

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

FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI

XAMIDOV VOXID SOBIROVICH

KUCHLI GRAVITATSIYA MAYDONIDA ZARRALAR DINAMIKASI

**01.03.01-Astronomiya
01.04.02 – Nazariy fizika**

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

Toshkent – 2023

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (phd) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Contents of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation in physical and
mathematical sciences**

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

Xamidov Voxid Sobirovich Kuchli gravitatsiya maydonida zarralar dinamikasi	3
Хамидов Вохид Собирович Динамика частиц в сильном гравитационном поле.....	21
Khamidov Vokhid Sobirovich Particle dynamics in a strong gravitational field.....	39
E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati List of published works Список опубликованных работ.....	44

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

FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI

XAMIDOV VOXID SOBIROVICH

KUCHLI GRAVITATSIYA MAYDONIDA ZARRALAR DINAMIKASI

**01.03.01-Astronomiya
01.04.02 – Nazariy fizika**

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

Toshkent – 2023

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori dissertatsiyasi mavzusi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.3.PhD/FM762 raqam bilan qayd etilgan.

Dissertatsiya "TIQXMMI" ITU huzuridagi Fundamental va amaliy tadqiqotlar institutida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbarlar:

Abdujabbarov Axmadjon Adiljanovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor
Axmedov Bobomurat Jurayevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

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

Mamadjanov Axror Ibragimovich
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

Yetakchi tashkilot

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi 2023-yil "___" _____ soat ___da "TIQXMMI" Milliy tadqiqotlar universitetining Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti huzuridagi Ilmiy darajalar beruvchi DSC.03/31.03.2022.T/FM.10.04 raqamli Ilmiy kengash majlisida bo'lib o'tadi. Manzil: 100000, Toshkent sh., Qori Niyoziy ko'chasi, 39-uy, Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti, 108-katta majlislar zali. Tel.: +998 71 237-09-61; ye-mail: info@ifar.uz

Dissertatsiya "TIQXMMI" Milliy tadqiqotlar universitetining Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti Axborot-resurs markazida ro'yxatdan o'tgan (ro'yxatga olish raqami _____).
Dissertatsiya bilan TIQXMMI Milliy tadqiqotlar universitetining Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti kutubxonasida tanishish mumkin. Manzil: 100000, Toshkent sh., Qori Niyoziy ko'chasi, 39-uy.
Tel.: +998 71 237-09-61.

Dissertatsiya avtoreferati 2023-y. "___" _____ da tarqatilgan.

(tarqatish bayonnomasi № __ 2023-y. «__» _____).

A.R. Xayotov
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) falsafa doktori

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 zarurati. Umumiy nisbiylik nazariyasining (UNN) yaratilishi bilan gravitatsiyaning yangi konsepsiyasi paydo bo'ldi. Uning mohiyati shundan iboratki, gravitatsion massiv obyektlar fazo-vaqt dastlabki yassi tuzilmasini o'zgartiradi, fazo-vaqt egrilik xususiyati esa gravitatsion maydon intensivligini ko'rsatadi. UNNning birinchi eksperimental tasdig'i 1919-yilgi quyosh tutilishi vaqtida gravitatsion linzalashtirish deb nomlanuvchi hodisani kuzatish orqali aniqlangan. Gravitatsion linzalashtirishning xususiyatlaridan biri uning faqatgina gravitatsion o'zaro ta'sir yordamida "ko'rish" mumkin bo'lgan qora materiyani aniqlashda samaradorligi hisoblanadi.

Biroq, yagona maydon nazariyasini qurish yo'lida UNN bir qator fundamental muammolarga duch keladi. Eynshteyn tenglamalarining vaakumli yechimlarida fazo-vaqtni kvantlashtirish zaruriyati bilan bog'liq bo'lgan singulyarlik va boshqa muammolarni umumiy nisbiylik nazariyasi va/yoki muqobil nazariyalarni o'zgartirish yordamida hal qilishga to'g'ri keladi. Shu nuqtai nazardan, gravitatsion linzalashtirishga modifikatsiyalangan va muqobil nazariyalarni sinab ko'rish uchun foydali vosita sifatida qaraladi. Shunday qilib, egrifazoning kompakt obyektlar yaqinidagi fotonlarning harakatiga va astronomik kuzatishlar natijalariga ta'sirini o'rganish va modellashtirish dolzarb vazifa hisoblanadi.

Keyingi yillarda mamlakatimizda fundamental va amaliy tadqiqotlarning dolzarb yo'nalishlarini rivojlantirishga tobora ko'proq e'tibor qaratilmoqda. Xususan, istiqbolli yo'nalishlardan biri bo'lgan astrofizik tadqiqotlarni rivojlantirish bugungi kunning muhim vazifalaridan biridir. Mamlakatimiz ilm-fanini muvaffaqiyatli rivojlantirish uchun fundamental tadqiqot va ishlanmalarning asosiy yo'nalishlari va ularni amaliyotda qo'llash 2022-2026-yillarda O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasida¹ o'z ifodasini topgan.

Mazkur dissertatsiya ishi davlat me'yoriy hujjatlarida, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 07-fevraldagi "O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi PF-4947-son Farmoni, shuningdek, O'zbekiston Respublikasi hukumatining 2018-yil 29-noyabrdagi qarori bilan e'lon qilingan "2019-2021-yillarda O'zbekistonda tarkibiy o'zgarishlarning asosiy yo'nalishlarining yo'l xaritasi"da tasdiqlangan vazifalarni amalga oshirishga ma'lum darajada xizmat qilmoqda.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi fan va texnikasining II. "Energetika, energiya va resurs tejamkorligi" ustuvor yo'nalishlariga muvofiq olib borilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Massiv va massasiz sinov zarralari dinamikasi ko'plab olimlar, jumladan, ingliz (S. Will, C. Keeton), rus (O. Supko, Ye. Bisnovati-Kogan), nemis (C. Laemmerzahl, J. Kunz, A. Grezenbach), argentinalik (L. Amarilla, E. Eiroa), chex (M. Kolos, J. Vrba, Z. Stuchlik, J. Schee),

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 28.01.2022-yildagi PF-60-son

hind (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) olimlari va b.lar tomonidan o'rganilgan. Ammo, plazma mavjudligida Shvarshildsimon deformatsiyalangan qora o'ralar atrofida fotonlarni linzalashtirishning ta'siri o'rganilmagan.

UNN doirasida elektromagnit maydon mavjudligida kompakt obyektlar atrofida nol bo'lmagan elektr zaryadi va magnit momentga ega bo'lgan sinov jismlarining dinamikasi B.J. Axmedov, A.A. Abdujabbarov, J.R. Rayimbayev, B.A. Toshmatov va B.M. Narzilloyev kabi vatanimiz olimlari hamda R. Wald, F. de Felice, F. Sorge va b. kabi chet el mualliflari tomonidan o'rganildi. Biroq, skalyar va elektromagnit maydonlar mavjudligida modifikatsiyalangan gravitatsiya nazariyalari doirasida zarrachalar dinamikasini tahlil qilish masalasi ochiqligicha qolmoqda.

Shuningdek, kompakt obyektlar atrofida aylana orbitalardagi zarrachalarning kvazidavriy ossilyatsiyalarida skalyar va elektromagnit maydonlar masalasi ham o'rganilmagan. Skalyar va elektromagnit maydonlar mavjudligida kompakt obyektlar atrofidagi zarrachalar dinamikasini tavsiflovchi modellarni ishlab chiqish va takomillashtirish gravitatsiyaning modifikatsiyalangan va/yoki muqobil nazariyalarining parametrlari uchun chegaraviy qiymatlarni olishga yordam beradi.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Innovatsion rivojlanish vazirligi tomonidan moliyalashtirilgan F-FA-2021-510-sonli "Neytron yulduzlari ichidagi yadroviy moddalarni modifikatsiyalangan gravitatsiya modellari doirasida tekshirish", F-FA-2021-432-sonli "Rentgen kichik massali ikkilanma tizimlarning sun'iy yo'ldosh ma'lumotlarini tahlil qilish va qayta ishlash" loyihalari doirasida amalga oshirildi.

Dissertatsiya tadqiqotining maqsadi qora o'ralar yaqinidagi fotonlar va zarrachalar dinamikasini tavsiflash uchun modellar va hisoblash usullarini ishlab chiqish va takomillashtirishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

– kuchsiz gravitatsion o'zaro ta'sir yaqinlashuvida fazo-vaqt deformatsiyasi parametrlarining fiksirlangan qiymatlarida bir jinsli plazmaning og'ish burchagiga ta'sirini o'rganish;

– bir jinsli plazma holatida yorug'lik nurlarining og'ish burchagining bir jinsli bo'lmagan plazmadagisi bilan qiyosiy tahlilini o'tkazish;

– fazo-vaqt deformatsiyasi parametrining turli qiymatlari uchun gravitatsion kuchsiz linzalashtirish tufayli tasvir manbai yorqinligining umumiy ortishini o'rganish;

– tasvir yorqinligi umumiy ortishining plazma muhitiga bog'liqligini o'rganish;

– Eynshteyn - Maksvell - skalayar maydon (EMS) modeli va qora o'ra zaryadining gravitatsion parametrlarining o'zgarishiga qarab hodisalar gorizonti radiusining profillarini o'rganish;

– modifikatsiyalangan gravitatsion modelda zaryadlangan qora o'ralarning fazo-vaqtdagi sinov zarrachalarining dinamikasini tekshirish;

– aylanma orbitalardagi sinov zarrachalarining xususiy burchak momenti va energiyasi uchun analitik ifodalarni izlash va ularga skalyar maydon parametrlari va modifikatsiyalangan gravitatsiya ta'sirini tahlil qilish;

- modifikatsiyalangan gravitatsiya maydonining ichki barqaror aylanma orbitalar (IBAO) radiusiga, IBAOdagi zarrachalarning energiyasi va burchak momentiga, shuningdek, energiya samaradorligiga ta'sirini tahlil qilish;
- modifikatsiyalangan gravitatsion model doirasida, qora o'ra atrofida aylanadigan zarrachalar tebranishlarining Kepler va radial chastotalari kabi fundamental chastotalarni o'rganish;
- nazariy natijalarni kuzatish ma'lumotlari bilan taqqoslash natijasida zaryad va modifikatsiyalangan gravitatsiya parametrlari uchun chegaraviy qiymatlarni olish.

Tadqiqot obyekti astrofizik kompakt obyektlar, elektr va magnit zaryadi nolga teng bo'lmagan fotonlar va sinov zarralari, skalyar maydonlar hisoblanadi.

Tadqiqot predmeti matematik va nazariy modellar, elektromagnit va gravitatsion maydonlar uchun tenglamalarni yechishning raqamli va analitik usullari, kompakt gravitatsion obyektlar yaqinidagi fotonlar va sinov zarralari dinamikasini o'rganishdir.

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

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

- Shvarshildsimon qora o'ra atrofida yorug'lik nurlarining og'ish burchagi fazo-vaqt deformatsiya parametri majud bo'lganda kamayishi ko'rsatilgan;
- kuchsiz gravitatsiya o'zaro ta'siri yaqinlashuvida fazo-vaqt deformatsiyasi parametrining qat'iy qiymatlari uchun bir jinsli plazmaning burilish burchagiga ta'siri o'rganildi;
- plazma muhitining nobirjinslili uchun mas'ul bo'lgan parametrning ortishi kompakt obyekt atrofida yorug'lik nurlarining og'ish burchagining ortishiga olib kelishi ko'rsatilgan;
- qiyosiy tahlilga ko'ra, yorug'lik nurining og'ish burchagi bir jinsli plazma holatida bir jinsli bo'lmagan plazma holatiga qaraganda kattaroqligi ko'rsatilgan;
- fazo-vaqt deformatsiyasi parametri ta'sirida tasvir yorqinligining umumiy kattalashishining kamayishi ko'rsatilgan;
- tasvir yorqinligining umumiy kattalashishi ham bir jinsli bo'lgan, ham bir jinsli bo'lmagan plazma parametrlarining ortishi bilan ortishi ko'rsatilgan;
- modifikatsiyalangan gravitatsion model parametri skalyar maydon parametriga qarab yuqori chegara qiymatiga ega ekanligi ko'rsatilgan;
- aylana orbitalaridagi tekshirilayotgan zarrachalarning xususiy burchak momenti va energiyasining analitik ifodalari topilgan va skalyar maydon parametrlari va modifikatsiyalangan gravitatsiya kuchining ularga ta'siri tahlil qilingan;
- qora o'ra zaryadining ortishi energiya va burchak momentining minimumini kamayishiga olib kelishi, ammo skalyar maydon parametrlari va modifikatsiyalangan gravitatsiya mavjud bo'lganida, bu qiymatlarning ortishi ko'rsatilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

- ichki barqaror aylana orbitalarning radiusi o'rganilayotgan qora o'ra zaryadining ortishi bilan Rayssner-Nordstrom qora o'ra elektr zaryadining xuddi

shunday ortishi bilan solishtirganda tez kamayishi va 16%gacha bo'lgan qiymatga yetishi ko'rsatildi;

– zarrachalarning ichki barqaror aylana orbitalarining radiusini chastota nisbati 5:4 dan kam bo'lgan ikkilanma cho'qqining kvazidavriy chastotalari haqidagi ma'lumotlardan foydalanib yuqori aniqlikda o'lchash mumkinligi ko'rsatildi;

– shuningdek, kvazidavriy ossilyatsiyalar radiusi qora o'ra zaryadining yuqori qiymatlarida ichki barqaror aylana orbitasiga yaqinlashishi aniqlandi;

– zaryad va modifikatsiyalangan gravitatsiya parametrlarining chegaraviy qiymatlari GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322 va XTE 1550-564 mikrokvazarlarida kuzatilgan kvazidavriy ossilyatsiyalar bilan nazariy natijalarni taqqoslash natijasida olindi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi matematik fizika, hisoblash matematikasi va relyativistik astrofizikaning zamonaviy sinalgan usullaridan foydalanish bilan ta'minlanadi. Natijalar qat'iy ravishda gravitatsiya metrik nazariyalari va nazariy fizikaning matematik apparati doirasida olindi. Shuningdek, zamonaviy raqamli va analitik hisoblash usullari ham qo'llanildi va natijalar mavjud kuzatuv ma'lumotlari va boshqa mualliflarning natijalari bilan taqqoslandi. Dissertatsiya ishida keltirilgan xulosalar kompakt obyektlar astrofizikasining asosiy qoidalariga mos keladi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati ishlab chiqilgan model plazma ishtirokida gravitatsion linzalashtirishda manba tasvirining yorqinligini oshirishning asosiy mexanizmlarini shakllantirish imkonini berishi bilan belgilanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ishlab chiqilgan nazariy modellar va olingan natijalardan nazariy natijalarni kuzatilgan mikrokvazarlardagi kvazidavriy ossilyatsiyalar bilan taqqoslash natijasida modifikatsiyalangan gravitatsion model parametrlari uchun aniqroq chegara qiymatlarini olish uchun foydalanish mumkin.

Tadqiqot natijalarining tatbiq etilishi

Modifikatsiyalangan gravitatsiya nazariyasida fotonlar va sinov zarralari harakatining ishlab chiqilgan nazariy modellari asosida quyidagilar tadqiq qilindi:

– Shanxaydagi Fudan universitetida (FU) xitoylik olimlar tomonidan qo'llanilgan massasiz zarrachalar harakati va gravitatsion linzalashtirishning ta'siri (FU ma'lumotnomasi, Xitoy, 2023-yil 24-iyul). Natijada, modifikatsiyalangan gravitatsiya parametrining qiymati hisoblandi;

– zaryadlangan zarrachalar harakati bo'yicha natijalar xorijiy tadqiqotchilar tomonidan yuqori impakt faktorli xorijiy jurnallarda 20 dan ortiq ilmiy ishlarda, aylanuvchi qora o'ra atrofidagi magnitlangan zarrachalarning ta'sirini tavsiflash, shuningdek, biriktiruvchi moddaning tezligi hisoblash uchun (Symmetry, 2023; V.15: id 293, Web-Sc, IF-2.94; European Physical Journal C, 2023; V.83: id 506, Web-Sc, IF-4.994; Chinese Journal of Physics, 2023; V.83: pp. 664-679, Web-Sc, IF-3.957 va h.k.) qo'llanilgan.

Natijada, plazma mavjud bo'lganda modifikatsiyalangan gravitatsiya nazariyalari doirasida kompakt obyektlar fotonlarining harakati haqida ma'lumot olindi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 5 ta milliy va 1 ta xalqaro ilmiy anjumanlarda taqdim etildi.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya ishi mavzusi bo'yicha O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda 5 ta, shu jumladan xorijiy jurnallarda 3 ta ilmiy maqola chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi

Dissertatsiya kirish, to'rt bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 98 betdan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida mavzuning dolzarbligi va zarurati, tadqiqotning respublika fan va texnika taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlariga mosligi, mavzuning o'rganilganlik darajasi, uning dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasi tadqiqotlar rejasi bilan bog'liqligi, tadqiqotning maqsad, vazifalari va obyekti, predmeti, usullari, ilmiy yangiligi, amaliy natijalari, ishonchliligi, natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati, natijalarning tasdiqlanishi, chop etilishi haqidagi qisqa ma'lumotlar keltirilgan, shuningdek dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi ko'rsatilgan.

Birinchi bobda kompakt obyektlar atrofidagi fotonlar va zarralar dinamikasi bo'yicha adabiyotlarning batafsil sharhi keltirilgan. Gravitatsion linzalar, energiya spektrlari va bunday ob'ektlarning akkretsiyon diskini o'rganish bo'yicha tadqiqotlar tahlil qilindi.

Kompakt ob'ektlar atrofidagi sinov zarralari dinamikasi, xususan, doiraviy orbitalarning radiusi va barqarorligini, zarrachalarning energiyasi va burchak momentumini aniqlashga e'tibor qaratildi. Fazo-vaqt tuzilishi va reisner-Nordstrom qora o'ralari maydonidagi zarrachalarning orbital harakati bo'yicha tadqiqotlar ko'rib chiqildi.

Tashqi elektromagnit maydonlarning aylanadigan va statik qora o'ralar yaqinidagi zaryadlangan va magnitlangan zarralar dinamikasiga ta'siri bo'yicha ishlar tahlil qilindi. Shuningdek, qora o'ra soylarini modellashtirish va ularning aylanish effektlari tufayli deformatsiyasi bo'yicha tadqiqotlar ko'rib chiqiladi.

Shunday qilib, birinchi bobda fotonlar dinamikasi va qora o'ralar atrofidagi har xil turdagi zaryadlangan zarralar bo'yicha zamonaviy nazariy tadqiqotlar haqida keng ma'lumot berilgan. Zarrachalarning ushbu ob'ektlar bilan tortishish va elektromagnit o'zaro ta'sirining keng doirasi ko'rib chiqiladi.

“Plazma mavjudligida statik qora o'ra atrofidagi gravitatsion linzalashtirish” nomli **ikkinchi** bobda Shvarshildsimon qora o'ra atrofida plazma muhiti mavjud bo'lganidagi gravitatsion kuchsiz linzalashtirish o'rganilgan. Shuningdek tasvir manbaining yorqinligi va o'lchamlarining, qora o'ra atrofida plazma mavjud bo'lganida bog'lanish parametrining ta'sirini hisobga olgan holda gravitatsion linzalashtirish hisobiga, to'liq ortishi tadqiq qilingan.

Sferik-simmetrik Shvarshildsimon qora o'raning, Boyer-Lindkvist koordinatalarida quyidagicha ko'rinishga ega bo'lgan, yechimini ko'rib chiqamiz:

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

$$f(r) = 1 - \frac{2Me^{-a/r}}{r}, \quad \text{ga ega} \quad (2)$$

bu yerda M – qora o'ra massasi, a – modifikatsiyalangan gravitatsiya bilan bog'liq bog'lanish konstantasi parametri.

Kuchsiz maydon rejimida fazo-vaqt (1) metrikasini qarab chiqamiz:

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}, \quad (3)$$

bu yerda $\eta_{\alpha\beta}$ – Minkovskiy fazo-vaqt metrikasi va $h_{\alpha\beta}$ – yassi fazo-vaqt geometriyasining g‘alayonlanishi bo‘lib, u gravitatsiyaning metrikaviy nazariyasi orqali aniqlanishi va quyidagicha ifodalanishi mumkin

$$\begin{aligned} \eta_{\alpha\beta} &= \text{diag}(-1, 1, 1, 1), \\ h_{\alpha\beta} &\ll 1, \quad h_{\alpha\beta} \rightarrow 0 \text{ under } x^i \rightarrow \infty, \\ g^{\alpha\beta} &= \eta^{\alpha\beta} - h^{\alpha\beta}, \quad h^{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (4)$$

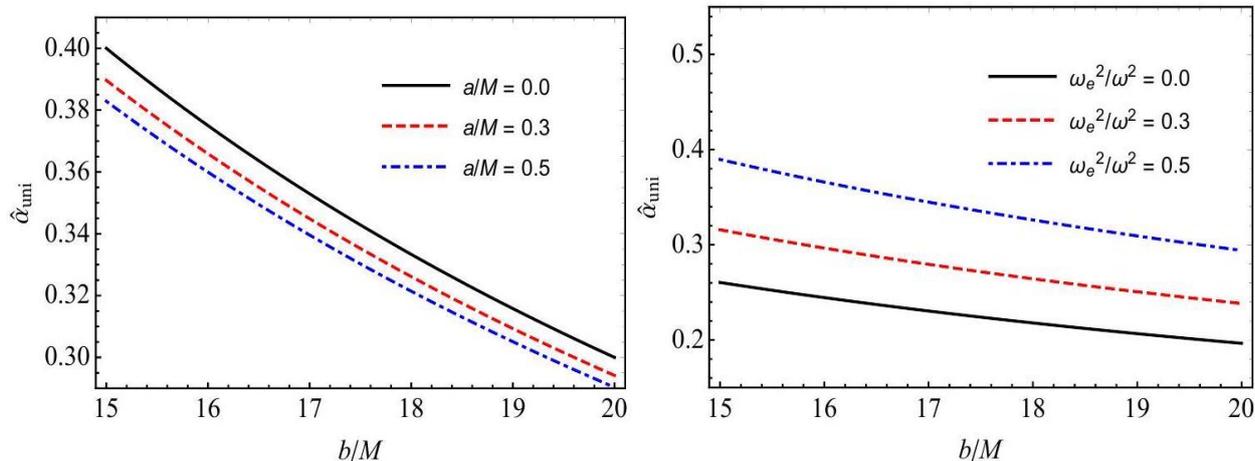
Qora o‘raning kuchsiz gravitatsiya maydonida plazmaning $\hat{\alpha}_k$ og‘ish burchagiga ta‘sirini qarab chiqamiz. Plazma mavjudligida og‘ish burchagining umumiy tenglamasini quyidagicha yozish mumkin

$$\hat{\alpha}_k = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(h_{33} + \frac{h_{00}\omega^2 - K_e N(x^i)}{\omega^2 - \omega_e^2} \right)_{,k} dz, \quad (5)$$

bu yerda $N(x^i)$ – qora o‘ra atrofidagi plazmadagi zarralarning sonli zichligi, $K_e = 4\pi e^2/m_e$ – plazma doimiysi, ω va ω_e – mos ravishda foton va plazma chastotalari.

(4)–(5) tenglamalardan foydalangan holda, og‘ish burchagi uchun (5) tenglamani quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$\hat{\alpha}_b = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b}{r} \left(\frac{dh_{33}}{dr} + \frac{1}{1 - \omega_e^2/\omega^2} \frac{dh_{00}}{dr} - \frac{K_e}{\omega^2 - \omega_e^2} \frac{dN}{dr} \right) dz, \quad (6)$$



1-rasm. a/M parametrning turli qiymatlari uchun $\hat{\alpha}_{uni}$ og‘ish burchagining b f impakt-parametrga (chapda) va ω_e^2/ω^2 plazma parametriga (o‘ngda) bog‘lanishi

bu yerda b – mo‘ljallangan parametr. Shuni ta‘kidlaymizki, $\hat{\alpha}_b$ qiymati manfiy ham, musbat ham bo‘lishi mumkin.

Bir jinsli plazma muhiti mavjudligida qora o‘ra atrofidagi yorug‘lik nurlarining og‘ish burchagini quyidagi yig‘indi ko‘rinishida qarab chiqamiz

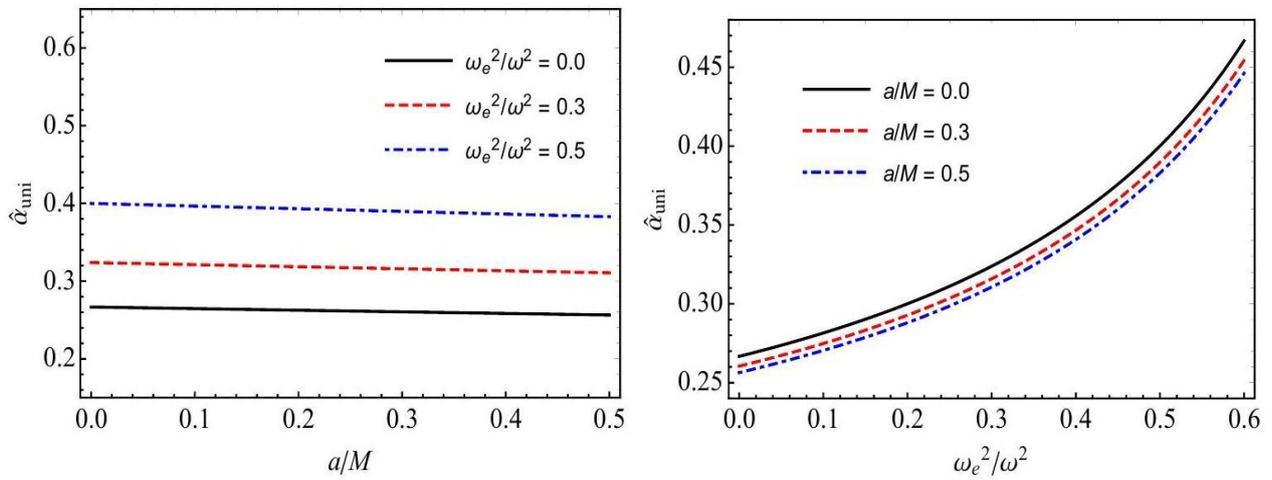
$$\hat{\alpha}_{uni} = \hat{\alpha}_{uni1} + \hat{\alpha}_{uni2} + \hat{\alpha}_{uni3} \quad (7)$$

bu yerda $\hat{\alpha}_{uni1}$ va $\hat{\alpha}_{uni2}$ larni gravitatsiya bilan birga bir jinsli plazma hisobiga og‘ish burchagining ulushlari sifatida tushuntirish mumkin hamda plazmaning bir jinsli taqsimoti hisobiga $\hat{\alpha}_{uni3} = 0$ bo‘ladi. Ushbu ishda a yangi parametrlri bir jinsli

plazma bilan o‘ralgan qora o‘ra atrofidagi yorug‘lik nurlarining og‘ish burchagi uchun quyidagi tenglama olingan:

$$\hat{\alpha}_{uni} = - \left(\frac{\pi a^3 R_s}{64 b^4} - \frac{a^2 R_s}{3 b^3} + \frac{\pi a R_s}{4 b^2} - \frac{R_s}{b} \right) - \left(\frac{3 \pi a^3 R_s}{32 b^4} - \frac{a^2 R_s}{b^3} + \frac{\pi a R_s}{2 b^2} - \frac{R_s}{b} \right) \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_e^2}. \quad (8)$$

1- rasmda qora o‘ra atrofidagi yorug‘lik nurlari og‘ish burchagining a parametr va ω_e/ω plazma chastotasining turli qiymatlari uchun b mo‘ljall parametriga bog‘liqligi keltirilgan. Mo‘ljall parametrining fikslangan qiymatlarida og‘ish burchagining plazma chastotasiga va a parametrga bog‘liqligi 2- rasmda keltirilgan. Grafiklardan shunday xulosaga kelish mumkinki, qora o‘ra atrofidagi yorug‘lik nurlarining og‘ishi plazma parametri mavjud bo‘lganida egiladi.



2- rasm. $\hat{\alpha}_{uni}$ og‘ish burchagining mo‘ljall parametrining $b/M = 15$ ga teng fikslangan qiymati uchun a/M parametr (chapda) va ω_e^2/ω^2 plazma parametr (o‘ngda) bog‘liqligi

Buning ustiga, a parametrning ortishi bilan yorug‘lik nurlarining egilish burchagi kamayadi. b mo‘ljall parametrning ortishi bilan gravitatsion og‘ish burchagi nulgga intiladi.

Nolga teng bo‘lmagan a parametrli Shvarshildsimon gravitatsiya maydonida bir jinsli bo‘lmagan plazma mavjudligida qora o‘ra atrofidagi yorug‘lik nurlarining og‘ish burchagini qarab chiqamiz. Soddashtirgan holda plazmaning bir jinsli bo‘lmagan taqsimoti sifatida singulyar izotermik sfera (SIS) modelini qarab chiqamiz. SIS muhiti plazmasining zichligi quyidagicha ifodalanadi

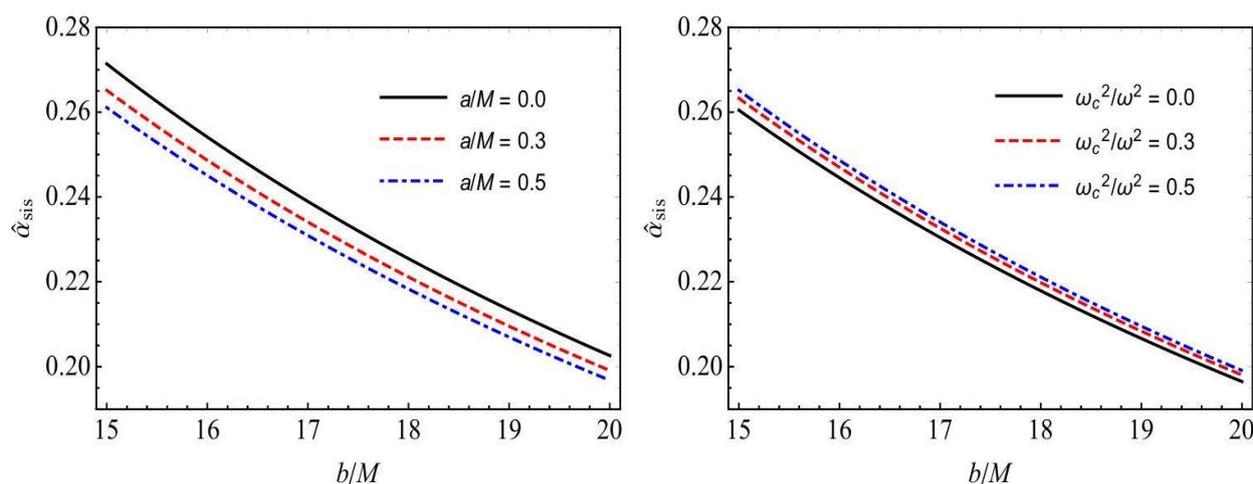
$$N(r) = \frac{\rho(r)}{km_p} \quad (9)$$

bu yerda

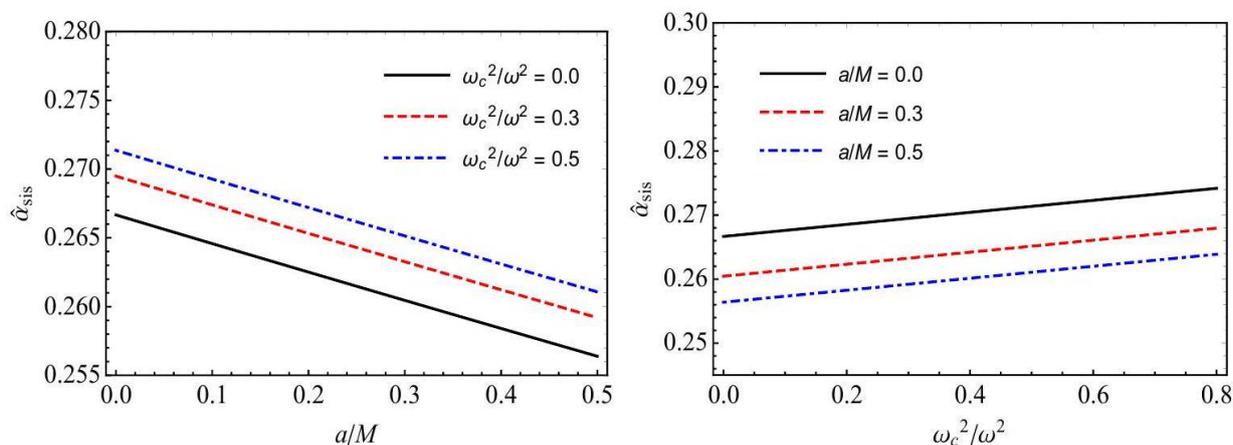
$$\rho(r) = \frac{\sigma_v^2}{2\pi r^2} \quad (10)$$

bu yerda σ_v – sochilish tezligi, $\rho(r)$ – kompakt obyekt atrofidagi plazmaning zichligi.

3-rasmda bir jinsli bo‘lmagan plazma va a parametrning qora o‘ra atrofidagi yorug‘lik nurlarining og‘ishiga bo‘ladigan effekti keltirilgan. Og‘ish burchagi og‘ishining jinsli bo‘lmagan plazmaga, b mo‘ljall parametrining fiksirlangan qiymatlari hamda bir jinsli bo‘lmagan plazma holati uchun, bog‘lanishi 4- rasmda keltirilgan. 3- va 4- rasmlardan ko‘rinib turibdiki, yorug‘lik nurlarining og‘ish burchagi a parametr borligida kamayadi, va aksincha, bir jinsli bo‘lmagan plazma muhitining ta’siri natijasida yorug‘lik nurlarining og‘ish burchagi ortadi.



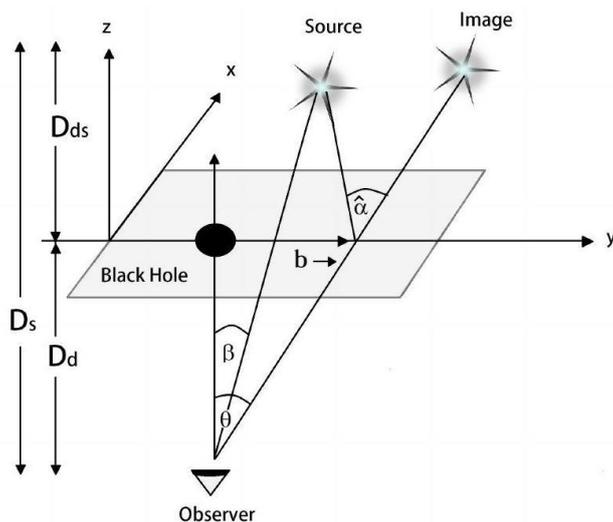
3- rasm. $\hat{\alpha}_{SIS}$ og‘ish burchagining b mo‘ljall parametriga: a/M parametrning turli qiymatlari uchun (chapda), bir jinsli bo‘lmagan plazma parametrlari uchun (o‘ngda) bog‘liqligi



4- rasm. $\hat{\alpha}_{SIS}$ og‘ish parametrining mo‘ljall parametrining $\frac{b}{M} = 15$ ga teng fiksirlangan qiymati uchun, a/M parametr (chapda) va bir jinsli bo‘lmagan plazma parametriga (o‘ngda) bog‘liqligi

Ushbu bobda shuningdek tasvir manbaining ortishi, plazma mavjudligida gravitatsion linzalashtirish natijasi sifatida ko‘rib chiqilgan, bunda linza tenglamasining quyidagicha ko‘rinishidan foydalanilgan

$$\theta D_s = \beta D_s + \hat{\alpha}_b D_{ds}, \quad (11)$$



5-rasm. Gravitatsion linzaning sxematik ko‘rinishi

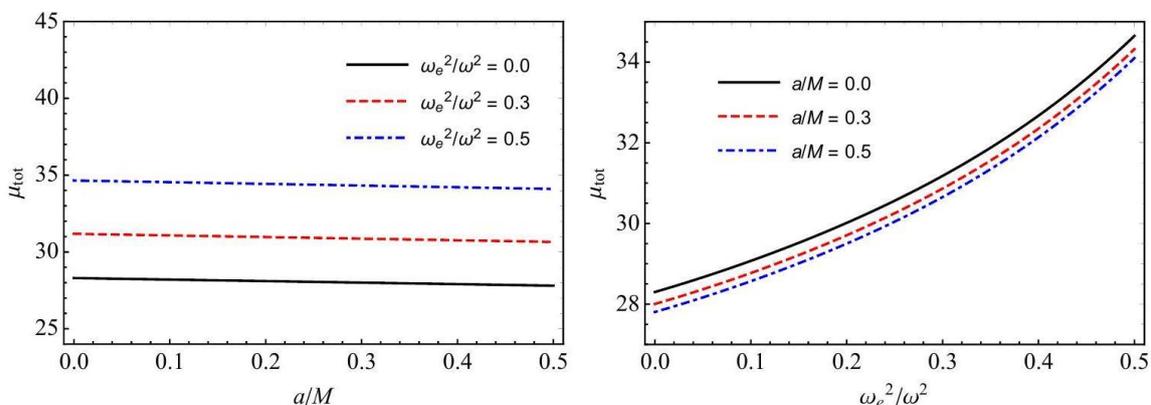
bu yerda D_s i D_{ds} – uzoqlashtirilgan manbadan kuzatuvchigacha va linza obyektigacha masofa (5-rasm). 5- rasmda ko‘rsatilishicha, θ va β mos ravishda manba ko‘rinadigan tasvirining hamda kuzatuvchi linzasi o‘qiga nisbatan manbaning o‘zining burchaklari. b mo‘ljal parametri va θ burchak orasidagi bog‘lanish $b = D_d$ ko‘rinishga ega bo‘lib, bu yerda D_d – kuzatuvchidan linza predmetigacha bo‘lgan masofa. Bu ifodalardan foydalangan holda (11) ifodani quyidagicha qayta yozish mumkin

$$\beta = \theta - \frac{D_{ds}}{D_s} \frac{F(\theta)}{D_d} \frac{1}{\theta}, \quad (12)$$

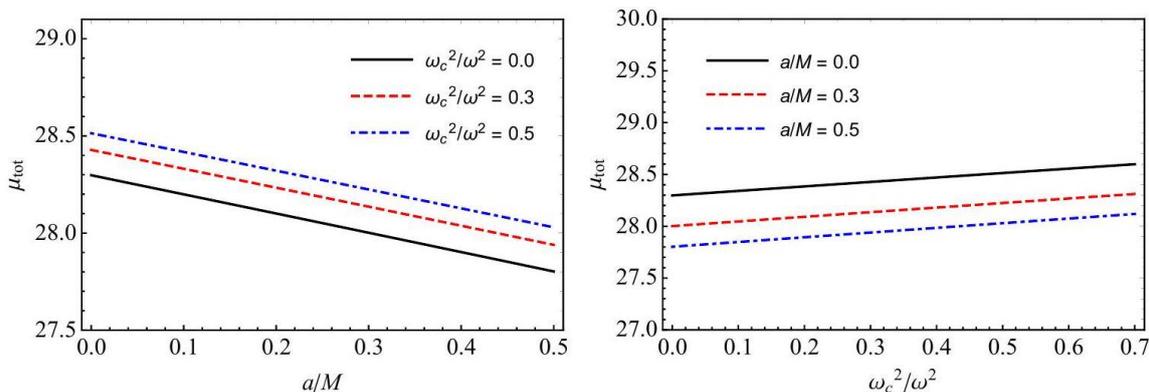
bu yerdagi

$$F(\theta) = |\alpha_b| b = |\alpha_b(\theta)| D_d \theta.$$

Yorqinlikning to‘liq ortishining, parametrning turli qiymatlari uchun, plazma parametrlariga bog‘liqligi 6- rasmda keltirilgan. Bu bog‘lanishdan ko‘rinib turibdiki, tasvir yorqinligining umumiy ortishi a parametrning ta’siri natijasida kamayadi hamda umumiy ortish bir jinsli plazma parametrining ortishi bilan kattalashadi.



6- rasm. a parametrning turli qiymatlari uchun μ_{tot} yorqinlikning to‘liq ortishining a parametrta (chapda), parametrning turli qiymatlari uchun plazma parametrlariga (o‘ngda) bog‘liqligi



7- rasm. Tasvir yorqinligining a parametr va bir jinsli bo‘lmagan plazmaga bog‘liq ravishda to‘liq kattalashishi

Manba tasviri yorqinligining a parametr va plazmaga bog‘liq ravishda to‘liq kattalashishi 7-rasmda ko‘rsatilgan. Umumiy kattalashish a parametrning mavjudligi hisobiga kamayadi. Boshqa tomondan, yorqinlikning umumiy kattalashishi bir jinsli bo‘lmagan plazmaning ortishi bilan ortadi.

“Eynshteyn–Maksvell – skalyar maydon nazariyasi doirasida qora o‘ra atrofidagi sinov zarralarining dinamikasi” nomli **uchinchi** bobida fazo-vaqt xususiyatlari, shuningdek Eynshteyn–Maksvell – skalyar maydoni (EMS) gravitatsiyasi doirasida qora o‘ra atrofidagi neytral zarralarining dinamikasi ham o‘rganilgan. EMS nazariyasida qora o‘ra yechimlarining quyidagicha tavsiflangan qisqacha obzordan boshlaymiz.

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [R - 2\nabla_\alpha \phi \nabla^\alpha \phi - K(\phi) F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta}],$$

bu yerda ∇_α – kovariant hosila, g – metrik tenzop aniqlovchisi, $g_{\mu\nu}$, R , – Richchi egriligi skalyari, ϕ – massaga ega bo‘lmagan skalyar maydon, $F_{\alpha\beta}$ – elektromagnit maydon tenzori, $K(\phi)$ – dilaton va elektromagnit maydon orasidagi bog‘lanish funksiyasi. Statik qora o‘ra atrofidagi fazo-vaqt uchun aniq analitiy yechim umumiy holda quyidagi ko‘rinishga ega:

$$ds^2 = -U(r)dt^2 + \frac{dr^2}{U(r)} + f(r)(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad (13)$$

bu yerda $U(r)$ va $f(r)$ – radial funksiyalar. Yechim quyidagi ko‘rinishda qarab chiqilgan

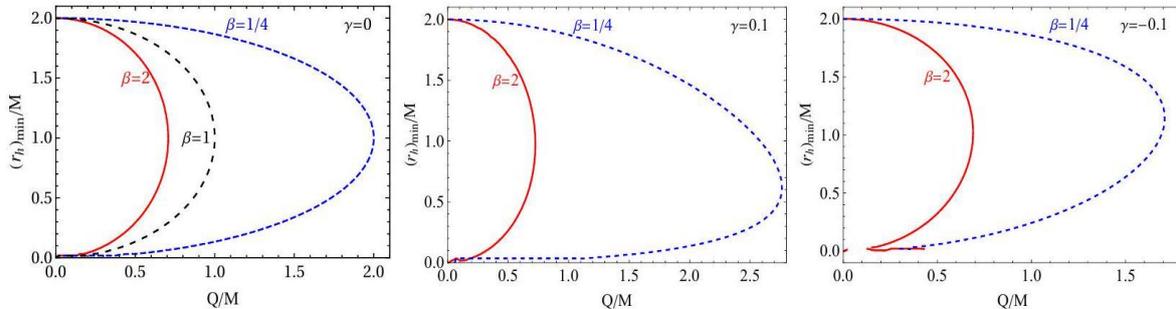
$$\begin{aligned} f(r) &= r^2 \left(1 + \frac{\gamma Q^2}{Mr}\right), \\ U(r) &= 1 - \frac{2M}{r} + \frac{\beta Q^2}{f(r)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Dilaton maydonining vektor va skalyar potentsiallari radial koordinatalar bilan quyidagicha bog‘langan

$$A_t(r) = \frac{Q}{r} \left[\gamma - \frac{\beta}{2} \left(1 + \frac{r^2}{f(r)}\right) \right], \quad (15)$$

$$\phi(r) = -\frac{1}{2} l n \left(\frac{f(r)}{r^2} \right). \quad (16)$$

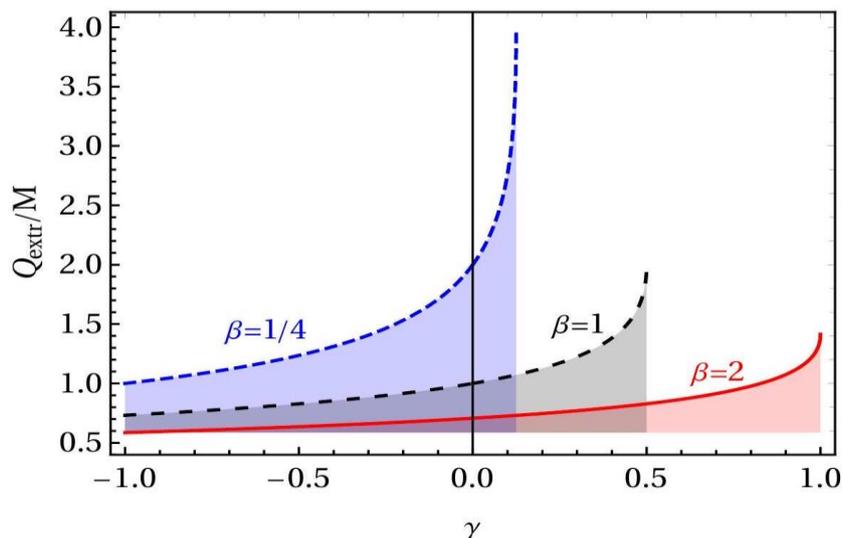
8- rasmda hodisalar gorizonti radiusining qora o'ra zaryadiga bog'liqligi β ning turli qiymatlarida γ parametrning turli qiymatlari uchun nolga teng (chap panel), musbat (o'rtadagi panel) va manfiy (o'ng panel) qiymatlarga ega holati ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, tashqi va ichki gorizontlarning qo'shilishiga mos keladigan Q zaryadning qiymati, β parametrning ortishi bilan kamayadi. Boshqa tomondan, β ning musbat (manfiy) qiymatlari tashqi gorizont minimal qiymatining ortishiga (kamayishiga) olib keladi.



8- rasm. β ning turli qiymatlarida hodisalar gorizonti radiusining γ ga bog'liqligi

9-rasmda chap va o'ng panellarda mos ravishda fikslangan $\beta = 1/4$ va $\beta = 2$ qiymatlarda hodisalar tashqi gorizonti minimal qiymatlarining qora o'ra zaryadi ekstremal qiymatlarining γ ga bog'liqligi keltirilgan.

Shuningdek, pastki panelda hodisalar tashqi gorizonti minimal qiymatlari va ekstremal zaryadlangan EMS qora o'ra o'rtasidagi bog'lanish ko'rsatilgan. Yuqori panellardagi shtrixlangan sohalar γ parametr qiymatlari to'plamiga tegishlidir. Son qiymatlari tahlili shuni ko'rsatadiki, β parametrning bo'lishi mumkin barcha qiymatlari uchun γ parametrning ekstremal qiymatlari mavjud. Bunda qora o'ra zaryadining ekstremal qiymati va tashqi gorizontning unga mos kelgan qiymati β ning ortishi bilan kamayadi. Biroq, $\gamma = 0$ bo'lgan holatda hodisalar gorizontining minimal qiymati β ning barcha qiymatlarida $r = M$ ni qabul qiladi, shu vaqtning o'zida qora o'ra ekstremal zaryad β ning ortishi bilan kamayadi.



9 -rasm. β ning turli qiymatlari uchun qora o'ra zaryadining γ parametrga bog'liq kritik qiymatlari

Qora o'ra atrofidagi sinov zarralari harakatining tenglamasini lagranjian yordamida topish mumkin:

$$L_p = \frac{1}{2} m g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu . \quad (17)$$

Harakat konstantalari quyidagi ko'rinishga ega

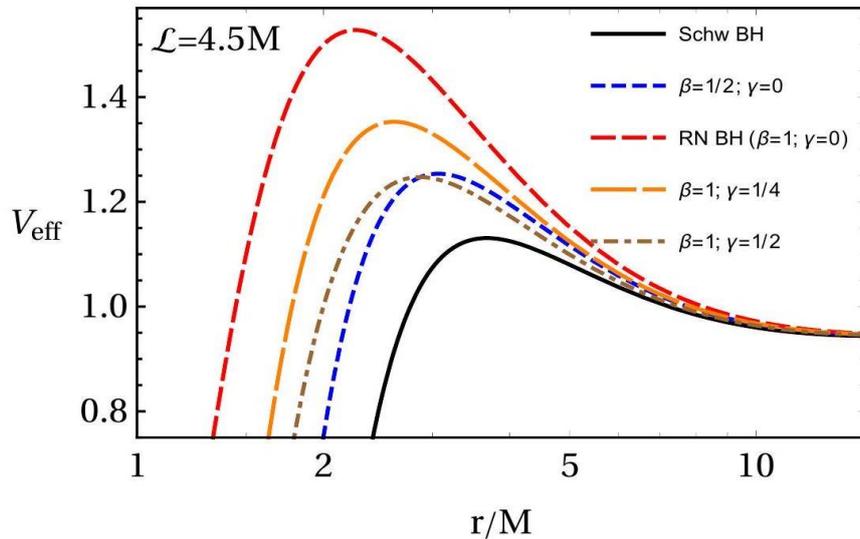
$$g_{tt} \dot{t} = -\mathcal{E}, \quad g_{\phi\phi} \dot{\phi} = \mathcal{L} , \quad (18)$$

bu yerda \mathcal{E} i \mathcal{L} – mos ravishda zarraning energiyasi va burchak momentidir. Sinov zaryadining harakat tenglamasi normallashtirish shartiga bo'ysunadi

$$g_{\mu\nu} u^\mu u^\nu = \epsilon, \quad (19)$$

bu yerda ϵ massasiz va massiv zarralar uchun mos ravishda 0 va -1 qiymatlarni qabul qiladi.

EMS zaryadlangan qora o'ra atrofidagi fazo-vaqtda sinov zaryadlari radial harakati effektiv potensialining EMS nazariyasi β va γ parametrlarining turli qiymatlari uchun bog'liqligi 10-rasmda keltirilgan.



10- rasm. β va γ EMS parametrlarining turli qiymatlarida EMS gravitatsiyasida zaryadlangan QT atrofida sinov zaryadlari radial harakati effektiv potensialining profillari. Barcha holatlarda $Q = M$

Bu rasmda qora o'raning zaryadi va zarrachalarning burchak momenti mos ravishda $Q = M$ va $\mathcal{L} = 4.5M$ kabi qayd qilingan, ekvatorial tekislik qarab chiqilgan bo'lib, bu yerda $\theta = \pi/2$ ga teng. 10- rasmdan ko'rinib turibdiki, effektiv potensialning maksimal qiymati $\beta = 1$ da γ ning ortishi bilan kamayadi. Bunda β ning ortishi effektiv potensial maksimumining ortishiga olib keladi.

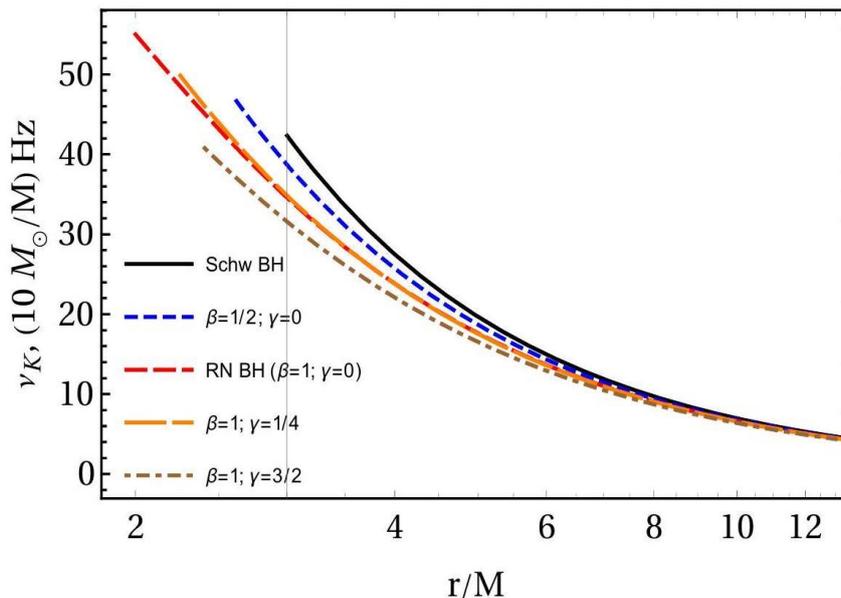
“Skalyar maydon mavjudligida zaryadlangan qora o'ra atrofidagi kvazidavriy ossillyatsiyalar” deb ataladigan **to'rtinchi** bobda EMS gravitatsiyasi doirasida zaryadlangan qora o'ra atrofida aylanayotgan sinov zaryadlarining asosiy chastotalari o'rganilgan. Jumladan, zarrachalarning aylanma orbitalarga nisbatan radial va vertikal yo'nalishlardagi chastotalari va Kepler chastotalari tahlil qilingan.

Sinov zaryadlarining statik qora o'ralar atrofidagi aylanma yoki Kepler orbitalari deb ataladigan orbitalardagi $\Omega_K = \dot{\phi}/\dot{t}$ burchak tezligi quyidagicha aniqlanadi

$$\Omega_K = \frac{d\phi}{dt} = -\frac{g_{tt}\mathcal{L}}{g_{\phi\phi}\mathcal{E}}. \quad (20)$$

Matematik hisob-kitoblardan keyin metrik funksiyalarga (14) ega fazo-vaqtda (13) Kepler chastotasi quyidagi ko'rinishga keladi:

$$\Omega_K^2 = \frac{2M}{r^2(2r+\gamma Q^2)} - \frac{\beta Q^2}{r^2(r+\gamma Q^2)^2}.$$

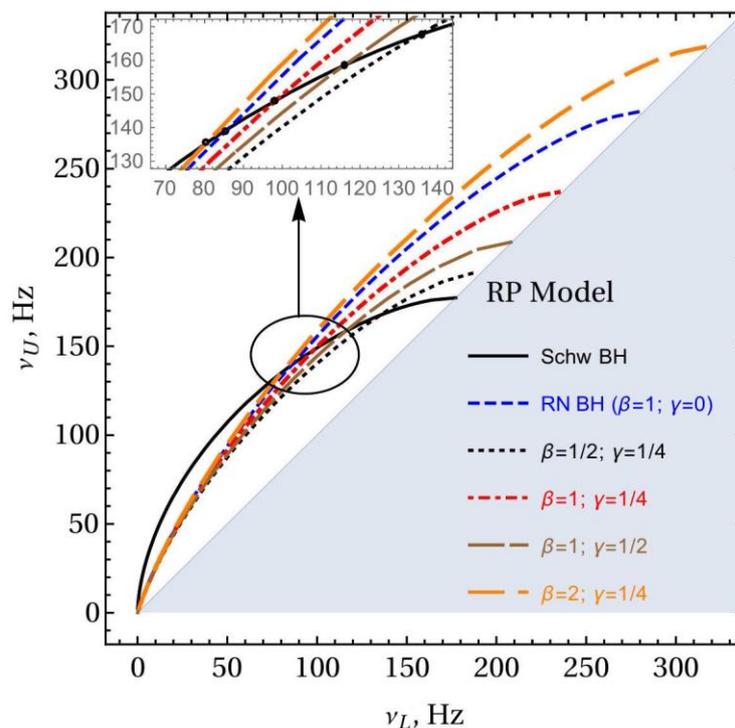


11- rasm. EMS gravitatsiyasida qora o'ra zaryadlari atrofida sinov zaryadlarining Kepler chastotasi, Shvarsschild qora o'radan tashqari, EMS parametrlari β va γ ning turli qiymatlari hamda qora o'ra zaryadi uchun radial koordinata funksiyasi sifatida

β va γ parametrlarning turli qiymatlari va fikslangan $Q/M = 1$ qiymat uchun qora o'ra zaryadlangan EMS atrofidagi sinov zaryadlari Kepler chastotalarining radial profillari 11- rasmda keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, Kepler chastotasi $\gamma\beta = 1$ parametrning ortishi bilan kamayadi. Ko'k shtrixlangan va qizil yirik punktirlangan chiziqlarni solishtirishdan parametrning ortishi chastotaning ortishiga olib kelishi ko'rinib turibdi.

EMS gravitatsiyada relyativistik pretsessiya (RP) modeli doirasida zaryadlangan qora o'ra atrofidagi kvazidavriy ossillyatsiyaning (QPO) ikkilangan cho'qqilari tadqiq qilingan.

QPO ning sinov zaryadlarining qora o'ra atrofida barqaror aylanma orbitalar bo'yicha radial, vertikal va orbital tebrinishlarining kombinatsiyalaridan foydalangan holdagi yuqori va quyi chastotalari mos ravishda $v_U = v_\phi$ va $v_L = v_\phi - v_r$, ko'rinishga ega bo'ladi.



12-rasm. RP modelidagi EMS gravitatsiyasida QPO yuqori va quyi cho‘qqilarining zaryadlangan qora o‘ralarga bog‘liq bo‘lishi mumkin qiymatlari

12- rasmda RP modelidagi EMS gravitatsiyasida QPO yuqori va quyi cho‘qqilarining zaryadlangan qora o‘ralarga bog‘liq bo‘lishi mumkin qiymatlari ko‘rsatilgan. Bu yerda qora o‘ra massasi $M = 15M_{\odot}$, zaryad $-Q = M$ ga teng. Bu rasmdan ko‘rinib turibdiki, $\beta = 1$ bo‘lganida qora o‘ra zaryadi mavjudligida QPO chastotalari ortadi, $\beta < 1$ bo‘lgan holatda esa, QPO ni quyi chastotali QPO atrofida kuzatish mumkin. Xuddi shuningdek $\beta = 1$ da γ ning ortishi chastotaning kamayishiga olib keladi.

Biri biriga yaqin chastotalar nisbatiga ega va markaziy qora o‘ra yulduz massasi bilan 3:2 nisbatga teng bo‘lgan GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322 va XTE 1550-564 mikrokvazarlarda kuzatilayotgan QPO lar uchun EMS parametri va qora o‘ra zaryadining chegaraviy qiymatlari olingan.

XULOSALAR

“Kuchli gravitatsiya maydonida zarralar dinamikasi” nomli dissertatsiya ishi doirasida bajarilgan tadqiqotlar natijalari bo‘yicha quyidagi xulosalar qilingan:

1. Fazo-vaqt deformatsiyasi parametrlari mavjudligida Shvarsshildsimon qora o‘ra atrofidagi yorug‘lik nurlarining og‘ish burchagi kamayishi ko‘rsatilgan. Plazma muhitining nobirjinsliligiga javob beruvchi parametrning ortishi kompakt obyekt atrofida yorug‘lik nurlarining og‘ish burchagining ortishiga olib kelishi ko‘rsatilgan. Fazo-vaqt deformatsiyasi parametrining ta’siri hisobiga tasvir yorqinligining umumiy kattalashishining kamayishi ham ko‘rsatilgan.
2. Tasvir yorqinligining umumiy kattalashishi ham bir jinsli, ham bir jinsli bo‘lmagan plazma parametrlarining ortib borishi bilan ortishi ko‘rsatilgan. Aylanma orbitalarda sinov zaryadarining solishtirma burchak momenti va energiyalarining analitik ifodalari birinchi marta topilgan hamda ularga skalyar maydon va modifikatsiyalangan gravitatsiya parametrlarining ta’siri tahlil qilingan.
3. Qora o‘ra zaryadining kattalashishi ham energiya, ham burchak momenti minimumining kamayishiga olib kelishi, biroq skalyar maydon va modifikatsiyalangan gravitatsiya mavjudligida bu kattaliklar kattalashishi ko‘rsatilgan. Tadqiq qilinayotgan qora o‘ra zaryadining ortishi bilan ichki barqaror aylanma orbitalarning radiusi, Rayssner–Nordstrom qora o‘ra elektr zaryadi qiymatining xuddi shunday ortishiga qaraganda, juda tez kamayishi aniqlandi.
4. Tadqiqotlarning astrofizik qo‘llanilishi sifatida ikki cho‘qqili kvazidavriy ossillyatsiyalar relyativistik pretsessiyasi uchun model takomillashtirildi.
5. Zarrachalar ichki barqaror aylanma orbitalarining radiusini, chastotalar nisbati 5:4 ga teng bo‘lgan ikkilanma cho‘qqi kvazidavriy ossillyatsiyasi chastotasi haqidagi ma’lumotlardan foydalangan holda, katta aniqlik bilan o‘lchash mumkinligi ko‘rsatilgan. Shuningdek, kvazidavriy ossillyatsiya radiusi qora o‘ra zaryadining nisbatan katta qiymatlarida ichki barqaror aylanma orbitaga yaqinlashishi ham aniqlangan.
6. Zaryadning chegaraviy qiymatlari va modifikatsiyalangan gravitatsiya parametrlari, GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322 va XTE 1550-564 mikrokvazarlardagi kuzatilayotgan kvazidavriy ossillyatsiyalarning nazariy natijalari bilan taqqoslashdan olingan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/31.03.2022.Т/ФМ.10.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА “ТИИМСХ”**

**ИНСТИТУТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

ХАМИДОВ ВОХИД СОБИРОВИЧ

ДИНАМИКА ЧАСТИЦ В СИЛЬНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

**01.03.01-Астрономия
01.04.02 – Теоретическая физика**

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

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2022.3.PhD/FM762.

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).

Научные руководители:

Абдужаббаров Ахмаджон Адилжанович
доктор физико-математических наук, профессор
Ахмедов Бобомурат Жураевич
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Шайматов Санжар Рузимуротович
доктор физико-математических наук, снс

Мамаджанов Ахрор Ибрагимович
кандидат физико-математических наук, доцент

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 «ТИИИМСХ». 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 «ТИИИМСХ» (регистрационный номер ____). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института фундаментальных и прикладных исследований Национального исследовательского университета «ТИИИМСХ». Адрес: 100000, г.Ташкент, улица Кори Ниязова 39.

Тел.: +998 71 237-09-61.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2023 г.

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

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

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

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. С созданием общей теории относительности (ОТО) появилось новая концепция гравитации, суть которой заключается в том, что гравитационные массивные объекты искажают изначально плоскую структуру пространства-времени, а свойства кривизны пространства-времени указывают на интенсивность гравитационного поля. Первое экспериментальное подтверждение ОТО было сделано путем наблюдения так называемого гравитационного линзирования во время солнечного затмения 1919 года. Одной из особенностей гравитационного линзирования является его эффективность для обнаружения темной материи, которую можно «увидеть» только посредством гравитационного взаимодействия.

Однако на пути построения единой теории поля ОТО сталкивается с рядом фундаментальных проблем. Проблемы существования сингулярности в вакуумных решениях уравнений Эйнштейна, связанные с необходимостью квантования пространства-времени, и другие приходится решать с помощью модификаций общей теории относительности и/или альтернативных теорий гравитации. В этом контексте гравитационное линзирование рассматривается как полезный инструмент для проверки модифицированных и альтернативных теорий гравитации. Таким образом, исследование и моделирование влияния искривленного пространства на движение фотонов вблизи компактных объектов и на результаты астрономических наблюдений является актуальной задачей.

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

Данная диссертационная работа в определенной мере служит реализации задач, утвержденных в государственных нормативных документах, в указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, а также в «Дорожной карте основных направлений структурных реформ в Узбекистане на 2019–2021 годы», опубликованной правительством Республики Узбекистан 29 ноября 2018 года.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и

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

технологий Республики Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы

Динамика массивных и безмассовых пробных частиц изучена многими учеными, в том числе английскими (С. Will, С. Keeton), российскими (О. Цупко, Е. Бисновати-Коган), немецкими (С. Laemmerzahl, J. Kunz, A. Grezenbach), аргентинскими (L. Amarilla, E. Eiroa), чешскими (M. Kolos, J. Vrba, Z. Stuchlik, J. Schee), индийскими (N. Dadhich, S. Ghosh, P. Joshi, M. Patil) и др. Однако эффект линзирования фотонов вокруг шварцшильдоподобных деформированных черных дыр при наличии плазмы не изучен.

Динамика пробных тел с ненулевым электрическим зарядом и магнитным моментом вокруг компактных объектов при наличии электромагнитного поля в рамках ОТО была изучена такими отечественными учеными, как Б.Ж. Ахмедов, А.А. Абдужаббаров, Д.Р. Райимбаев, Б.А. Тошматов и Б.М. Нарзиллоев, и зарубежными авторами, такими как R. Wald, F. de Felice, F. Sorge и др. Однако открытым остается вопрос анализа динамики частиц в рамках модифицированных теорий гравитации при наличии скалярного и электромагнитного полей.

Также остается неизученным вопрос скалярного и электромагнитного полей на квазипериодических осцилляциях частиц на круговых орбитах вокруг компактных объектов. Разработка и усовершенствование моделей, описывающих динамику частиц вокруг компактных объектов при наличии скалярного и электромагнитного полей, способствуют получению предельных значений для параметров модифицированных и/или альтернативных теорий гравитации.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов, финансируемых Министерством инновационного развития, № F-FA-2021-510 «Исследование ядерного вещества внутри нейтронных звезд в рамках модифицированных моделей гравитации», № F-FA-2021-432 «Анализ и обработка спутниковых данных рентгеновских маломассивных двойных систем».

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

Задачи исследования:

- исследовать влияние однородной плазмы на угол отклонения при фиксированных значениях параметра деформации пространства-времени в приближении слабого гравитационного взаимодействия;
- провести сравнительный анализ угла отклонения светового луча в случае однородной плазмы с случаем в неоднородной плазме;
- изучить общее увеличение яркости источника изображения из-за гравитационного слабого линзирования для различных значений параметра деформации пространства-времени;

- изучить зависимость общего увеличения яркости изображения от плазменной среды;
- исследовать профили радиуса горизонта событий в зависимости от изменения гравитационных параметров модели Эйнштейна-Максвелла-скалярного поля (ЭМС) и заряда ЧД;
- исследовать динамику пробных частиц в пространстве-времени заряженных ЧД в модифицированной гравитационной модели;
- поиск аналитических выражений для удельного углового момента и энергии пробных частиц на круговых орбитах и анализ влияния на них параметров скалярного поля и модифицированной гравитации;
- проанализировать влияние модифицированного гравитационного поля на радиус внутренних стабильных круговых орбит (ВСКО), энергию и угловой момент частиц на ВСКО, а также на энергетическую эффективность;
- исследовать фундаментальные частоты, такие как кеплеровы и радиальные частоты колебаний частиц, вращающихся вокруг ЧД, в рамках модифицированной гравитационной модели;
- получить предельные значения на заряд и параметры модифицированной гравитации из сравнения теоретических результатов с наблюдательными данными.

Объектом исследования являются астрофизические компактные объекты, фотоны и пробные частицы с ненулевым электрическим и магнитным зарядами, скалярные поля.

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

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

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- показано, что угол отклонения световых лучей вокруг шварцшильдopodobной ЧД уменьшается при наличии параметра деформации пространства-времени;
- исследовано влияние однородной плазмы на угол отклонения при фиксированных значениях параметра деформации пространства-времени в приближении слабого гравитационного взаимодействия;
- показано, что увеличение параметра, отвечающего за неоднородность плазменной среды, вызывает увеличение угла отклонения световых лучей вокруг компактного объекта;
- из сравнительного анализа показано, что угол отклонения светового луча больше в случае однородной плазмы по сравнению со случаем в неоднородной плазме;

- показано, что общее увеличение яркости изображения уменьшается из-за влияния параметра деформации пространства-времени;
- показано, что общее увеличение яркости изображения увеличивается с увеличением параметров как однородной, так и неоднородной плазмы;
- показано, что параметр модифицированной гравитационной модели имеет верхнее предельное значение, зависящее от параметра скалярного поля;
- найдены аналитические выражения для удельного углового момента и энергии пробных частиц на круговых орбитах и проанализировано влияние на них параметров скалярного поля и модифицированной гравитации;
- показано, что увеличение заряда ЧД приводит к уменьшению минимума как энергии, так и углового момента, однако при наличии параметров скалярного поля и модифицированной гравитации эти величины увеличиваются.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

- показано, что радиус внутренних стабильных круговых орбит быстро уменьшается с увеличением заряда исследуемой ЧД по сравнению с аналогичным увеличением значения электрического заряда ЧД Райсснера-Нордстрема и достигает значения до 16%;
- показано, что радиус внутренних стабильных круговых орбит частиц можно измерить, используя данные о квазипериодических частотах двойного пика с соотношением частот менее 5:4 с высокой точностью;
- также установлено, что радиус квазипериодических осцилляций приближается к внутренней стабильной круговой орбите при более высоких значениях заряда ЧД;
- получены предельные значения на заряд и параметры модифицированной гравитации из сравнения теоретических результатов с наблюдаемыми квазипериодическими осцилляциями в микроквазарах GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322 и XTE 1550-564.

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

Научная и практическая значимость результатов исследования

Научная значимость результатов исследования определяется тем, что разработанная модель дает возможность сформулировать основные механизмы увеличения яркости изображения источника при гравитационном линзировании при наличии плазмы.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные теоретические модели и полученные результаты могут быть использованы для получения более точных предельных значений на

параметры модифицированной гравитационной модели из сравнения теоретических результатов с наблюдаемыми квазипериодическими осцилляциями в микроквазарах.

Внедрение результатов исследования

На основе разработанных теоретических моделей движения фотонов и пробных частиц в модифицированной теории гравитации исследованы:

– свойства движения безмассовых частиц и эффект гравитационного линзирования, которые были использованы китайскими учеными Фуданьского университета (ФУ) в городе Шанхае (справка ФУ, Китай, от 24 июля 2023 г.). В результате рассчитано значение параметра модифицированной гравитации;

– результаты по движению заряженных частиц, которые были использованы в более чем 20 научных работах зарубежных исследователей в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором, использованы для характеристики эффектов намагниченных частиц вокруг вращающейся черной дыры, а также для расчета скорости аккрецирующего вещества (Symmetry, 2023; V.15: id 293, Web-Sc, IF-2.94; European Physical Journal C, 2023; V.83: id 506, Web-Sc, IF-4.994; Chinese Journal of Physics, 2023; V.83: pp. 664-679, Web-Sc, IF-3.957 и др).

В результате получена информация о движении фотонов компактных объектов в рамках модифицированных теорий гравитации при наличии плазмы.

Апробация результатов исследования

Результаты исследования были представлены на 5 республиканских и 1 международной научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования

По теме диссертационной работы опубликованы 5 научных работ в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 3 зарубежных.

Структура и объем диссертации

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе представлен подробный обзор литературы по динамике фотонов и частиц в окрестности компактных объектов. Проанализированы исследования по изучению гравитационного линзирования, энергетических спектров и аккреционного диска таких объектов.

Уделено внимание работам по динамике пробных частиц в окрестности компактных объектов, в частности определению радиуса и устойчивости круговых орбит, энергии и углового момента частиц. Рассмотрены исследования структуры пространства-времени и орбитального движения частиц в поле черных дыр Рейснера-Нордстрёма.

Проанализированы работы по влиянию внешних электромагнитных полей на динамику заряженных и намагниченных частиц около вращающихся и статических черных дыр. Также рассмотрены исследования по моделированию теней черных дыр и их деформации из-за эффектов вращения.

Таким образом, в первой главе представлен обширный обзор современных теоретических исследований динамики фотонов и различных типов заряженных частиц в окрестности черных дыр. Рассмотрен широкий круг эффектов гравитационного и электромагнитного взаимодействия частиц с этими объектами.

Во второй главе под названием «Гравитационное линзирование вокруг статической черной дыры при наличии плазмы» изучено гравитационное слабое линзирование вокруг шварцшильдоподобной ЧД в присутствии плазменной среды. Также исследовано полное увеличение размера и яркости источника изображения за счет гравитационного линзирования с учетом влияния параметра связи при наличии плазмы вокруг ЧД.

Рассмотрим решение сферически-симметричной Шварцшильдоподобной ЧД, которое в координатах Бойера–Линдквиста имеет следующий вид:

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

с

$$f(r) = 1 - \frac{2Me^{-a/r}}{r}, \quad (2)$$

где M – масса ЧД, a – параметр константы связи, связанной с модифицированной гравитацией.

Рассмотрим метрику пространства-времени (1) в режиме слабого поля:

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}, \quad (3)$$

где $\eta_{\alpha\beta}$ – метрика пространства-времени Минковского и $h_{\alpha\beta}$ – возмущение геометрии плоского пространства-времени, которое может быть определено метрической теорией гравитации и выражено как

$$\begin{aligned} \eta_{\alpha\beta} &= \text{diag}(-1, 1, 1, 1), \\ h_{\alpha\beta} &\ll 1, \quad h_{\alpha\beta} \rightarrow 0 \text{ under } x^i \rightarrow \infty, \\ g^{\alpha\beta} &= \eta^{\alpha\beta} - h^{\alpha\beta}, \quad h^{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим влияние плазмы на угол отклонения $\hat{\alpha}_k$ в гравитационном слабом поле ЧД. Общее уравнение угла отклонения при наличии плазмы можно записать в виде

$$\hat{\alpha}_k = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(h_{33} + \frac{h_{00}\omega^2 - K_e N(x^i)}{\omega^2 - \omega_e^2} \right)_{,k} dz, \quad (5)$$

где $N(x^i)$ – числовая плотность частиц в плазме вокруг ЧД, $K_e = 4\pi e^2/m_e$ – постоянная плазмы, ω и ω_e – фотонная и плазменная частоты, соответственно.

Используя уравнения (4)–(5), можно переписать уравнение (5) для угла отклонения в следующем виде:

$$\hat{\alpha}_b = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b}{r} \left(\frac{dh_{33}}{dr} + \frac{1}{1 - \omega_e^2/\omega^2} \frac{dh_{00}}{dr} - \frac{K_e}{\omega^2 - \omega_e^2} \frac{dN}{dr} \right) dz, \quad (6)$$

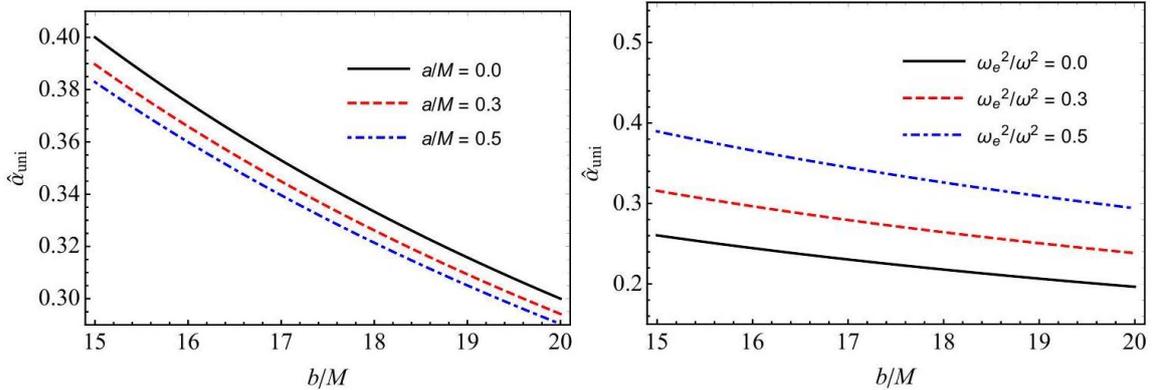


Рис. 1. Зависимость угла отклонения $\hat{\alpha}_{\text{uni}}$ от импакт-параметра b для различных значений параметра a/M (слева) и параметра плазмы ω_e^2/ω^2 (справа)

где b – прицельный параметр. Отметим, что значения $\hat{\alpha}_b$ могут быть как отрицательными, так и положительными.

Рассмотрим угол отклонения световых лучей вокруг ЧД в присутствии однородной плазменной среды в виде суммы

$$\hat{\alpha}_{\text{uni}} = \hat{\alpha}_{\text{uni}1} + \hat{\alpha}_{\text{uni}2} + \hat{\alpha}_{\text{uni}3} \quad (7)$$

где $\hat{\alpha}_{uni1}$ и $\hat{\alpha}_{uni2}$ можно объяснить как части угла отклонения за счет однородной плазмы вместе с гравитацией и $\hat{\alpha}_{uni3} = 0$ – за счет равномерного распределения плазмы. В данной работе получено уравнение угла отклонения световых лучей вокруг ЧД с новым параметром a в окружении однородной плазмы в следующем виде:

$$\hat{\alpha}_{uni} = - \left(\frac{\pi a^3 R_s}{64 b^4} - \frac{a^2 R_s}{3 b^3} + \frac{\pi a R_s}{4 b^2} - \frac{R_s}{b} \right) - \left(\frac{3 \pi a^3 R_s}{32 b^4} - \frac{a^2 R_s}{b^3} + \frac{\pi a R_s}{2 b^2} - \frac{R_s}{b} \right) \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_e^2}. \quad (8)$$

На рисунке 1 представлена зависимость угла отклонения световых лучей вокруг ЧД от прицельного параметра b для различных значений параметра a и плазменной частоты ω_e/ω . Зависимость угла отклонения от плазменной частоты и параметра a при фиксированных значениях прицельного параметра представлена на рисунке 2. Из графиков можно сделать вывод, что угол

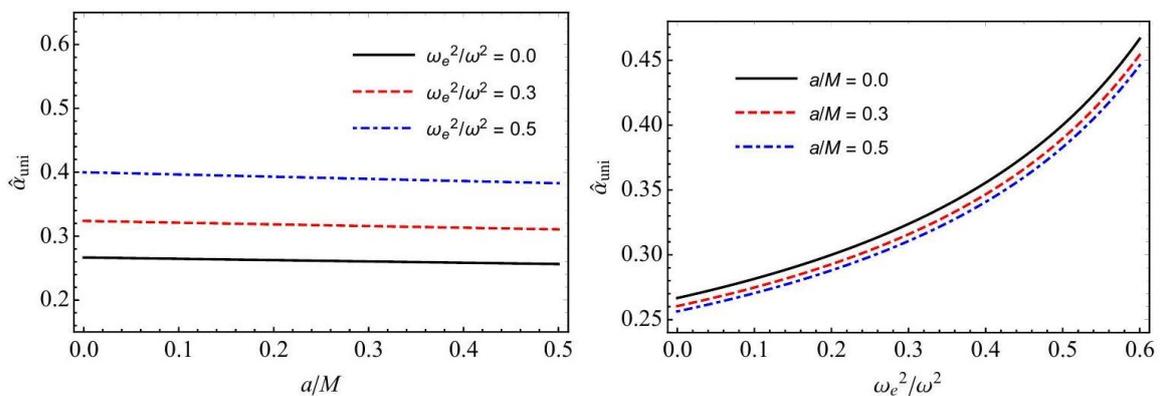


Рис. 2. Зависимость угла отклонения $\hat{\alpha}_{uni}$ от параметра a/M (слева) и параметра плазмы ω_e^2/ω^2 (справа) для фиксированного значения прицельного параметра $b/M = 15$

отклонения световых лучей вокруг ЧД изгибается при наличии плазменного параметра. Более того, с увеличением параметра a угол изгиба световых лучей уменьшается. Угол гравитационного отклонения стремится к нулю с увеличением прицельного параметра b .

Рассмотрим угол отклонения световых лучей вокруг ЧД при наличии неоднородной плазмы в Шварцшильдоподобной гравитационном поле с ненулевым параметром a . Для простоты рассмотрим модель сингулярной изотермической сферы (СИС) в качестве неоднородного распределения плазмы. Плотность плазмы среды СИС выражается в следующем виде

$$N(r) = \frac{\rho(r)}{k m_p} \quad (9)$$

с

$$\rho(r) = \frac{\sigma_v^2}{2\pi r^2} \quad (10)$$

где σ_v – скорость рассеивания, $\rho(r)$ – плотность плазмы вокруг компактного объекта.

На рисунке 3 представлен эффект неоднородной плазмы и параметра a на угол отклонения световых лучей вокруг ЧД. Зависимость угла отклонения от неоднородной плазмы и параметра a для фиксированных значений прицельного параметра b и случая неоднородной плазмы показана на рисунке 4. Из рисунков 3 и 4 видно, что угол отклонения световых лучей уменьшается при наличии параметра a и, наоборот, из-за влияния неоднородной плазменной среды угол отклонения световых лучей увеличивается.

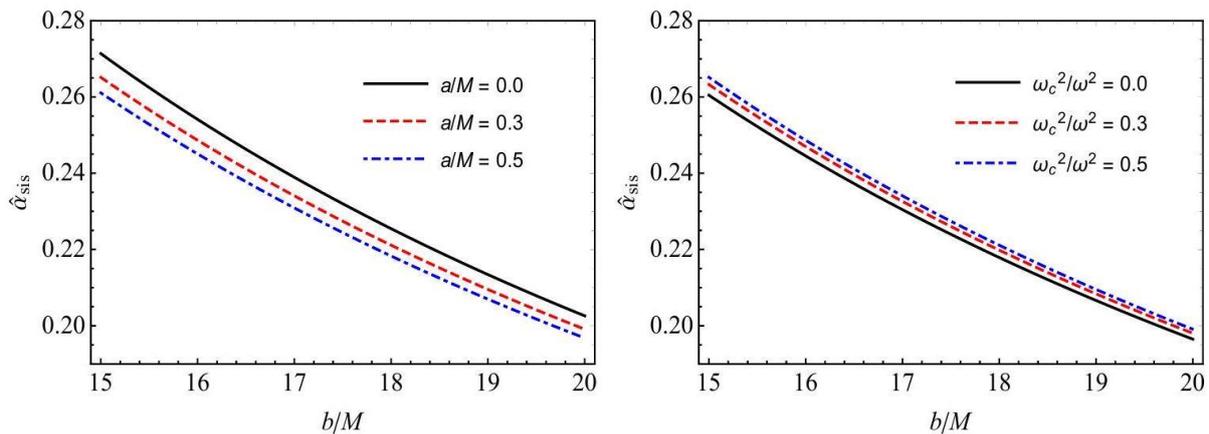


Рис. 3. Зависимость угла отклонения $\hat{\alpha}_{SIS}$ от прицельного параметра b для различных значений параметра a/M (слева), параметра неоднородной плазмы (справа)

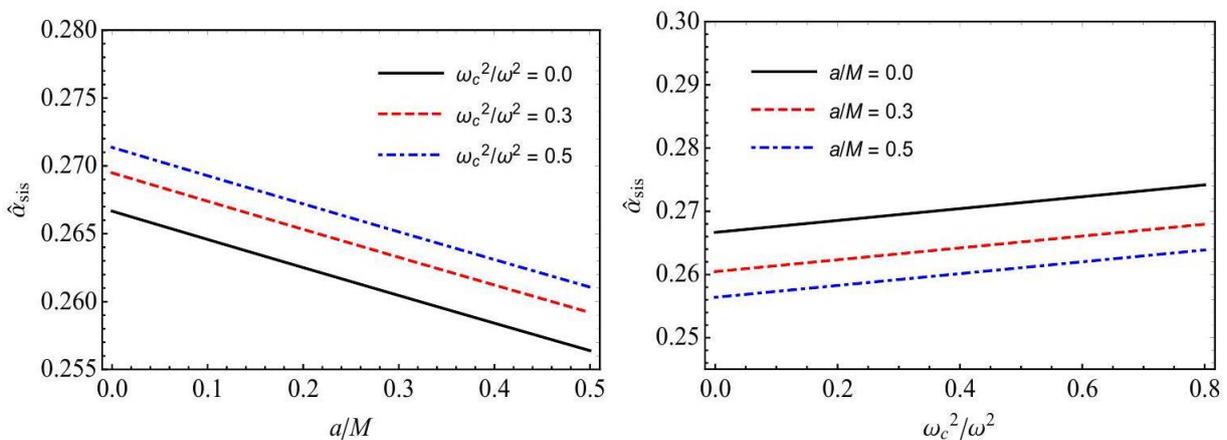


Рис. 4. Зависимость угла отклонения $\hat{\alpha}_{SIS}$ от параметра a/M (слева) и параметра неоднородной плазмы (справа) для фиксированного значения прицельного параметра $b/M = 15$

Также в этой главе рассмотрено увеличение источника изображения как следствие гравитационного линзирования в присутствии плазмы, при использовании уравнения линзы в виде

$$\theta D_s = \beta D_s + \hat{\alpha}_b D_{ds}, \quad (11)$$

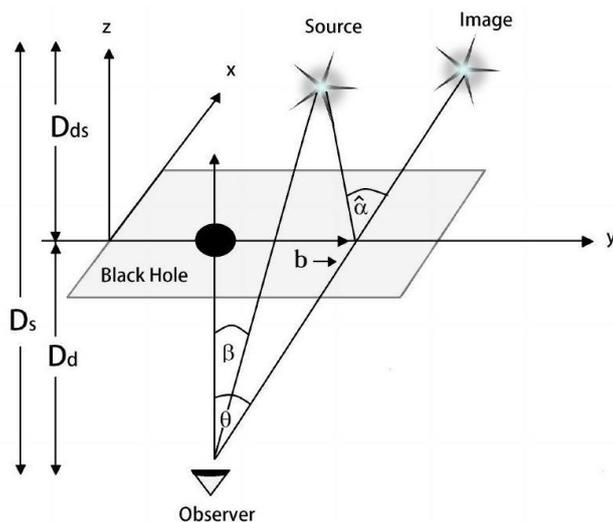


Рис. 5. Схематическое представление гравитационной линзы

где D_s и D_{ds} – расстояния от удаленного источника до наблюдателя и объекта линзы (рис. 5). Как показано на рисунке 5, θ и β представляют собой угол видимого изображения источника и самого источника по отношению к оси линзы наблюдателя соответственно. Связь между прицельным параметром b и углом θ – имеет вид $b = D_d \theta$, где D_d – расстояние от наблюдателя до предмета линзы. Используя эти выражения, можно переписать уравнение (11) в виде

$$\beta = \theta - \frac{D_{ds}}{D_s} \frac{F(\theta)}{D_d \theta}, \quad (12)$$

с

$$F(\theta) = |\alpha_b| b = |\alpha_b(\theta)| D_d \theta.$$

Зависимость полного увеличения яркости от параметра плазмы для различных значений параметра a представлена на рисунке 6. Из этой зависимости видно, что общее увеличение яркости изображения уменьшается из-за влияния параметра a , и общее увеличение возрастает с увеличением параметра однородной плазмы.

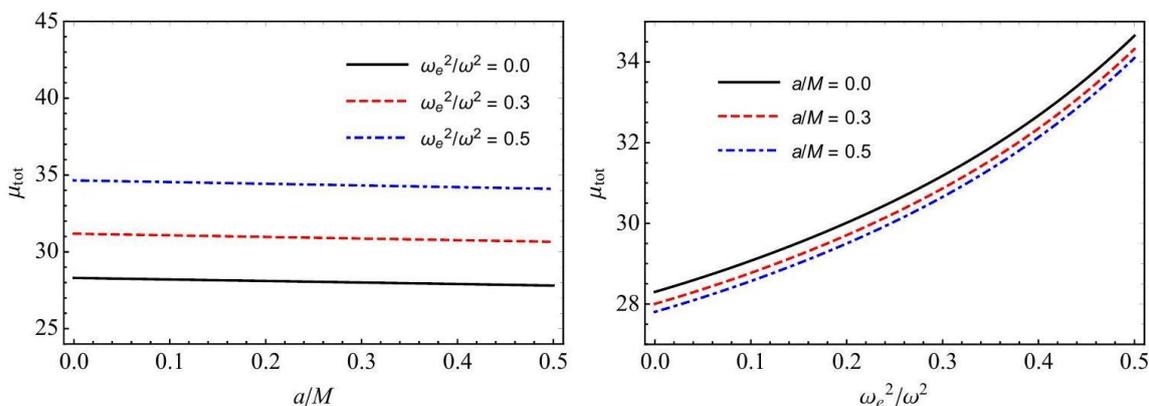


Рис. 6. Зависимость полного увеличения яркости μ_{tot} от параметра a для различных значений плазменной частоты (слева) и параметра плазмы для различных значений

параметра a (справа).

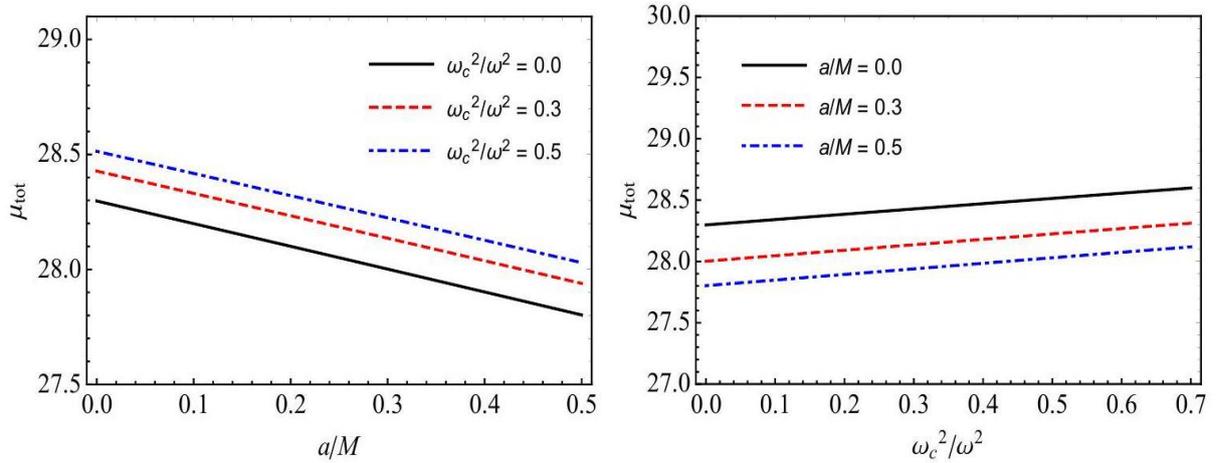


Рис. 7. Полное увеличение яркости изображений в зависимости от параметра a и неоднородной плазмы

Зависимость полного увеличения яркости изображений источника от параметра a и параметров плазмы показана на рисунке 7. Общее увеличение уменьшается из-за наличия параметра a . С другой стороны, общее увеличение яркости возрастает с увеличением параметра неоднородной плазмы.

В третьей главе под названием «Динамика пробных частиц вокруг черной дыры в рамках теории Эйнштейна–Максвелла – скалярного поля» изучены свойства пространства-времени, а также динамика нейтральных частиц вокруг ЧД в рамках гравитации Эйнштейна–Максвелла – скалярного поля (ЭМС). Начнем с краткого обзора решений ЧД в теории ЭМС, описываемых действием

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [R - 2\nabla_\alpha \phi \nabla^\alpha \phi - K(\phi) F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta}],$$

где ∇_α – ковариантная производная, g – определитель метрического тензора $g_{\mu\nu}$, R , – скаляр Риччи кривизны, ϕ – безмассовое скалярное поле, $F_{\alpha\beta}$ – тензор электромагнитного поля, $K(\phi)$ – функция связи между дилатоном и электромагнитными полями. Точные аналитические решения для пространства-времени вокруг статической ЧД в общем виде имеют вид:

$$ds^2 = -U(r)dt^2 + \frac{dr^2}{U(r)} + f(r)(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2), \quad (13)$$

где $U(r)$ и $f(r)$ – радиальные функции. Рассмотрено решение в виде

$$\begin{aligned} f(r) &= r^2 \left(1 + \frac{\gamma Q^2}{Mr}\right), \\ U(r) &= 1 - \frac{2M}{r} + \frac{\beta Q^2}{f(r)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Векторный и скалярный потенциалы поля дилатона зависят от радиальной координаты как

$$A_t(r) = \frac{Q}{r} \left[\gamma - \frac{\beta}{2} \left(1 + \frac{r^2}{f(r)} \right) \right], \quad (15)$$

$$\phi(r) = -\frac{1}{2} \ln \left(\frac{f(r)}{r^2} \right). \quad (16)$$

На рисунке 8 показаны зависимости радиуса горизонта событий от заряда ЧД при нулевом (левая панель), положительном (средняя панель) и отрицательном (правая панель) значениях параметра для различных значений параметра β . Видно, что экстремальное значение заряда Q , соответствующее слиянию внешнего и внутреннего горизонтов, уменьшается с увеличением параметра β . С другой стороны, положительные (отрицательные) значения β вызывают увеличение (уменьшение) минимального значения внешнего горизонта.

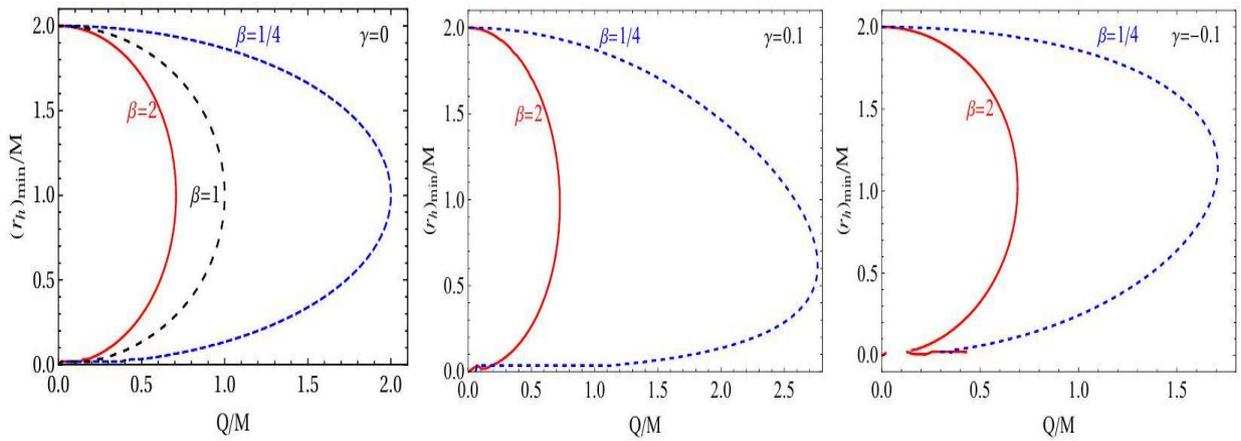


Рис. 8. Зависимость радиуса горизонта событий от γ при различных значениях β

На рисунке 9 представлены зависимости экстремальных значений заряда ЧД минимальных значений внешнего горизонта событий от параметра γ на верхней левой и правой панелях, соответственно, при фиксированных значениях $\beta = 1/4$ и $\beta = 2$. Также показаны связи между минимальными значениями внешнего горизонта события и экстремально заряженной ЧД ЭМС на нижней панели. Заштрихованные области на верхних панелях соответствуют набору значений параметра γ . Численный анализ показывает, что существует экстремальное значение параметра γ для всех возможных значений параметра β . При этом экстремальное значение заряда ЧД и соответствующее ему значение внешнего горизонта уменьшаются с увеличением β . Однако в случае, когда $\gamma = 0$, минимальное значение горизонта событий принимает $r = M$ при всех значениях β , в то время как экстремальный заряд уменьшается с увеличением β .

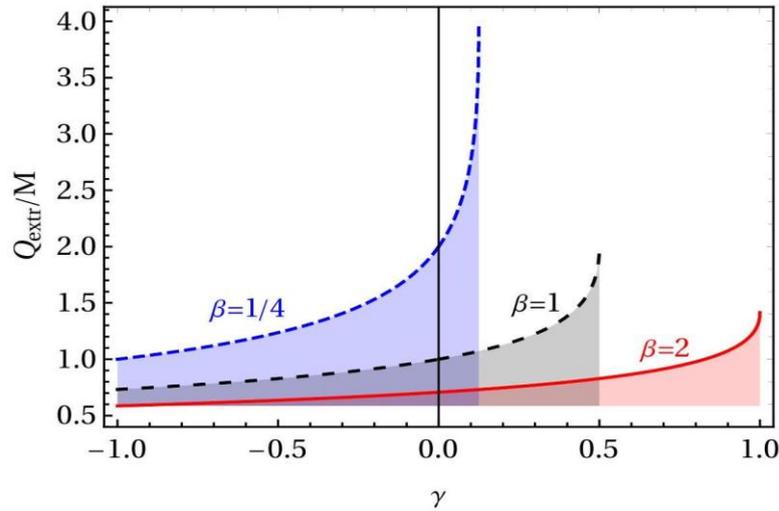


Рис. 9. Критические значения заряда ЧД в зависимости от параметра γ для различных значений β

Уравнение движения пробных частиц вокруг ЧД можно найти с помощью лагранжиана:

$$L_p = \frac{1}{2} m g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu . \quad (17)$$

Константы движения имеют вид

$$g_{tt} \dot{t} = -\mathcal{E}, \quad g_{\phi\phi} \dot{\phi} = \mathcal{L}, \quad (18)$$

где \mathcal{E} и \mathcal{L} – удельная энергия и угловой момент частицы соответственно. Уравнения движения пробной частицы подчиняются условию нормировки

$$g_{\mu\nu} u^\mu u^\nu = \epsilon, \quad (19)$$

где ϵ принимает значения 0 и -1 для безмассовых и массивных частиц соответственно.

Радиальная зависимость эффективного потенциала радиального движения пробных частиц в пространстве-времени вокруг заряженных ЧД ЭМС показана на рисунке 10 для различных значений параметров теории ЭМС β и γ .

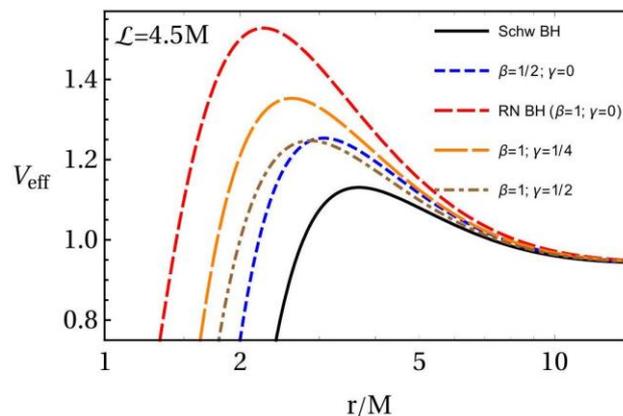


Рис. 10. Профили эффективного потенциала радиального движения пробных частиц вокруг заряженных ЧД в гравитации ЭМС при различных значениях параметров ЭМС β и γ . Во всех случаях $Q = M$.

На этом рисунке зафиксированы заряд ЧД и угловой момент частиц как $Q = M$ и $\mathcal{L} = 4.5M$, соответственно, рассмотрена экваториальную плоскость, где $\theta = \pi/2$. Из рисунка 10 видно, что максимальное значение эффективного потенциала уменьшается с увеличением γ при $\beta = 1$. При этом увеличение β вызывает увеличение максимума эффективного потенциала.

В четвертой главе под названием «Квазипериодические осцилляции вокруг заряженной черной дыры при наличии скалярного поля» изучены основные частоты пробных частиц, вращающихся вокруг заряженной ЧД в рамках гравитации ЭМС. В частности, анализируются частоты кеплеровских орбит и частоты колебаний частиц в радиальном и вертикальном направлениях относительно круговых орбит.

Угловая скорость $\Omega_K = \dot{\phi}/\dot{t}$ пробных частиц на круговых или так называемых кеплеровских орбитах вокруг статических ЧД определяется как

$$\Omega_K = \frac{d\phi}{dt} = -\frac{g_{tt}\mathcal{L}}{g_{\phi\phi}\mathcal{E}}. \quad (20)$$

После математических расчетов кеплерова частота в пространстве-времени (13) с метрическими функциями (14) принимает следующий вид:

$$\Omega_K^2 = \frac{2M}{r^2(2r+\gamma Q^2)} - \frac{\beta Q^2}{r^2(r+\gamma Q^2)^2}.$$

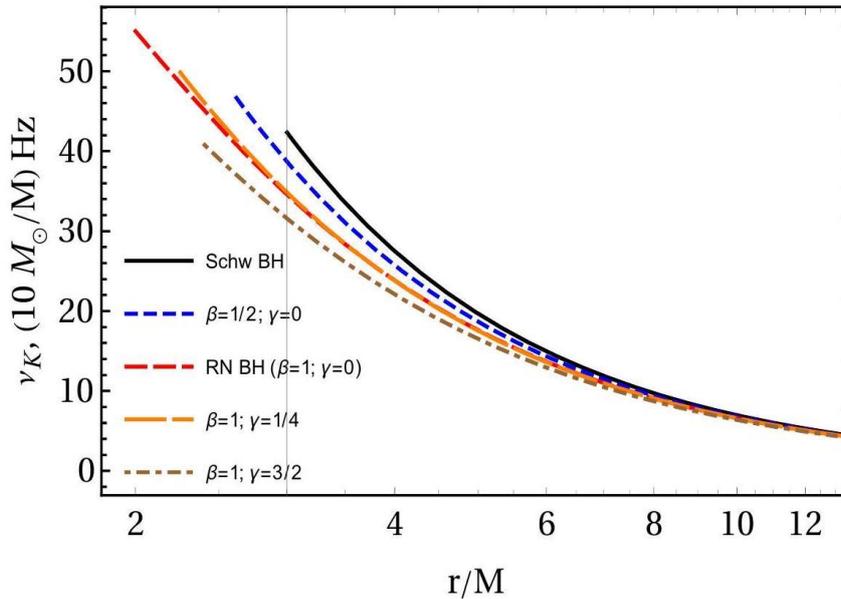


Рис. 11. Кеплеровская частота пробных частиц вокруг зарядов ЧД в гравитации ЭМС как функция радиальной координаты для различных значений параметров ЭМС β и γ и заряда ЧД принимается как $Q = M$, за исключением шварцшильдовской ЧД

Радиальные профили кеплеровских частот пробных частиц вокруг заряженной ЭМС ЧД представлены на рисунке 11 для различных значений β и γ параметров и фиксированного значения $Q/M = 1$. Из рисунка видно, что кеплеровская частота уменьшается с увеличением параметра $\gamma\beta = 1$. Из сравнения синих штриховых и красных крупнопунктирных линий видно, что увеличение параметра β вызывает увеличение частоты.

Исследованы двойные пики квазипериодических осцилляций (QPO) вокруг заряженных ЧД в гравитации ЭМС в рамках модели релятивистской прецессии (РП). Верхняя и нижняя частоты QPO с использованием комбинаций частот радиальных, вертикальных и орбитальных колебаний пробных частиц по устойчивым круговым орбитам вокруг ЧД имеют вид $\nu_U = \nu_\phi$ и $\nu_L = \nu_\phi - \nu_r$, соответственно.

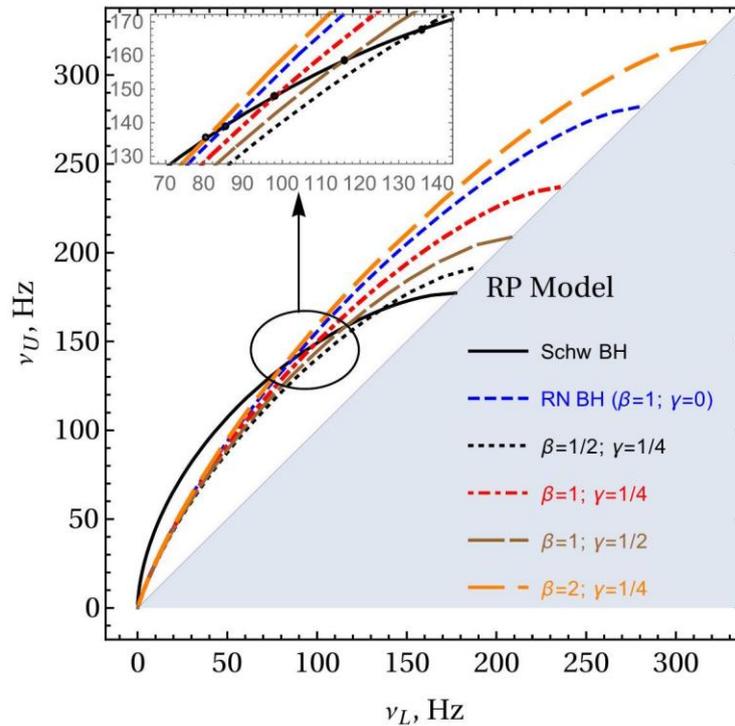


Рис. 12. Возможные значения частот верхних и нижних пиков QPO от заряженных ЧД в гравитации ЭМС в модели РП

На рисунке 12 показаны зависимости между верхней и нижней частотами двухпиковых QPO от заряженных ЧД в гравитации ЭМС в модели РП. Здесь масса ЧД $M = 15M_\odot$, а заряд $-Q = M$. Из этого рисунка видно, что частоты QPO возрастают в присутствии заряда ЧД при $\beta = 1$, а в случаях $\beta < 1$ можно QPO наблюдать вблизи низкочастотных QPO. Точно так же увеличение γ вызывает уменьшение частот при $\beta = 1$.

Получено предельное значение на заряд ЧД и параметра ЭМС для наблюдаемых QPO в микроквазарах GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322 и ХТЕ 1550-564, которые имеют отношения частот, близкие друг к другу и равные 3:2 с центральной ЧД звездной массы.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, выполненных в рамках диссертационной работы «Динамика частиц в сильном гравитационном поле», сделаны следующие выводы:

1. Показано, что угол отклонения световых лучей вокруг Шварцшильдоподобной ЧД уменьшается при наличии параметра деформации пространства-времени. Показано, что увеличение параметра, отвечающего за неоднородность плазменной среды, вызывает увеличение угла отклонения световых лучей вокруг компактного объекта. Также показано, что общее увеличение яркости изображения уменьшается из-за влияния параметра деформации пространства-времени.
2. Показано, что общее увеличение яркости изображения увеличивается с увеличением параметров как однородной, так и неоднородной плазмы. Впервые найдены аналитические выражения для удельного углового момента и энергии пробных частиц на круговых орбитах и проанализировано влияние на них параметров скалярного поля и модифицированной гравитации.
3. Показано, что увеличение заряда ЧД приводит к уменьшению минимума как энергии, так и углового момента, однако при наличии параметров скалярного поля и модифицированной гравитации эти величины увеличиваются. Обнаружено, что радиус внутренних стабильных круговых орбит быстро уменьшается с увеличением заряда исследуемой ЧД по сравнению с аналогичным увеличением значения электрического заряда ЧД Райсснера–Нордстрема.
4. В качестве астрофизического применения исследований усовершенствована модель для релятивистской прецессии двухпиковых квазипериодических осцилляций.
5. Показано, что радиус внутренних стабильных круговых орбит частиц можно измерить, используя данные о частоте квазипериодических осцилляций двойного пика с соотношением частот менее 5:4 с высокой точностью. Также установлено, что радиус квазипериодических осцилляций приближается к внутренней стабильной круговой орбите при более высоких значениях заряда ЧД.
6. Получены предельные значения на заряд и параметры модифицированной гравитации из сравнения теоретических результатов с наблюдаемыми квазипериодическими осцилляциями в микроквазарах GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322 и XTE 1550-564.

**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

KHAMIDOV VOKHID SOBIROVICH

DYNAMICS OF PARTICLES IN A STRONG GRAVITATIONAL FIELD

**01.0 3.0 1 -Astronomy
01.04.02 - Theoretical physics**

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

Tashkent - 2023

The theme of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered by Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2022.3.PhD/FM762.

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

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

Scientific supervisor and:

Abdujabbarov Ahmadjon Adilzhanovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Ahmedov Bobomura t Zhuraevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents:

Shaymatov Sanjar Ruzimurotovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences , SNS

Mamadjanov Ahror Ibragimovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Associate Professor

Lead organization:

Samarkand State University named after Sharaf 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.10.4 at the Institute of Fundamental and Applied Research under the National Research University "TIAME" (Address: 100000, Tashkent city, Qori Niyazov Street 39, Institute of Fundamental and Applied Research, Hall 108; tel.: 71 237-09-61.; e-mail: info@ifar.uz)

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

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

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

A. R. Hayotov

Vice Chairman of the Scientific Council

on Award of Scientific Degrees,

D. Ph.-M.S., Professor

E. Kh. Karimbayev

Scientific Secretary of Scientific Council

on Award of Scientific Degrees

PhD in Ph.-M.S.

B.M. Narzilloev

Chairman of the Scientific Seminar of the

Scientific Council on Award of Scientific

Degrees, D. Ph.-M.S.

INTRODUCTION (PhD dissertation abstract)

The aim of the research is to develop and improvement of models and computational methods to describe the dynamics of photons and particles in the vicinity of black holes .

The tasks of the research:

- to study the influence of a homogeneous plasma on the deflection angle for fixed values of the space-time deformation parameter in the approximation of a weak gravitational interaction;

- to carry out a comparative analysis of the angle of deflection of the light beam in the case of a homogeneous plasma with the case in an inhomogeneous plasma;

- to study the overall increase in the brightness of the image source due to gravitational weak lensing for various values of the space-time deformation parameter;

- to study the dependence of the overall increase in image brightness on the plasma medium;

- to investigate the profiles of the event horizon radius depending on the change in the gravitational parameters of the Einstein-Maxwell-scalar field model (EMS) and the black hole charge;

- to investigate the dynamics of test particles in the space-time of charged BHs in a modified gravitational model;

- search for analytical expressions for the specific angular momentum and energy of test particles in circular orbits and analysis of the influence of the parameters of the scalar field and modified gravity on them;

- to analyze the effect of the modified gravitational field on the radius of internal stable circular orbits (ISCO) , the energy and angular momentum of particles on the ISCO , as well as on energy efficiency;

- explore fundamental frequencies, such as Keplerian and radial frequencies of oscillations of particles rotating around a black hole , within the framework of a modified gravitational model;

- to obtain limiting values for the charge and modified gravity parameters from a comparison of theoretical results with observational data .

The object of research is astrophysical compact objects, photons and test particles with non-zero electric and magnetic charges, scalar fields .

The subject of research is mathematical and theoretical models, numerical and analytical methods for solving equations for electromagnetic and gravitational fields, the study of the dynamics of photons and test particles in the vicinity of compact gravitational objects.

The scientific novelty of the research is as follows:

- it is shown that the angle of deflection of light rays around a Schwarzschild-like BH decreases in the presence of a space-time deformation parameter;

- the influence of a homogeneous plasma on the deflection angle for fixed values of the space-time deformation parameter was studied in the approximation of a weak gravitational interaction;

- it is shown that an increase in the parameter responsible for the inhomogeneity of the plasma medium causes an increase in the angle of deflection of light rays around a compact object;
- from a comparative analysis it is shown that the angle of deflection of the light beam is larger in the case of a homogeneous plasma compared to the case in an inhomogeneous plasma;
- it is shown that the overall increase in image brightness decreases due to the influence of the space-time deformation parameter;

The practical results of the study are as follows:

- it has been shown that the radius of internal stable circular orbits rapidly decreases with an increase in the charge of the studied BH compared to a similar increase in the electric charge of the Reissner-Nordström BH and reaches a value of up to 16% ;
- it has been shown that the radius of internal stable circular orbits of particles can be measured using data on quasi-periodic frequencies of the double peak with a frequency ratio of less than 5:4 with high accuracy ;
- it has also been found that the radius of quasi-periodic oscillations approaches the inner stable circular orbit at higher values of the BH charge ;
- limiting values for the charge and parameters of modified gravity were obtained from a comparison of theoretical results with observed quasi - periodic oscillations in the microquasars GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322 and XTE 1550-564 .

Application of research results

On the basis of the developed theoretical models of the motion of photons and test particles in the modified theory of gravity, the following have been investigated :

The results have been used by Chinese scientists at the Fudan University (FU) in Shanghai (The letter from July 2023). As a result, the value of the modified gravity parameter has been calculated;

- results on the motion of charged particles, which were used in more than 20 scientific papers by foreign researchers in foreign journals with a high impact factor, were used to characterize the effects of magnetized particles around a rotating black hole, as well as to calculate the velocity of accreting matter (Symmetry, 2023 ; V. 15 : id 293 , Web-Sc, IF- 2.94 ; European Physical Journal C , 2023 ; V. 83 : id 506 , Web-Sc, IF- 4.994 ; Chinese Journal of Physics, 2023 ; V. 83 : pp . 664-679 , Web-Sc, IF- 3.957 , etc.).

As a result, information was obtained on the motion of photons of compact objects in the framework of modified theories of gravity in the presence of plasma.

The structure and scope of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 98 pages.

CONCLUSIONS

Based on the results of research carried out within the framework of the dissertation work "Dynamics of particles in a strong gravitational field", the following conclusions were made:

1. It is shown that the angle of deflection of light rays around W of a Warzschild-like BH decreases in the presence of a space-time deformation parameter. It is shown that an increase in the parameter responsible for the inhomogeneity of the plasma medium causes an increase in the angle of deflection of light rays around a compact object. It is also shown that the overall increase in image brightness decreases due to the influence of the space-time warp parameter.
2. It is shown that the overall increase in image brightness increases with an increase in the parameters of both homogeneous and inhomogeneous plasmas. For the first time, analytical expressions for the specific angular momentum and energy of test particles in circular orbits are found, and the influence of the parameters of the scalar field and modified gravity on them is analyzed.
3. It is shown that an increase in the BH charge leads to a decrease in the minimum of both energy and angular momentum, however, in the presence of scalar field parameters and modified gravity, these values increase. It is found that the radius of inner stable circular orbits rapidly decreases with the increase in the charge of the studied BH as compared to a similar increase in the electric charge of the Reissner – Nordström BH.
4. As an astrophysical application of the research, the model for the relativistic precession of two-peak quasi-periodic oscillations has been improved.
5. It is shown that the radius of internal stable circular orbits of particles can be measured using data on the frequency of quasi-periodic oscillations of the double peak with a frequency ratio of less than 5:4 with high accuracy. It is also found that the radius of quasi-periodic oscillations approaches the inner stable circular orbit at higher values of the BH charge.
6. The limiting values for the charge and parameters of modified gravity are obtained by comparing the theoretical results with the observed quasi - periodic oscillations in the microquasars GRS 1905+105, GRO J 1655-40, H 1745+322, and XTE 1550-564 .

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

I bo'lim (part I; I chast)

1. Atamurotov F., Sarikulov F., Khamidov V., Abdujabbarov A. "Gravitational weak lensing of Schwarzschild-like black hole in presence of plasma" // The European Physical Journal Plus, Volume 137, id. 567, 2022y, (№ 1. Web of Science: IF=3.758)
2. Rayimbaev J., Abdujabbarov A., Abdulkhamidov F., Khamidov V., Djumanov S., Toshov J., Inoyatov S. "Quasiperiodic oscillation around charged black holes in Einstein-Maxwell-scalar theory" // The European Physical Journal C, Volume 82, id. 1110, 2022y, (№ 1. Web of Science: IF=4.994)
3. Sarikulov F., Atamurotov F., Abdujabbarov A., Khamidov V. "The photon motion and weak gravitational lensing in a black-bounce spacetime" // Chinese Physics C, Volume 47, No. 10, DOI: 10.1088/1674-1137/acedf2, 2023y, (№ 1. Web of Science: IF=3.47)
4. Khamidov V. "Influence of plasma on deflection angle by a Schwarzschild black hole in perfect fluid dark matter" // O'zMU xabarlari, [3/1/1], 592-596 pp, 2023y (01.00.00. № 5).
5. Khamidov V.S., Yovqochev, P.N. "Movement of particles and their orbits around the Kiselev black hole" // Science an Education in Karakalpakstan, № 2/2(33), pp. 37-42, 2023 (01.00.00. № 5)

II bo'lim (part II; II chast)

6. Khamidov V., Orzuev Sh. "Weak gravitational lensing of black hole from T-duality in uniform plasma" // VI International conference "STATISTICS and its Applications". Namangan, 2022, -P. 357. National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.
7. Khamidov V., Nosirov A., Abdulloyev A. "Thermodynamics of rotating charged black hole in 4D Einstein-Gauss-Bonnet gravity" // Republican scientific and methodological center for the development of education of the Republic of Uzbekistan, National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan. -P. 212.
8. Khamidov V., Uktamov U. "On description shadow of the rotating Bardeen black hole with string clouds field" // "Elektr ta'minoti tizimining dolzarb muammolari" mavzusidagi xalqaro ilmiy-texnik anjuman. - Toshkent: 7-8-sentyabr 2023-y. ToshDTU, 2023. -B.165-166.
9. Khamidov V., Nosirov A. "Some properties of Rotating Charged Black Hole in 4D Einstein-Gauss-Bonnet Gravity" // "Elektr ta'minoti tizimining dolzarb muammolari" mavzusidagi xalqaro ilmiy-texnik anjuman. - Toshkent: 7-8-sentyabr 2023-y. ToshDTU, 2023. -B.128-130.
10. Khamidov V.S., Turaev Y.SH., Haydarov K.B. "Observational properties of black hole candidate objects" // Technology of New Materials:

Prospects for the Development of Polymer Composite Materials Used in Mechanical Engineering", Andijan Machine- Building Institute, 329-330 bet, 2022-yil, 19-20-oktyabr.

11. Turaev Y.SH., Khamidov V.S., Haydarov K.B. "Estimation of black hole mass from optical band observation" // Technology of New Materials: Prospects for the Development of Polymer Composite Materials Used in Mechanical Engineering", Andijan Machine- Building Institute, 331-333 bet, 2022-yil, 19-20-oktyabr.

12. Turaev Y.SH., Qorjobova, Khamidov V.S., Sobitbekova M. "Shadow of the rotating Ayon-Beato-Garcia black hole" // 'Fizika fanini axborot va innovatsion texnologiyalar muhitida o'qitishning zamonaviy tendensiyalari: muammo va yechimlar' Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari 488-490-bet, Navoiy Pedagogika Instituti, 2022-yil, 20-noyabr

“Fan va innovatsiyalar” xalqaro ilmiy jurnali (International scientific journal “Science and Innovation”) tahririyatida tahrirdan oʻtkazilib, oʻzbek, ingliz va rus tillaridagi matnlari oʻzaro muvofiqlashtirildi (06.09.2023).

№ 1400



Bosishga ruxsat etildi: 06.09.2023

Bichimi: 60x84 ¹/₁₆ «Times New Roman»

Garniturada raqamli bosma usulda bosildi.

Shartli bosma tabogʻi 3,0 Adadi 100. Buyurtma: № 99/3

«Innovatsion rivojlanish nashriyot-matbaa uyi »

bosmaxonasida chop etildi.

100174, Toshkent sh., Olmazor tumani Ziyo MFY, Talabalar ko'chasi, 96-1-uy

