

**“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**

---

**TOSHKENT KIMYO XALQARO UNIVERSITETI  
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI**

**IBRAGIMOV INOMJON XUSAINOVICH**

**MUQOBIL GRAVITATSIYA NAZARIYALARIDA MAGNIT DIPOL  
MOMENTIGA EGA ZARRALAR DINAMIKASI**

**01.03.01 – Astronomiya  
01.03.02- Kosmos fizikasi va astrofizika**

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

**Toshkent - 2024**

**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**

**Ibragimov Inomjon Xusainovich**

Muqobil gravitatsiya nazariyalarida magnit dipol momentiga ega zarralar  
dinamikasi ..... 3

**Ибрагимов Иномжон Хусайнович**

Динамика частиц с магнитным дипольным моментом в  
альтернативных теориях гравитации ..... 21

**Ibragimov Inomjon Xusainovich**

Dynamics of particles with magnetic dipole momentum in alternative  
theories of gravity ..... 27

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

List of published works  
Список опубликованных работ..... 32

**“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**

---

**TOSHKENT KIMYO XALQARO UNIVERSITETI  
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI**

**IBRAGIMOV INOMJON XUSAINOVICH**

**MUQOBIL GRAVITATSIYA NAZARIYALARIDA MAGNIT DIPOL  
MOMENTIGA EGA ZARRALAR DINAMIKASI**

**01.03.01 – Astronomiya  
01.03.02- Kosmos fizikasi va astrofizika**

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

**Toshkent - 2024**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM1042 r aqami bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Toshkent Kimyo xalqaro universiteti hamda Fundamental va amaliy tadqiqotlar institutida bajarilgan.

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

**Ilmiy rahbarlar:**

**Abdujabbarov Ahmadjon Adiljanovich**  
Fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Ahmedov Bobomurot Juraevich**  
Fizika-matematika fanlari doktori, akademik

**Rasmiy opponenlar:**

**Shuhrat Numonjonovich Mardonov**  
Fizika-matematika fanlari doktori

**Abror Ibragimovich Mamadjanov**  
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 2024-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](mailto: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 2024-yil "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2023-yil "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_\_ raqamli reestr bayonnomasi)

**B.A. Toshmatov**

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

**D. R. Rayimbayev**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy  
kengash ilmiy kotibi f.-m.f. d

**A.B. Abdikamalov**

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

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati.** Muqobil gravitatsiya nazariyalariga ehtiyoj hozirgi standart gravitatsiya nazariyasi - Umumiy nisbiylik nazariyasidagi mavjud cheklovlaridan kelib chiqadi. Umumiy nisbiylik nazariyasi bizning quyosh sistemamizda va kattaroq miqyosda gravitatsiya maydonida harakatini tushuntirishda muvaffaqiyat qozongan bo'lsa-da, u qora o'ralar ichida yoki Katta portlash paytidagi kabi ekstremal sharoitlarda gravitatsiyaning tabiatini hisobga olmaydi. Bundan tashqari, umumiy nisbiylik nazariyasini zarrachalarning harakatini juda kichik miqyosda tasvirlaydigan kvant mexanikasi nazariyasi bilan birlashtirib bo'lmaydi. Modifikatsiyalangan Nyuton dinamikasi va Kvant gravitatsiyasi kabi muqobil gravitatsiya nazariyalari bu cheklovlarni bartaraf etishga va koinotdagi gravitatsion o'zaro ta'sirni to'liqroq tushunishga imkon beradi.

Boshqa tomondan taklif etilgan muqobil nazariyalar natijalarini tahlil qilish va tajriba va kuzatuv ma'lumotlar bilan solishtirish, shuningdek, yangi nazariyalar va yechimlar parametrlari uchun cheklovchi qiymatlarni olish dolzarb masala bo'lib qolmoqda. Gravitatsiyaning alternativ va modifikatsiyalangan nazariyalarini ishlab chiqishga urinishlar, xususan, koinotda qora materiya va qora energiya mavjudligi bilan bog'liq bo'lgan kosmologik sabablar hisoblanadi.

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 Strategiyasida<sup>1</sup> 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.

**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.**

---

<sup>1</sup> 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".

Tashqi magnit maydondagi qora oʻralar atrofida elektromagnit maydonning nazariy modelini yaratish va zaryadlangan zarrachalar dinamikasi koʻplab olimlar, jumladan, ingliz (R.Vold, J.Petterson), rus (A.Zaxarov, V. Frolov, I. Novikov), nemis (C. Laemmerzahl, J. Kunz, A. Grezenbach), argentinalik (L. Amarilla, E. Eiroa), chex (M. Kolos, J. Vrba), hindistonlik (N. Dadich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) va boshqalar tomonidan oʻrganib chiqilgan. Ammo muqobil gravitatsiya nazariyasi doirasida magnit maydonda magnitlangan zarralar harakatini oʻrganish masalasi ochiq qolmoqda. Shuningdek, bunday nazariyalar doirasida magnitlangan zarrachalarning doiraviy orbitalarining xossalari toʻliq oʻrganilmagan.

Umumiy nisbiylik nazariyasi doirasidagi elektromagnit maydon va magnitlangan zarracha harakatining matematik modeli mahalliy olimlar B.J.Ahmedov, A.A. Abdujabbarov, D.R.Rayimboev, B.A.Toshmatov va F.A. Atamurortov, hamda xorijlik olimlar R.Vald, F.de Feliche, F.Sorge va boshqalar tomonidan oʻrganilgan. Biroq, muqobil gravitatsiya nazariyasi doirasida markaziy obyekt tashqi magnit maydonda joylashgan holatlar uchun nazariy modellar takomillashtirish masalasi ochiq qolmoqda.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy taʼlim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bogʻliqligi.** 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** alternativ gravitatsiya nazariyasi doirasida qora oʻralar yaqinidagi zarrachalar dinamikasini tavsiflash uchun astrofizik modellarni ishlab chiqish va takomillashtirishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

Eynshteyn-Maksvel-skalyar nazariyasida magnitlangan zarralar harakatini oʻrganish;

Magnit maydonida joylashgan kvant gravitatsiyasidagi Schwarzschild qora oʻrasi atrofida zaryadli va magnitlangan zarralar aylana orbitalari hamda toʻqnashuvlarini tadqiq qilish;

Magnitlangan Kerr qora oʻrasi atrofida Skalyar-vektor-tenzor maydon effektida magnitlangan zarralar harakatini tekshirish.

**Tadqiqotning obyekti** astrofizik qora oʻralar, elektr va magnit zaryadlari nolga teng boʻlmagan sinov zarralari, qora materiya.

**Tadqiqotning predmeti** astrofizik modellar, elektromagnit va tortishish maydonlari uchun tenglamalarni yechishning raqamli va analitik usullari, kompakt gravitatsiya obyektlari yaqinidagi magnitlangan zarralari dinamikasini oʻrganish.

**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:

Ilk bor, EMS gravitatsiya skalyar maydon parametrining musbat (manfiy) qiymatlari magnitlangan zarrachalarning toʻqnashuvlarida massa markazi energiyasini sezilarli oshirishini (kamaytirishini) koʻrsatdi;

Ilk bor, SRG (PSR) J1745--2900 magnetari o'ta massiv qora o'ra Sgr A\* muhitiga yaqin joyda barqaror bo'lolmasligi ko'rsatildi.

Ilk bor, STVG ta'siri ITAO radiusi va ITAOdagi burchak momentini hisoblashda juda muhimligi va magnit o'zaro ta'sir kuchini kuchaytirishi aniqlandi;

Ilk bor, STVG effekti mavjud bo'lganda magnitlangan zarralar to'qnashuvidagi massa markazining energiyasini ortishi ko'rsatildi.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

QN va Kerr qora o'ralari atrofidagi zarrachalarning eng kichik doiraviy orbitalari radiuslarini qiyosiy tahlili QN parametrining  $0 < \gamma < \infty$  oralig'idagi qiymatlari Kerr qora o'rasining aylanish parametrini  $a/M \lesssim 0.31$  oraliqda almashtirishi mumkinligi ko'rsatildi. Shuningdek, QN qora o'rasi atrofida akkretsiyon diskining energiya effektivligi tahlili energiya effektivligi QN parametrlarining oshishi bilan ortishi ko'rsatdi.

Magnit maydon mavjudligida QN Schwarzschild qora o'ra atrofida zaryadlangan zarrachalar harakati magnit maydon eng kichik doiraviy orbita radiusining kamayishiga, QN parametri esa ortishiga olib kelishi ko'rsatildi.

Magnit maydondagi zarracha uchun Hamilton-Jakobi tenglamasi tahlili magnitlangan zarrachalar energiyasining minimal qiymati QN parametrlari ortishi bilan ortishini ko'rsatdi.

Shuningdek, QN parametrining ortishi bilan minimal magnit bog'lanish parametrining maksimumining ortishiga olib kelishi ko'rsatildi. Magnitlangan zarrachaning QN Schwarzschild qora o'rasi atrofidagi doiraviy orbitalari diapazoni QN parametri ortishi bilan kamayishi aniqlandi. SRG (PSR) J1745-2900 tipidagi magnetar orbitasi supermassiv qora o'ra Sgr A\* yaqinida barqaror bo'lolmasligi ko'rsatildi.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** 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 qo'llanilgan va natijalar mavjud kuzatuv ma'lumotlari va boshqa mualliflarning natijalari bilan taqqoslangan. Dissertatsiya ishining xulosalari kompakt ob'ektlar astrofizikasining asosiy qoidalariga mos keladi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, ishlab chiqilgan model qora o'raning magnit va elektr zaryadlarining ta'sirini aylanuvchi qora o'raning aylanish ta'siridan 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 ma'lumotlaridan foydalangan holda qora o'ralar parametrlari va tortishishning alternativ nazariyalari uchun aniqroq chegara qiymatlarini olish uchun ishlatilishi mumkin.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Muqobil gravitatsiya nazariyasida elektromagnit maydon va magnitlangan zarrachalar harakatining ishlab chiqilgan

astrofizik modellari asosida:

magnitlangan zarrachalarning harakatlanish xususiyati va magnit effektlari xitoylik olimlar tomonidan Shanxaydagi Fudan universitetida (FU) ishlatilgan (FU, Xitoy, 2024-yil 5-maydagi xati). Natijada, zarrachalarning magnit zaryadining qiymati va bu zarralar orbitalaridagi deformatsiyalangan fazo effektlari hisoblab chiqilgan;

magnitlangan zarrachalar harakati bo'yicha natijalar xorijiy tadqiqotchilarning ishlarida qo'llanilgan, magnitlangan zarrachalarning aylanadigan qora o'ra atrofidagi ta'sirini tavsiflash uchun yuqori impakt faktorli xorijiy jurnallarda chop etilgan 5 dan ortiq ilmiy maqolalarda (The European Physical Journal C, Volume 84, Issue 3, article id.291, Web-Sc, IF-4.991; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 9, article id.855, Web-Sc, IF-4.991; Physical Review D, Volume 108, Issue 4, article id.044030, Web-Sc, IF-4.080; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 8, article id.704, Web-Sc, IF-4.991; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 6, article id.506, Web-Sc, IF-4.991 va boshqalar) foydalanilgan.

Ilmiy natijalarning qo'llanilishi, muqobil gravitatsiya nazariyalari doirasida magnit maydon va magnitlangan zarralarning kompakt obyektlar atrofidagi harakati haqida ma'lumot olingan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Mazkur tadqiqotning asosiy natijalari 1 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 12 ta ilmiy ish, jumladan O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etgan ilmiy nashrlar ro'yxatida 5 ta ilmiy maqola (2 ta respublika va 3 ta xorijiy jurnallarda) chop etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 100 bet.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida mavzusining dolzarbligi, zarurati, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga bog'liqligi, muammoning o'rganilganlik darajasi, dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog'liqligi va tadqiqotning maqsadi, vazifalari, ob'yekti, predmeti, usullari, ilmiy yangiligi, amaliy natijasi, ishonchliligi, natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati, natijalarining amaliyotga joriy qilinishi, natijalarining aprobatsiyasi, natijalarining e'lon qilinishi hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi to'g'risida qisqacha ma'lumotlar keltirilgan.

**“Einstein-Makswell-skalar nazariyasida zaryadlangan qora o'ralari atrofida magnitlangan zarrachalarning dinamikasi va to'qnashuvi”** deb nomlangan birinchi bobda Einstein-Makswell-skalyar (EMS) nazariyasida

magnitlangan va elektr zaryadlangan statik qora o'ralar (QO') atrofida magnitlangan zarrachalar dinamikasi o'rganilgan. Dastlab, biz Einstein-Makswell-skalar parametrlarining mumkin bo'lgan qiymatlarini o'rganamiz, ular uchun fazo-vaqt geometriyasi qora o'ra fazovaqtini ifodalaydi. Elektr zaryadlangan qora o'raning elektr maydoni va magnitlangan sinov zarrasining magnit maydoni o'rtasida o'zaro ta'sir yo'q. Shuning uchun biz qora o'rani tashqi asimptotik bir xil magnit maydonda joylashgan deb hisoblaymiz. Biz EMS nazariyasida zaryadlangan qora o'ra atrofidagi tashqi magnit maydonning xususiyatlarini o'rganamiz. Bundan tashqari, biz qora o'ra zaryadi va Einstein-Makswell-skalar nazariyasi parametrlarining barqaror aylana orbitalardagi zarracha energiyasi va burchak momentiga, shuningdek, ichki barqaror aylana orbitalarining radiusiga ta'sirini o'rganib chiqdik. Olingan barcha natijalar Reissner-Nordström qora o'rasining olingan natijalari bilan taqqoslanadi. Natijada, biz Einstein-Makswell-skalar nazariyasida zaryadlangan qora o'ra atrofida magnitlangan va elektr zaryadlangan zarralar to'qnashuvining massa energiyasi markazining harakatini o'rganamiz. Umumiy massasi  $M$  va elektr zaryadi  $Q$  bo'lgan Einstein-Makswell-skalyar gravitatsiyadagi elektr zaryadlangan qora o'ra atrofidagi fazo vaqti sferik koordinatalar yordamida quyidagi ko'rinishda tavsiflanadi:

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

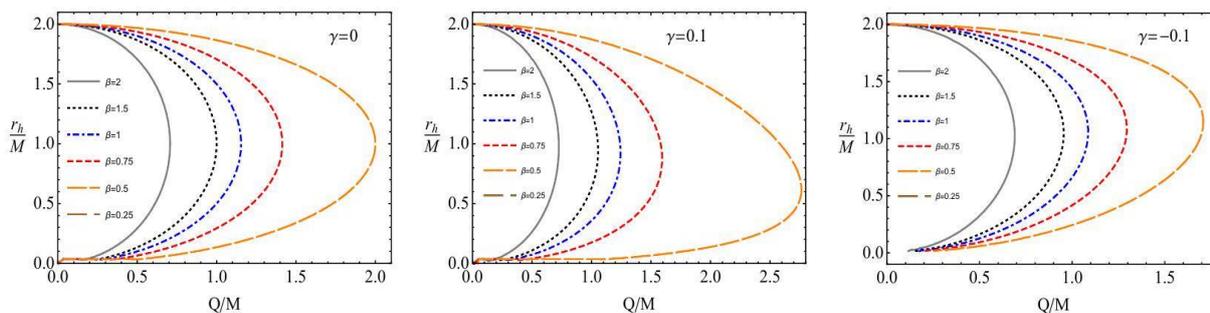
bu yerda radial metrik funktsiya quyidagi ko'rinishga ega

$$U(r) = 1 - \frac{2M}{r} - \frac{\lambda}{3}f(r) + \frac{\beta Q^2}{f(r)} \quad (2)$$

$$f(r) = r^2 \left( 1 + \frac{\gamma Q^2}{Mr} \right) \quad (3)$$

bu yerda  $\beta$  va  $\gamma$  o'lchovsiz parametrlar Einstein-Makswell-skalyar nazariyasidan kelib chiqadi. Bundan tashqari,  $\lambda$  parametri kosmologik konstantaga mos keladi (de Sitter uchun  $\lambda > 0$  va anti-de Sitter fazo vaqti uchun  $\lambda < 0$ ). (2) - formula  $\lambda = \beta = 0$  bo'lganda Schwarzschild qora o'rasiga aylanadi va  $\lambda = \gamma = 0$  hamda  $\beta = 1$  bo'lganda, Reissner-Nordström qora o'ra fazo vaqtini aks ettiradi. Ushbu ishda biz  $\lambda = 0$  holatini ko'rib chiqamiz. Elektromagnit to'rt potentsialning nolga teng bo'lmagan komponenti quyidagicha:

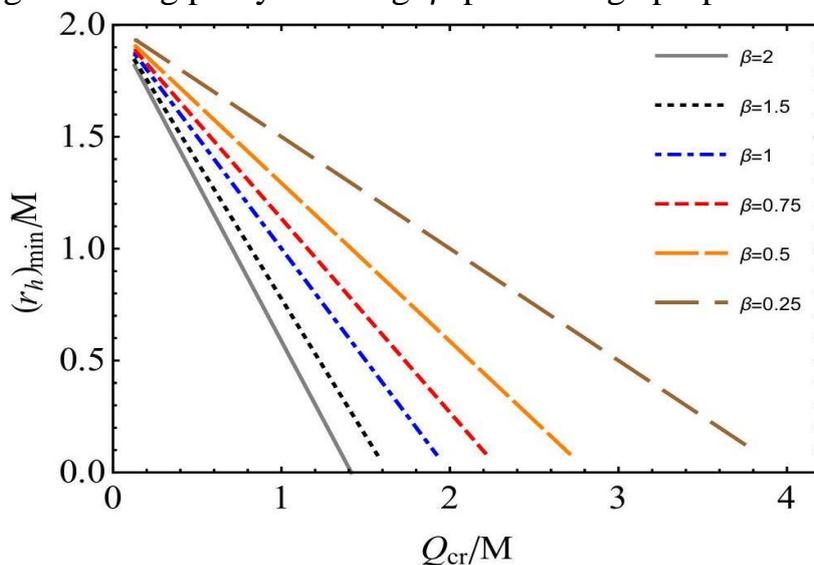
$$A_t = \frac{Q}{r} \left[ \gamma - \frac{\beta}{2} \left( 1 + \frac{rQ}{f(r)} \right) \right] \quad (4)$$



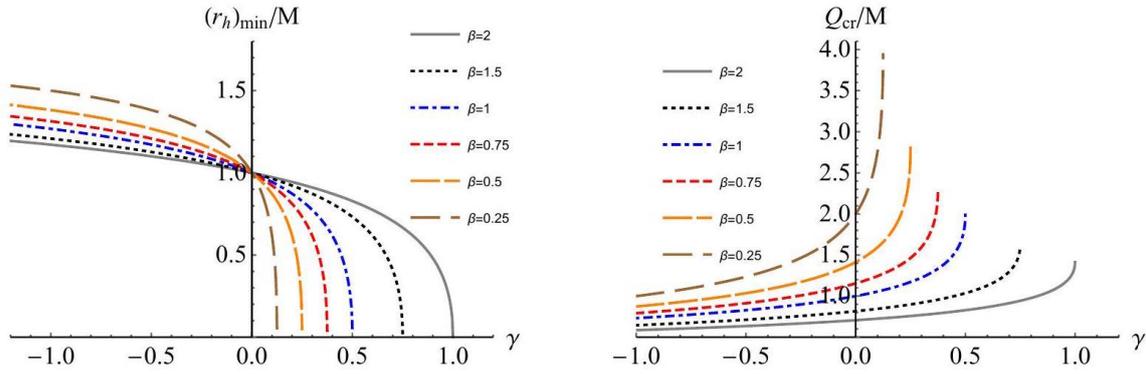
**1-rasm. Hodisa gorizonti radiusining grafigi bo'lib  $\beta$  parametrining turli qiymatlari uchun  $\gamma$  parametrining funksiyasidir.**

1-rasmda hodisalar gorizonti radiusining qora o'ra zaryadiga bog'liqligini  $\beta$  parametrining turli qiymatlari uchun  $\gamma$  parametrining nolga  $\gamma = 0$  (chap), musbat (o'rta) va manfiy (o'ng) qiymatlarida ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki,  $Q$  zaryadining kritik qiymati  $\beta$  parametrining oshishi bilan ortadi.  $\gamma = 0$  qora o'ra zaryadining kritik qiymatiga mos keladigan tashqi gorizontning minimal qiymati,  $\beta$  ning musbat (manfiy) qiymatlari esa tashqi gorizontning minimal qiymatining oshishiga (kamayishiga) sabab bo'ladi.

2 -rasmda tashqi gorizontning minimal qiymatlari va  $\beta$  parametrining turli qiymatlari uchun  $\gamma$  maksimal qiymatlariga mos keladigan qora o'ra zaryadining kritik qiymatlariga bog'liqligi ko'rsatilgan. Ushbu rasmdan ko'rinib turibdiki, tashqi gorizontning minimal radiusi kritik qora o'ra zaryadining chiziqli kamayuvchi funksiyasiga ega va uning pasayish tezligi  $\beta$  parametriga proporsionaldir.



**2-rasm. Tashqi gorizontning minimal radiusi kritik qora o'ra zaryadining funksiyasi sifatida  $Q_{cr}$ ,  $\beta$  parametrining turli qiymatlari uchun  $\gamma$  parametrining mos keladigan yuqori qiymatlarida.**



3-rasm. Qora o'ra zaryadining kritik qiymatlari va hodisa gorizontining minimal radiusi  $\beta$  parametrining turli qiymatlari uchun  $\gamma$  parametrining funksiyasi sifatida.

3-rasmda yuqori zaryadlangan EMS QO' (chap panel) tashqi gorizontining minimal qiymatlarini va  $\beta$  parametrining turli qiymatlari uchun  $\gamma$  parametrining funksiyalari sifatida QO' (o'ng panel) ekstremal zaryadi ko'rsatilgan. Bizning sonli tahlilimiz shuni ko'rsatadiki,  $\beta$  parametrining barcha mumkin bo'lgan qiymatlari uchun hodisa gorizonti radiusining chegaralari bir xil.

$$\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \{(r_h)_{\min}, Q_{\text{extr}}\} = \{2M, 0\} \quad (5)$$

va

$$\lim_{\gamma \rightarrow \gamma_{\max}} \{(r_h)_{\min}, Q_{\text{extr}}\} = \{0, Q_{\text{extr}}\}. \quad (6)$$

$\gamma_{\max}(Q_{\text{extr}})$  ning yuqori qiymati  $\beta$  parametri oshishi(kamayishi) bilan ortadi (kamayadi).

QO' atrofidagi magnit maydonga mos keladigan elektromagnit to'rt-potensial quyidagi shaklga ega

$$A_{\phi} = \frac{1}{2} B_0 f(r) \sin^2 \theta \quad (7)$$

bu yerda  $B_0$  - tegishli kuzatuvchi tomonidan o'lchangan tashqi yagona magnit maydonning asimptotik qiymati.

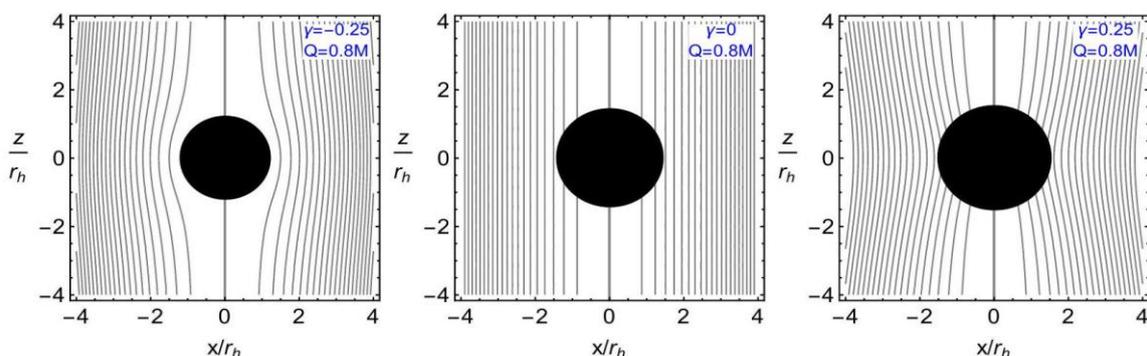
EMS nazariyasida elektr zaryadlangan QO' atrofidagi tashqi magnit maydonlarining nolga teng bo'lmagan komponenti quyidagiga teng

$$B^{\hat{r}} = B_0 \cos \theta, B^{\hat{\theta}} = \sqrt{\frac{U(r)}{f(r)}} B_0 \left( r + \frac{\gamma Q^2}{2M} \right) \sin \theta \quad (8)$$

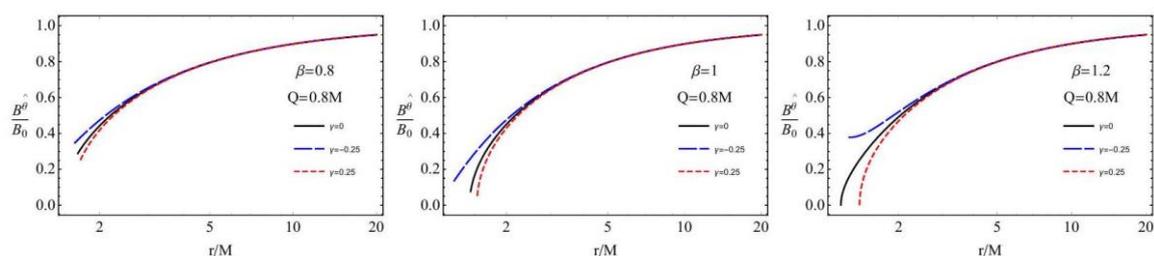
EMS QO' atrofidagi tashqi magnit maydon chiziqlarining xususiyatlari  $\gamma$  parametrining  $Q = 0,8$  da turli qiymatlari uchun 4-rasmida keltirilgan. Ko'rinib turibdiki,  $\gamma = 0$  bo'lganda magnit maydon bir xil,  $\gamma$  ning manfiy va musbat

qiymatlari uchun maydon mos ravishda parabolik va giperbolik bo'ladi.

5-rasmda  $\gamma$  va  $\beta$  parametrlarining turli qiymatlari uchun EMS QO' atrofidagi tashqi magnit maydon burchak komponentining normallashtirilgan qiymati uning asimptotik qiymatlariga radial bog'liqligi ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, burchak komponenti  $\gamma$  parametrini oshirishga nisbatan pasayishini ko'rsatadi. Shunga o'xshash holatni  $\beta$  parametrda ham ko'rish mumkin.



4-rasm.  $\gamma$  parametrining turli qiymatlari uchun EMS BH atrofidagi magnit maydon chiziqlari. Bu erda biz BH zaryadini  $Q/M = 0,8$  va  $\beta = 1$  deb olamiz.



5-rasm.  $\gamma$  va  $\beta$  parametrlarining turli qiymatlari uchun EMS QO' atrofidagi magnit maydonning ortonormal burchak komponenti. Bu yerda biz BH zaryadini  $Q/M = 0,8$  deb belgiladik.

**“Qayta normallashtirilgan Schwarzschild qora o'ralari atrofidagi sinov zarralarining dinamikasi”** deb nomlangan 2-bobda tashqi asimptotik jihatdan bir jinsli magnit maydon mavjud bo'lganda, qayta normallashtirilgan Schwarzschild qora o'ralari atrofida neytral, elektr zaryadlangan va magnitlangan zarrachalar dinamikasini o'rganilgan.

QN qora o'ra atrofidagi neytral sinov zarralarining eng ichki barqaror aylana orbitasi tahlili va aylanuvchi Kerr qora o'rasi natijalari bilan taqqoslab, QN qora o'ra va aylanuvchi Kerr qora o'rasi parametrlari bir xil  $a/M \lesssim 0.31$  ichki turg'un aylana orbita (ITAO) radiusiga ega ekanligi ko'rsatildi. Astronomik kuzatuvlarga ko'ra, akkretsiya disklari astrofizik qora o'ralar mavjudligini tasdiqlaydi.  $a/M \sim 0.99$  gacha aylanish parametri bilan tez aylanib, QN Schwarzschild qora o'ra parametrlarining neytral zarrachalarning aylana orbitalariga ta'siri Kerr qora o'rasiga taqlid qila olmaydi, degan xulosaga kelish mumkin.

Keyinchalik, tashqi asimptotik bir xil magnit (elektromagnit) maydon va magnitlangan (elektr zaryadlangan) zarralar o'rtasidagi kuchli o'zaro ta'sir mavjud bo'lganda, QN qora o'ralariga yaqin joyda zaryadlangan va magnitlangan

zarrachalarning harakatini tahlil qilish uchun Hamilton-Jakobi tenglamasidan foydalanildi. Biz QN qora o'ra parametrlari zaryadlangan va magnitlangan zarrachalar dinamikasini miqdoriy jihatdan o'zgartirishini, xususan  $\lambda$  parametrining ortishi bilan zarrachalarning ITAO radiusi kamayishini,  $\gamma$  parametrining oshishi esa zarrachalarning ITAO radiusi ortishiga olib kelishini ko'rsatdik.

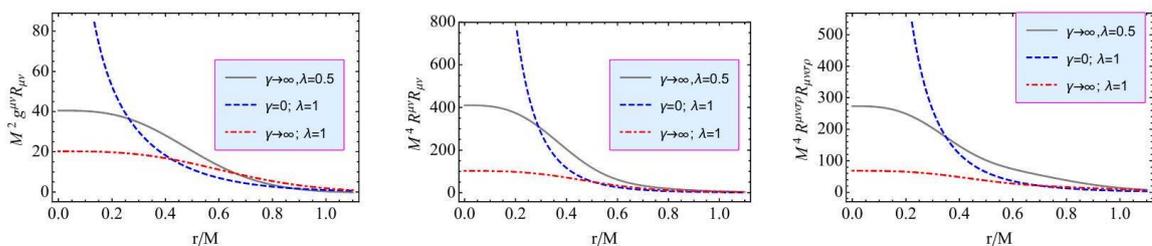
Massasi  $M$  bo'lgan statik QO' atrofidagi fazo-vaqtning chiziqli elementini quyidagicha tavsiflash mumkin

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{1}{f(r)}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2), \quad (9)$$

bu yerda

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} \left( 1 + \frac{\Omega M^2}{r^2} + \frac{\gamma \Omega M^3}{r^3} \right)^{-1}, \quad (10)$$

$\gamma$  va  $\Omega$  - bu qayta normallashtirish nazariyasidan kelib chiqqan o'zgarmas yangi fazo-vaqt parametrlari va kvant tuzatishlarni tavsiflaydi.



**6-rasm.  $\gamma$  va  $\lambda$  parametrlarining turli qiymatlari uchun fazo-vaqt skalyar invariantlarining radial konturlari. Chap panel Ricci skalyariga, o'rta panel Ricci tensorining kvadratiga va o'ng panel Kretchman skalyariga mos keladi.**

6-rasmda  $\gamma$  va  $\lambda$  parametrlarining turli qiymatlari uchun skalyar invariantlarning radial bog'liqligi ko'rsatilgan. 6-grafikdan ko'rish mumkinki, QN Schwarzschild QO'  $\gamma$  va  $\lambda$  ning ikkala parametrining ortishi Ricci skalari, Ricci tenzori, kvadrat qiymatlari va QN Schwarzschild QO' markazida Kretschmann egrilik skalyarlarining kamayishiga olib keladi. Bundan tashqari,  $\gamma = 0$  bo'lganda, egrilik skalyarlari QO' markazida ajralib turishini ko'rish mumkin.

Massiv neytral zarralar uchun harakat tenglamalari quyidagi ko'rinishga ega

$$\dot{r}^2 = \mathcal{E}^2 + g_{tt} \left( 1 + \frac{\mathcal{K}}{r^2} \right), \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{g_{\theta\theta}^2} \left( \mathcal{K} - \frac{l^2}{\sin^2\theta} \right), \quad (12)$$

$$\dot{\phi} = \frac{l}{g_{\phi\phi}}, \quad (13)$$

$$\dot{t} = -\frac{\mathcal{E}}{g_{tt}}, \quad (14)$$

bu yerda  $\mathcal{K}$  umumiy burchak impulsiga mos keladigan Karter konstantasini bildiradi.

Zarrachaning harakatini  $\theta = \text{const}$  va  $\dot{\theta} = 0$  bo'lgan doimiy tekislik bilan cheklab, Karter doimiysi  $\mathcal{K} = l^2/\sin^2 \theta$  ko'rinishini oladi va radial harakat tenglamasini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\dot{r}^2 = \mathcal{E}^2 - V_{\text{eff}} \quad (15)$$

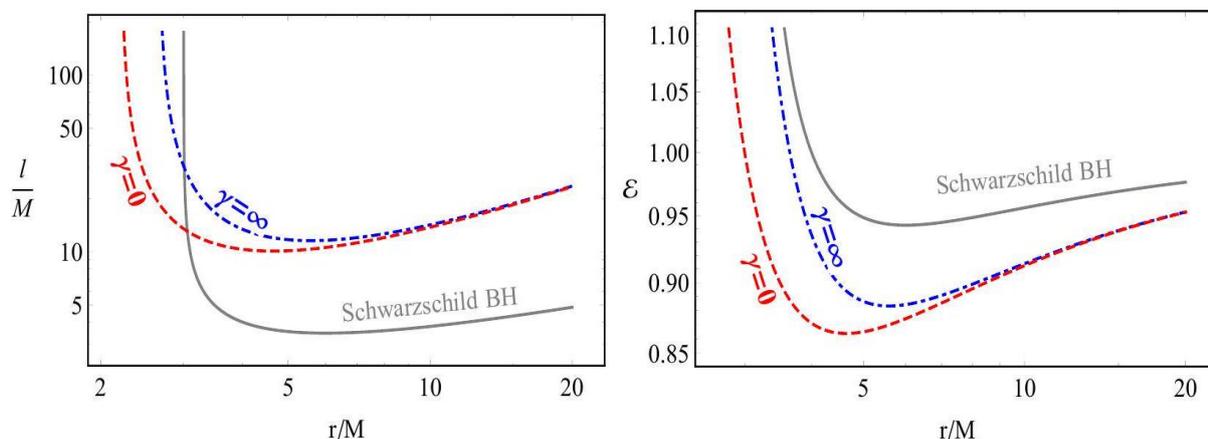
bu yerda neytral zarralar harakatining effektiv potentsiali quyidagicha:

$$V_{\text{eff}} = f(r) \left( 1 + \frac{l^2}{r^2 \sin^2 \theta} \right). \quad (16)$$

Endi aylanma harakat shartlarini ko'rib chiqish mumkin, bu radial harakat ( $\dot{r} = 0$ ) va radial yo'nalishda hech qanday kuch yo'q degan ma'noni anglatadi ( $\ddot{r} = 0$ ) va ekvator tekisligidagi aylana orbitalar uchun o'ziga xos burchak momenti va o'ziga xos energiyaning radial konturlarini ( $\theta = \pi/2$ ) quyidagi tarzda olinadi.

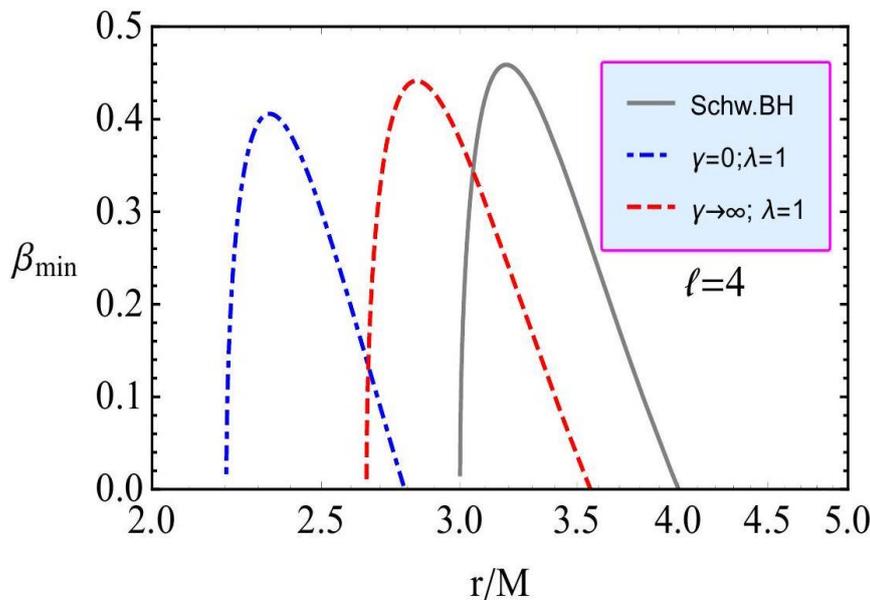
$$l = \frac{r^3 \mathcal{Z}}{2 - r\mathcal{Z}}, \quad \mathcal{E} = \frac{2f(r)}{2 - r\mathcal{Z}} \quad (17)$$

bu yerda  $\mathcal{Z} = \partial_r \ln f(r)$ .



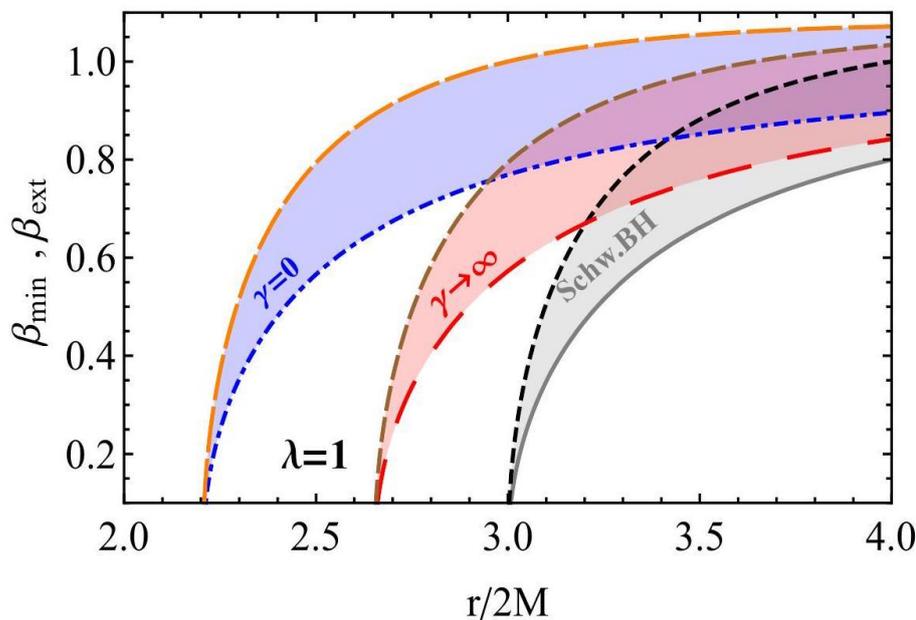
**7-rasm.** Schwarzschild bilan taqqoslaganda  $\lambda = 1$  parametrining belgilangan qiymatida  $\gamma$  ning turli qiymatlari uchun radial koordinatadan aylana orbitalar uchun o'ziga xos burchak momentumining (chap panelda) va energiyaning (o'ng panelda).

7-rasmda  $\gamma = 0$  va  $\gamma \rightarrow \infty$  parametrlarining Schwarzschild QO' ga nisbatan  $\gamma = 1$  parametrining belgilangan qiymatlari uchun o'ziga xos energiya va burchak momentining radial bog'liqligi ko'rsatilgan. 7-grafikning chap panelidan xulosa qilish mumkinki, o'ziga xos burchak momenti  $\lambda$  va  $\gamma$  parametrlarining ortishi bilan ortadi, energiya esa pasayadi.



**8-rasm.**  $\gamma$  va  $\lambda$  parametrlarining turli qiymatlari uchun  $\beta$  minimal magnit o'zaro ta'sir parametrining radial konturlari. Chizmalarda o'ziga xos burchak momentidan  $l = 4$  sifatida foydalanamiz.

8 - rasmda  $\gamma$  va  $\lambda$  parametrlarining turli qiymatlari uchun radial koordinata funksiyasi sifatida minimal magnit o'zaro ta'sir parametrini ko'rsatadi. 8 - rasmdan ko'rish mumkinki, minimal magnit bog'lanish parametrining cho'qqisi  $\lambda$  parametrining ortishi bilan kamayadi va  $\gamma$  parametrining oshishi uning oshishiga sabab bo'ladi.



**9-rasm.**  $l = 0$  bo'lgan magnitlangan zarrachaning minimal magnit bog'lanish parametrining radial konturlari va  $\lambda$  parametrining  $\gamma = 0$  va  $\gamma \rightarrow \infty$  gacha bo'lgan turli qiymatlari uchun ekstremal magnit bog'lanish parametrlari. Kulrang, och-ko'k va och-qizil rangli joylar mos ravishda  $\lambda = 0$  (Schwarzschild holati),  $\lambda = 1, \gamma = 0$  va  $\lambda = 1, \gamma \rightarrow \infty$  parametrlariga mos keladi.

9 - rasmda magnit bog'lanish parametrining ekstremal qiymatining radial bog'liqligi va magnit bog'lanish parametrining minimal qiymati  $\beta_{\min}(l = 0)$  da,

parametrning turli qiymatlari uchun  $\gamma$  tasvirlangan. Rangli joylar  $\beta_{\text{extr}} < \beta < \beta_{\text{min}}(l=0)$  magnit bog'lanish parametrli magnitlangan zarrachaning barqaror aylana orbitalariga ruxsat berilgan diapazonini bildiradi. Aylana orbitalarga ruxsat berilgan diapazondagi zarrachaning o'ziga xos burchak momentini quyidagi tenglamani yechish orqali topish mumkin.

$$\beta = \beta_{\text{min}}(r; \lambda, \gamma) \quad (18)$$

bu yerda  $l$

$$l_{\text{min}}(r; \gamma, \lambda; \beta) = \frac{r^2 \left( \beta - \sqrt{\frac{1}{f(r)} + \mathcal{C}(r; \gamma, \lambda)} \right)}{[1 - \mathcal{D}(r; \gamma, \lambda)] \sqrt{\frac{1}{f(r)} + \mathcal{C}(r; \gamma, \lambda)}} \quad (19)$$

(19) tenglamadan aylana orbitalarda magnitlangan zarrachaning minimal energiyasini quyidagicha topish mumkin.

$$\varepsilon_{\text{min}}(r; \gamma, \lambda; \beta) = \frac{\mathcal{A}(r; \gamma, \lambda) \sqrt{\beta - \sqrt{\frac{1}{f(r)} + \mathcal{C}(r; \gamma, \lambda)}}}{2^4 \sqrt{\frac{1}{f(r)} + \mathcal{C}(r; \gamma, \lambda)} \sqrt{r - \frac{\mathcal{D}(r; \gamma, \lambda)}{r}}} \quad (20)$$

$\gamma$  va  $\lambda$  parametrlarining aylana orbitalarga ruxsat etilgan diapazonga ta'sirini ko'rish uchun biz raqamli hisob-kitoblarni amalga oshirdik, ularning natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

**1-jadval.** Aylana orbitalari uchun raqamli qiymatlar  $\Delta r = r_{\text{max}} - r_{\text{min}}$  maydonini  $\beta$  magnit o'zaro ta'sir parametri va  $\gamma$  parametrlarining turli qiymatlari uchun ko'rsatilgan.

	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.9$	$\beta = 0.9$
$\lambda$	$\gamma = 0$	$\gamma \rightarrow \infty$	$\gamma = 0$	$\gamma \rightarrow \infty$	$\gamma = 0$	$\gamma \rightarrow \infty$
0.1	0.00415	0.00420	0.1336	0.1351	9.6857	9.7232
0.5	0.00396	0.00423	0.1284	0.1366	9.3955	9.60921
1	0.00383	0.00441	0.1259	0.1429	8.9194	9.4511

**“O'zgartirilgan gravitatsiyada magnitlangan Kerr qora o'ralari atrofida magnit dipol momentli zarrachalarning aylana orbitalari va to'qnashuvi”** deb nomlangan 3-bobda magnitlangan Kerr QO' yaqinidagi magnit dipol momenti bilan o'zgartirilgan gravitatsiya sharoitida aylanayotgan QO' magnitosferasi o'rganilgan.

Ushbu bobdagi umumiy relyativistik magnitodinamik simulyatsiyalar QO' atrofidagi haqiqiy magnit maydon juda murakkab tabiatga ega bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi.

Ushbu bobda MG nazariyasining bir shakli bo'lgan STVG nazariyasi doirasida tashqi asimptotik jihatdan bir xil magnit maydonlarda joylashgan aylanuvchi Kerr-MG QO' lar atrofida aylanayotgan magnit dipol momentiga ega

bo'lgan sinov zarralarining dinamikasini o'rgandik.

Magnitlangan zarrachalarning aylana orbitalarini boshqaradigan effektiv potentsialni magnit va STVG o'zaro ta'sirining birgalikdagi ta'sirini hisobga oldik. Bizning tekshiruvimiz ushbu magnitlangan zarralar uchun ITAO xususiyatlarini tahlil qilishga qaratilgan. Bizning topilmalarimiz shuni ko'rsatadiki, STVG o'zaro ta'siri juda muhim va magnit o'zaro ta'sir uning ITAO radiusi va ITAOdagi burchak momentumiga ta'sirini kuchaytiradi. Bundan tashqari, biz magnitlangan zarralar ishtirokidagi to'qnashuv jarayonlarini o'rganib chiqdik, zarrachalarning QO' gorizonti yaqinida to'qnashishiga imkon beruvchi burchak momentining maksimal va minimal qiymatlarini aniqladik.

Ushbu bo'limda biz Kerr-MG QO' joylashgan magnit maydonni qisqacha ko'rib chiqamiz, ularni Boyer-Linquist koordinatalarida sifatida tasvirlash mumkin.

$$ds^2 = g_{tt}dt^2 + g_{rr}dr^2 + g_{\theta\theta}d\theta^2 + g_{\phi\phi}d\phi^2 + 2g_{t\phi}dtd\phi \quad (21)$$

bu yerda  $g_{\alpha\beta}$  metrik komponentlari radial va burchak koordinatalarining funktsiyalari,  $r$  va  $\theta$  quyidagi ko'qinishda:

$$g_{tt} = -\frac{\Delta_m - a^2 \sin^2 \theta}{\Sigma}, \quad g_{rr} = \frac{\Sigma}{\Delta_m}, \quad g_{\theta\theta} = \Sigma,$$

$$g_{\phi\phi} = \frac{\sin^2 \theta}{\Sigma} [(r^2 + a^2)^2 - \Delta_m a^2 \sin^2 \theta]$$

$$g_{t\phi} = \frac{a \sin^2 \theta}{\Sigma} [\Delta_m - (r^2 + a^2)]$$

bu yerda

$$\Delta_m = r^2 - 2GMr + a^2 + \alpha G_N GM^2,$$

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

hamda  $G = G_N(1 + \alpha)$  modifikatsiyalangan gravitatsiya doimiysi,  $M$  - QO' ning massasi va  $G_N$  - Nyuton tortishish doimiysi. O'lchamsiz parametr  $\alpha$  tortishish maydonining darajasini aniqlaydi.  $\alpha = 0$  va  $a = 0$  uchun Kerr-MG QO' mos ravishda Kerr va Schwarzschild-MG QO' ga kamayadi.

Magnit maydon ifodasini quyidagi ko'rinishda topamiz:

$$B^\alpha = \frac{1}{2} \eta^{\alpha\beta\sigma\gamma} F_{\sigma\gamma} u_\alpha \quad (22)$$

Magnitlangan zarrachalarning skalyar va magnit maydonlari o'rtasidagi ikkala o'zaro ta'sirini hisobga oladigan Hamilton-Jakobi tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

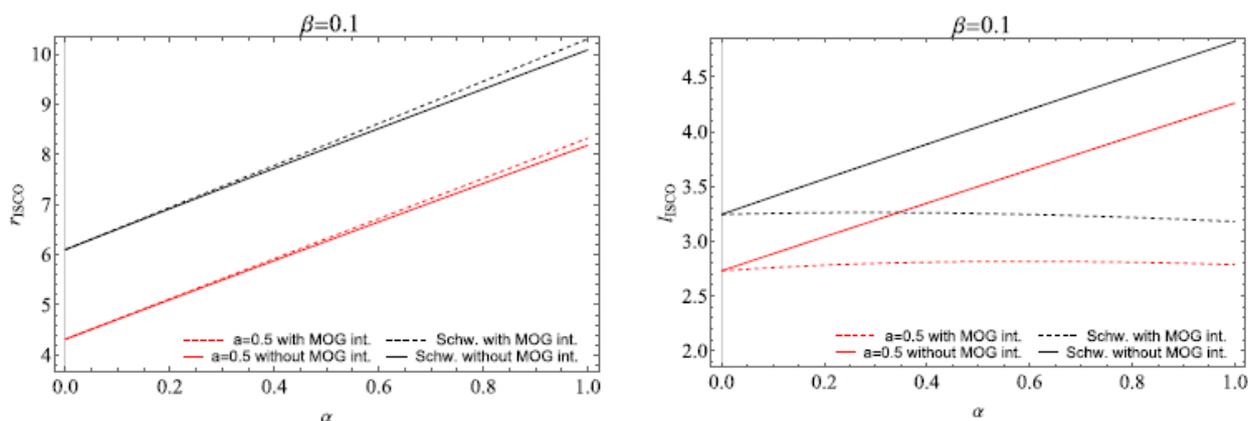
$$g^{\mu\nu} \left( \frac{\partial S}{\partial x^\mu} - q\Phi_\mu \right) \left( \frac{\partial S}{\partial x^\nu} - q\Phi_\nu \right) = -m^2 \left( 1 - \frac{U}{2m} \right)^2 \quad (23)$$

bu yerda  $q = \sqrt{\alpha} m$  - gravitatsion sinov zarracha zaryadi va  $q\Phi_\alpha$  - zarralar va skalar maydon o'rtasidagi MG o'zaro ta'sirini belgilaydigan atama. MGda aylanuvchi Kerr QO' yaqinidagi magnitlangan zarrachalarning elektromagnit va MG o'zaro ta'sirini o'z ichiga olgan Lagranje tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$L = \frac{1}{2} (m + U) g_{\mu\nu} u^\mu u^\nu - \frac{1}{2} \kappa U + q\Phi_\mu u^\mu \quad (24)$$

Ker MG qora o'rasi atrofida magnitlangan zarralar uchun effektiv potensial:

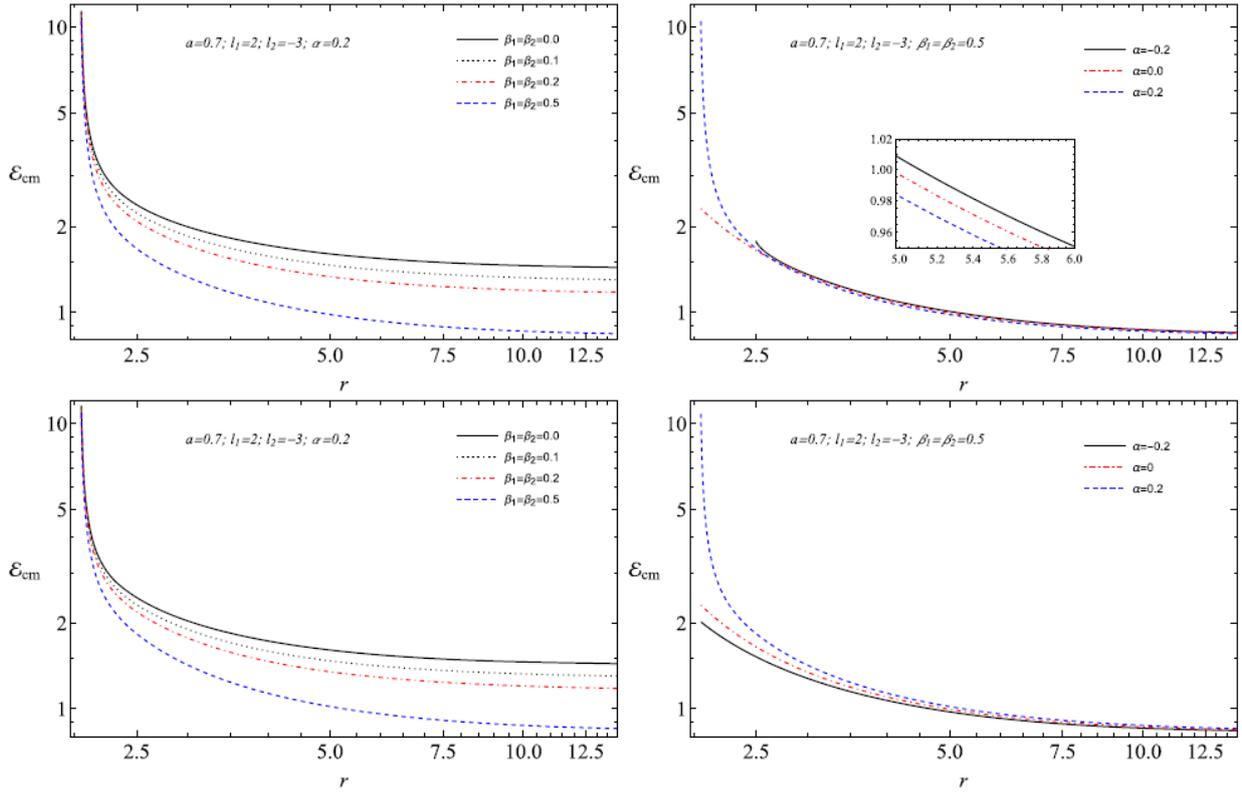
$$V_{\text{eff}}^{\pm} = \frac{\alpha M}{r} + \frac{g_{t\phi}}{g_{\phi\phi}} \left( l - \frac{\alpha M a}{r} \right) \pm \sqrt{\left[ \frac{g_{t\phi}^2}{g_{\phi\phi}} - g_{tt} \right] \left[ \text{Big}(1 - \beta F(r) \backslash \text{Big})^2 + g^{\phi\phi} \left( l - \frac{aM\alpha}{r} \right)^2 \right]} \quad (25)$$



**10-rasm.** ITAO radiusining  $\alpha$  ga bog'liqligining, "MG bilan" va "MGsiz" grafigi.

Aylana orbitalarning barqaror radiusini effektiv potensialning minimal qiymatlari yordamida aniqlash mumkin. Xulosa qilib aytganda,  $V_{\text{eff}}''(r) < 0$  beqaror aylana orbitalariga olib keladi, barcha aylana barqaror orbitalar esa  $\partial_{rr} V_{\text{eff}}(r_{\text{ITAO}}) > 0$  shartini qanoatlantiradi. Aksincha, ITAO  $V_{\text{eff}}''(r_{\text{ITAO}}) = 0$  shartini qondiradi. MG kesishuvi va magnit maydonning ta'sirini tushunish uchun biz 10-grafikda ITAO radiusining o'zgarishini sonli usulda chizdik. Bundan ko'rinadika, QO' spini ITAO radiusini kamaytiradi, MG o'zaro ta'siri esa aylanuvchi va aylanmaydigan holatlarda ITAO ga ta'sir qiladi. Bundan tashqari, MG o'zaro ta'sir mavjud bo'lganda,  $\beta$  magnit maydon o'zaro ta'sir parametrining ITAO radiusiga kuchli ta'sirini kuzatish mumkin, chunki  $\beta$  ITAO radiusiga sezilarli hissa qo'shadi.

Kerr-MG QO' ning ekvator tekisligida harakatlanuvchi tinchlikdagi massalari  $m_1$  va  $m_2$  bo'lgan ikkita magnitlangan zarrachalarni ko'rib chiqaylik. Bu zarralar cheksizlikdan  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 1$  energiyalari bilan QO' tomon kelib, hodisa gorizonti yaqinida to'qnashadi.  $E_{cm}$  ning grafik tahlilini ko'rib chiqqanmiz.



**11-rasm.** MG ta'sirini (yuqori qator) hisobga olmagan holda va MG (pastki qator) ta'sirini hisobga olmagan holda  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 1$  ekvivalent boshlang'ich energiyaga ega magnitlangan zarrachalarning to'qnashuvi natijasida hosil bo'lgan massa markazi energiyasining grafik tasviri.

11-grafikda magnitlangan zarrachalarning massa markazi energiyasini MG parametrining  $\alpha$  va QO' spin parametri  $a$  turli qiymatlari uchun radial taqsimotini ko'rsatganmiz. Yuqori qator MG ta'sirini hisobga olmagan holda ifodalaydi, pastki qator esa MG effektini o'z ichiga oladi. Grafik natijalarimizdan biz magnet maydonning o'zaro ta'siri massa markazining energiyasiga sezilarli ta'sir qilishini kuzatdik. Shuni ta'kidlash mumkinki, magnet maydon kamayishi, MG parametri  $\alpha$  massa markazi energiyasiga hissa qo'shadi. Bundan tashqari, biz MG effektining yo'qligi bilan solishtirganda, MG effekti holatida ko'proq massa markazi energiyasini olish mumkinligini ham kuzatdik.

## XULOSALAR

**“Muqobil gravitatsiya nazariyalarida magnit dipol momentiga ega zarralar dinamikasi”** mavzusidagi falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Qora o'ralar atrofidagi magnit maydon bo'yicha tadqiqotlar  $\gamma$  parametrining manfiy qiymatlari uzoqdagi kuzatuvchi tomonidan o'lchangan magnit maydonning burchak komponentini oshirishi ko'rsatildi.
2. Einstein-Makswell-skalyar maydon nazariyasi doirasida magnit momentiga ega bo'lgan zarralar radial harakati davomida magnit o'zaro ta'sir parametri effektiv potensial maksimumi va energiya hamda impuls momentining minimum qiymatlarini kamaytirishi ko'rsatildi. Shuningdek, eng kichik turg'un doiraviy orbitalarning radiusi magnitlanish parametri ortishi bilan keskin kamayishi qayd etildi.
3. Renormallashtirilgan guruh takommilashgan (RGI) Schwarzschild qora o'ra parametrlarining oshishi bilan egrilik skalyarlarining qiymatlari kamayishi ko'rsatildi. RGI Schwarzschild qora o'ra hodisalar gorizonti strukturasi tahlili  $\lambda$  parametrini 0 dan 1 gacha oshirish bilan tashqi va ichki gorizontlar orasidagi masofa kamayishi va  $\lambda=1$  da yo'qolishini ko'rsatdi.  $\lambda > 1$  holda hodisalar gorizonti yo'qolishi qayd etildi.
4. RGI Schwarzschild qora o'ra atrofida neytral zarrachalarning doiraviy orbitalari uchun energiyasi (impuls momenti) Schwarzschild qora o'rasiga nisbatan kamayishi (ortishi) bir qancha barqaror aylana orbitalariga mos keladigan foton sferasi kamayishi ko'rsatildi. Shuningdek, RGI qora o'rasida atrofida akkretsiya diskining energiya samaradorligi tahlili energiya samaradorligi RGI parametrlarining oshishi bilan ortishi ko'rsatdi.
5. Magnit maydon mavjudligida RGI Schwarzschild qora o'ra atrofida zaryadlangan zarrachalar harakati magnit maydon eng kichik doiraviy orbita radiusining kamayishiga, RGI parametri esa ortishiga olib kelishi ko'rsatildi. Magnit maydondagi zarracha uchun Gamilton-Jakobi tenglamasi tahlili magnitlangan zarrachalar energiyasining minimal qiymati RGI parametrlari ortishi bilan ortishini ko'rsatdi.
6. Shuningdek, RGI parametrining ortishi bilan minimal magnit bog'lanish parametrining maksimumining ortishiga olib kelishi ko'rsatildi. Magnitlangan zarrachaning RGI Schwarzschild qora o'rasida atrofida doiraviy orbitalari diapazoni RGI parametri ortishi bilan kamayishi aniqlandi.
7. MOG parametri magnitlangan zarralar eng kichik doiraviy orbitalarining radiusiga kuchli ta'sir qilishi ko'rsatildi. MOG gravitatsion model doirasida zarralarning impuls momentlarining maksimal va minimal qiymatlari aniqlandi. Magnit maydon magnitlangan zarralar massa markazi energiyasiga sezilarli darajada ta'sir qilishi va uni kamaytirishi ko'rsatildi, MOG parametri esa massa markazi energiyasini oshirishi ko'rsatildi.

**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"**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КИМЁ  
ИНСТИТУТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**ИБРАГИМОВ ИНОМЖОН ХУСАИНОВИЧ**

**ДИНАМИКА ЧАСТИЦ С МАГНИТНЫМ ДИПОЛЬНЫМ МОМЕНТОМ  
В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕОРИЯХ ГРАВИТАЦИИ**

**01.03.01-Астрономия  
01.03.02 – Физика космоса и астрофизика**

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

**Ташкент – 2024**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2024.2.PhD/FM1042**

Диссертация выполнена в институте фундаментальных и прикладных исследований при НИУ «ТИИМСХ» и Ташкентский международный университет Кимё автореферат диссертации на трех языках (узбекский, английский, русский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.ifar.uz](http://www.ifar.uz)) и Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

<b>Научные руководители:</b>	<b>Абдужаббаров Ахмаджон Адилжанович</b> доктор физико-математических наук, профессор <b>Ахмедов Бобомурат Жураевич</b> доктор физико-математических наук, академик
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Шухрат Нумонжонович Мардонов</b> доктор физико-математических наук <b>Аброр Ибрагимович Мамаджанов</b> кандидат физико-математических наук
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Самаркандский государственный университет имени Шарафа Рашидова</b>

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 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](mailto: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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.  
(протокол рассылки № \_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.)

**Б.А. Тошматов**  
Заместитель председателя Научного совета  
по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

**Д. Р. Райимбаев**  
ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней  
д.ф.-м.н.

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

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация PhD диссертации)

**Целью исследования** являются разработка и усовершенствование астрофизических моделей описания динамики частиц вблизи черных дыр в рамках теории альтернативной гравитации.

**Объект исследования** – астрофизические черные дыры, пробные частицы с ненулевыми электрическими и магнитными зарядами, темная материя.

**Научная новизна диссертационного исследования**, следующая:

Исследования магнитного поля вокруг черных дыр показали, что отрицательные значения параметра  $\gamma$  увеличивают угловую составляющую магнитного поля, измеряемую далеким наблюдателем.

В рамках скалярной теории Эйнштейна-Максвелла (ЭМС) было показано, что параметр магнитного взаимодействия уменьшает эффективные потенциальные максимальные и минимальные значения энергии и импульса при радиальном движении частиц с магнитным моментом. Было также отмечено, что радиус наименьших устойчивых круговых орбит резко уменьшается с увеличением параметра намагниченности.

Показано, что энергия столкновения магнитных и электрически заряженных частиц увеличивается (уменьшается) с увеличением положительного (отрицательного) значения параметра ЭМС.

Показано, что значения скаляров кривизны уменьшаются с увеличением параметров черной дыры Шварцшильда улучшенной ренормализационной группой. Анализ структуры горизонта событий черной дыры Шварцшильда УГР показал, что расстояние между внешним и внутренним горизонтами уменьшается с увеличением параметра  $\lambda$  от 0 до 1 и исчезает при  $\lambda = 1$ . В случае  $\lambda > 1$  горизонт событий исчезает.

Показано, что энергия (импульс) круговых орбит нейтральных частиц вокруг черной дыры Шварцшильда УРГ уменьшается (увеличивается) по отношению к черной дыре Шварцшильда, а фотонная сфера, что соответствует нескольким устойчивым круговым орбитам уменьшается.

Показано, что параметр МОГ сильно влияет на радиус наименьших круговых орбит намагниченных частиц. Максимальные и минимальные значения момента импульса частиц были определены в рамках гравитационной модели МОГ.

Показано, что магнитное поле существенно влияет и снижает энергию центра масс намагниченных частиц, а параметр МОГ увеличивает энергию центра масс.

**Внедрение результатов исследования.** На основе разработанных астрофизических моделей электромагнитного поля и движения намагниченных частиц в теории альтернативной гравитации:

свойства движения намагниченных частиц и магнитные эффекты были использованы китайскими учёными Фуданьского университета (ФУ) в Шанхае (ФУ, Китай, письмо от 5 мая 2024 г.). В результате были рассчитаны

величина магнитного заряда частиц и эффекты деформированного пространства на орбитах этих частиц;

Результаты по движению намагниченных частиц были использованы в работах зарубежных исследователей, в более чем 5 научных статьях, опубликованных в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором для описания воздействия намагниченных частиц вокруг вращающегося черного диска (The European Physical Journal C, Volume 84, Issue 3, article id.291, Web-Sc, IF-4.991; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 9, article id.855, Web-Sc, IF-4.991; Physical Review D, Volume 108, Issue 4, article id.044030, Web-Sc, IF-4.080; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 8, article id.704, Web-Sc, IF-4.991; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 6, article id.506, Web-Sc, IF-4.991 и др.).

Применение научных результатов, информации о движении магнитного поля и намагниченных частиц вокруг компактных объектов в рамках альтернативных теорий гравитации.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследований апробированы на 5 научно-практических конференциях, в том числе 4 республиканской и 1 международной конференциях

**Опубликованность результатов исследования.** По теме исследования были опубликованы 12 научных работ, в том числе 5 научных статей (2 опубликована в республиканских и 3 зарубежных журналах).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 100 страниц.

## ВЫВОДЫ

На основе исследований, выполненных по теме «Динамика частиц с магнитным дипольным моментом в альтернативных теориях гравитации» диссертацию на доктора философии (PhD):

1. Исследования магнитного поля вокруг черных дыр показали, что отрицательные значения параметра  $\gamma$  увеличивают угловую составляющую магнитного поля, измеряемую далеким наблюдателем.
2. В рамках скалярной теории поля Эйнштейна-Максвелла было показано, что параметр магнитного взаимодействия уменьшает максимум эффективного потенциала и минимальные значения энергии и импульса при радиальном движении частиц с магнитным моментом. Было также отмечено, что радиус наименьших устойчивых круговых орбит резко уменьшается с увеличением параметра намагниченности.
3. Показано, что значения скаляров кривизны уменьшаются с увеличением параметров черной дыры Шварцшильда УРГ. Анализ структуры горизонта событий черной дыры Шварцшильда УРГ показал, что увеличение параметра  $\lambda$  от 0 до 1 уменьшает расстояние между внешним и внутренним горизонтами и исчезает при  $\lambda = 1$ . В случае  $\lambda > 1$  горизонт событий исчезает.
4. Было показано, что энергия (момент импульса) круговых орбит нейтральных частиц вокруг черной дыры Шварцшильда УРГ уменьшается (увеличивается) по отношению к черной дыре Шварцшильда, а фотонная сфера, соответствующая нескольким стабильным круговым орбитам, уменьшается. Также анализ энергетической эффективности аккреционного диска вокруг черной дыры УРГ показал, что энергетическая эффективность увеличивается с увеличением параметров УРГ.
5. Было показано, что в присутствии магнитного поля движение заряженных частиц вокруг черной дыры Шварцшильда УРГ приводит к тому, что магнитное поле уменьшает радиус наименьшей круговой орбиты, а параметр УРГ увеличивается. Анализ уравнения Гамильтона-Якоби для частицы в магнитном поле показал, что минимальное значение энергии намагниченной частицы увеличивается с увеличением параметров УРГ.
6. Также было показано, что увеличение параметра  $RGI$  приводит к увеличению максимума минимального параметра магнитной связи. Было обнаружено, что диапазон круговых орбит вокруг черной дыры Шварцшильда УРГ намагниченной частицы уменьшается с увеличением параметра УРГ.
7. Показано, что параметр  $MOG$  сильно влияет на радиус наименьших круговых орбит намагниченных частиц. Максимальные и минимальные

значения момента импульса частиц были определены в рамках гравитационной модели MOG. Показано, что магнитное поле существенно влияет и снижает энергию центра масс намагниченных частиц, а параметр MOG увеличивает энергию центра масс.

**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**  
**KIMYO INTERNATIONAL UNIVERSITY IN TASHKENT**  
**INSTITUTE OF FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH**

**IBRAGIMOV INOMJON XUSAINOVICH**

**DYNAMICS OF PARTICLES WITH A MAGNETIC DIPOLE MOMENT  
IN ALTERNATIVE THEORIES OF GRAVITY**

**01.03.01 – Astronomy**  
**01.03.02 – Physics of Cosmos and Astrophysics**

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

**Tashkent – 2024**

**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 B2024.2.PhD/FM1042**

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at Andijan State University named after Z.M. Bobur. The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council ([www.ifar.uz](http://www.ifar.uz)) and on the information and education portal at "Zionet" ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific supervisors:** **Abdujabbarov Ahmadjon Adiljanovich**  
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor  
**Ahmedov Bobomurat Juraevich**  
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

**Official opponents:** **Shuhrat Numonjonovich Mardonov**  
Doctor of physical and mathematical sciences  
**Ahror Ibragimovich Mamadjanov**  
Candidate of physical and mathematical sciences

**Leading organization:** **Samarkand State University named after Sharof Rashidov**

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 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](mailto: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 "\_\_\_" \_\_\_\_\_, 2024.  
(Registry record № \_\_\_ dated "\_\_\_" \_\_\_\_\_, 2024)

**B.A. Toshmatov**  
Vice Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,  
D. Ph.-M.S.

**R.D. Raimbayev**  
Scientific Secretary of Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees  
D. Ph.-M.S.

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

## INTRODUCTION (Annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research of the dissertation** is to develop and improve astrophysical models for describing the dynamics of particles near black holes within the framework of the theory of alternative gravity.

**The objects of the research** is astrophysical black holes, test particles with non-zero electric and magnetic charges, dark matter.

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

Studies of the magnetic field around black holes have shown that negative values of the  $\gamma$  parameter increase the angular component of the magnetic field measured by a distant observer.

In the framework of the Einstein-Maxwell-scalar (EMS) field theory, it was shown that the magnetic interaction parameter decreases the effective potential maximum and minimum values of energy and momentum during the radial movement of particles with magnetic moment. It was also noted that the radius of the smallest stable circular orbits sharply decreases with the increase of the magnetization parameter.

It was shown that the collision energy of magnetic and electrically charged particles increases (decreases) with an increase in the positive (negative) value of the EMS parameter.

It was shown that the values of the curvature scalars decrease with the increase in the parameters of the renormalized group improved (RGI) Schwarzschild black hole.

The analysis of the structure of the event horizon of the RGI Schwarzschild black hole showed that the distance between the outer and inner horizons decreases with the increase of the parameter  $\lambda$  from 0 to 1 and disappears at  $\lambda=1$ . In the case of  $\lambda > 1$ , the loss of the event horizon was noted.

It was shown that the energy (momentum) for circular orbits of neutral particles around the RGI Schwarzschild black hole decreases (increases) with respect to the Schwarzschild black hole, and the photon sphere decreases corresponding to several stable circular orbits.

It was shown that the MOG parameter strongly affects the radius of the smallest circular orbits of magnetized particles. The maximum and minimum values of moment of momentum of particles were determined within MOG gravity model.

It was shown that the magnetic field significantly affects and reduces the energy of the center of mass of magnetized particles, while the MOG parameter increases the energy of the center of mass.

**Applications of the research results.** Based on developed astrophysical models of electromagnetic field and magnetized particle motion in the theory of alternative gravity:

the properties of motion of magnetized particles and magnetic effects were used by Chinese scientists at Fudan University (FU) in Shanghai (FU, China, letter dated May 5, 2024). As a result, the value of the magnetic charge of the particles and the deformed space effects in the orbits of these particles were calculated;

our results on the motion of magnetized particles are used in the work of foreign researchers, the effect of magnetized particles around a rotating black hole are used in more than 5 scientific articles published in foreign journals with a high impact factor to describe (The European Physical Journal C, Volume 84, Issue 3, article id.291, Web-Sc, IF-4.991; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 9, article id.855, Web-Sc, IF-4.991; Physical Review D, Volume 108, Issue 4, article id.044030, Web-Sc, IF-4.080; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 8, article id.704, Web-Sc, IF-4.991; The European Physical Journal C, Volume 83, Issue 6, article id.506, Web-Sc, IF-4.991; etc.).

results are obtained on the magnetic field and the movement of magnetized particles around compact objects within the framework of alternative gravitation theories.

**Testing of the research results.** The research results were reported and discussed at 1 international conference and 4 local scientific conferences.

**Publication of research results.** 12 research papers in total have been published on research results, 3 of them are in the international scientific journals and 2 of them are in Republican 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, three chapters, a conclusion and references, all in 105 pages.

## CONCLUSION

The following conclusions were presented on the basis of research carried out on the topic of “Dynamics of particles with a magnetic dipole moment in alternative theories of gravity” for the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation:

1. Studies on the magnetic field around the BH have shown that negative values of the parameter  $\gamma$  increase the angular component of the magnetic field measured by a distant observer.
2. Within the framework of the Einstein-Maxwell scalar field theory, it was shown that the magnetic influence parameter reduces the maximum stability and minimum values of energy and momentum during the radial motion of particles with a magnetic moment. . It is also noted that the radius of the smallest stable circular orbits deviates sharply from the boundaries of the boundary.
3. The analysis of the event horizon structure of RGI Schwarzschild BH has shown that with increasing the  $\lambda$  parameter from 0 to 1 the distance between outer and inner horizons decreases and vanishes for  $\lambda = 1$ . Beyond  $\lambda > 1$  we do not have any event horizon.
4. We studied circular orbits of neutral particles around RGI Schwarzschild BH and showed that the energy (angular momentum) of the particles decreases (increases) with respect to pure Schwarzschild case with decreasing the photon sphere corresponding to marginally stable circular orbits.
5. It was shown that in the presence of a magnetic field, the movement of charged particles around the Schwarzschild black hole URG leads to the fact that the magnetic field reduces the radius of the smallest circular orbit, and the URG parameter increases. Analysis of the Hamilton-Jacobi equation for a particle in a magnetic field showed that the minimum value of the energy of a magnetized particle increases with increasing parameters of the ERG.
6. It has also been shown that an increase in the RGI parameter leads to an increase in the maximum of the minimum magnetic coupling parameter. It was found that the range of circular orbits around a Schwarzschild black hole URG of a magnetized particle decreases with increasing URG parameter.
7. It is shown that the MOG parameter strongly influences the radius of the smallest circular orbits of magnetized particles. The maximum and minimum values of the particle angular momentum were determined within the framework of the MOG gravitational model. It is shown that the magnetic field significantly affects and reduces the energy of the center of mass of magnetized particles, and the MOG parameter increases the energy of the center of mass.

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

**I bo'lim (part I; I часть)**

1. Muhammad Zahid, Rayimbaev J., Saeed Ullah Khan, Jingli Ren, Ahmedov S., Ibragimov I., Dynamics and collisions of magnetized particles around charged black holes in Einstein–Maxwell-scalar theory // The European Physical Journal C, Volume 82, article number 494, (2022) (№1 Web of Science, IF:4.59).
2. Saeed Ullah Khan, Uktamov U., Rayimbaev J., Abdujabbarov A., Ibragimov I. & Zhi-Min Che, Circular orbits and collisions of particles with magnetic dipole moment near magnetized Kerr black holes in modified gravity// The European Physical Journal C, Volume 84, article number 203, (2024) (№1 Web of Science, IF:4.59).
3. Abdulazizov B.T., Umaraliyev M.M., Ibragimov I.X., On periodic rotation of pulsars and neutron stars. NamDU ilmiy axborotnomasi 2024-yil 3-son, 79-88 betlar.
4. Yovqochev P., Ortiqboyev D. and Ibragimov I., Effect of magnetized plasma on an observable shadow of a Reissner-Nordstrom black hole. Journal of Fundamental and Applied Research Vol. 3, Issue 2 (2023) 20230008.
5. Odil Yunusov, Vakhid Khamidov, Inomjon Ibragimov. Shadow of a gup-modified schwarzschild black hole in the presence of plasma.// O'zbekiston Milliy universiteti xabarleri [3.1.1] 2024-yil 76 bet.
6. Eshniyozov V., Yusupov J, Matrasulov D. & Ibragimov I, Particle Dynamics in Kicked Quantum Networks // NATO Science for Peace and Security Series-B: Physics and Biophysics, Low-Dimensional Functional Materials. 139-145 betlar, (2013).

**II bo'lim (part II; II часть)**

7. Usanov S., Ibragimov I., Usanov S., Nonlinear electromagnetic spatial solitons in the resonant value of electromagnetic waves // Central Asian Journal of STEM, Том 4 № 1 (2023).
8. Matrasulov J., Karpova O., Ibragimov I., Brownian motion on networks: metric graph approach. “Fizika va elektronikaning dolzarb muammolari” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani. Toshkent 3-4 noyabr 2023 yil, 320 bet.
9. Ibragimov I.X., Abdujabbarov A.A., Optical properties of the Kerr-Like black hole. Hozirgi zamon fizikasining dolzarb muommolari. 25-26 noyabr 2022 yil, 91-bet.
10. Orzuev Sh., Ibragimov I., Alimova A. Weak gravitational lensing in sis plasma with Gaussbonnet theory. // Fizika fanining rivojida istedodli yoshlarning o'zni (RIAK-XVII-2024), 5-6-aprel 2024-yil, 31-bet.

11. Karshiboev Kh., Ibragimov I., Khudayberdieva M. Near horizon collision around modmax black hole. // Fizika fanining rivojida istedodli yoshlarning o'rnini (RIAK-XVII-2024), 5-6-aprel 2024-yil, 49-bet.
12. J. Matrasulov, J. Yuspov, I. Ibragimov. Optically induced chaotic ionization of relativistic atoms created by coulomb impurities in graphene. // 9th international conference on superconductivity and magnetism. 27th April-4th.(Abstract ID: 1200)May 2024, 410-bet.

Avtoreferat «O‘zMU xabarları» jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi. (13.06.2024).

**Bosmaxona litsenziyasi:**



**9338**

Bichimi: 84x60 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. «Times New Roman» garniturası.

Raqamli bosma usulda bosildi.

Shartli bosma tabog‘i: 2,5. Adadi 100 dona. Buyurtma № 2/24.

Guvohnoma № 851684.

«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko‘chasi, 83-uy.