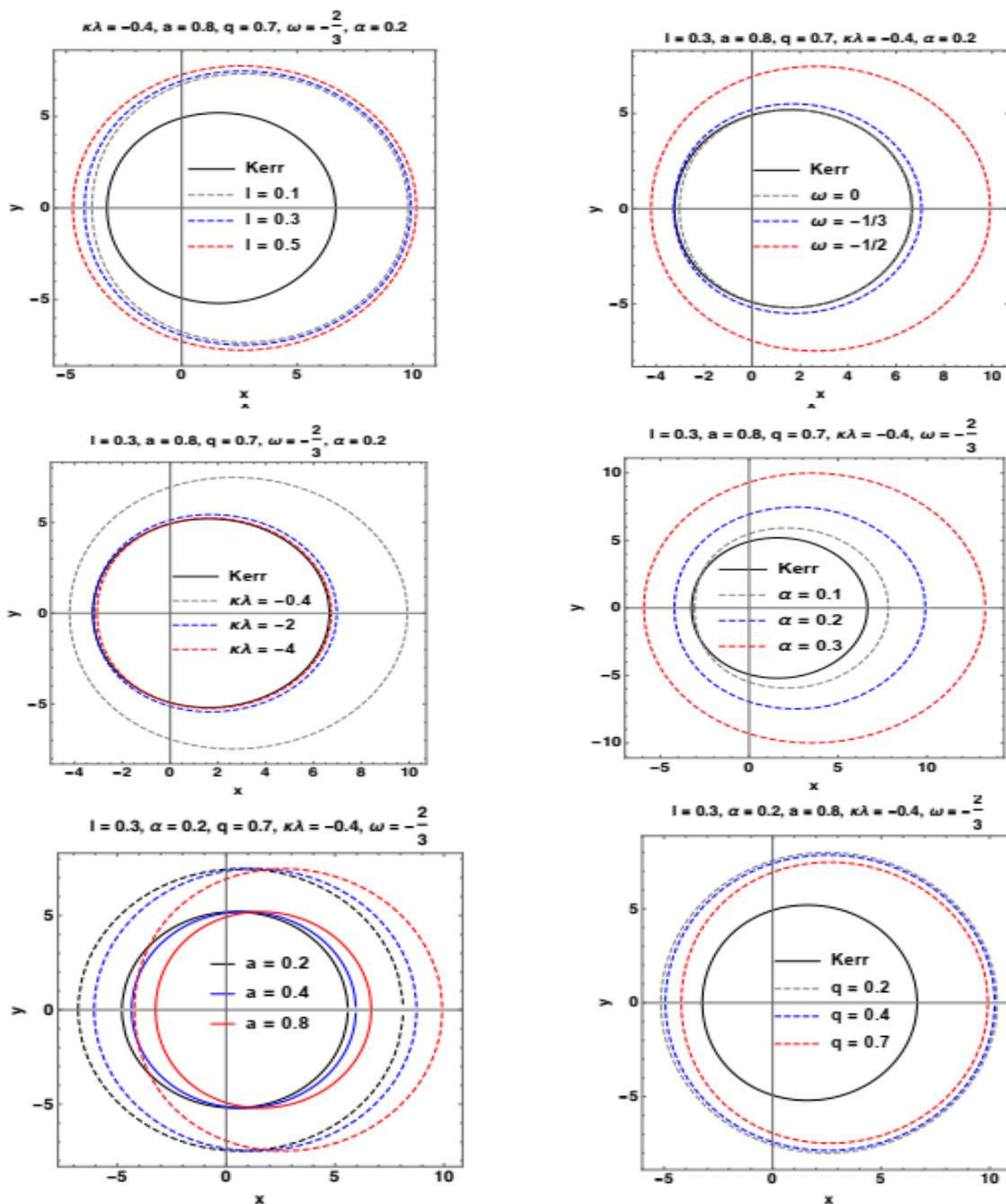


7-rasm. $\nu = 1$ va $\nu = 2$ parametrlari uchun umumiy regulyar qora o‘ralar atrofida magnitlangan zarrachaning ISCO radiusi.

Dissertatsiyaning to‘rtinchi bobi “**Rastall gravitatsiyasida aksial - simmetrik qora o‘raning optik xususiyatlari**” deb nomlanib, ushbu bobda Rastall gravitatsiya nazariyasining zaryadlangan va aylanuvchi NUT Kiselev (CRNK) qora o‘raning optik xususiyatlarini o‘rganishga bag‘ishlangan. Rastall gravitatsiya kuchida CRNK qora o‘raning fazo- vaqtidagi fotonlarning harakatini o‘rganib, gravitatsion ob‘yektivlashtirish tufayli fotonni kesish burchagi asosan NUT zaryadiga, holat parametrining kvintessensiya tenglamasiga va kvintessensiya intensivligiga bog‘liqligi ko‘rsatilgan. Biz boshqa fazo- vaqt parametrlarining kesish burchagiga ta’siri ahamiyatsiz darajada kichik ekanligini kuzatamiz. Biz fazo- vaqt parametrlarining turli qiymatlari uchun Rastall gravitatsiya kuchida CRNK qora o‘raga tushgan soyaning shaklini taqdim etamiz. Qora o‘raning aylanish parametri qora o‘ra soyasining joylashuvi va radiusini juda kam o‘zgartirishini ko‘rsatamiz. Vaholanki, qolgan fazo-vaqt parametr qiymatlarining o‘zgarishi qora o‘raning kuzatilgan soyasining shakli va radiusini sezilarli darajada o‘zgartirishi mumkin. Biz qora o‘ra soyasining radiusi va fotonning burilish burchagi Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o‘ra uchun Kerr qora o‘raga nisbatan kattaroq ekanligini kuzatamiz. Va nihoyat, biz fazo- vaqt parametrlari kuzatilgan R_s va δ_s qiymatlarini qanday o‘zgartirishi mumkinligini ko‘rsatamiz. Bizning natijalarimiz ko‘rsatadiki, R_s ning katta qiymatlari uchun δ_s parametrining kichikroq qiymatlariga ega bo‘lamiz.

8-rasmning yuqori o‘ng qismida ω parametri kamaygan qiymatlariga nisbatan Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o‘ra soyasi radiusi ortishi ko‘rsatilgan. Shunisi e’tiborga loyiqki, ushbu ω parametrning nolga yaqin qiymatlari uchun Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o‘rada hosil bo‘lgan soyaning o‘lchami Kerr qora o‘radagi kabi deyarli bir xil. Xuddi shu rasmdagi

ikkinchi qatorning chap qismida $k\lambda$ parametrining turli qiymatlari uchun Rastall gravitatsiyasidagi CRNK qora o'ra soyasining radiusini ko'rsatadi. Xuddi shu qismda shuni ko'rish mumkin, ushbu $k\lambda$ parametrning kichikroq qiymatlari uchun CRNK qora o'raning soyasining o'lchami Rastall gravitatsiyasida Kerr qora o'raga to'g'ri keladi.



8-rasm Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o'raning soyasining shakli. Kerr qora o'rasi bilan taqqoslangan.

Bu va oldingi grafiklar shuni ko'rsatadiki, $k\lambda$ parametrining kichikroq qiymatlarida, ω parametrining qiymatlari nolga yaqin bo'lsa, Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o'ralarining ko'rinadigan soyasini soyadan Kerr qora o'raning soyasidan ajratish qiyinlashadi. Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o'ra

soyasining o'lchamining α parametriga kuchli bog'liqligini ko'rish mumkin, chunki ushbu α parametrning o'sishi bilan sezilarli darajada oshadi va 8-rasmdagi ikkinchi qatorning ikkinchi qismida ko'rsatilgan. Ko'rsatilgandek, α parametrining nolga yaqin qiymatlari uchun Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o'ra soyasining o'lchami Kerr qora o'raning soyasi bilan bir xil bo'ladi. 8-rasmning oxirgi qatorining chap qismida Rastall gravitatsiyasi CRNK qora o'raning soyasi α spin parametrining turli qiymatlari uchun Kerr qora o'raning soyasi bilan taqqoslanadi. Bu yerda ta'kidlash kerakki, 8-rasmda zich chiziqlar Kerr holatiga, nuqtali chiziqlar esa Rastall gravitatsiyasidagi CRNK qora o'ra holatiga mos keladi. α spin parametrining qiymatlari faqat Kerr izlanishi uchun ko'rsatilgan bo'lsa-da, bir xil rangdagi nuqta chiziqlar Rastall gravitatsiyasidagi CRNK qora o'raga bir xil α spin parametri bo'lgan soyani ifodalaydi. Osonlik bilan ko'rish mumkinki, α aylanish parametrining o'sishi soyaning o'lchamini sezilarli darajada o'zgartirmaydi va faqat Kerr va CRNK fazosida soya doirasining markazini o'ngga siljitadi. 8-rasmning oxirgi diagrammasida q va α elektromagnit zaryad Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o'ra atrofidagi soyaga qanday ta'sir qilishini ko'rsatadi. Ko'rinib turibdiki, q parametrini oshirish soyaning radiusini kamaytiradi.

XULOSALAR

“Aksial-simmetrik qora o'ralar atrofida astrofizik jarayonlar” dissertatsiyasi doirasida bajarilgan tadqiqot natijalari asosida quyidagi xulosalar olindi:

1. Gravitatsion maydon uchun berilgan metrikaning beshta noma'lum funksiyasi yordamida ifodalangan yangi umumlashtirilgan parametrlangan aksial-simmetrik yechim taklif etildi. Bu metrik funksiyalarning tegishli tanlovi asosida ma'lum bo'lgan relativistik yechimlarga mos kelishi ko'rsatildi.
2. Magnitlangan zarrachalar dinamikasini tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, aylana orbitalarda zarrachalarning energiyasi ham, impuls momenti ham magnitlangan zarrachaning qiymati ortishi bilan ortadi. Bundan tashqari, magnitlangan zarrachaning qiymati ortishi bilan zarralarning eng kichik doiraviy orbita radiusi ham ortib borishi ko'rsatildi.
3. Rastall gravitatsiyasida CRNK qora o'ra atrofida hosil bo'lgan foton sferasiga fazo-vaqt parametrlarining ta'sirini tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, qora o'ra soyaning o'lchami NUT parametri ortishi bilan bir oz ortadi va elektromagnit parametrining oshishi bilan u kamayadi.
4. Bundan tashqari, Rastall gravitatsiyasi parametri qiymatining kamayishi qora o'ra soyasining o'lchamini kattalashtirishi ko'rsatilgan.
5. Fotonlarning markaziy qora o'raga eng yaqin yaqinlashish radiusi va fotonlarning ta'sir parametri o'rtasidagi munosabatdan metrik parametrlarning kattaroq qiymatlari uchun bu munosabat taxminan chiziqli bo'lishi aniqlandi.
6. Impakt parametrining qat'iy qiymati uchun CRNK fazo-vaqt parametrlarining qiymatlari ortishi bilan fotonlarning markaziy ob'yektga

eng yaqin yaqinlashish radiusi pasayishi ko'rsatilgan. Qolgan fazo-vaqt parametrlari qiymatlarining oshishi bilan eng yaqin doiraviy orbita radiusiga teskari ta'sir etishi ham kuzatilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ ИНСТИТУТЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИИ НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА «ТИИИМСХ»**

**ИНСТИТУТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

ХУДОЙБЕРДИЕВА МАЛИКА КАРОМАТ ҚИЗИ

**АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОКРУГ
АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ ЧЁРНЫХ ДЫР**

**01.04.02 – Теоретическая физика
01.03.01-Астрономия**

**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/FM759.

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:

Ахмедов Бобомурат Жураевич
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Шайматов Санжар Рузимуротович
доктор физико-математических наук, снс

Атамуротов Фаррух Шухратович
доктор философии (PhD) ф.-м.н.

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 Институте 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 учёных 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 необходимость темы диссертации. В настоящее время в мире уделяется огромное внимание на разработку и усовершенствованию математических моделей различных физических и астрофизических явлений. В частности, недавние наблюдательные данные полученные телескопом «Горизонта событий» указывают на наличие тени (силуэта) черных дыр в центре галактик. С другой стороны поиск единой теории поля в фундаментальной физике требует разработку новых альтернативных и/или модифицированных теорий гравитации к существующей общей теории относительности. Сравнение этих теорий с наблюдательными и экспериментальными данными и получение пороговых значений параметров новых теорий является актуальной задачей.

Современные достижения в экспериментальных методах астрофизических наблюдений потребовали учета общих релятивистских и пострелятивистских эффектов на результаты многих повседневных астрономических наблюдений. В частности, к ним относятся процессы, связанные с наблюдением компактных массивных астрофизических объектов с сильными гравитационными полями. Актуальным вопросом является также разработка новых альтернативных математических моделей, описывающих астрофизические процессы вблизи компактных объектов, с учетом поправок модифицированных и альтернативных теорий гравитации. С другой стороны, изучение и моделирование влияния риманова характера геометрии вблизи компактных объектов на результаты астрономических наблюдений также является актуальным вопросом.

В нашей Республике уделяется огромное внимание фундаментальным исследованиям в области релятивистской астрофизики черных дыр. Направления этих исследований, имеющих важное значение для развития науки нашей страны, связаны со Стратегией¹ действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг. В доказательство этого можно упомянуть, что в последние годы в релятивистской астрофизике стали изучаться движение намагниченных и заряженных частиц вокруг компактных тел, их захват чёрной дырой, физические свойства частиц, внешнее магнитное поле вокруг компактных тел и их природа была глубоко изучена. Несмотря на огромный объем работ по наблюдению за черными дырами, некоторые вопросы до сих пор не решены.

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

¹Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 07 февраля 2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

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.

Данная диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан II. “Энергетика, энерго- и ресурсосбережение”.

Степень изученности проблемы.

Исследованием различных астрофизических процессов в рамках параметризованной метрики рассмотрены многими учеными, в том числе японскими (К.Хiоki, К.Maeda), российскими (А. Захаров, В. Фролов, И. Новиков), немецкими (С.Laemmerzahl, J.Kunz, А. Grezenbach), американскими (J. Psaltis, N. Yunes), чешскими (Z. Stuchlik, J. Schee), индийскими (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) и другие. Однако, эта параметризованная метрика получена путем возмущения стандартных решений и не является широкомасштабным. Широкомасштабная параметризованная модель решения и формализм еще не полностью разработаны.

В рамках теории гравитации анализа электромагнитного поля вокруг компактных тел и движения намагниченных частиц были изучены отечественными учеными, как Б.Ж. Ахмедов, А.А.Абдужаббаров, Б.А.Тошматов, Ж.Райимбаев, и зарубежными авторами таких как R.Wald, S.R. , F.de-Felice, F. Sorge и другие. Эти ученые изучали движение заряженных и намагниченных частиц вокруг компактных объектов.

Однако влияние параметров различных альтернативных моделей гравитации и параметров, описывающих тёмную материю, на движение этих частиц остаётся неизученным.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов Астрономического института, F-FA-2021-432 "Анализ и обработка данных, полученных со спутников для мало массивных рентгеновских двойных систем", № ВА-ФА-Ф2-008 "Релятивистская астрофизика изолированных черных дыр и тесных двойных систем с черными дырами", № MRB – AN – 2019 – 29 и "Моделирование компактных астрофизических объектов и расчеты их наблюдательных характеристик к параметрам телескопа РТ-70 и российского орбитального телескопа Гамма-400".

Целью исследования является формулировка обобщенного решения для аксиально-симметричных компактных объектов.

Задачи исследования:

нахождение нового обобщенного параметризованного аксиально-симметричного решения для источника гравитационного поля;

анализ динамики магнитно-заряженных частиц, в частности, получение выражений для энергии и углового момента частиц на круговых орбитах;

анализ влияния параметров пространства-времени на фотонную сферу, формирующуюся вокруг черной дыры CRNK в гравитации Расталла;

исследование влияния значения параметра гравитации Расталла на размеры тени черной дыры;

исследование влияния пространственно-временных параметров CRNK на радиус наибольшего сближения фотонов с центральным объектом.

Объектом исследования являются астрофизические черные дыры, параметризованное решение, намагниченные частицы.

Предмет исследования являются астрофизические процессы вблизи компактных гравитационных объектов, численные и аналитические методы решения дифференциальных уравнений, механизмы получения параметризованных решений и их применение.

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

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Предложено новое обобщённое параметризованное аксиально-симметричное решение для источника гравитационного поля, выраженное через пять метрических функций.

Анализ динамики магнитно-заряженных частиц показал, что как энергия, так и угловой момент частиц на круговых орбитах увеличиваются с увеличением их магнитного заряда. Также показано, что радиус внутренней стабильной круговой орбиты частиц увеличивается с увеличением магнитного заряда частиц.

Показано, что размер тени CRNK черной дыры в гравитации Расталла незначительно увеличивается с увеличением НУТ параметра и уменьшается с ростом электримагнитного параметра пространства-времени.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Обнаружено, что уменьшение значения параметра Расталл гравитации увеличивает размер тени.

Из соотношения между радиусом наибольшего сближения фотонов с центральной черной дырой и прицельным параметром фотонов было получено, что это соотношение становится линейным при больших значениях метрических параметров.

Показано, что при фиксированном значении прицельного параметра с увеличением значений параметров пространственно-временных параметров Расталл гравитации, радиус наибольшего сближения фотонов с центральным объектом уменьшается. Также наблюдалось обратное влияние на радиус наибольшего сближения при увеличении значений остальных параметров пространства-времени.

Достоверность результатов исследования в работе используются современные методы общей теории относительности и теоретической

физики, эффективные численные методы и алгоритмы; сравнение полученных теоретических результатов с результатами астрономических и астрофизических наблюдений и с опытом других авторов; полученные выводы объясняются совместимостью с основными принципами теорий поля для гравитационных компактных объектов.

Научная и практическая значимость результатов исследований заключается в том, что анализ параметризованной метрики и сравнение с конкретными решениями для черных дыр может предоставить полезный инструмент для исследования различных математических моделей гравитации. Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они могут сыграть роль в построении ограничения динамического и стационарного пространства-времени черной дыры с наблюдениями телескопов LISA и EHT. Также, изучение движение намагниченных частиц может быть использована для дальнейшего усовершенствования математических моделей для описания движения намагниченных нейтронных звезд вокруг сверхмассивных черных дыр.

Внедрение результатов исследования. На основе разработанных методов импульсного движения намагниченных и заряженных частиц в общей теории относительности:

свойство движения намагниченных частиц и магнитные эффекты были использованы китайскими учеными Фуданьского университета (ФУ) в городе Шанхай (справка ФУ, Китай, от 6 февраля 2023 г.). В результате рассчитаны значение магнитного заряда частиц и эффекты деформированного пространств, к орбитам этих частиц;

результаты по движению заряженных частиц использованы в работах зарубежных исследователей, 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 European Physical Journal C, Volume 82, Issue 12, article id.1110; The Astrophysical Journal, Volume 935, Issue 2, id.91, 31 pp; Universe, vol. 8, issue 3, p. 182; Physical Review D, Volume 102, Issue 12, article id.124078 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 диссертационного исследования доложены на 4 международных и 4 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертационной работы опубликованы 6 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 2 зарубежных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 95 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации указывается актуальность и необходимость темы, соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и техники республики, степень изученности проблемы, её 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 “**Астрофизические проблемы для черных дыр**”, изучены методы перехода от сингулярности к регулярности и предлагается параметризационное решение для гравитационного поля.

В общей теории относительности с учётом нелинейной электродинамики (НЭД) плотность Лагранжа определяется следующим выражением.

$$L = \frac{4\mu}{\alpha} \frac{(\alpha F)^{\frac{\nu+3}{4}}}{\left(1 + (\alpha F)^{\frac{\nu}{4}}\right)^{1 + \frac{\mu}{\nu}}}, \quad (1)$$

Здесь $F = F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ - скаляр Фарадея. Параметр $\alpha > 0$ характеризует силу нелинейного эффекта, $\mu > 0$ характеризует степень нелинейности, $\nu > 0$ является свободным параметром, определяющим характер электромагнитного поля для точного решения.

Теория НЭД даёт хорошие результаты для магнитно заряженных общих растворов черных дыр, когда скаляр Фарадея $F > 0$. Общая сферически-симметричная метрика пространства-времени чёрной дыры имеет форму, аналогичную метрике Шварцшильда, а её линейный элемент в стандартных координатах Шварцшильда имеет следующий вид

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2m(r)}{r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2M}{r}\right)} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (2)$$

Здесь функция $m(r)$ имеет следующий вид.

$$m(r) = \frac{Mr^\mu}{(r^\nu + q^\nu)^\frac{\mu}{\nu}}, \quad (3)$$

Обратим внимание, что регулярные решения допускаются только для $\mu \geq 3$ параметров. В нашем исследовании мы рассматриваем общие сингулярные магнитно-заряженные черные дыры с функцией масс в метрической системе. Из проведенных исследований видно, что астрофизически значимые случаи имеют место для параметра $\nu = 1$ и

соответствуют черным дырам НЭД Максвелла. Поэтому в наших исследованиях мы предпочитаем описанную выше пространственно-временную ситуацию.

Состояние горизонта чёрной дыры определяется следующим условием

$$f(r) = -g_{tt}(r) = 1 - \frac{2m(r)}{r}. \quad (4)$$

Мы нашли новое обобщённое параметризованное аксиально-симметричное решение для гравитационного поля, выраженное с помощью пяти метрических функций. Мы проверяем, что общее параметризованное решение соответствует некоторым общерелятивистским решениям при соответствующем выборе метрических функций.

В общем случае квадратичная форма во внутренней и внешней областях может быть выражена следующим образом.

$$ds^2 = -dt^2 + \mathcal{A}(dt + B\sin^2\theta d\varphi)^2 + \mathcal{D}dr^2 + \mathcal{E}d\theta^2 + \mathcal{F}\sin^2\theta d\varphi^2, \quad (5)$$

Неизвестные функции \mathcal{A} , B , \mathcal{D} , \mathcal{E} , \mathcal{F} зависят только от r и φ .

В частности, в это представление также вводится метрика Керра (Бойер и Линдквист, 1967).

$$ds^2 = -dt^2 + \frac{2Mr}{r^2 + a^2 \cos^2\theta} (dt + a \sin^2\theta d\varphi)^2 + \frac{r^2 + a^2 \cos^2\theta}{r^2 - 2Mr + a^2} dr^2 + (r^2 + a^2 \cos^2\theta) d\theta^2 + (r^2 + a^2) \sin^2\theta d\varphi^2, \quad (6)$$

этим формулами определяются ненулевые компоненты метрического тензора.

$$\begin{aligned} g_{00} &= -(1 - \mathcal{A}), & g_{03} &= \mathcal{A}B\sin^2\theta, & g_{11} &= \mathcal{D}, \\ g_{22} &= \mathcal{E}, & g_{33} &= (\mathcal{A}B^2\sin^2\theta + \mathcal{F})\sin^2\theta, & g &= -\mathcal{H}\mathcal{E}\mathcal{D}\sin^2\theta, \\ g^{00} &= -\frac{1}{\mathcal{H}}(\mathcal{A}B\sin^2\theta), & g^{03} &= \frac{1}{\mathcal{H}}\mathcal{A}B, & g^{11} &= \frac{1}{\mathcal{D}} \\ g^{22} &= \frac{1}{\mathcal{E}}, & g^{33} &= \frac{1}{\mathcal{H}\sin^2\theta}(1 - \mathcal{A}), & \mathcal{H} &\equiv \mathcal{A}B^2\sin^2\theta + \mathcal{F}(1 - \mathcal{A}). \end{aligned} \quad (7)$$

Вторая глава диссертации называется “**Движение заряженных частиц вокруг заряженной чёрной дыры,**” и мы используем формализм Гамильтона для описания динамики электрически заряженных частиц вблизи сингулярной общей магнитно-заряженной чёрной сферы. Гамильтониан H в этом случае принимает следующий вид форма.

$$H = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} (\pi_\alpha - q_p A_\alpha) (\pi_\beta - q_p A_\beta) + \frac{m^2}{2}, \quad (8)$$

Гамильтоновы уравнения движения описываются следующим образом

$$\frac{dx^\alpha}{d\lambda} = \frac{\partial H}{\partial \pi_\alpha}, \quad \frac{d\pi_\alpha}{d\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x^\alpha} \quad (9)$$

где m — масса пробной частицы, π_a — канонический 4-й импульс, q_p — заряд пробной частицы, а λ — аффинный параметр, связанный с конкретным временем следующим образом: $\lambda/\tau=m$.

Эффективный потенциал описывает гравитационный эффект, потенциал центральной силы, определяемый угловым моментом и потенциальной электромагнитной энергией. Положительный угловой момент $L>0$ соответствует частице, вращающейся против часовой стрелки

$$e = \frac{q_p Q_m G M}{m c^4}. \quad (10)$$

$$V_{eff}(r, \theta) = \sqrt{\left(1 - \frac{2m(r)}{r}\right) \left[\frac{(L - e \cos\theta)^2}{r^2 \sin^2\theta} + 1\right]}. \quad (11)$$

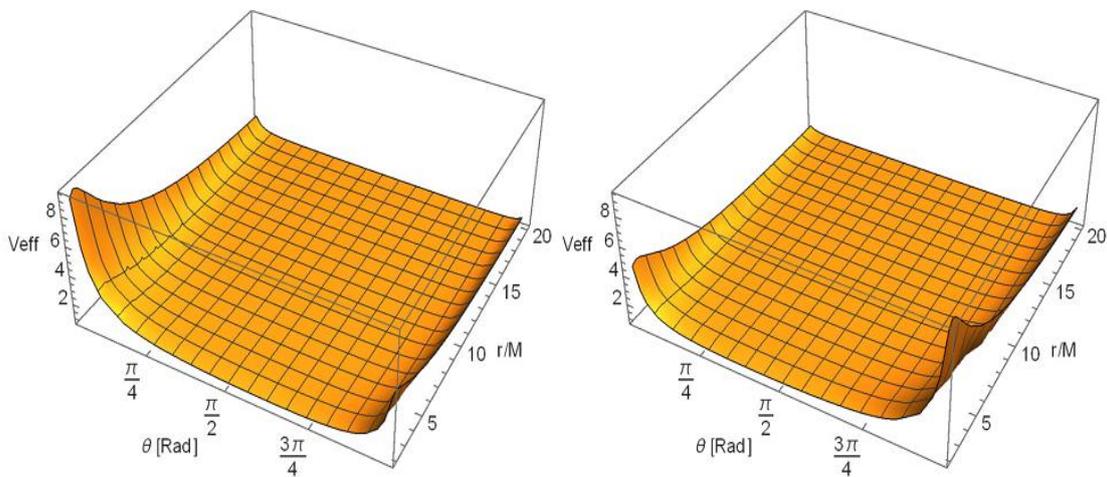


Рисунок 1. Эффективный потенциал заряженной частицы в поле общей чёрной дыры при значениях параметров $a=0.3$, $q=0.5$, $\mu = 3$, $\nu = 1$ и $L=3$. Параметр $e = -1$ слева, $e = 1$ справа.

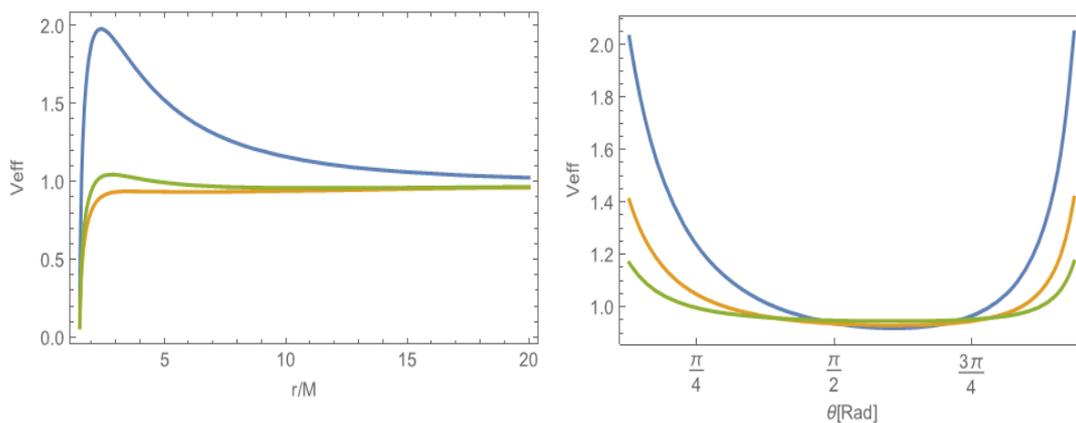


Рисунок 2. Эффективный потенциал заряженных частиц в поле общей чёрной дыры с параметрами $\alpha=0.3$, $q = 0.5$, $\mu = 3$, $\nu = 1$, $L = 3$ и $e=-1$ и $L=3$.

Виды положительных и отрицательных значений параметра e для эффективного потенциала $V_{eff}(r, \theta)$ показаны на рисунке 1. Имеется важная симметрия эффективного потенциала по параметру e , и такие же результаты

получаются, если одновременно поменять знак гравимагнитного параметра и $\theta \rightarrow \pi - \theta$. Мы можем легко увидеть это утверждение из выражения эффективного потенциала.

Мы можем видеть участки эффективного потенциала, где $\theta = \text{const}$ и $r = \text{const}$. На этих рисунках хорошо видно, что эффективный потенциал не является симметричным $\theta = \pi/2$ относительно экваториальной плоскости, и это согласуется с результатом электромагнитного взаимодействия электрически заряженной частицы с зарядом магнитного монополя чёрной дыры из-за наличия параметра e . Для нейтральных частиц эта асимметрия исчезает.

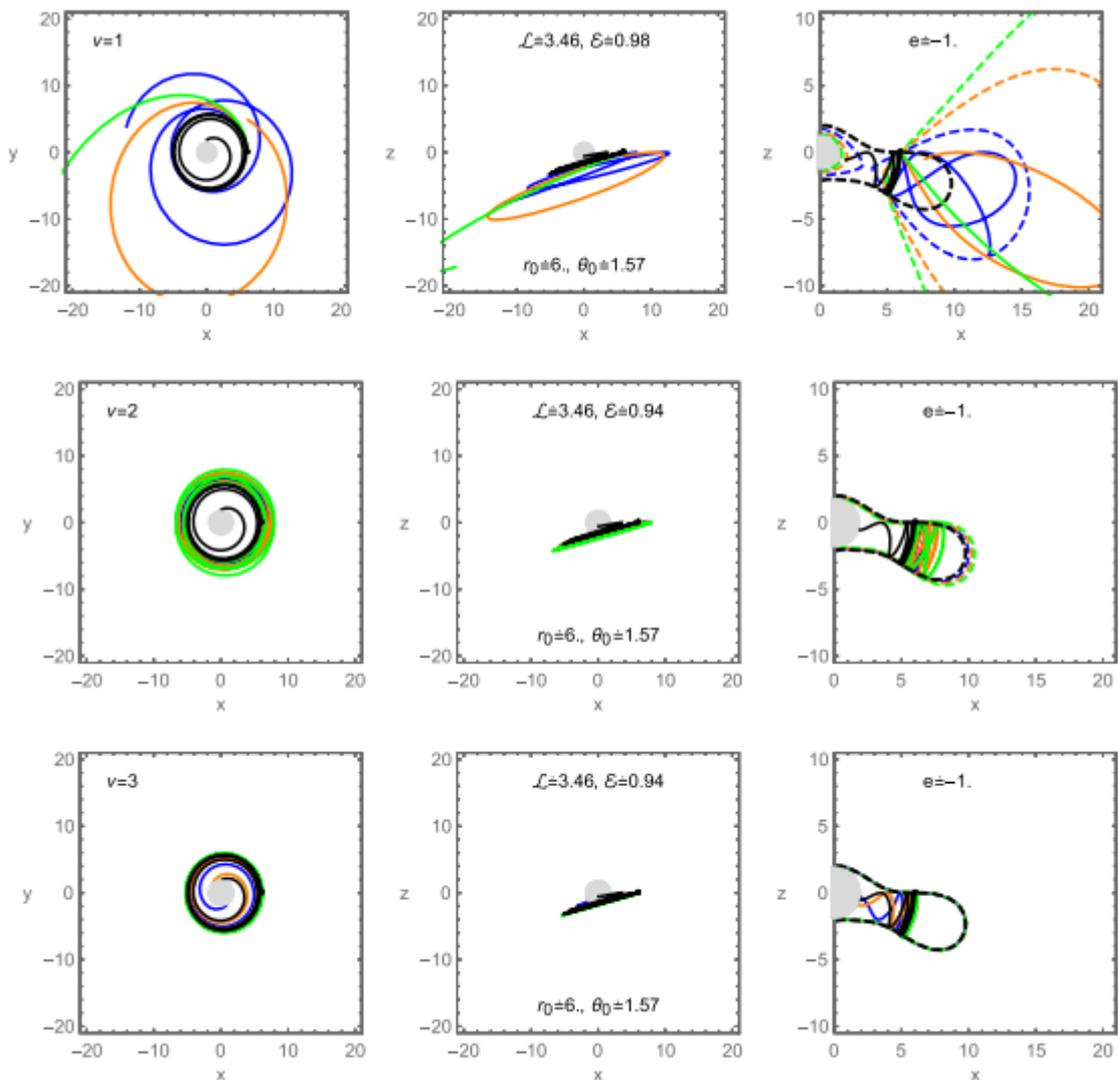


Рисунок 3. Различные параметры, представленные траекториями (толстые линии) и ограничениями движения (непрерывные кривые), выбраны как $\alpha=0.3$, $q=0.5$, $v=1$, $e = -1$ и μ : $\mu = 2$ (синий), $\mu=4$ (жёлтый), $\mu=6$ (зелёный) и v : $v = 1,2,3$. Чёрная линия описывает движение заряженной частицы в геометрии Шварцшильда, находящейся в поле магнитного монополя.

На фоне увеличения параметра v движение орбиты заряженной частицы приближается к орбитам вокруг чёрной дыры Шварцшильда,

находящейся в поле магнитного монополя. Можно сделать вывод, что самые большие отличия в поведении заряженных частиц по сравнению со случаем Шварцшильда связаны с магнитно-заряженными черными дырами НЭД Максвелла. Эти различия меньше у черных дыр Бардина ($\nu = 2$) и почти полностью исчезают у черных дыр Хейворда ($\nu = 3$).

В третьей главе под названием “Эпициклическое движение и движение намагниченных частиц вокруг магнитно-заряженной чёрной дыры, исследована движение магнитных частиц вокруг магнитно-заряженной чёрной дыры в общей теории относительности с учётом нелинейной электродинамики.

Эффективный потенциал будет иметь следующий вид.

$$V_{eff}(r, L, B, q) = f(r) \left[\left(1 - \frac{B}{r^2}\right)^2 + \frac{L^2}{r^2} \right], \quad (12)$$

$\beta = \mu / (mM)$ – безразмерный параметр, характеризующий намагниченную частицу.

Круговые устойчивые орбиты намагниченной частицы вокруг центрального объекта можно определить следующим образом в соответствии со стандартными условиями.

$$V'_{eff} = 0, \quad V''_{eff} \geq 0 \quad (13)$$

Удельный угловой момент и энергия намагниченной частицы на круговых орбитах могут быть определены следующими выражениями:

$$L^2 = \frac{(r^2 - B)(r(r^2 - B)f'(r) + 4Bf(r))}{r^2(rf'(r) - 2f(r))}, \quad \mathcal{E}^2 = \frac{2f^2(r)(B^2 - r^4)}{r^4(rf'(r) - 2f(r))} \quad (14)$$

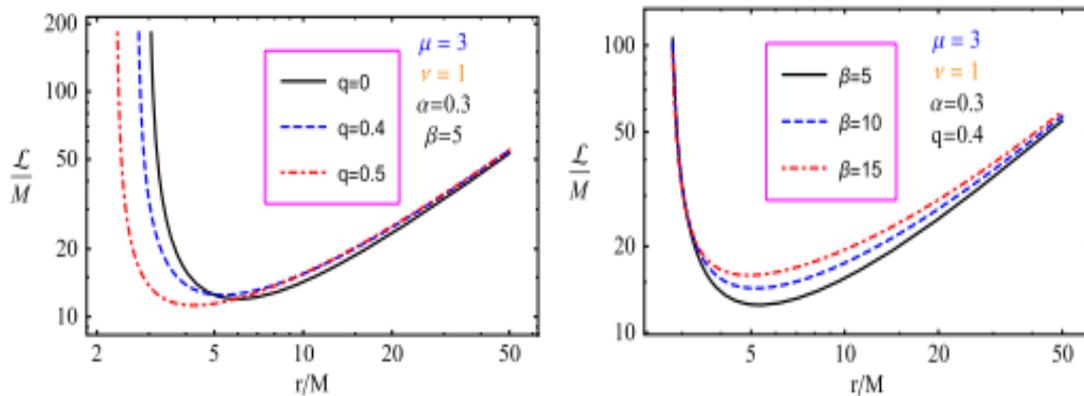


Рисунок 4. Зависимость удельного углового момента круговых орбит от радиуса при различных значениях параметра намагниченного заряда и параметра β .

Из рисунка 4 видно, что увеличение (уменьшение) магнитного заряда (параметр β) чёрной дыры уменьшает (увеличивает) минимальное значение удельного импульса намагниченной частицы. Кроме того, с увеличением как параметра намагниченного заряда, так и параметра β уменьшается значение расстояния, на котором удельный угловой момент минимален.

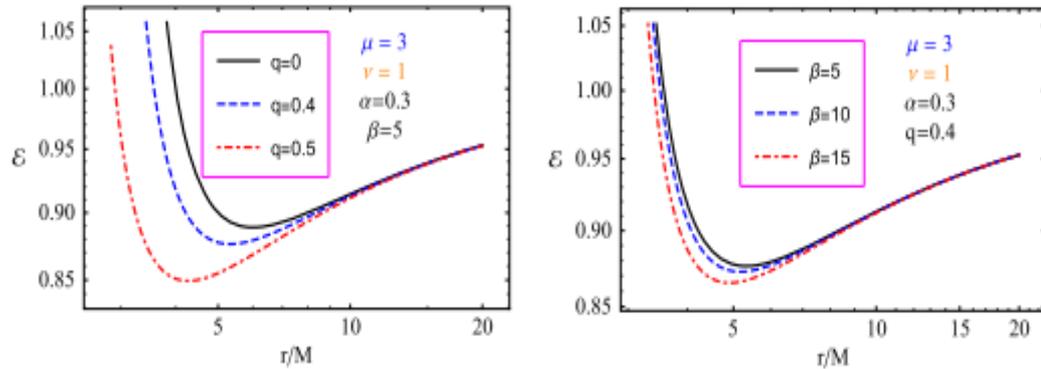


Рисунок 5. Радиальная зависимость энергии для круговых орбит при различных значениях параметра намагниченного заряда и параметра β .

Радиальная зависимость удельной энергии намагниченной частицы от различных значений параметра β и параметра магнитного заряда представлена на рисунке 4. Из рисунка 5 видно, что с увеличением параметров q и β радиус ISCO смещается в сторону центральной чёрной дыры, а минимальные значения энергии уменьшаются.

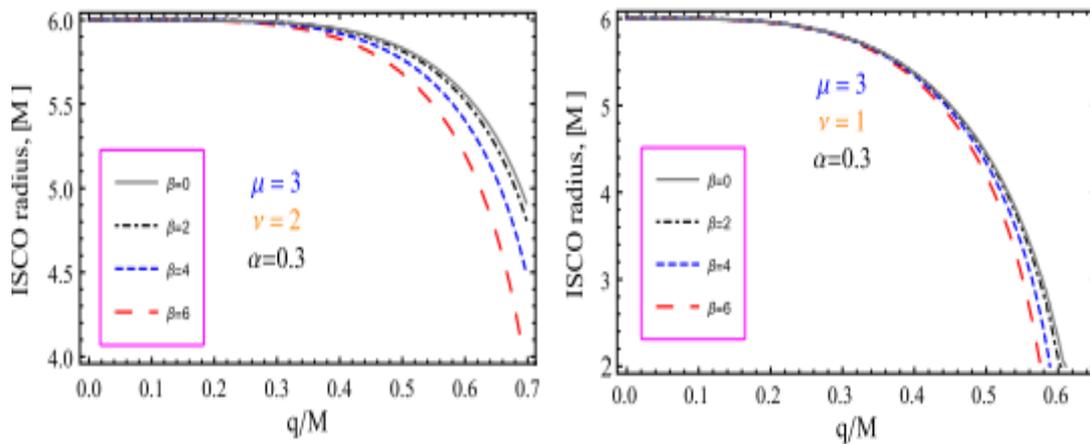


Рисунок 6. Радиус ISCO намагниченной частицы вокруг общей чёрной дыры для параметров $\nu = 1$ и $\nu = 2$.

Зависимость радиуса ISCO от параметра намагниченного заряда для различных значений параметров β и ν представлены на рисунке 6, $\mu=3$, $\alpha=0.3$. Из рисунков видно, что увеличение параметра β увеличивает скорость уменьшения радиуса ISCO, а при сравнении случаев $\nu = 1$ и $\nu = 2$ видно, что влияние параметра сильнее при $\nu = 2$, чем при $\nu = 1$.

На рисунке 7 представлена зависимость радиуса ISCO от параметра β для различных значений параметра магнитного заряда q и β , $\mu=3$, $\alpha=0.3$. Можно заметить, что радиус ISCO уменьшается с увеличением параметра магнитного заряда q и β . Наши численные расчёты показывают, что при максимальном значении параметра магнитного заряда для намагниченной частицы ISCO обращается в нуль при любых значениях параметра β . Кроме того, поскольку имеется радиус ISCO при $q < q_{max}$, существует верхний предел для параметра β , и этот верхний предел уменьшается с увеличением значения β . Это означает, что орбита намагниченной частицы становится неустойчивой из-за взаимодействия между магнитным полем и магнитным моментом частицы.

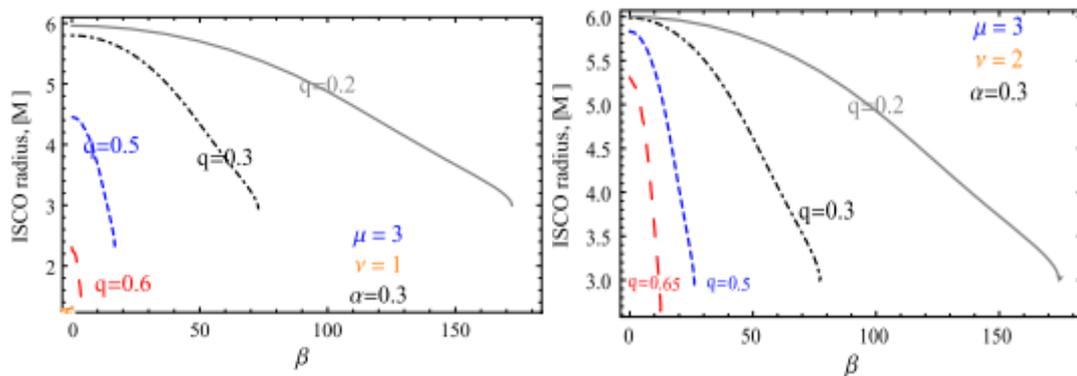


Рисунок 7. Радиус ISCO намагниченной частицы вокруг общих регулярных черных дыр для параметров $\nu = 1$ и $\nu = 2$.

Четвертая глава диссертации называется “**Оптические свойства аксиально-симметричной чёрной дыры в гравитации Расталла,**”. Данная глава посвящена исследованию оптических свойств заряженной и вращающейся чёрной дыры НУТ Киселева (CRNK) в теории гравитации Расталла. При изучении движения фотонов в пространстве-времени чёрной дыры CRNK в гравитации Расталла было показано, что угол отсечки фотонов в основном зависит от заряда НУТ, уравнения состояния квинтэссенции и интенсивности квинтэссенции вследствие гравитационной объективации. Заметим, что влияние других параметров пространства-времени на угол сдвига пренебрежимо мало. Мы представляем форму тени, отбрасываемой чёрной дырой CRNK в гравитационной силе Расталла для различных значений параметров пространства-времени. Мы показываем, что параметр вращения чёрной дыры очень мало изменяет положение и размер тени чёрной дыры. Однако изменение значений остальных пространственно-временных параметров может существенно изменить форму и размер наблюдаемой тени чёрной дыры. Мы видим, что радиус тени чёрной дыры и угол отклонения фотона больше для чёрной дыры CRNK в гравитации Расталла, чем для чёрной дыры Керра. Наконец, мы показываем, как параметры пространства-времени могут изменить наблюдаемые значения R_s

и δ_s . Наши результаты показывают, что при больших значениях R_s мы имеем меньшие значения параметра δ_s .

В правой верхней части рисунка 8 показано увеличение размера темной тени CRNK в гравитации Расталла при уменьшении значений параметра ω . Примечательно, что при значениях этого параметра ω , близких к нулю, размер тени, образующейся в чёрной дыре CRNK в гравитации Расталла, почти такой же, как и в чёрной дыре Керра. В левой части второго ряда на этом же рисунке показаны форма и размер тени чёрной дыры CRNK в расталловской гравитации для разных значений параметра $k\lambda$. В этой же части видно, что при меньших значениях этого параметра $k\lambda$ размер тени черной дыры CRNK соответствует черной дыре Керра в гравитации Расталла.

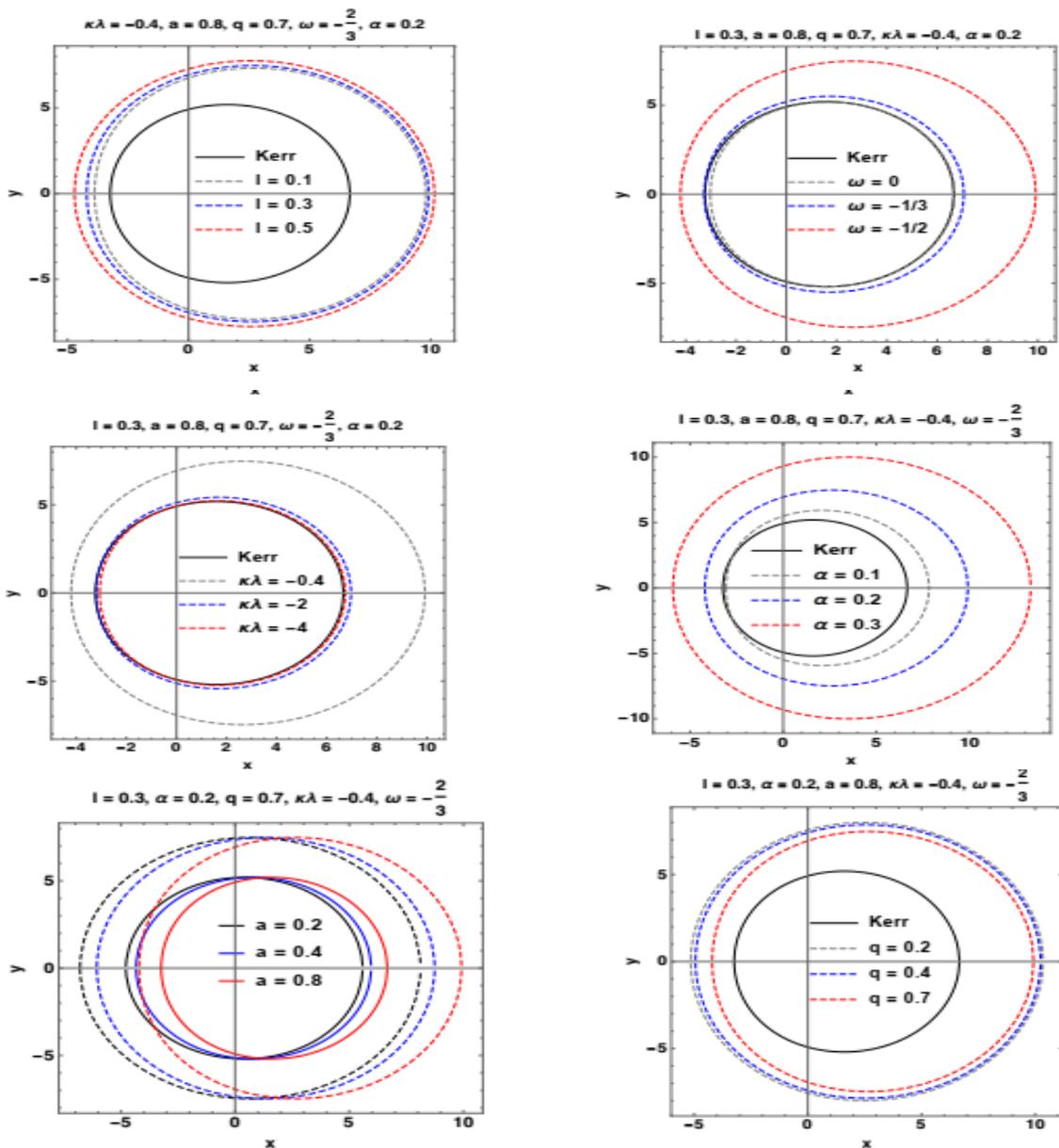


Рисунок 8. Форма тени чёрной дыры CRNK в гравитации Расталла по сравнению с чёрной дырой Керра.

Этот и предыдущий графики показывают, что при меньших значениях параметра $k\lambda$, когда значения параметра ω близки к нулю, становится трудно отличить видимую тень черных дыр CRNK от тени керровской черной дыра в гравитации Rastal. В гравитации Расталла видно, что размер тени черной дыры CRNK сильно зависит от параметра α , так как он значительно увеличивается с увеличением этого параметра α , и показан во второй части второго ряда на рисунке 8. Как показано, размер тени чёрной дыры CRNK в гравитации Расталла такой же, как и тень чёрной дыры Керра при значениях параметра α , близких к нулю. В левой части последней строки рисунка 8 тень гравитационной чёрной дыры Расталла CRNK сравнивается с тенью чёрной дыры Керра для разных значений параметра спина α . Здесь следует отметить, что сплошные линии на рисунке 8 соответствуют керровскому состоянию, а пунктирные – состоянию чёрной дыры CRNK в расталловской гравитации. Хотя значения параметра спина α показаны только для поиска Керра, те же цветные пунктирные линии представляют тень с тем же параметром спина α , что и чёрная дыра CRNK в гравитации Расталла. Легко видеть, что увеличение параметра вращения α существенно не меняет размер тени, а лишь смещает центр теневого круга вправо в пространствах Керра и CRNK. На последней диаграмме рисунка 8 показано, как электромагнитный заряд q и a влияют на тень вокруг чёрной дыры CRNK в гравитации Расталла.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, выполненных в рамках диссертационной работы «Астрофизические процессы вокруг аксиально-симметричных черных дыр», сделаны следующие выводы:

1. Предложено новое обобщённое параметризованное аксиально-симметричное решение для источника гравитационного поля, выраженное через пять метрических функций. Показано, общее параметризованное решение соответствует известным точным решениям уравнений поля при соответствующих выборах метрических функций.
2. Анализ динамики магнитно-заряженных частиц показал, что как энергия, так и угловой момент частиц на круговых орбитах увеличиваются с увеличением их магнитного заряда. Также показано, что радиус внутренней стабильной круговой орбиты частиц увеличивается с увеличением магнитного заряда частиц.
3. Показано, что размер тени CRNK черной дыры в гравитации Расталла незначительно увеличивается с увеличением НУТ параметра и уменьшается с ростом электримагнитного параметра пространства-времени.
4. Обнаружено, что уменьшение значения параметра Расталл гравитации увеличивает размер тени.
5. Из соотношения между радиусом наибольшего сближения фотонов с центральной черной дырой и прицельным параметром фотонов было

получено, что это соотношение становится линейным при больших значениях метрических параметров.

6. Показано, что при фиксированном значении прицельного параметра с увеличением значений параметров пространственно-временных параметров Расталл гравитации, радиус наибольшего сближения фотонов с центральным объектом уменьшается. Также наблюдалось обратное влияние на радиус наибольшего сближения при увеличении значений остальных параметров пространства-времени.

**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

KHUDOYBERDIEVA MALIKA KAROMAT QIZI

**ASTROPHYSICAL PROCESSES AROUND AXIAL-SIMMETRIC
BLACK HOLES**

01.04.02 – Theoretical physics

01.03.01 – Astronomy

ABSTRACT

of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Tashkent – 2023

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 No. B.2022.3. PhD/FM759.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Fundamental and Applied Research.

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.ifar.uz and on the website of "Ziyonet" information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Ahmedov Bobomurat Juraevich

Doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Official opponents:

Shaymatov Sanjar Ruzimurotovich

Doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher

Atamurotov Farruh Shuxratovich,

Doctor of Philosophy, PhD in Ph.-M.S.

Leading organization:

Samarkand State University named after Sharof Rashidov

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.10.04 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.: 71 237-09-62.; 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.: 71 237-09-62.

The Abstract of the dissertation was distributed on "___" _____, 2023.
(Registry record № ___ dated "___" _____, 2023)

A.R. Hayotov

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

E.Kh. Karimbaev

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)

The Topicality and demand of the dissertation topic. Currently, the development and improvement of mathematical models of various physical and astrophysical phenomena is attracting more attention. In particular, the latest observational data obtained by the Event Horizon telescope indicates the existence of a shadow (silhouette) of black holes in the centers of galaxies. 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 threshold values for the parameters of the new theories is an urgent problem.

Modern advances in experimental techniques for astrophysical observations have required consideration of general relativistic and post-relativistic effects on the results of many everyday astronomical observations, for example, the processes associated with the observation of compact massive astrophysical objects with strong gravitational fields. Taking into account the corrections of modified and alternative theories of gravity, it is also relevant to develop new alternative mathematical models describing astrophysical processes near compact objects. On the other hand, it is relevant to study and model the influence of the Riemannian nature of geometry near compact objects on the results of astronomical observations.

In our republic, great attention is paid to conducting experimental and theoretical work in the field of relativistic astrophysics, as well as conducting world class fundamental research. In the action strategy¹ for the further development of the Republic of Uzbekistan in 2017-2021 put forward by the President of our Republic, the rise of science in our country, important directions of fundamental research and ways of implementing their results are indicated. As a proof of this, it can be mentioned that in recent years in relativistic astrophysics, the movement of magnetized and charged particles around compact objects, their capture by the black hole, the physical properties of particles, the external magnetic field around compact objects and their nature studied in depth. Despite the huge amount of work that has been done in observing the Black Ora, some questions in this regard have not yet been answered.

This dissertation work is included in the state regulatory documents, in the decrees of the President of the Republic of Uzbekistan "On the strategy of actions for the further development of the Republic of Uzbekistan" No. PF-4947, dated

¹ Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PF-4947 dated February 7, 2017 "Strategy of actions on five priority areas of development of the Republic of Uzbekistan in 2017-2021".

February 7, 2017, as well as O It serves to a certain extent to implement the tasks approved in the "Roadmap" of the main directions of structural changes in Uzbekistan in 2019-2021, announced by the decision of the Government of the Republic of Uzbekistan on November 29, 2018.

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".

Degree of study of the problem

The study of various astrophysical processes within the parametrized metrics are considered by many scientists, including Japanese (K.Xioki, K.Maeda), Russian (A. Zakharov, V. Frolov, I. Novikov), German (C.Laemmerzhl, J.Kunz , A. Grezenbach), American (J. Psaltis, N. Yunes), Czech (Z. Stuchlik, J. Schee), Indian (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) and others. However, this parametrized metric is obtained by perturbing the standard solutions and is not wide scale. The wide-scale parameterized decision model and formalism are not yet fully developed.

Within the framework of the theory of gravity, analyzes of the electromagnetic field around compact bodies and the movement of magnetized particles were studied by domestic scientists such as B.Zh. Akhmedov, A.A. Abdujabbarov, B.A. Toshmatov, Zh. Rayimbaev, and foreign authors such as R. Wald, S. R. , F.de-Felice, F. Sorge and others. These scientists studied the movement of charged and magnetized particles around compact objects.

However, the influence of the parameters of various alternative gravity models and parameters describing dark matter on the motion of these particles remains unexplored.

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 research was carried out within the framework of projects of the Astronomical Institute, F-FA-2021-432 "Analysis and processing of data obtained from satellites for low-mass X-ray binaries", No. VA-FA-F2-008 "Relativistic astrophysics of isolated black holes and close binary systems with black holes", No. MRB - AN - 2019 - 29 and "Modeling of compact astrophysical objects and calculations of their observational characteristics to the parameters of the RT-70 telescope and the Russian orbital telescope Gamma-400".

The aim of the research: The main goal of the research work is to formulate a generalized solution for axially symmetric compact objects.

The tasks of the research:

finding a new generalized parametrized axially symmetric solution for the source of the gravitational field;

analysis of the dynamics of magnetically charged particles, in particular, obtaining expressions for the energy and angular momentum of particles in circular orbits;

analysis of the influence of space-time parameters on the photon sphere formed around the black hole CRNK in Rastall 's gravity;

study of the influence of the value of the Rastall gravity parameter on the dimensions of the shadow of a black hole;

study of the influence of space-time parameters of CRNK on the radius of closest approach of photons to the central object.

The objects of the research are astrophysical black holes, magnetized particles, and shadows of black holes, parameterized solution

The subjects of the research are mathematical models for studying optical-energetic processes near compact gravitational objects, numerical and analytical methods for solving differential equations.

The methods of the research. Mathematical apparatus of macroscopic electrodynamics and metric affine differential geometry in the general theory of relativity, analytical and numerical methods for solving differential equations of motion and field are used.

The scientific novelty of the research:

A new generalized parameterized axial-symmetric solution expressed by five unknown functions of the given metric for the gravitational field was proposed.

It is shown to correspond to known relativistic solutions based on an appropriate choice of metric functions.

The analysis of the dynamics of magnetized particles showed that both the energy and momentum of particles in circular orbits increase with the increase in the value of the magnetized particle. In addition, it was shown that as the value of the magnetized particle increases, the radius of the smallest circular orbit of the particles also increases.

Analysis of the space-time parameters on the photon sphere formed around the CRNK (Charged and Rotating NUT Kiselev) black hole in Rastall gravity showed that the size of the black hole shadow increases slightly with the increase of the NUT parameter. and it decreases as the electromagnetic parameter increases.

The practical results of the research are as follows:

Decreasing the value of the Rastall gravity parameter has been shown to increase the size of the black holes shadow. From the relationship between the radius of closest approach of photons to the central black hole and the effect parameter of photons, it was found that for larger values of the metric parameters,

this relationship is approximately linear. For a fixed value of the impact parameter, it is shown that the radius of closest approach of photons to the central object decreases with increasing values of CRNK space-time parameters. It was also observed that the radius of the nearest circular orbit has an inverse effect with increasing values of the remaining space-time parameters.

The reliability of the research results. The work uses modern methods of general relativity and theoretical physics, efficient numerical methods and algorithms; comparison of the obtained theoretical results with the results of astronomical and astrophysical observations and with the experience of other authors; the obtained conclusions are explained by compatibility with the basic principles of field theories for gravitational compact objects.

The scientific and practical significance of the research results of the research results 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. Also, studying the behavior of magnetized particles can be used to further refine mathematical models to describe the behavior of magnetized neutron stars around supermassive black holes.

Application of the research results. Based on the developed methods of the momentum movement of magnetized and charged particles in the theory of general relativity: Scientific results obtained on the movement of magnetized particles and magnetic effects were used by scientists from Fudan University (FU) in Shanghai (Fudan University, China, February 6, 2023 reference). The magnetic value of the particles and the influence of the deformed space on the orbits of these particles were calculated.

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

Publication of the research results. 6 research papers were published on research results, 2 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 PhD dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a bibliography. The volume of the dissertation is 95 pages.

CONCLUSIONS

The following conclusions were presented on the basis of research carried out on the topic of “Astrophysical processes around axial-symmetric black holes” for the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation:

1. A new generalized parametrized axially symmetric solution for the source of gravitational field is proposed, expressed in terms of five metric functions. It is shown that the general parametrized solution corresponds to the known general relativistic solutions with appropriate choices of metric functions.
2. The analysis of the dynamics of magnetically charged particles have shown that both the energy and angular momentum of the particles, at circular orbits, increase with the increase of their magnetic charge. Moreover, it has been shown, that ISCO radius of the particles also increases as the magnetic charge of the particles increases.
3. The analysis of the influence of the spacetime parameters on the photon sphere formed around the CRNK black hole in the Rastall gravity has shown that the size of the shadow slightly increases with the increase in the NUT parameter l and it decreases with the increase in the electromagnetic charge parameter q .
4. Moreover, it has been shown that the decrease in the value of the spacetime parameter ω makes the size of the shadow bigger.
5. From the relation between the radius of closest approach of photons to the central black hole and the impact parameter of photons, it has been obtained that this relation becomes approximately linear for the bigger values of metric parameters.
6. It has been shown that for the fixed value of the impact parameter, with the increase in the values of the parameters of CRNK spacetime parameters the radius of the closest approach of photons to the central object goes down. It has been also observed the opposite effect on the radius of the closest approach with the increase in the values of the rest of the spacetime parameters.

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

I bo'lim (part I; I часть)

1. Javlon Rayimbaev, Pulat Tadjimuratov, Ahmadjon Abdujabbarov, Bobomurat Ahmedov, Malika Khudoyberdieva, Dynamics of test particles and twin peaks QPOs around regular black holes in modified gravity // Galaxies 9(4), id: 75 (2021) (№ 1. Web of Science: **IF=2.05**)
2. Javlon Rayimbaev, Ahmadjon Abdujabbarov, Mubasher Jamil Wen-Biao Han, Malika Khudoyberdieva, Dynamics of test particles around charged black holes in Einstein-Æther gravity // Modern Physics Letters A. – World Scientific(Singapore), vol.37, Iss:33, Article: 2250220 (2022), 31 pages, (№ 1. Web of Science: **IF=2.066**)
3. Xudoyberdiyeva Malika, Jurayeva Nozima, Tarkibida kompakt ob'yektlar bo'lgan tor qo'shaloq sistemalarning elektromagnit nurlanishi // Scientific journal of Samarkand State University. 2020, №5(141) (01.00.00. №2)
4. Xudoyberdiyeva Malika, Elektromagnit maydonda qora o'ra atrofidagi zaryadlangan zarralar // Scientific journal of Namangan State University. 2021, №10(22) (01.00.00. №14)
5. Xudoyberdiyeva Malika, Qora o'ralar atrofidagi elektromagnit maydon // Scientific journal of Urgench State University. 2021, №10(17) (01.00.00. №12)
6. Xudoyberdiyeva Malika, Juraeva Nozima, Qora o'ra atrofida energiya olish mexanizmlari // Scientific journal of Namangan State University. 2020, №12(20) (01.00.00. №14)

II bo'lim (part II; II часть)

7. Khudoyberdieva M., Juraeva N.B., "Aksial-simmetrik qora o'ra atrofida sinov zarra harakati" // International scientific and practical online conference "Integration into the word and connection of sciences" Azerbaijan, 30 th November, 2020, pp.104-105
8. Khudoyberdieva M, Juraeva N.B. " Test particles around Hayward black holes surrounded by quintessential medium" // Humanity and Science Congress Hosted From Essen, Germany February 10th, 2022, pp. 61-63
9. Khudoyberdiyeva M., The Meissner effect of kerr-taub-nut spacetime, // Pavlodar, republic of Kazakhstan, innovation development of science and education collection of scientific works, january 2021, pp 156-158

10. Khudoyberdieva M. ,The penrose process of kerr-taub-nut spacetime // USA NEWYORK, International conference on research innovation in multidisciplinary sciences, 2021 march 6th-7th ,pp 240-241
11. Xudoyberdiyeva Malika , Jurayeva Nozima. 3:2 nisbat chastota rezonansidagi zaryadlangan zarralar tebranishlari va mikrokvazarlar uchun chegaraviy massa // Navoiy davlat pedogogika universiteti ,Astronomiya fanini o‘qitishda zamonaviy ta’lim texnologiyalaridan foydalanish metodikasi:muamo va yechimlar,respublika ilmiy-amaliy konferensiya materiallari, 2022 –yil.17-may,68-69 betlar
12. Xudoyberdiyeva M., Jurayeva N., Tashqi magnit maydonda joylashgan qora o‘ra atrofida zaryadlangan zarra harakati// Urganch davlat universiteti ,O‘zbekistonda uchinchi renesans poydevorini mustahkamlashda yoshlarning o‘rni va roli,ilmiy –amaliy onlayn konferensiya,2020-yil 16-dekabr , 109-111 betlar
13. Xudoyberdiyeva M.K., Jurayeva N.B., Kurbonov N.A., Energetic processes around regular black holes.// O‘zbekiston Milliy universiteti ,Fizika fanining rivojida istedodli yoshlarning o‘rni ,PIAK-XIII- 2020,respublika ilmiy anjumani materiallari,2020-yil 19-may 199-202 betlar
14. Худойбердиева М. , Жураева Н.,Пробное движение частиц вокруг чёрной дыры в конформной гравитации //O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi «Fan va ta’limni rivojlantirishda ёшларнинг ўрни» ,mavzusidagi Respublika ilmiy va ilmiy-amaliy anjumani 2020-yil 30-oktabr 73-75 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.***

