

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ

ТУРСУНОВ АРМАН АЛТАЕВИЧ

**ҚОРА ЎРАЛАР АТРОФИДАГИ АСТРОФИЗИК ЖАРАЁНЛАР
ВА ЮҚОРИ ЭНЕРГИЯЛИ КОСМИК НУРЛАР**

01.03.01-Астрономия

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

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

**Оглавление автореферата диссертации
доктора физико-математических наук (DSc)**

Турсунов Арман Алтаевич

Қора ўралар атрофида астрофизик жараёнлар ва юқори энергияли
космик нурлар 3

Tursunov Arman Altayevich

Astrophysical processes in black hole environment and high-energy cosmic
rays..... 29

Турсунов Арман Алтаевич

Астрофизические процессы в окрестности черных дыр и космические
лучи высоких энергий 53

Эълон қилинган ишлар рўйхати

List of published works
Список опубликованных работ..... 65

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ

ТУРСУНОВ АРМАН АЛТАЕВИЧ

**ҚОРА ЎРАЛАР АТРОФИДАГИ АСТРОФИЗИК ЖАРАЁНЛАР
ВА ЮҚОРИ ЭНЕРГИЯЛИ КОСМИК НУРЛАР**

01.03.01-Астрономия

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.1.DSc/FM133 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Астрономия институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, инглиз, рус (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.inp.uz) ва «Ziyonet» ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

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

Расмий оппонентлар: **Абишев Медеу Ержанович**
физика-математика фанлари доктори, профессор,
Қозоғистон фанлар академиясининг муҳбир аъзоси

Миртаджиева Каромат Тахировна
физика-математика фанлари доктори, доцент

Олимов Хуснитдин Косимович
физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

Етакчи ташкилот: **Россия фанлар академиясининг астрономия институти**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz.)

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-19.)

Диссертация автореферати 2019 йил « _____ » кун тарқатилди.
(2019 йил “ _____ ” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

М. Ю. Ташметов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

Э.М. Турсунов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

И. Нуриддинов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., профессор

Кириш (докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда дунёда қора ўралар атрофида астрофизик жараёнларга кўп олимлар томонидан эътибор қаратилмоқда. Қора ўралар – Коинотда ўзининг кичик ўлчами ва катта массаси билан бошқа осмон жисмларидан ажралиб турувчи ҳамда замонавий физиканинг бор чиройи ва экстремаллигини намоён этувчи экзотик астрофизик объектдир. Коинотда энг қоронғи объект бўлгани ҳолда қора ўралар атрофидаги фазо-вақтни эгрилаб, у ердаги моддаларни юқори ҳароратгача қиздиради ҳамда энг ёрқин, юқори қувватли ва ўта массив объектлар ҳисобланади. Сўнги йиллардаги кузатув ва экспериментал асбобларнинг ривожланиши билвосита ва бевосита бундай объектларнинг табиатда мавжудлигини тасдиқлади.

Ҳозирги кунда етакчи тадқиқотчилар томонидан диссертация мавзуси билан боғлиқ бўлган ва уларнинг долзарблиги ва заруратини белгилаб берувчи қатор муҳим кашфиётлар очилган. 2019 йил апрель ойида Ҳодисалар горизонти телескопи (ЕНТ - Event horizon telescope) ёрдамида илк бор М87 (Meisser 87) галактикаси марказида жойлашган қора ўранинг тасвири 1.3 мм ли тўлқин узунлиги диапазолида олинди. 2018 йилнинг июль ойида “Муз-куб” нейтрино обсерваторияси (Ice Cube Neutrino Observatory)да Галактикамиз ташқарисидан келаётган юқори энергияли нейтринолар топилганлиги тўғрисидаги муҳим кашфиёт эълон қилинди ва нейтриноларнинг манбаи биздан тахминан 1.75 Гпк масофадаги релятивистик джети бизга томон йўналган ўта-массив қора ўра – блазарни аниқлаш имконини берди. Юқори энергияли нейтринолар бирламчи космик нурларнинг атрофидаги муҳит ёки фотонлар билан адрон ўзаро таъсири натижасида пайдо бўлади. Энергияси $\sim 10^{15.5}$ эВ гача бўлган космик нурлар одатда галактик янги юлдузнинг портлашидан пайдо бўлади деб ҳисобланади. 2018 йилнинг май-июль ойларида Европа жанубий обсерваториясидаги (ESO) жуда катта телескоп (Very Large Telescope)нинг бир қисми бўлган GRAVITY қурилмаси ёрдамида спектрнинг инфрақизил қисмида қора ўра яқинидаги ҳаракатланувчи материя кузатилди ва унинг тезлиги ёруғлик тезлигининг 30 фоизини ташкил этишини кўрсатди. 2018 йил ўрталарида А. Эйнштейн томонидан яратилган умумий нисбийлик назарияси (УНН)ни ўта массив қора ўра атрофида айланувчи S2 юлдузи ҳаракатининг кузатуви ёрдамида муваффақиятли текшириш натижалари эълон қилинди. Бундан ташқари 2015 йилдан бошлаб лазер интерферометри обсерваторияларида бир неча бор қора ўраларнинг ва нейтрон юлдузларнинг қўшилиши натижасида вужудга келган гравитацион тўлқинларнинг қайд этилгани эълон қилинди.

Мамлакатимизда қора ўралар атрофида астрофизик жараёнлар ва юқори энергияли космик нурлар бўйича тадқиқотларга ҳам катта эътибор берилади. Мамлакатимиз илм-фан ривожини ҳамда фундаментал тадқиқот натижаларини ҳаётга татбиқ қилиш учун ушбу фундаментал тадқиқотларнинг йўналишлари Ўзбекистон Республикасини янада

ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар¹ стратегиясига бевосита боғлиқ. Бу борада охириги 20 йил мобайнида Республикамизда релятивистик компакт объектлар астрофизикаси соҳаси жадал ривожланди, қора ўралар, юмрон қозик ўралари ва ялонғоч сингуляр объектларнинг оптик ва энергетик хусусиятлари ўрганилди, нейтрон юлдузлар релятивистик астрофизикасида умумрелятивистик эффектлар топилди, айланувчи магнитланган объектлар плазма магнитосфераси ва релятивистик электродинамикаси ривожлантирилди, вақти вақти билан кузатилувчи пульсарлар ва радиотинч магнитарлар табиати ойдинлаштирилди. Шундай бўлса ҳам ўта юқори энергияли космик нурларнинг келиб чиқиши борасидаги муҳим саволлар жавобини кутиб қолмоқда.

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

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи. Ўта массив қора ўралар ва уларга тегишли эффектлар, хусусан, улар атрофидаги модда ва электромагнит майдонлар, гравитацион линза эффектлари ва қора ўралар тасвирларини тадқиқ этиш билан қуйидаги ташкилотлардаги олимлар шуғулланишмоқда: Кёln университети, Радиоастрономия бўйича Макс Планк жамияти институти, Гравитацион физика бўйича Макс Планк жамияти институти – Альберт Эйнштейн институти, Франкфурт университети, Амалий космик тадқиқотлар ва микрогравитация маркази (Германия), Калифорния университети (Лос-Анджелес, АҚШ), Астрофизика институти (Андалузия, Испания), Университетлараро астрономия ва астрофизика маркази, Тата фундаментал тадқиқотлар институти (Хиндистон), Москва давлат университети, Штернберг номидаги Давлат астрономия институти (Россия), Шанхайдаги Фудан университети (Хитой), ЎзР ФА Астрономия институти (Ўзбекистон) ва бошқалар.

Космик нурлар, хусусан, юқори энергияли космик нурлар тадқиқоти бўйича дунё миқёсида бир қатор кашфиётлар қилинган. Масалан, Пьер Оже (Аргентина) ва Аллен панжара антеннаси ёрдамида қайд этилган космик нурлари йўналишларининг анизотропиясини ўрганиш ёрдамида $10^{18.5}$ эВ дан

¹Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида"ги ФП-4947-сонли Фармони.

юқори бўлган катта энергияли космик нурлар пайдо бўлиши Галактикадан ташқари табиатга эга эканлиги кўрсатилди. Ўта юқори энергияли космик нурларнинг зарралар оқими жуда кичик бўлгани учун, мобил қурилмалар, масалан, яримўтказгичли технологиялардан фойдаланувчи смартфонлар ёрдамида зарраларни қайд этиш таклиф этилди. Ушбу лойиҳа Космик нурлар фавкулудда тақсимланган обсерватория (Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory – CREDO) ёрдамида амалга оширилади ва ушбу лойиҳага диссертация муаллифи билан бир қаторда 13 давлатдан 22 илмий муассаса олимлари жамоаси жалб этилади, масалан, Польша Фанлар академиясининг Ядро физикаси институти (Польша), Опавадаги Силезия университети (Чехия), Я.Коменский номидаги университет (Словакия), Канзас университети (АҚШ), Бирлашган ядро тадқиқотлари институти (Россия), Массачусет технология институти (АҚШ) илмий жамоалари ва бошқалар.

Айланувчи қора ўралар атрофида электромагнит майдон хоссалари ва айланувчи қора ўраларнинг назарий таснифи билан дунёнинг етакчи илмий тадқиқот марказлари ва олий таълим муассасалари шуғулланиб келишмоқда, хусусан, Альберт Эйнштейн маркази (Чехия), Опавадаги Силезия университети (Чехия), Альберта университети (Канада), Назарий физика маркази (Польша), Ўзбекистон Фанлар академияси Астрономия институти ва бошқалар.

Ҳозирда жаҳонда компакт гравитацион объектлар яқинида энергетик жараёнларни ўрганиш мақсадида бир қатор, жумладан, қуйидаги муҳим йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: ўта юқори энергияли космик нурларни назарий ва тажрибавий тадқиқ қилиш; юқори энергияли нейтриноларнинг пайдо бўлишини ўрганиш; айланувчи қора ўралардан энергия ажралиши самарадорлигини аниқлаш; Галактика марказидаги қора ўралар атрофидаги эффектларни кузатиш; қора ўралар яқинидаги электромагнит майдонларни назарий моделлаштириш ва улар атрофидаги зарралар ҳаракатини таҳлил қилиш; ташқи магнит майдони мавжудлигида айланувчи қора ўралар яқинида энергетик жараёнларни ўрганиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Астрофизик қора ўралар атрофидаги материянинг хусусиятлари, шунингдек, қора ўралар параметрлари учун лимитлар олиш дунёнинг кўплаб етакчи илмий марказларининг олимлари, жумладан, германиялик (Р.Ганцель, А.Экарт, А.Зенсус, С.Бритзен), испаниялик (Р.Шодел, Б.Шахзаманян), италиялик (Р.Руффини, К.Кремаскини, М.Тессаротто), чехиялик (З.Стухлик, М.Колош), россиялик (А.Захаров, Д.Гальцов), америкалик (А.Гез), хитойлик (К.Бамби, А.Абдикамалов) ва бошқалар томонидан ўрганилган. Лекин қора ўра билан унинг атрофидаги материянинг ўзаро таъсири, қора ўра параметрига чекловлар олиш ёки аккрецион оқимнинг характеристикалари етарли даражада ўрганилмаган.

Ўта юқори энергияли космик нурлар детекторлари орасида иккита асосий космик нурлар лабораторияларини эътироф этса бўлади: шимолий яримшардаги телескоплар жамланмаси ва жанубий яримшардаги Пьер Оже

обсерваторияси. Ушбу нурларни экспериментал тадқиқ қилиш билан бир қаторда уларнинг келиб чиқиш механизмлари ва пайдо бўлишини ўрганишда қўлланилувчи бир қанча назарий ва феноменологик моделлар мавжуд. Бошқа илмий гуруҳлар орасида экзотик моделлар доирасида юқори энергияли космик нурларнинг кузатилишини тавсифлашга эришган АҚШ (Fly's Eye коллаборацияси), Антарктида (Ice Cube коллаборацияси), Германиядаги (Р.Энгель, К.Манхайм) илмий жамоаларининг хизматларини алоҳида таъкидлаб ўтиш жоиз. Аммо ҳозиргача ўта юқори энергияли космик нурларнинг пайдо бўлиш ва тезлашиш механизмлари етарлича тавсифланмади. Бундан ташқари, ушбу космик нурлар физикаси ва ўта массив қора ўраларнинг хоссалари орасидаги бевосита боғланиш ҳалигача муҳокама қилинмаган.

Бир жинсли ташқи электр майдонида жойлашган айланувчи Керр қора ўраси яқинидаги электромагнит майдонлар хусусиятлари, ташқи магнит майдон мавжудлигида айланувчи қора ўра атрофида зарралар динамикасини ўрганиш, Керр қора ўраси яқинида зарралар тўқнашувлари бир қатор илмий изланувчилар томонидан ўрганилган ва муҳокама қилинган, масалан: англиялик (Р.Вальд, Р.Бледфорд), америкалик (М.Банадос ва б.), россиялик (Д.В.Гальцов ва б.), канадалик (В.Фролов ва А.Шум), ўзбекистонлик (А.Абдужаббаров, Б.Ахмедов ва б.), туркиялик (А.Алиев ва Н.Ўздемир) ва бошқалар олимлар. Аммо, ўта самарали режимдаги энергия ажралиш механизмлари олдинги муаллифлар томонидан изчил таҳлил қилинмаган. Ушбу эффектларни илмий ўрганиш космик нурлар, релятивистик джет, квазарлар ва ҳ.к. ларда кузатилган турли муҳим феноменаларни изоҳлашда ёрдам беради.

Қора ўраларнинг соялари вакуум ҳолида ва плазма мавжудлигида, марказий объектнинг турли кўшимча параметрлари билан, баъзан, ғайри одатий ва физикавий тушунтирилмаган параметрлар орқали бир қатор олимлар томонидан ўрганилган, масалан япониялик (К.Маэда, К.Хиоки), германиялик (А.Грензебах, В.Перлик, К.Ламмерцаль, Л.Реццолла ва б.), ўзбекистонлик (А.Абдужаббаров, Б.Ахмедов, Ф.Атамуротов ва б.), аргентиналик (Э.Эироа, Л.Амарилла), чехиялик (Я.Шэ, З. Стухлик), россиялик (Г. Бисноватый-Коган, О. Цупко) ва бошқалар. Аммо бу ишларда олинган аналитик ва сонли натижаларни қора ўраларга номзод объектлар атрофидаги юқори хароратли плазмага қўллаш масаласи очик қолмоқда.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Астрономия институти илмий-тадқиқотлар режасининг ВА-ФА-Ф2-008 рақамли «Динамик ва стационар релятивистик гравитацион объектларда астрофизик жараёнлар» (2017–2020); «Қўшалок системаларда изоляцияланган қора ўралар релятивистик астрофизикаси» (2017–2020), ЁФА-АТех-2018-8 рақамли «Релятивистик астрофизикада компакт объектлар яқинидаги гравитацион ва электромагнит майдонлар ҳамда зарралар» (2018–2019); Ўзбекистон–Белоруссия дастурининг MRB-

AN-2019-29 рақамли «Астрофизик объектларни моделлаштириш ва уларнинг кузатиш хусусиятларини РТ-70 телескопи параметрлари ва Гамма-400 рус орбитал телескопи параметрлари билан корреляциялаш» (2019–2021) мавзусидаги илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади астрофизик қора ўралар ва улар атрофидаги моддаларнинг электромагнит ва энергетик характеристикаларини ўрганиш ҳамда натижаларни юқори энергияли космик нурлар физикасига, қора ўралардан релятивистик плазма ажралиши, қора ўралар соялари ва бошқа бир қатор кузатув ҳодисаларини тадқиқ қилишга қўллашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ташқи магнит майдони мавжудлигида айланувчи қора ўралар атрофида зарядланган ва нейтрал зарралар ҳаракати, тўқнашиши ва сочилишини таҳлил этиш;

эгри чизиқли координаталарда электромагнит майдонларни тадқиқ этиш;

астрофизик қора ўралар яқинида ҳосил бўлувчи ўта юқори энергияли космик нурларни тавсифловчи модель ишлаб чиқиш;

юқори энергияли космик нурлар учун таклиф этилган модель ёрдамида олинган назарий натижаларни кузатув натижалари билан солиштириш;

айланувчи қора ўралар соясига бир жинсли бўлмаган плазманинг таъсирини аниқлаш;

қора ўралар ва унинг атрофидаги моддаларнинг электромагнит ўзаро таъсирлашишини ҳисобга олган ҳолда ушбу модель доирасида кузатув маълумотларини қайта таҳлил этиш ва муҳокама қилиш;

назарий натижаларни қора ўраларга номзод объектлар учун, хусусан, Галактика марказидаги ўта массив қора ўра учун татбиқ этиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ташқи магнит майдонда жойлашган айланувчи қора ўралар ҳамда қора ўраликка номзод SgrA*, M87, NGC1052 каби объектлар ва блазарлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети астрофизик шароитларда қора ўралардан энергия ажралиши механизмлари; релятивистик қора ўраларнинг электромагнитик хусусиятлари, кучли гравитация режимида модданинг электромагнит нурланиши, компакт объектлар атрофидаги плазма характеристикалари ва плазма муҳитидаги қора ўранинг сояси ҳамда улар билан боғлиқ кузатув маълумотларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Турли юқори энергияли астрофизик ҳодисаларнинг хусусиятларини умумий нисбийлик назариясининг математик аппарати ҳамда модда ва майдон учун ночизиқли дифференциал тенгламаларни рақамли ечиш усуллари ёрдамида реал жараёнларни феноменологик моделлаштириш амалга оширилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк бор Сомон йўли марказидаги SgrA* қора ўранинг электр зарядига чеклов олинган, унинг энг катта қиймати $Q_{SgrA*} \leq 10^{15} Кл$ га тенглиги ва магнитланган қора ўралар яқинидаги стабил орбиталарнинг кенгайиши

аниқланган;

илк бор SgrA* қора ўранинг атрофида айланаётган плазманинг релятивистиклиги ва магнитланганлиги зарядларнинг ажралишига олиб келиши кўрсатилган, ушбу плазмада заряд концентрацияси 10^{-5} см^{-3} ва зарралар сони зичлиги $10^{7 \pm 1} \text{ см}^{-3}$ тартибида эканлиги аниқланган;

Галактика марказида SgrA* дан 1500 Шварцшильд радиуси доирасида ёрқин юлдуз бўлиш эҳтимоли йўқ бўлиши кўрсатилган;

ўта массив қора ўралардан энергия ажралиши натижасида ўта юқори энергияли космик нурлар пайдо бўлишининг янги механизми таклиф қилинган;

магнетик Пенроуз жараёнининг ўта эффектив режими кашф этилган ва ўта массив қора ўра яқинида протоннинг энергияси 10^{20} эВ дан ортиб кетиши кўрсатилган;

илк бор Галактика марказидаги SgrA* қора ўрадан энергия ажралишининг ўта самарали режимда учиб чиқаётган протоннинг энергияси $10^{15.5}$ эВ тартибида эканлиги кўрсатилган, бу энергия космик нурлар энергияси спектрининг тизза соҳасига мос келиши ва бу соҳада зарралар оқими сезиларли камайиши кузатилган;

Райсснера-Нордстрем-де-Ситтер қора ўраси сояси ўлчами учун аналитик ифода олинган;

илк бор плазма муҳитидаги айланувчи қора ўралар учун ёруғликнинг гравитацион оғиши ва унинг қутбланиш векторининг Фарадей бурилиши ўрганилган ва кучли ҳамда бир жинсли бўлмаган плазма учун ёруғлик оғиш бурчагининг аналитик ифодаси топилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

ўта массив қора ўрани юқори энергияли космик нурлар манбаси сифатида ишлатиб қора ўраларнинг параметрлари қийматларига лимитлар олишда янги усул таклиф этилган;

ўта юқори энергияли космик нурлар манбасининг массаси, масофаси ва магнит майдони каби параметрларига чегаравий қийматлар олинган;

ўта массив қора ўранинг электр заряди қора ўранинг айланиш параметри максимал қийматининг 60 % гача ўрнини боса олиши кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ишда умумий нисбийлик назариясининг замонавий усуллари ҳамда юқори аниқликдаги рақамли усуллар ва алгоритмлардан фойдаланилгани, аксарият графикларни чизишда Wolfram Mathematica дастуридан фойдаланилгани, олинган назарий натижаларни кузатув маълумотлари ва бошқа олимларнинг натижалари билан таққослаш олиб борилгани, хулосалар гравитацион компакт объектлар назариясининг асосий ҳолатларига мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти диссертацияда ишлаб чиқилган формализм ёрдамида астрофизик қора ўралардан энергия чиқариш механизмлари ва электромагнит майдонларини, яқин келажакда янги авлод радиотелескоплари

ёрдамида қора ўраларнинг сояларини олиш ва галактикалар марказидаги ўта массив қора ўраларнинг турли параметрлари ҳамда хусусиятлари ҳақида маълумот олиш имкониятини бериши билан белгиланади. Бундан ташқари, Галактика марказидан келувчи ёруғликнинг рентген текширувлари натижасида қора ўра электр зарядининг мавжудлигига чекловлар олиш мумкин, бу эса ядроси актив галактикалар, квазарлар ва бошқалар билан боғлиқ бўлган ўта массив қора ўралар атрофида тезланиш механизмларида ҳал қилувчи рол ўйнайди.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти улар ёрдамида қора ўраларнинг массаси, айланиш, ориентация, заряд ва магнит майдон каби турли хил параметрларини баҳолаш учун ишлатилиши мумкинлиги билан изоҳланади. Натижалардан, шунингдек, гравитация кучларининг табиати ва динамикасини таҳлил қилиш, кузатиш тажрибаларини ишлаб чиқиш ва қора ўраларнинг муқобилларини аниқлаш ва идентификация қилиш мезонлари учун фойдаланиш мумкин.

Бу ифода ҳозирги ва келажакдаги интерферометрик кузатишларда қора ўранинг параметрлари учун лимитлар олишга ёрдам бериши мумкин, масалан, агар магнит ёки бран зарядлари етарлича катта бўлганда, “Ҳодисалар горизонти” телескопи ёрдамида лимит олиш мумкин

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Қора ўралар атрофида астрофизик жараёнлар ва юқори энергияли космик нурлар бўйича олинган натижалар асосида:

Сомон йўли марказидаги SgrA* қора ўранинг параметрлари ва атрофидаги плазманинг динамикаси бўйича олинган натижалар SFB -956 рақамли Германия илмий фонди, Европа Иттифоқининг структуравий жамғармалари ва Польша Миллий илмий маркази грантлари доирасида гравитация назариясининг кучли майдон режимида текшириш учун фойдаланилган (Польша фанлар академияси Назарий физика марказининг 2019 йил 8 июлдаги маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши SgrA* қора ўранинг электрик зарядига чегаравий қийматларни олиш имконини берган;

ўта массив қора ўралардан энергия ажралиши натижасида ўта юқори энергияли космик нурлар пайдо бўлишининг янги механизми хорижлик олимлар томонидан (Physical Review D, 2018, 2019; International Journal of Modern Physics D, 2019; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2019) галактикамиз марказидаги ўтамассив қора ўранинг электромагнит хусусиятларини, қора ўра ва юлдузлараро фазонинг ўзаро таъсирларини ўрганишда фойдаланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши Хорндескийнинг зарядланган қора ўра атрофида гравитация (тортишиш) назариясини текшириш имконини берган;

қора ўраларнинг энергетик хусусиятларини ўрганиш, айланиш энергиясини электромагнит экстракциялашнинг аниқ усуллари, шунингдек, юқори энергияли жараёнлар бўйича олинган натижалар Хиндистоннинг Университетлараро грант қўмитаси дастурлари доирасида (Хиндистоннинг

Университетлараро грант қўмитасининг 2019 йил 15 июндаги маълумотномаси) ва хорижлик олимлар томонидан (Physics of the Dark Universe, 2019; The European Physical Journal C, 2019; Physical Review D, 2019; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019) астрофизик компакт номзодларнинг параметрларининг чегара қийматларини олиш учун ишлатилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши эргосферадаги заррачалар заррачалари билан кесишган қора ўралар энергиясини чиқариб ташлаш учун умумлаштириш имконини берган;

Райсснер-Нордстрем-де-Ситтер қора ўраси сояси ўлчами учун олинган аналитик ифодаси хорижлик олимлар томонидан (Physical Review D, 2019; International Journal of Modern Physics D, 2019; The European Physical Journal C, 2019; Physics of the Dark Universe, 2019; The Astrophysical Journal, 2018) қўлланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши зарядли зарраларнинг магнитланган қора ўра атрофидаги ҳаракатлари ва тегишли квазив-даврий осциляциялар, баъзи бир юлдузлар массаси тартибидаги микроквазарлар ва қора ўраларининг масса, айланиш параметри ва магнит майдонларини аниқлаш имконини берган;

плазма муҳитидаги айланувчи қора ўралар учун ёруғликнинг гравитацион оғиши ва унинг қутбланиш векторининг Фарадей бурилиши, кучли ҳамда бир жинсли бўлмаган плазма учун ёруғлик оғиш бурчагининг топилган аналитик ифодаси SGS/12/2019 рақамли Силезия университети гранти ва 14-37086 рақамли Гравитация ва астрофизика Альберт Эйнштейн маркази гранти доирасида ва хорижлик олимлар томонидан (Physical Review D, 2018, 2019; Astrophysics and Space, 2016; The European Physical Journal C, 2018, 2019; International Journal of Modern Physics D, 2018; Modern Physics Letters A, 2018; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016) плазмадаги қора ўраларнинг оптик хусусиятларини ўрганишда фойдаланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши плазма гравитацион линзаланиш таъсири, плазма қора ўраларнинг соялари, Эйнштейннинг тортишиш назарияси ва тортишишнинг муқобил назарияларини ишлаб чиқиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 8 та ҳалқаро ва республика илмий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг чоп этилганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 22 та илмий ишлар нашр қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 12 та илмий мақола хорижий журналларда.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш қисми, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 216 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Қора ўра магнитосферасининг электродинамикаси**» деб номланган биринчи боби астрофизик қора ўраларнинг электромагнит хусусиятларини ўрганишга бағишланган. У астрофизик қора ўраларни фақат иккита параметр, массаси – M ва айланиш параметри – a билан тавсифланадиган «Керр қора ўраси» гипотезасини ўрганишдан бошланади. Бироқ «no-hair» теоремасига кўра, Эйнштейн-Максвелл тенгламаларидан айланувчи массага эга жисм учун учинчи параметр – электр заряд бўлиши келиб чиқади. Қора ўраларнинг заряд параметри одатда нолга тенг, бу ҳолат эса ҳар қандай астрофизик қора ўрани ўраб турган плазма моддасининг селекция бирикмасидан келиб чиққан ҳолда қора ўралар тезда нейтраллашади, деб изоҳланади. Бироқ ҳар қандай астрофизик қора ўра ташқи магнит майдонга киритилган ҳолда ўзининг атрофидаги фазо-вақтни «судраши» (frame-dragging эффекти), магнит майдон чизиқларини буриши вакуум ва плазмада электр майдонини вужудга келтиради. Бунда қора ўра квадрупол зарядланади ва бу динамик жиҳатдан муҳимдир. Аммо бу заряд магнит майдон сингари кучсиз ва унинг энергия-импульс тензори атрофидаги фазо-вақтни ўзгартирмайди. Шу сабабдан Керр гипотезаси жуда яхши ва у стандарт кўринишда Бойэр-Линдквист координаталар системасида қуйидагича ифодаланади:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma}\right) dt^2 - \frac{4Mr a \sin^2 \theta}{\Sigma} dt d\phi + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \left(r^2 + a^2 + \frac{2Mr a^2}{\Sigma} \sin^2 \theta\right) \sin^2 \theta d\phi^2, \quad (1)$$

бу ерда $\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$ ва $\Delta = r^2 - 2Mr + a^2$. Ҳалқа сингулярлик $r = 0, \theta = \pi/2$ да кузатилади. $\Delta = 0$ тенгламанинг ечимлари ташқи ва ички горизонтни беради

$$r_{\pm} = M \pm (M^2 - a^2)^{1/2}. \quad (2)$$

Ташқи горизонт $r_{+} \equiv r_H$ – «ходисалар горизонти» дейилади. Бу ердаги геометрия икки хил, вақтсимон $\delta / \delta t$ ва фазосимон $\delta / \delta \phi$ Киллинг векторлари орқали характерланади, улар мос равишда энергия E ва импульс моменти L сақланишини ифодалайди.

Табийки, Керр фазо-вакти ташқи магнит майдонда стационар ва аксиал симметрик бўлишини ҳам назарда тутамиз. Шундан келиб чиқиб Киллинг тенгламасини қуйидагича ёзишимиз мумкин: $\xi_{\alpha;\beta} + \xi_{\beta;\alpha} = 0$ ва унинг электромагнит майдон учун ечими эса

$$A^\mu = C_1 \xi_{(t)}^\mu + C_2 \xi_{(\phi)}^\mu, A_t = \frac{B}{2}(g_{t\phi} + 2ag_{tt}), A_\phi = \frac{B}{2}(g_{\phi\phi} + 2ag_{t\phi}), \quad (3)$$

кўринишда ифодаланади. Шунинг эслатиб ўтиш керакки, қора ўранинг A билан берилган квадрупол электр майдони, магнит майдон куч чизиқлари бурлишининг натижасидир. (3) тенгламалардаги иккита тенглама ассимтотик магнит майдон учун олинган. Шунга қарамай, аксиал симметрик қора ўра атрофида индукцияланган зарядлар ҳисобига пайдо бўлувчи электр майдон ҳам мавжуд бўлади.

Биринчи боб, шунингдек, ташқи магнит майдонга жойлаштирилган айланувчи қора ўра атрофидаги зарядланган синов зарра ҳаракатига электромагнит нурланиш реакцияси – таъсирини ўрганиш билан давом этади. Кўп астрофизик жараёнларда ташқи магнит майдонга жойлаштирилган («ботирилган») деб ҳисобланадиган қора ўра атрофида зарядланган зарралар ҳаракатида юзага келадиган синхротрон нурланишларни ҳисобга олмаслик мумкин эмас. Зарядланган зарранинг эгриланган фазо-вақтдаги ҳаракати қуйидаги тенглама орқали аниқланади:

$$\begin{aligned} \frac{Du^\mu}{d\tau} &= \frac{q}{m} F_\nu^\mu u^\nu + \frac{2q^2}{3m} \left(\frac{D^2 u^\mu}{d\tau^2} + u^\mu u_\nu \frac{D^2 u^\nu}{d\tau^2} \right) \\ &+ \frac{q^2}{3m} (R_\lambda^\mu u^\lambda + R_\lambda^\nu u_\nu u^\lambda u^\mu) + \frac{2q^2}{m} f_{tail}^{\mu\nu} u_\nu, \end{aligned} \quad (4)$$

бу ерда охирда берилган f интеграл қуйидагича ифодаланади:

$$f_{tail}^{\mu\nu} = \int_{-\infty}^{\tau-0^+} D^{[\mu} G^{\nu]\lambda'}(z(\tau), z(\tau')) u^{\lambda'} d\tau', \quad (5)$$

бу ерда u^μ q заряд ва m массали зарранинг 4-тезлиги. $F_{\mu\nu} = A_{\nu,\mu} - A_{\mu,\nu}$ – электромагнит майдон тензори, бу ерда A_μ – ташқи магнит майдоннинг 4-вектор потенциали. R_ν^μ – Риччи тензори, $G_{+\lambda}^\mu$ кечикувчи Грин функцияси ҳамда интеграл зарранинг дунё чизиғи z бўйича олинади, яъни $u^\mu(\tau) = dz^\mu(\tau)/d\tau$. Диссертацияда кўрсатилганидек, элементар заррачалар учун Риччи терминини вакуум ҳолида ҳисобга олмаслик мумкин. Масалан, 10 Куёш массали қора ўра атрофидаги горизонтда «дум» куч ва гравитацион кучлар нисбати тахминан 10^{-19} га тенг. Шундай қилиб, астрофизик қора ўралар атрофида электронлар ва протонлар ҳаракати Лоренц-Дирак ковариант кўринишда яхши ифодаланиши мумкин. Шундай қилиб, Лоренц-

Дирак тенгламаси ташқи кучлар йўқ бўлган ҳолда тезлаштирувчи, координаталар бўйича учинчи даражали ҳосилали Шётт ҳадини ўз ичига олади. Биз ташқи кучларнинг учинчи даражали ҳосиллага эга ҳадларини ўзгартириб, тенглама даражасини сезиларли даражада пасайтириш мумкинлигини кўрсатдик. Бу ерда Дирак ассимтотик шарти қилиб $\frac{Du^\mu}{d\tau}|_{\tau \rightarrow \infty} = 0$ олинган. У ҳолда ҳаракат тенгламасини қуйидагича ёзишимиз мумкин бўлади:

$$\frac{Du^\mu}{d\tau} = \frac{q}{m} F_\nu^\mu u^\nu + \frac{2q^2}{3m} \left(F_{\beta;\mu}^\alpha u^\beta u^\mu + \frac{q}{m} (F_\beta^\alpha F_\mu^\beta + F_{\mu\nu} F_\sigma^\nu u^\sigma u^\alpha) u^\mu \right), \quad (6)$$

бу ерда нуқтали вергул билан ковариант координаталар ҳосилалари белгиланган. (6) тенглама Ландау-Лифшиц тенгламасининг ковариант кўриниши бўлиб, инерция принципига мос келувчи иккинчи тартибли дифференциал тенгламадир. Биз Лоренц-Дирак ва Ландау-Лифшиц тенгаламаларининг иккаласини ҳам интеграллаб, бир хил натижаларни қўлга киритамиз. Диссертацияда траекторияларга “жавоб берувчи” (6) динамик тенгаламаларни интеграллаш усуллари тақдим этилган. Хусусан, экваториал ҳаракатдаги зарядли зарранинг “охирги тақдири” (қора ўрага тушадими ёки стабил айланма орбитага тушадими) ташқи Лоренц кучининг ориентациясига боғлиқлиги кўрсатилди, жумладан, зарранинг нурланиш реакция кучи мувозанат радиуси атрофидаги ҳар қандай тебранишни сўндиради. Бундан ташқари, радиация реакцияси кучи магнитланган қора ўра атрофидаги тартибсизлик даражасини камайтиришга олиб келди, бу космик кузатиладиган турли объектлар акрецион дискининг шаклланиши каби бир неча муҳим натижаларга олиб боради. Биз, шунингдек, m массали q зарядли зарранинг M массага ва B магнит майдонга эга қора ўра атрофидаги ҳаракати учун совиш вақтини ҳисоблаганмиз. Барча доимийлар киритилиб, зарядли зарра учун “совиш вақт шкаласи” қуйидаги (7) ифодада келтирилган

$$\tau_{cooling} \approx \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right)^{-1} \frac{3m^3 c^5}{2q^4 B^2}. \quad (7)$$

Диссертацияда муҳокама қилинганидек, реал шароитларда Лоренц кучи гравитацион кучга нисбатан доминант ҳисобланади. Қора ўра яқинида “совиш вақти” камайд. Қуйидаги 1-жадвалда электронлар, протонлар ва тўла ионланган темир ядролари учун магнит майдоннинг турли қийматларидаги “совиш вақти” қийматлари келтирилган.

1-жадвал

Магнит майдоннинг B турли қийматлари учун электронлар τ_e , протонлар τ_p ва тўла ионланган темир ядролари τ_{Fe} учун “совиш вақтлари”.

| B (Гс) | τ_e (с) | τ_p (с) | τ_{Fe} (с) |
|-----------|--------------|--------------|-----------------|
| 10^{12} | 10^{-16} | 10^{-6} | 10^{-5} |
| 10^8 | 10^{-8} | 10^2 | 10^3 |
| 10^4 | 1 | 10^{10} | 10^{11} |
| 1 | 10^8 | 10^{18} | 10^{19} |
| 10^{-4} | 10^{16} | 10^{26} | 10^{27} |

Массага учинчи даражали боғланиш натижасида электронлар протонларга нисбатан 10^{10} марта тезроқ совийди. Яна бир тарафдан, совиш вақти ва орбита вақтларини таққослашимиз мумкин: энг кичик стабил орбита радиусида $\tau_{orb} \approx 4\pi r_{isco} / c$, юлдузсимон қора ўралар учун 10^{-3} с ёки ўта массив қора ўралар учун 10^5 с тартибда бўлади. Шундай қилиб, энергия ажралиши электрон каби энгил зарралар учун жуда актуал бўлиши мумкин.

Зарядланган заррачаларнинг энергия йўқотиш тезлиги ҳаракат тенгламасининг вақт компонентаси ёрдамида аниқроқ ҳисоблаб чиқилиши мумкин. Ҳисоблашлар натижасида қуйидагига эга бўламиз:

$$\frac{dE}{d\tau} = -K_1 E^3 + K_2 E x(\tau), \quad (8)$$

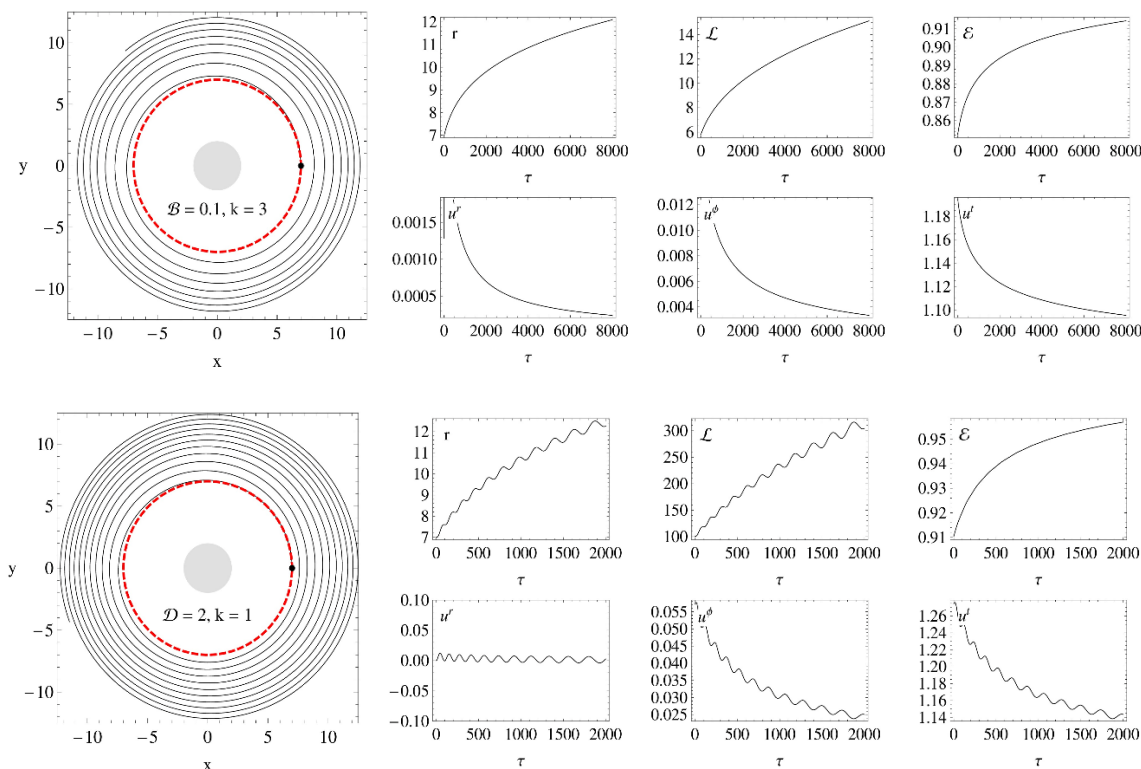
бу ерда $K_1 = 4kB^2$ ва $K_2 = 2kB$ лар доимийлар ва $x(\tau) = 2kBf(\tau) + u^\phi(\tau)/r(\tau)$. Бу тенгламанинг аналитик ечими қуйидаги кўринишда топилиши мумкин:

$$E(\tau) = \frac{E_i e^{\kappa_2 X(\tau)}}{\left(1 + 2K_1 E_i^2 \int_0^\tau e^{2\kappa_2 X(\tau')} \tau' d\tau'\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

бу ерда $X(\tau) = \int_0^\tau x(\tau) d\tau$.

Ҳаракат тенгламаларини сонли интеграллашда нурланиш орбитал кенгайишининг янги эффектлари топилди. Нурланишнинг таъсири туфайли зарядланган зарранинг стабил айланма ҳаракат радиуси магнитланган қора ўрадан ташқи тарафга силжиши (катталашishi) кўрсатилди. Бу эффект чексиз узоқликдаги кузатувчи учун заррача импульс моменти ва энергиясининг ошишига олиб келади. Бундан ташқари бу каби орбиталарнинг кенгайиши магнит майдон конфигурациясига боғлиқ эмаслиги ҳам кўрсатилган. Аммо у фақатгина қора ўрадан ташқи тарафга

йўналган Лоренц кучи бўлган ҳолларда пайдо бўлади. Бу шартларда $qLB > 0$, бу ерда q – заряд ва L – импульс моменти ҳамда B – ташқи магнит майдон индукцияси. Нурланишнинг орбита кенгайишига таъсири 1-расмда келтирилган.



1-расм. Зарядли зарранинг махсус магнит майдон (юқорида) ва диполь (пастда) магнит майдонда қора ўра атрофидаги ҳаракатида зарра орбитал радиуси, энергияси, импульс моменти ва зарра тезлиги турли компоненталарининг ўзгариши. Траекториянинг бошланиш нуқтаси қора нуқта билан белгиланган. Нурланишсиз траектория пунктир кизил чизиқлар билан берилган.

Зарядланган зарранинг магнит майдон фиксирланган қора ўра атрофидаги экваториал текисликдаги ҳаракатида кинетик энергиянинг доимий камайиши, зарранинг потенциал энергияси ошиши кузатилади. Олинган энергия билан зарранинг чексизликдаги ($E_\infty = mc^2$) энергиялари нисбати энг кичик стабил орбитанинг жойлашишига боғлиқ. Зарядланган зарралар учун энг кичик стабил орбитанинг горизонтга жуда яқин жойлашиши билан максимал (100 %) самардорликка эришиш мумкин. Аммо 100 % самардорлик имконсиздир, чунки энг кичик стабил орбитанинг горизонтда жойлашишида $B \rightarrow \infty$. Магнит майдон бўлмаган ҳолда зарранинг орбитасини чексизликдан энг кичик стабил орбитага кўчиришдаги тесқари механик жараённинг формал эффеқтивлиги 5.7 %. Шунини эслатиб ўтиш жоизки, кўпчилик реал ҳолларда орбиталарнинг кенгайиш эффеқти орбитал вақт шкаласига нисбатан жуда юқори тартибларда секин бўлади. Бироқ баъзи кучли магнит майдон мавжуд бўлган астрофизик жараёнларда бу эффеқт таққосаланадиган даража бўлиши мумкин.

“Сомон йўли марказидаги қора ўра” деб номланган иккинчи боб галактикамиз марказидаги Sgr A* деб номланган ўта массив қора ўрани ўрганишга бағишланган. Кузатув натижалари қора ўранинг массасини катта аниқликда баҳолашга ёрдам берди: унинг массаси $M_* = 4.14 \times 10^6$ Куёш массасига тенг бўлиб, ва бу эса $R_g = 2GM_*/c^2 = 1.22 \times 10^{12} \text{ см} \sim 10^{12}$ см ли гравитацион радиусига мос келади. Ушбу боб галактика марказидаги релятивистик муҳитни жуда катта ёй бурчак сезгирликка эга ускуналар ёрдамида исботланишини келтиришдан бошланади. Ушбу боб галактика марказидаги ташқи магнит майдонга жойлаштирилган айланувчи ўта массив қора ўра зарядининг ҳақиқий чеграсини турли хил моделлар ва методлар асосида аниқлаш билан давом эттирилади. SgrA* зарядининг чегаравий қийматлари 2-жадвалда келтирилган. Жадвалда келтирилган электр заряднинг барча юқори чегаралари энг камида максимал зарядга нисбатан 10 марта кичик ва шунинг учун бу фазо-вақт метрикасига таъсир қилмайди. Бироқ заряд миқдори кичик бўлишига қарамасдан қора ўранинг электр майдони зарядланган зарралар динамикасига етарли даражада таъсир қилади ва улар тормозланиш-нурланиш ёрқинликнинг ўзгаришига қараб текширилиши мумкин. Шунинг учун диссертацияда қора ўра зарядини кузатув орқали текширишнинг янги усули таклиф қилинган. Аккреция назариясида қора ўранинг яна бир муҳим характеристикаси бу энг кичик стабил орбитанинг жойлашувидир. Турли ($e^-, Q < 0$ ёки $p^+, Q > 0$) зарядларда энг кичик стабил орбита $r = 3r_s$ дан $r = 1.83r_s$ гача кўчиши мумкин. Бу эффект айланиш параметри $a_* = 0.64$ бўлган ҳолдаги эффект ўрнини босиши мумкин. Буни Sgr A* нинг айланиш параметрларини ҳисоблаш моделларида ҳисобга олиш мумкин.

2-жадвал

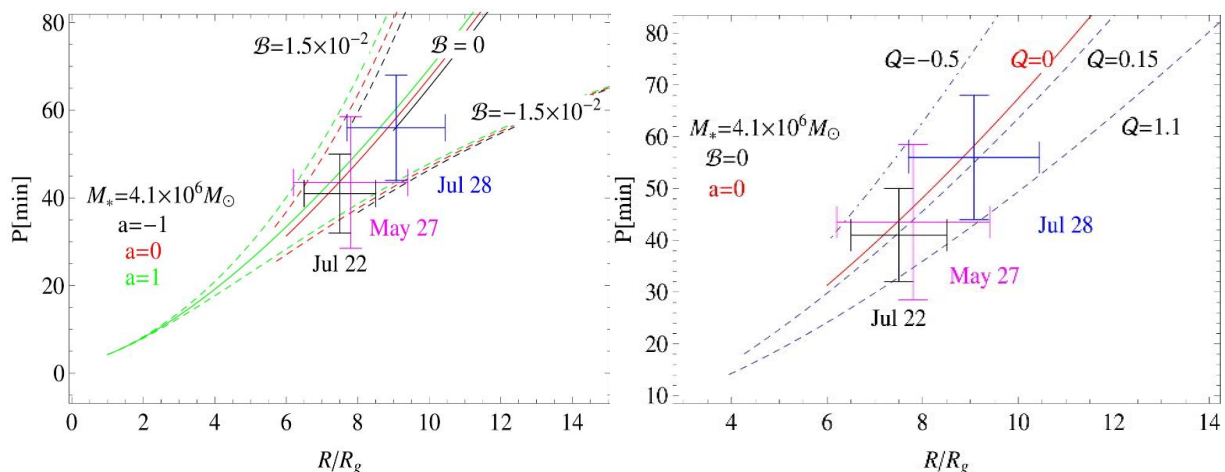
Галактика марказидаги ўта массив қора ўра электр зарядининг турли чегаравий қийматлари

| Жараён | Чегара | Изоҳ |
|---|---|----------------|
| ρ ва e массалари фарқи | $Q_{eq} = 3.1 \times 10^8 \left(\frac{M_*}{4 \times 10^6 M_\odot} \right) Кл$ | Турғун заряд |
| Протонлар аккрецияси | $Q_{max}^+ = 6.16 \times 10^8 \left(\frac{M_*}{4 \times 10^6 M_\odot} \right) Кл$ | Нотурғун заряд |
| Электронлар аккрецияси | $Q_{max}^- = 3.36 \times 10^5 \left(\frac{M_*}{4 \times 10^6 M_\odot} \right) Кл$ | Нотурғун заряд |
| Магнит майдон ва қора ўра айланиш параметри | $Q_{ind}^{max} \leq 10^{15} \left(\frac{M_*}{4 \times 10^6 M_\odot} \right)^2 \left(\frac{B_{ext}}{10G} \right) Кл$ | Турғун заряд |
| Экстремал қора ўра | $Q_{max}^{theor} = 6.86 \times 10^{26} \left(\frac{M_*}{4 \times 10^6 M_\odot} \right) \sqrt{1 - \tilde{a}^2} Кл$ | Юқори чегара |

Ушбу бобда, шунингдек, Галактика марказидаги айланувчи Sgr A* қора ўра хусусиятлари ва чакнаш нуқталари динамикаси таҳлил қилинган. Яқиндагина GRAVITY@ESO галактика марказидаги ўта массив қора ўра гравитацион радиуси атрофида инфрақизил соҳага яқин $2.2\mu m$ тўлқин узунлигидаги кузатув натижаларини эълон қилди. Чакнаш нуқталарининг табиати ва келиб чиқиш сабаблари номаълумлигича қолмоқда. Кўп тахминларга қарамадан улар иссиқ магнитланган оқим динамикасининг ўзгариши билан боғлиқ. Бу ҳодисани тушунтирувчи феномен оралик ҳодисалар ёки Қуёшдаги каби магнит куч чизикларининг қўшилишидан хосил бўладиган Рентген чакнашлари ёки магнитогидродинамик нотурғунлик билан боғлиқ бўлиши мумкин.

Бошқа томондан, магнит майдонда мавжуд ҳолда плазманинг релятивистик ҳаракати, плазмадаги зарядлар парчаланиши ва умумий зарядлар зичлигининг ортишига олиб келади. Ташқи магнит майдонда плазма ҳаракати билан бўлган ҳаракатланувчи санок системасида электр майдон компенсацияси бу зарядни оширади. Sgr A* яқинидаги магнит майдон индукцияси 10–100 Гс деб баҳоланган. Горизонтал кутбланиш деворларининг яқинда кузатилган ёруғлик чакнашларининг орбитал даврлари билан таққосланадиган вақт шкаласи билан кузатишлари ҳаракатлар орбитаси текислигига перпендикуляр магнит майдонининг йўналишини билдиради. Бунинг натижасида, релятивистик орбиталарда айланувчи чакнаш билан боғлиқ бўлган нуқталар плазмадаги зарядлар бўлиниши туфайли умумий электр зарядга эга бўлиши мумкин. Шунинг учун биз диссертацияда Sgr A* атрофидаги чакнаш компоненталарининг динамикасига ва хусусиятларига электромагнит майдоннинг таъсирини ўргандик.

Асосан астрометрик хатоликлар ва тўлиқ бўлмаган орбитал қамрови сабабли юзага келадиган ўлчовдаги хатоликларни ҳисобга олган ҳолда Лоренц кучининг катталигига, иссиқ жойларнинг электр токини ва аниқ заряд зичлиги билан боғлиқ чекловларни кўямиз. Чакнаш компоненталари бирдан қичик бўлган ҳолда заряд қийматлари учун $10^{13-16} Кл$ чеклов лимитлари олинди. Бу плазма коцентрациясининг $10^{-5} см^{-3}$ тартибдаги қийматига мос келади. Ҳолбуки, плазма зичлиги $10^{6-8} см^{-3}$ тартибида. Иссиқ нуқта динамикасига электромагнит майдон таъсири илгариги ишларда ҳисобга олинмаган. Хусусан, электромагнит майдон Sgr A* айланишининг ўлчамига қандай таъсир қилиши мумкинлигини кўриб чиқдик. Қора ўранинг нол бўлмаган кичик зарядга эга бўлиши унинг атрофидаги магнит майдоннинг буралиб қолишига ўхшаган ҳодисага олиб келади. 2-расмда таклиф қилинган модель билан орбитага тўғри келадиган натижалар кўрсатилган.



2-расм. Чапда: GRAVITY томонидан кузатилган учта чакнашларда орбита-давр муносабати, 22-июлда (қора), 27-майда (қизил) ва 28-июлда (кўк). $4.14 \times 10^6 M_{\odot}$ массали, айланиш текислигига перпендикуляр ташқи магнит майдонга жойлаштирилган Керр қора ўраси атрофида айланувчи зарядланган қайноқ нуқта билан мослаштирилган. $B=0$ (узлуксиз чизиклар) соф қора ўрасига тўғри келади, $B = \pm 1.5 \times 10^{-2}$ бўлган ҳолда Лоренц кучининг гравитацион кучга нисбатини билдиради. Учта чакнаш нуқталаринг ўртача қиймати $B = -3 \times 10^{-3}$ бўлган ҳолга тўғри келади. Ўнгда: кичик индукцияланган зарядга эга бўлган қора ўра учун натижалар.

Бобда, шунингдек, галактик марказ қора ўраси яқинидаги ҳаракатланувчи юлдуз ўрганилган. Галактик марказдаги ядровий юлдуз кластери Галактикадаги энг зич юлдузлар тўдаларидан биридир. Унинг ички қисмидаги юлдузлар бир неча минг км/с орбитал тезликда ўта массив қора ўра Sgr A* атрофида айланади. В типидagi S2 юлдуз ҳозирги кунда умумий нисбийлик назарияси ва бошқа гравитация назарияларини юлдузлар орбитаси ёрдамида текшириб кўриш учун энг мақбул объектдир. Бирок ~ 16 йиллик орбитал даври ва $\sim 0,88$ қийматли эксцентритети $\sim 11'$ лик перицентр силжишига олиб келади ва кузатув нуқтаи назаридан турли ғалаёнлар санок системаси билан боғлиқ қийматларни аниқлаш мураккаб бўлган ҳолдир. Бу муаммони ҳал қилишнинг содда усуллари билан бири кичикроқ перигелий масофасини босиб ўтадиган юлдузларни топишди: $r_p \leq 1529$ Шварцшильд радиуси (120 а.б.). Диссертациянинг ушбу бобида юлдузларнинг релятивистик орбиталарида юлдузларнинг топилиш эҳтимоли жуда кичиклиги кўрсатилган. Шунга қарамасдан, бу соҳадан ўтувчи юлдузларни аниқлаш мумкин. Биз, шунингдек, кам учрайдиган соҳани кесиб ўтувчи юлдузни аниқлаш эҳтимоли учун оддий формулани тақдим этдик ва юлдуз ноёб соҳада, яъни кузатувчилар учун «кутиш» вақтини кўрсатадиган тахминий вақтни текширдик.

Диссертациянинг «Қора ўралар ўта юқори энергияли космик нурларнинг манбалари сифатида» деб номланган учинчи боби қора ўраларнинг айланишидан янги электромагнит энергияни чиқариб олишнинг ўта эффектив режимини шакллантириш ва унинг ўта юқори энергия космик нурларини тушунтиришда қўлланишига бағишланган. Ушбу боб қора ўра термодинамикасининг асосий тушунчалари ва энергия чиқариш механизмлари билан боғлиқ ишларни ўрганишдан бошланади.

Керр қора ўра геометриясининг энг қизиқарли хусусиятларидан бири, бу – массаси M ва айланиш параметри a бўлган қора ўра камаймайдиган энергияга эга эканлигини англатадиган термодинамик энтропия S_H билан қора ўра ходисалар горизонти A_H майдони орасида тўғридан-тўғри ўхшашлик мавжудлигидир:

$$E_{irr} = \sqrt{\frac{S_H \hbar c^5}{4\pi G k_B}} \equiv \sqrt{\frac{A_H}{16\pi G^2}} c^4 = \frac{Mc^2}{\sqrt{2}} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{M}\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Экстремал айланувчи қора ўра учун бу умумий энергиянинг 71% ини ташкил этади, қолган 29 % – айланиш энергияси ва шунинг учун уни ажратиш олиш мумкин. Юлдуз массасидаги қора ўралар учун бу энергия 10^{63} эВ тартибда бўлади, $M = 10^9 M_\odot$ массали ўта массив қора ўралар учун у 10^{74} эВ тартибда бўлиб, уларни оламдаги энг катта энергия захираларига айлантиради. Шу сабабли, бу улкан манбани жуда самарали тарзда ажратиш жуда муҳим. Айланувчи қора ўра атрофида унга тушаётган заррачанинг парчаланишини таҳлил қилиб, қора ўралардан 3 та – паст, ўрта ва юқори энергия ажралиш режимларини ажратдик. Жараённинг самарадорлиги ажралган энергиянинг тўла энергияга нисбати сифатида аниқланади.

Тадқиқ этилаётган механизм Магнетик Пенроуз процесси (МПП) деб аталади. Магнит майдон мавжуд бўлмаганда, МПП қуйи чегараси экстремал айланадиган қора ўрага мос келадиган максимал эффективлиги 20,7% га тенг Пенроуз жараёнига ўтади. Барча зарралар зарядланган бўлса, самарадорлик қуйидаги ифодага ўтади:

$$\eta_{MPP}^{mod.} \approx \frac{q_3}{q_1} - 1. \quad (11)$$

Бу $q_3 > q_1$ ҳолда ўрта МПП режимига мос келади ва қора ўранинг гравитацион индукцияланган электр майдонини нейтраллаштиради. Ўрта режимдаги МПП бошқа машҳур жараёнга, яъни Блэндфорд-Знаек механизмига (БЗ) ўхшашдир. Иккала ҳолатда ҳам асосий манба қора ўранинг квадрупол электр майдони бўлиб, у санок системаларининг эргашиши эффекти орқали магнит майдон чизиқларини боғлаб туради. Шу ўринда қора ўра атрофидаги глобал плазма нейтраллиги чекловлари сабабли БЗ самарадорлиги ва МППнинг мўътадил режими ўта юқори даражада ўсиши мумкин эмаслигини таъкидлаш жоиз. Ўрта режимда МПП БЗ га яқинлашади ва бу жараённинг сонли симуляцияларида ўта юқори самарадорлик нима учун кузатилмаганлигини тушунтиради.

МППнинг учинчи ва энг самарали режими мавжуд бўлиб, у баъзи бир муҳим натижаларга олиб келадиган алоҳида эътибор талаб қилади. Қора ўрага тушувчи нейтрал зарралар икки зарядли бўлакка бўлинган ҳолда самарадорликка муҳим хисса қўшади:

$$\eta_{MPP}^{ultra} \approx \frac{q_3}{m_1} A_i. \quad (12)$$

Электронлар ва протонлар каби элементар зарралар учун q/m нисбат

жуда катта бўлиб, у самарадорликнинг улкан қийматларга эришиш имконини беради. Бу МППни зарралар ажралиши учун ўта юқори энергияни таъминлайдиган ультра режимни вужудга келтиради. Магнит майдони 1 Гс атрофида бўлгандаёқ самарадорлик 100% дан ошиб кетади. Электронлар ҳолида эса 1 мГс магнит майдони учун шундай натижага эришиш мумкин. Шунини алоҳида таъкидлаш керакки, электромагнит таъсирлар эргосферани $r = 2M$ геометрик чегарадан ташқарида фаол равишда кенгайтиради. Яъни манфий энергия орбиталари самарадорликни оширади ва жараён ишлаши учун кенгайиб бораётган кенг ҳудудларда мавжуд бўлади.

Ўта юқори режимда МППнинг қизиқарли қўлланишларидан бири юқори энергияли космик нурларнинг келиб чиқиш ва пайдо бўлиш механизмини тушунтиришдир. Булар катта адрон коллайдерда олиш мумкин бўлган энергия $< 10^{13}$ эВ дан анча катта бўлган Ерда қайд этилган $E > 10^{18}$ eV қийматга эга. Илгари космик нурли флоресанс ўлчовлари протоннинг устун оқимини кўрсатган бўлса-да, ҳозирда қайд этилаётган оқимларда аралаш таркибли экстрагалактик зарядланган зарралар мавжуд. Космик нурларнинг спектри уларда “тизза” ва “пой”лар мавжудлигини кўрсатади. “Тизза”даги $\sim 10^{15.5}$ эВ энергияча бўлган космик нурларнинг галактик ўта янги юлдузларнинг портлашларидаги зарралар оқимидан келиб чиқиши аниқланган бўлса-да, “пой”даги $10^{18.5}$ эВ оралигидаги оқимнинг сезиларли даражада пасайиши бундай зарралар манбаси бошқалигини кўрсатади. Кўпгина тадқиқотлар $10^{15.5}$ эВ дан юқори энергияли космик нурларнинг экстрагалактик келиб чиқишини таъкидласа-да, “тизза” ва “пой” орасидаги энергияли нурлар келиб чиқиш табиати ҳамон муҳокамада бўлиб қолмоқда.

Юқори энергияли космик нурларни тушунтириш учун қўшимча ўлчамлар, Лоренц инварианциясининг бузилиши, янги экзотик заррачалар мавжудлиги каби бир қатор моделлар таклиф этилди. Ўта юқори энергияли космик нурлар тезлашиш механизмлари орасида релятивистик джэтларнинг плазмасидаги релятивистик зарбалар модели энг мақбул деб ҳисобланган. Яқинда олинган натижалар ва ҳисоб-китоблар шунини кўрсатадики, бу модель зарба тезлашуви 10^{20} эВ дан юқори бўлган энергияли протонларни тушунтира олмайди. Бундан ташқари, реал вазиятларда муқаррар равишда ўта юқори энергияли космик нурларнинг модда томонидан ютилиши бирламчи энергияни сезиларли даражада камайтиради. Шунинг учун ўта юқори энергияли космик нурлар пайдо бўлиши ва тезлашиш механизмлари аниқ эмас.

Биз МППнинг янги, жуда самарали режими асосида қора ўранинг айланиш энергиясини ажратиш механизмини аслида ўта юқори энергияли космик нурларнинг табиатини тушунтириш учун ишлатиш мумкинлигини кўрсатдик. Ажралиб чиқаётган космик нур заррачаси энергиясини сифат жиҳатидан баҳолаш учун биз экстремал, асимптотик бир жинсли бўлган ташқи магнит майдонни кўриб чиқамиз. Умуман олганда, магнит майдон қора ўра горизонти яқинида мураккаб структурага эга, бироқ фазонинг кичик қисмида майдон тахминан бир жинсли деб ҳисоблаш мумкин. МППни ўта массив қора ўра атрофида нейтроннинг бета-парчаланишига қўллаш орқали биз бета-парчаланиш натижасида ажралиб чиққан протоннинг энергиясини

оламиз:

$$E_p = 1.33 \times 10^{20} eV \left(\frac{q}{e} \right) \left(\frac{m}{m_{p^+}} \right)^{-1} \left(\frac{B}{10^4 G} \right) \left(\frac{M}{10^9 M_\odot} \right), \quad (13)$$

бу ифодадан $M \sim 10^9 M_\odot$ массали қора ўра ва $B \sim 10^4 G$ магнит майдон учун ажралган протон энергияси 10^{20} эВ дан ошиши кузатилади. Моделнинг муҳим жойи шундаки, у қора ўранинг тез айланишини талаб қилмайди. Юқорида келтирилган жараёнлар ихтиёрий парчаланиш реакциялари учун умумлаштирилиши мумкин. 3-жадвалда турли радиоактив парчаланиш усуллари учун турли режимларда энергия ажралош самарадорликлари келтириб ўтилган. Зарранинг бошланғич энергияси $m_x c^2$ га тенг, фотон энергияси $E_\gamma = 2m_e c^2$ га тенг деб олинган.

3-жадвал

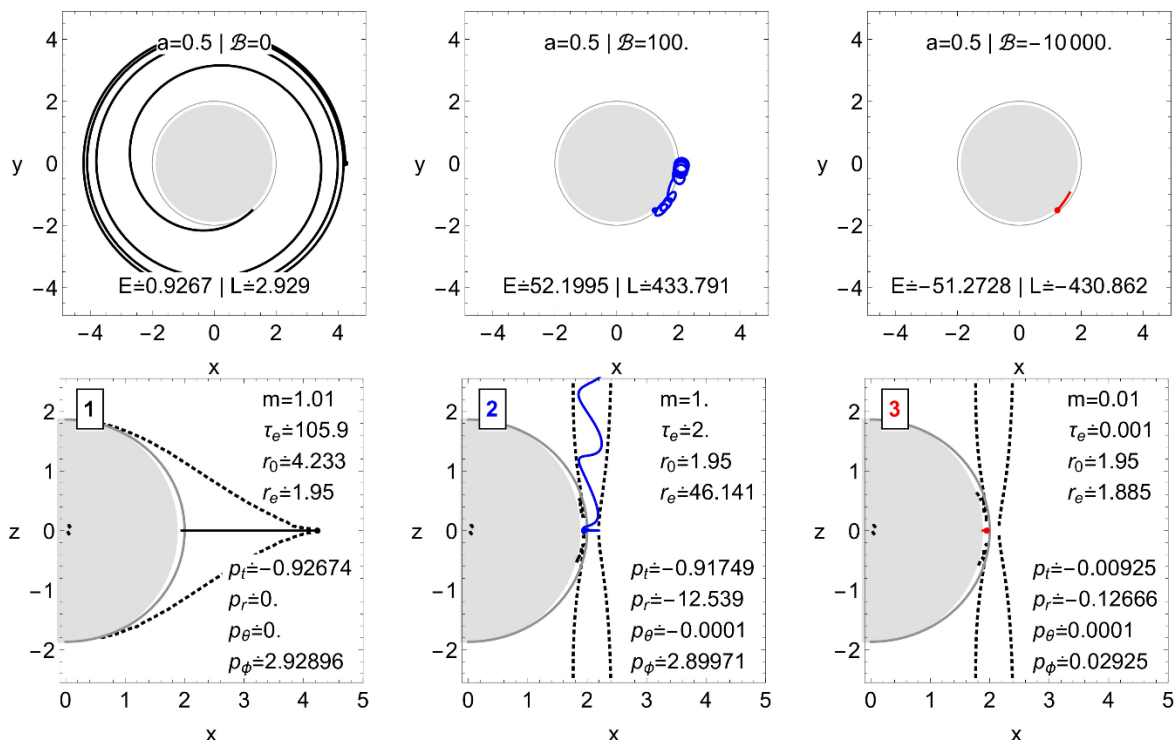
Массаси $10M_\odot$, айланиш параметри $a = 0.8M$ ва $10^4 G$ магнит майдонга эга бўлган қора ўра учун радиоактив емирилиш реакциялари орқали энергия ажратиш самарадорлиги ва режими.

| Емирилиш режими | Реакция тенгламаси | Ажралувчи зарра | Самарадорлик η_{max} | МПП режими |
|----------------------|---|-----------------|---------------------------|------------|
| α емирилиш | ${}^A_Z X^0 \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y^{2-} + {}^4_2 \alpha^{2+}$ | Y | <0 | - |
| | | α | 2824/A | юқори |
| | ${}^A_Z X^+ \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y^{-} + {}^4_2 \alpha^{2+}$ | Y | <0 | - |
| | | α | ~ 1 | ўрта |
| | ${}^A_Z X^- \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y^{3-} + {}^4_2 \alpha^{2+}$ | Y | ~ 2 | ўрта |
| | | α | <0 | - |
| β^- емирилиш | ${}^A_Z X^0 \rightarrow {}^A_{Z+1} Y^+ + e^- + \bar{\nu}$ | Y | 1412/A | юқори |
| | | e^- | <0 | - |
| | | $\bar{\nu}$ | 0.06 | паст |
| β^+ емирилиш | ${}^A_Z X^+ \rightarrow {}^A_{Z-1} Y^0 + e^+ + \nu$ | Y | <0 | - |
| | | e^+ | ~ 0 | паст - |
| | | ν | <0 | - |
| γ нурланиш | ${}^A_Z X^0 \rightarrow {}^A_Z X'^0 + {}^0_0 \gamma^0$ | X' | 0.06 | паст |
| | | γ | 0.06 | паст |
| Жуфтлик пайдо бўлиши | $\gamma^0 \rightarrow e^- + e^+$ | e^- | <0 | - |
| | | e^+ | 2.6×10^6 | юқори |

Ўта юқори энергияли космик нурларнинг тезлашиш жараёни сонли усулларда синов қилинди. Қуйидаги расмда сонли усулларда олинган натижалар келтирилган. Натижалар парчаланувчи заррачанинг энергияси дастлабки энергияга нисбатан 50 баробар кўпроқ эканлигини кўрсатди.

Реалистик ҳолатларда $B = \frac{qGBM}{mc^4}$ ўлчамсиз катталиқнинг қиймати ҳисобига

энергия ошиши 10^{10} мартагача қийматга эришиши мумкин, хусусан, $10^9 M_{\odot}$ массали ўта массив қора ўра ва 10^4 Гс магнит майдонда протон учун 10^{11} ва электрон учун 10^{14} қийматга эришиш мумкин.

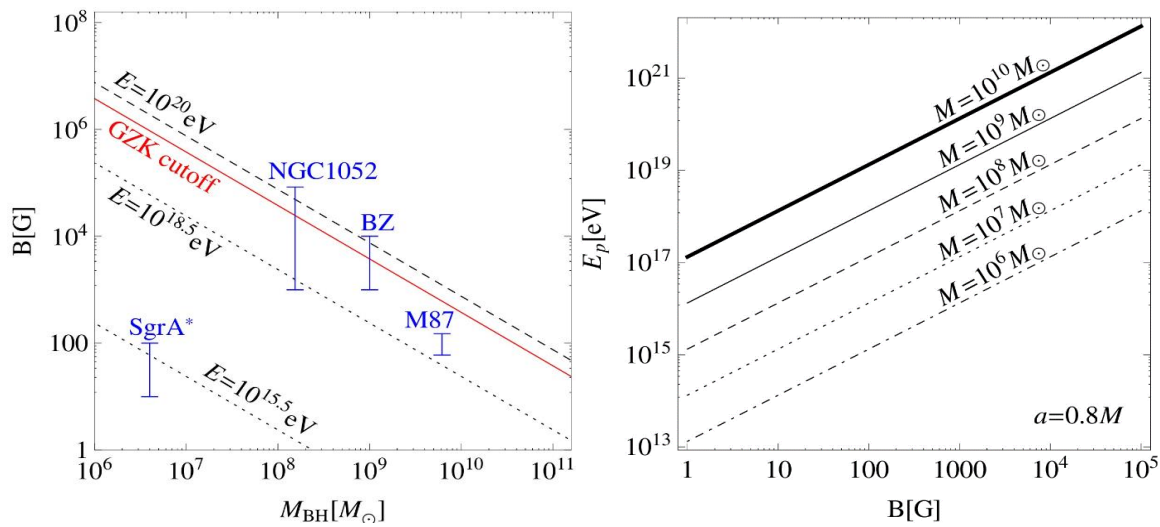


3-расм. Ташқи магнит майдонда жойлашган айланувчи қора ўра эргосферасидан (кулранг доира ва айлана орасидаги фазода) нейтрал заррачаларнинг (қора) иккита зарарли заррачаларга (кўк ва қизил чизиқлар) бўлинишининг сонли усулда ҳисобланган моделлари. Пунктир чизиқлар заррачанинг энергетик чегарасини ифодалайди.

Нейтрал заррача ионизацияси туфайли ўта юқори энергияли заррачалар ҳосил бўлиш механизми магнит майдоннинг конфигурациясига боғлиқ эмас. Энг муҳими электромагнит майдон A_t компонентасининг мавжудлиги бўлиб, бу компонента магнит майдонида қора ўранинг айланиши ҳисобига пайдо бўлади. Майдоннинг очик куч чизиқлари бўйлаб зарраларнинг ажралиши табиий кўринса-да, заррачалар ультра релятивистик тезликларгача тезлаштирилгач у майдон куч чизиқларини кесиб ўтади ва қора ўрадан ихтиёрий йўналишда узоқлашиши мумкин. Турли хил магнит майдон конфигурацияси учун МППни синовдан ўтказиш (бир жинсли, диполь ва ажралувчи монополь) ажралган зарра энергиясининг тўлиқ энергияси магнит майдон конфигурациясига боғлиқ эмаслигини кўрсатди, бунда уларнинг узоқлашиш йўналишлари бир-биридан фарқ қилиши мумкин. Бир жинсли магнит майдон учун барча узоқлашувчи (турли бошланғич шартларга эга бўлган) зарралар максимал даражада коллимацияга учрайди, монополь конфигурациядаги магнит майдон учун зарраларнинг узоқлашиши изотропик табиатга эга бўлади. Шунини таъкидлаш жоизки, нейтрал заррачанинг дастлабки энергияси ва бурчак моменти унинг парчаланиши натижасида пайдо бўлган зарядланган зарраларининг тезлашишида аҳамиятга эга эмас.

4-расмда нейтрон бета-парчаланишидан кейин ажралиб чиққан протон энергиясининг магнит майдон ва қора ўра айланиши параметрига боғлиқлиги

кўрсатилган.

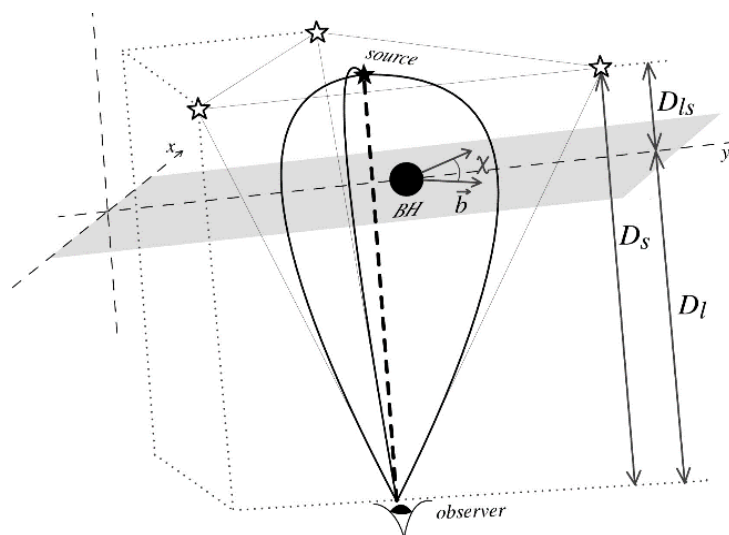


4-расм. Чапда: протонларни турли энергияга тезлаштирувчи қора ўра массаси ва магнит майдони учун чекловлар: 10^{20} эВ (пунктир), GZK-cutoff $10^{19.7}$ эВ (узлуксиз), пой $10^{18.5}$ эВ (нуқтали) and тизза $10^{15.5}$ эВ. Кўк вертикал чизиқлар ўта массив қора ўрага кузатувлардан олинган чекловларга мос келади: Sgr A*, M87 ва NGC 1052 . BZ – массаси $10^9 M_\odot$ бўлган ўта массив қора ўра ва магнит майдони $10^3 - 10^4$ Гс бўлган ҳол учун мос келади. Ўнгда: нейтрон бета-парчаланишида пайдо бўлган протон энергиясининг магнит майдонга ва ўта массив қора ўра массасининг турли қийматларига боғлиқлиги.

Бирламчи космик нурларнинг траекторияси бўйлаб магнит майдоннинг мавжудлиги синхротрон нурланиш реакциясига ва магнит майдонларининг сезиларли даражада катта бўлиши мумкин бўлган манба ҳудудларида энергия ажралишига олиб келиши мумкин. Электронлар энергиясининг протонларга нисбатан 10^{10} баробар тезроқ камайиши кўрсатилди. Шу боис, 10^4 Гс магнит майдонида жойлашган ўта массив қора ўра учун асосий космик нурлари кўпроқ протон ёки ион ҳисобланади, электронларнинг парчаланиш вақтлари эса қора ўрадан узоқлашиш учун етмайди. Бошқа тарафдан, магнит майдони одатда 10^{12} Гс дан юқори бўлган нейтрон юлдузи синхротрон энергиясининг йўқолиш вақти протон ва ион учун ҳам жуда қисқа, шу сабабли юқори энергиясини сақлаган ҳолда космик нурлар нейтрон юлдузларни ташлаб кетиши амримаҳол.

Синхротрон эмиссиясидан ташқари ўта юқори энергияли космик нурлар энергиясининг асосий қисмини қора ўра атрофида зич бўлган муҳит моддалари билан ўзаро таъсирларда йўқотиши мумкин. Бу ҳолатда турли хил механизмларни кўриб чиқиш мумкин. Жараённинг кинематикаси МППда ажралиб чиққан ўта юқори энергияли космик нурлар эффектив потенциалда хаотик ҳаракати туфайли магнит майдон куч чизиқлари бўйлаб ҳаракат қилади. Шу билан бирга, кучли гравитацион майдонда юзага келадиган магнит майдонининг узилиши сабабли майдонларнинг чизиқлари узилиши мумкин, бу асосий космик нурларнинг узоқлашиш йўналишини аккреция дисклари ва джет тарқалиш ҳудудларидан ташқарига чиқариши мумкин. Бошқа томондан, МПП да ажралиб чиққан ишлаб чиқарувчи космик нурлар

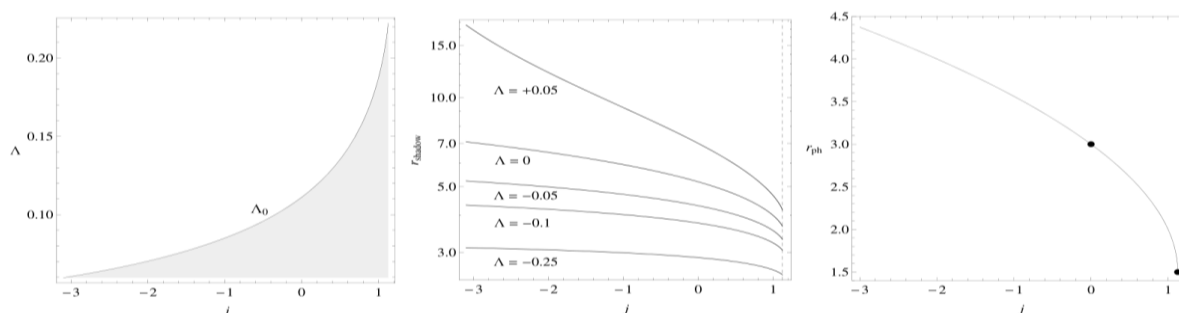
релятивистик джетларнинг бир қисми бўлиши мумкин ва бунда моделлаштиришда МПП томонидан тезлашишларнинг таъсирлари ва релятивистик шоклардан фойдаланиш мумкин. МПП бу ҳолатда плазма релятивистик джетларидаги шоклардан космик нурларнинг тезлашувининг турли моделларида ёрдамчи двигатель ролини бажариши мумкин. МППда ажралиб чиққан космик нурларда, шунингдек, юқори энергияли нейтринолар ва гамма нурлари каби иккинчи даражали космоген хабарчиларнинг излари бўлиши мумкин.



5-расм. Гравитацион линзанинг схематик чизмаси. Юлдузча сифатида кўрсатилган ёруғлик фон манбаи марказий қора ўра томонидан линзаланади. D_s – кузатувчи ва манба ўртасидаги масофа. D_{ls} – линзадан (қора ўрадан) манбагача бўлган масофа. D_l – кузатувчи ва линза орасидаги масофа. χ вектор J нинг x у текисликка проекцияси ва b векторининг проекцияси орасидаги бурилиш бурчагини билдиради.

Диссертациянинг “Қора ўраларнинг оптик хусусиятлари ва сояси” деб номланган тўртинчи боби плазманинг қора ўра сояси тасвирига ва қора ўралар атрофида гравитацион линза эффектини ўрганишга бағишланган. Боб мавзу бўйича ишларнинг таснифи ва плазма билан қуршалган айланувчи қора ўранинг атрофида гравитацион линза эффектининг тавсифига оид маълумотлар билан бошланади. Хусусан, плазма орқали тарқаладиган ёруғликнинг кучайиши ва ёруғликнинг поларизация текислигининг Фарадай айланишига таъсири ўрганилди ва плазмадаги объект атрофида линзаланиш эффекти орқали ёруғликнинг оғиш бурчаги биринчи марта ҳисобланди. Гравитацион линза тизимининг схематик намоиши 5-расмда келтирилган.

Бундан ташқари, бу бобда Райсснер-Нордстром-де-Ситтер фазо-вақтида геодезик тенгламалар олинган. Фотон геодезик чизиқлари учун критик импакт параметри тутилиш кесим юзи ва тарк этиш ҳудудларини ҳамда соянинг ўлчамлари (радиуси)ни ифодалайди. Соя радиуси учун аналитик ифодалар ва келтирилган параметрлар учун критик қийматлар олинди. Олинган натижалар 6-расмда кўрсатилган.



6-расм. Чапдан: қора ўра соясининг чексизликка кетадиган критик қийматига мос келувчи космологик доимий Λ_0 нинг $j = Q^2 + P^2$ заряд параметрларига боғлиқлиги, бунда Q ва P – дайон зарядлари. Соянинг мавжуд бўлиши мумкин бўлган ҳудуд $\Lambda < \Lambda_0$ га тўғри келади (расмда бўялган ҳудуд). Марказда: турли Λ қийматлари учун соя радиусининг параметр j га боғлиқлиги. $j = 9/8$ – критикал қиймати пунктир чизик билан кўрсатилган. Ўнгда: фотон орбитаси радиусининг j параметрига боғлиқлиги. Фотон орбитасининг минимал қиймати ($j = 9/8$ учун $r_{ph} = 1.5$) ва Шварцшильд чегараси ($j = 0$ учун $r_{ph} = 3$) қора нуқталар билан белгиланган.

Натижаларни олиш учун икки хил ёндашув қўлланган, яъни «кўп илдизлар» ва «эффektiv потенциал яқинлашиши» усуллари. Ҳар иккиси ҳам бир хил натижаларга олиб келади. Бу ифодалар жорий ва келгусида интерферометрик кузатишлар натижалари ёрдамида қора ўраларнинг параметрларига чегаралар ва қийматлар олиш учун ишлатилиши мумкин, масалан, магнит ёки бикрлик зарядлари учун “Ҳодисалар горизонти” телескопи ёрдамида чегаравий қийматлар олиш мумкин. Биз сферик-симметрик метрикани ҳисобга олганимиз учун соянинг шакли доирасимон бўлади. Аммо турли сабабларга кўра, масалан, аккрецион оқимлар мавжудлиги туфайли соялар атрофидаги ёрқин нуқталар тақсимоти ҳисобига, симметриянинг бузилиши кузатилиши мумкин.

ХУЛОСА

«Қора ўралар атрофида астрофизик жараёнлар ва юқори энергияли космик нурлар» мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Сомон йўли марказидаги қора ўранинг барқарор бўлмаган электр заряди масаласи қайта кўриб чиқилди ва унинг қийматига фазо-вақт геометриясига таъсир қилмайдиган $Q \leq 10^{15} K_l$ каби реалистик чекловлар киритилди. Рентген диапазонида кузатиш орқали қора ўра зарядини аниқлаш усули таклиф қилинди. Чандра телескопи маълумотлари асосида Sgr A* нинг термал нурланишининг сирт ёрқинлик профилини кузатиш ва пасайишига асосланган ҳолда қора ўранинг заряди учун юқори қиймат $Q_{SgrA*} \leq 3 \times 10^8 K_l$ аниқланди.

2. Электр заряди қора ўранинг айланиш параметри максимал қийматининг 60 % гача ўрнини боса олиши кўрсатилди: зарядли зарралар ички турғун айлана орбиталарининг қора ўра заряди йўқ бўлган ҳолатига нисбатан ичкарига силжиши кўрсатилди. Шундай қилиб, қора ўра спинининг қийматини баҳолайдиган кўплаб моделларни ушбу спинни ўлчашда вужудга

келадиган ноаникликлар ҳисобига қайта кўриб чиқишга ва электромагнит ўзаро таъсирни ҳисобга олишга олиб келади.

3. Илк бор Sgr A* ни айланаётган ёруғ аланга компоненталарининг электромагнит хусусиятлари 2018 май-июнь ойларида GRAVITY курилмаси ёрдамида қайд қилинган ва таҳлил этилган. Ҳусусан, Sgr A* атрофини айланаётган плазма, релятивистик ва магнитланган бўлиб, у плазмадаги зарядларнинг ажралишига олиб келади. Ушбу плазма заряд концентрацияси 1 куб метр ҳажмда 10 та эканлиги аниқланди. Плазмадаги зарралар сони зичлиги $10^{7\pm 1} \text{ см}^{-3}$ тартибда.

4. Галактика марказидаги ёрқин юлдузларнинг умумий сони бирдан паст бўладиган кичик соҳани кесиб ўтувчи юлдузларни қайд қилиш эҳтимоллиги учун содда ифода олинди. Юқори энергияли орбиталарда учиб ўтиши мумкин бўлишига қарамасдан, SgrA* дан 1500 Шварцшильд радиуси масофасидан ичкарида ёрқин юлдуз бўлиш эҳтимоли кам бўлиши кўрсатилди.

5. Ўта массив қора ўралардан энергия ажралиши натижасида ўта юқори энергияли космик нурлар пайдо бўлишининг янги механизми таклиф қилинди. Ўта эффектив МПП режимда ва нейтрал зарранинг радиоактив парчаланишидан фойдаланган ҳолда массаси $10^9 M_{\odot}$ бўлган ва атрофидаги магнит майдони 10^4 Гс бўлган ўта массив қора ўра яқинида нейтроннинг парчаланиши натижасида пайдо бўлган протон энергияси 10^{20} эВ га етиши мумкинлиги кўрсатилди.

6. Космик нурлар энергетик спектрининг зарралар оқими сезиларли камаядиган “тизза” соҳасига тўғри келувчи протонлар энергиясининг қиймати $10^{15.5}$ эВ тартибда олинди. Спектрнинг “тизза” соҳаси энергияси аниқлиги космик нурлар манбаларида ушбу қийматдаги энергетик сатҳнинг мавжудлигини ва таклиф этилган моделнинг тўғрилигини билдиради. Натижалар нейтрал заррачанинг ионлашиш жараёнини ташқи магнит майдонда мавжудлигида сонли усулда симуляция қилиш орқали текширилди. Жараён магнит майдон конфигурациясига боғлиқ эмаслиги кўрсатилди.

7. Магнитланган қора ўралар яқинидаги орбиталарнинг кенгайиши топилди ва тадқиқ этилди. Нурланиш реакция кучлари зарядли зарраларнинг айлана орбиталарининг итарувчи Лоренц кучлари таъсирида $qLB > 0$ бўлганда қора ўрадан ташқи томонга силжиши кўрсатилди, бу ерда q ва L зарранинг электр заряди ва айланиш моменти ва B магнит майдон индукцияси. Ушбу эффект аксиал симметрик бўлган ихтиёрий конфигурациядаги магнит майдонда ишлайди. Протонлар электронга қараганда 10^{10} марта секин энергиясини йўқотиши кўрсатилди.

8. Райсснера-Нордстрем-де-Ситтер қора ўраси сояси ўлчами учун аналитик ифода олинди. Бу ифода ҳозирги ва келажакдаги интерферометрик кузатишларда қора ўранинг параметрлари учун лимитлар олишга ёрдам бериши мумкин, масалан, агар магнит майдони ёки бикрлик кучлари етарлича катта бўлганда, “Ҳодисалар горизонти” телескопи ёрдамида чегаравий қийматлар олиш мумкин. Айланувчи қора ўра атрофидаги плазманинг гравитацион линза эффектига, Фарадей кутбланиш текислигининг айланишига таъсири тадқиқ этилди.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE
OF DOCTOR OF SCIENCES DSc.27.06.2019.FM/T.33.01
AT THE INSTITUTE OF NUSLEAR PHYSICS, ASTRONOMICAL
INSTITUTE OF UZBEKISTAN ACADEMY OF SCIENCES,
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

ASTRONOMICAL INSTITUTE

TURSUNOV ARMAN ALTAYEVICH

**ASTROPHYSICAL PROCESSES IN BLACK HOLE ENVIRONMENT
AND HIGH-ENERGY COSMIC RAYS**

01.03.01- Astronomy

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2019

The theme of the dissertation of doctor of physical and mathematical sciences (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2019.1.DSc/FM133.

The doctoral (DSc) dissertation was carried out at the Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, English, Russian (synopsis)) languages on the website of the Scientific Council at the address of www.inp.uz and on the website of "Ziyonet" information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Ahmedov Bobomurat Juraevich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents:

Abishev Medeu Yerzhanovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
corresponding member of Kazakhstan National Academy
of Sciences

Mirtadjieva Karomat Takhirovna

doctor of physical and mathematical sciences, associate
professor

Olimov Khusnitdin Kosimovich

doctor of physical and mathematical sciences

Leading organization:

**Institute of Astronomy of the Russian Academy of
Sciences, Moscow**

The defense of the dissertation will be held on "____th" _____ 2019 at _____ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address:INP, Ulugbek settlement, 100124, Tashkent city. ph.: (+99871)289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (DSc) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the Institute of Nuclear Physics (registered under No.______). Address: INP, Ulugbek settlement, 100124, Tashkent city. ph.: (+99871) 289-31-19.

The Abstract of dissertation was distributed on "____" _____ 2019.
(Registry record No. _____ dated "____" _____ 2019.)

M.Yu. Tashmetov

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

E.M.Tursunov

Scientific Secretary of Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S.

I. Nuritdinov

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

INTRODUCTION (Annotation of doctoral dissertation)

Topicality and demand of the theme of dissertation. Nowadays there is a great interest to probe the nature of black holes. Black holes are fascinating astrophysical objects with extremely compact sizes and tremendous masses representing the modern physics in its beauty and extremes. Being the darkest cosmic objects, black holes are observed to be the most luminous, powerful and massive objects in the Universe, warping the spacetime and heating surrounding matter to enormous temperatures. Recent progress in development of observational and experimental facilities have enabled to provide both direct and indirect evidences of their presence in nature.

Recently there were the triumphal discoveries, which define the topicality of the subject of the dissertation. In April 2019 the first ever image of a black hole – extragalactic supermassive black hole located at the center of Meisser 87 galaxy, has been revealed by the Event Horizon Telescope (EHT) observing at mm wavelengths. In July 2018 unprecedented discovery of extragalactic high-energy neutrinos by IceCube Neutrino Observatory has been announced which enabled to pinpoint the source to blazar, which is a supermassive black hole (SMBH) at the distance of $\sim 1.75\text{Gpc}$ with relativistic jets directed almost exactly towards us. High-energy neutrinos can be produced in the hadronic interactions of primary high-energy cosmic rays with surrounding matter or photons. The origin and production mechanism of ultra-high-energy cosmic rays (UHECRs) still remains unclear. One of the first direct observations of material orbiting very close to a black hole, on the scales of few Schwarzschild radii, has been detected in May-July 2018 by GRAVITY instrument on the Very Large Telescope (VLT) of European Southern Observatory (ESO). New observations, carried out in the near-infrared K-band have shown the hot flares of gas revolving black hole at the center of Milky Way at about 30% of the speed of light, just outside its event horizon. The origin and nature of flares/hot spots around black hole remains under debate. The first successful test of Einsein's general theory of relativity (GR) on the scales of million-solar-mass compact objects has been announced by Gravity Collaboration in mid 2018 based on the observations of the motion of S2-star passing the massive black hole at the center of our Galaxy. The new observations have also enabled to derive the mass of the black hole M_* with the greatest precision, being of 4.14×10^6 of solar masses, which corresponds to the gravitational radius of $R_g = 2GM_* / c^2 = 1.22 \times 10^{12} \text{cm} \approx 10^{12} \text{cm}$. Starting 2015, advanced Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory have announced the numerous detection of gravitational waves made from the coalescence of black holes and neutron stars in close binary systems.

In our Republic, great attention is paid to the study of astrophysical processes in the vicinity of black holes. The directions of these fundamental research, which are of great importance for the development of science in our country, are connected with the Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017–2021 years. Over the last 20 years, relativistic

astrophysics of compact gravitational objects has been developed in our Republic. In particular, the energetic and optical properties of black holes, wormholes and naked singularities have been studied, the new effects of the general theory of relativity in relativistic astrophysics of neutron stars have been found, relativistic electrodynamics and the plasma magnetosphere of rotating compact objects have investigated, the natures of weakly radiating pulsars and the radioloud magnetars were clarified.

This dissertation work, to a certain extent, serves as an implementation of tasks in accordance with state normative documents, Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan PF-4947 "On the Strategy for the further development of the Republic of Uzbekistan" from February 7, 2017, as well as the "Road map of the main directions of structural reforms in Uzbekistan for 2019-2021", published by the government of the Republic of Uzbekistan on November 29, 2018.

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

Review of international scientific researches on dissertation subject. On the study of supermassive black holes and related effects, particles motion and electromagnetic fields around the black hole in external magnetic field it has been obtained a large number of original scientific results by leading scientific institutions and universities, including obtaining and study the properties of rotating black holes shadow in the framework of General Relativity and modified theories of gravity (University of Cologne, Max Planck Institute for Radio Astronomy, Max Planck Institute for Gravitational Physics – Albert Einstein Institute, Frankfurt University, Germany; Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Physics Research Laboratory, Tata Institute of Fundamental Research, India; the Centre for Applied Space Technology and Microgravity, Germany; Astronomical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow State University, Russia); it has been found the structure of the electromagnetic field around a rotating black hole and studied the equations of motion of charged particles around a rotating black hole in the presence of an external magnetic field (Astronomical Institute, Albert Einstein Center and the Silesian University in Opava, Czech Republic; University of Alberta, Canada; Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, India; Centre for Applied Space Technology and Microgravity and Oldenburg University, Germany); study of energetic processes in the vicinity of rotating black holes in the framework of General Relativity and alternative theories of gravity, in particular, study of the properties of space-time properties around a black hole in the gravity model of Horava have been carried out (Albert Einstein Center and Silesian University in Opava, Czech Republic; University of Alberta, Canada; Centre for Applied Space Technology and Microgravity, Germany).

The electromagnetic field configurations in the external asymptotically uniform magnetic field, as well as shadows of rotating black holes has been carried

out by the world's leading research centers and institutions of higher education, in particular, Astronomical Institute, Albert Einstein Center and the Silesian University in Opava (Czech Republic), the University of Alberta (Canada), the Max Planck Institute for Gravitational Physics – Albert Einstein Institute and the Frankfurt University (Germany), Inter-University Centre of Astronomy and Astrophysics, Research Laboratory of Physics and Tata Institute of Fundamental Research (India), the Centre for Applied Space Technology and Microgravity and the Oldenburg University (Germany), State Astronomical Institute named after Sternberg of Moscow State University, Joint Institute for Nuclear Research in Dubna (Russia), Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute and National University of Uzbekistan (Uzbekistan).

Currently, in order to study energetic processes in the vicinity of compact gravitational objects there have been carried out investigations in the world in a number of priority areas, including: theoretical and experimental studies of ultra-high-energy cosmic rays; origin of extragalactic high-energy neutrinos; efficient energy extraction from rotating black holes; observations of effects occurring around Galactic center black hole; theoretical modelling of electromagnetic fields around black holes and analysis of particle motion around these objects; study of energetic processes in the vicinity of rotating black holes in the presence of an external electromagnetic field.

Degree of study of the problem. Properties of matter surrounding astrophysical black hole, as well as the constraints on the black hole parameters has been investigated both theoretically and experimentally in many research centers around the world, for example in Germany (R. Ganzel, A. Eckart, A. Zensus, S. Britzen), Spain (R. Schoedel, B. Shahzamanian), Italy (R. Ruffini, C. Cremaschini), Czech Republic (Z. Stuchlik, J. Kolos), Russia (A. Zakharov, D. Gal'tsov), China (C. Bambi, A. Abdikamalov) and others. However, the effect of electromagnetic interaction of matter with black hole on the constraints of black hole parameters or characteristics of accretion flow has not been properly studied.

Among detectors of ultra-high-energy cosmic rays one can highlight two largest cosmic ray observatories, such as the Telescope Array on the northern hemisphere and Pierre Auger Observatory on the southern hemisphere. Apart from the observational study of UHECRs, there are various theoretical and semi-phenomenological models attempting to describe the origin and mechanism of their formation. One can mention the groups in USA (Fly's Eye collaboration), Antarctica (Ice Cube collaboration), Germany (R. Engel, K. Mannheim) among others. However, still the origin and mechanism of the formation of the highest energy cosmic rays are not properly understood. Moreover, the connection of UHECRs with the immediate region of supermassive black holes are not yet discussed.

The properties of the electromagnetic field around rotating Kerr black hole immersed into external homogeneous magnetic field, the investigation of the dynamics of charged particles revolving a rotating black hole in the presence of an external field, particles collisions and decays in the vicinity of a Kerr black hole

have been investigated and discussed by many scientists, such as e.g. from the UK (R. Wald et al.), the USA (M. Banados, et al.), Russia (D.V. Gal'tsov, et al.), Canada (V. Frolov, et al.), Turkey (Aliev, N. Ozdemir), Uzbekistan (A. Abdujabbarov, B. Ahmedov), and many others. However, a detailed study of the energy extraction mechanisms in ultra-efficient regime has not been previously mentioned, as this findings was first announced by me and my colleagues. The investigation of these effects leads to explanation of various important phenomena observed in cosmic rays, relativistic jets, quasars, etc.

Shadow of a black holes in both vacuum and plasma cases with the various additional parameters of the central object, sometimes, extraordinary and physically unjustified parameters, have been studied by many scientists, including those from Japan (K. Maeda, K. Hioki), Germany (A. Grenzebach, V. Perlick, C. Laemmerzahl), Uzbekistan (A. Abdujabbarov, B. Ahmedov, F. Atamurotov), Argentina (E. Eiroa, L. Amarilla), Czech Republic (J. Schee, Z. Stuchlik), Russia (G. Bisnovaty-Kogan, O. Tsupko) and many others. However, all these works being of analytical solutions are oversimplified and should not be applied in realistic observations, have been carried out in the framework of particular choice of solutions of compact objects and it does not exist a formalism describing shadows of black holes independent from the choice of the model of black holes and gravity theories.

Connection of the topic of dissertation with the scientific works of scientific research organizations, where the dissertation was carried out. The dissertation was done in the framework of the scientific projects of the Ulugh Beg Astronomical Institute, Uzbekistan Academy of Sciences: VA-FA-F-2-008 “Astrophysical Processes in Stationary and Dynamic Relativistic Gravitation Objects” (2017-2020); VA-FA-F-2-008a “Relativistic astrophysics of isolated black holes in tight binary systems containing black holes” (2017-2020), YFA-FTECH-2018-8 “Particles and strong gravitational and electromagnetic fields in the vicinity of compact objects in relativistic astrophysics” (2018-2019); Belorussian-Uzbek project MRB-AN-2019-29 “Modelling of compact astrophysical objects and correlation of their observational characteristics with parameters of the telescope RT-70 and Russian orbital telescope Gamma-400” (2019-2021).

The aim of the research is the investigation of electromagnetic properties of astrophysical black holes and surrounding matter, as well as the application of results to the description of various observed phenomena, such as ultra-high-energy cosmic rays, relativistic jets, black hole shadow, etc.

The tasks of the research:

to analyse the charged and neutral particles motion, collisions and decays around rotating black holes in the presence of an external magnetic field;

to study the electromagnetic fields in curved spacetimes;

to develop a new model for the ultra-high-energy cosmic rays produced in close vicinity of astrophysical black holes;

to make a comparative analysis of the predictions of the model of UHECRs

with observational data;

to determine the influence of an inhomogeneous plasma to the form of rotating black hole shadow;

to discuss the reinterpretation of observational data by taking into account the electromagnetic interactions of black holes and matter in the frame of given model;

to apply theoretical results to particular black hole candidates, including supermassive black hole at the center of the Galaxy.

The objects of the research are rotating black holes immersed into external magnetic fields and such candidates as SgrA*, M87, NGC1052 and similar objects including blazars.

The subjects of the research are the mechanisms of energy extraction from black holes in astrophysical conditions; electromagnetic properties of realistic black holes; electromagnetic radiation of matter in the regime of strong gravity; characteristics of plasma around compact objects and shadow of black hole surrounded by plasma.

The methods of the research. Phenomenological modelling of the properties of various high-energy astrophysical phenomena by means and methods of mathematical apparatus of general relativity combined to electrodynamics and numerical simulations of realistic processes by solving nonlinear differential equations for matter and fields.

The scientific novelty of the research is in the following:

for the first time a small charge associated with the black hole Sgr A* at the center of the Milky Way has been constrained with the uppermost limit of $Q_{SgrA*} \sim 10^{15} C$ and new effect of orbital widening in the vicinity of magnetized black holes has been found.

for the first time it has been shown that the plasma surrounding Sgr A* is relativistic and magnetized, which leads to the charge separation in a plasma. It has been found that the net charge number density of plasma surrounding Sgr A* is $10^{-5} cm^{-3}$, while the plasma number density is of order $10^{7 \pm 1} cm^{-3}$.

it has been shown that it is unlikely to detect a bright star in the innermost $R=1500$ Schwarzschild radii from Sgr A*, although stellar fly-by at highly-eccentric orbit is possible.

a novel mechanism for the production of ultra-high-energy cosmic rays (UHECRs) by extracting the energy from supermassive black holes has been suggested. It has been shown that proton's energy can naturally exceed 10^{20} eV for supermassive black hole of $10^9 M_{\odot}$.

it has been shown for the first time that the energy of escaping proton in the most efficient regime of energy extraction from the Galactic center Sgr A* black hole is of order $10^{15.5}$ eV, which coincides with the knee of the cosmic ray energy spectra, where the flux of particles shows significant decrease.

new analytical expressions for the shadow sizes of the RNdSD black holes has been obtained.

gravitational deflection in a plasma surrounding rotating gravitational

objects and Faraday rotation of polarization plane has been studied for the first time and the expression for the lensing angle in the case of a strongly non-uniform plasma surrounding rotating compact object has been derived.

Practical results of the research are as follows:

novel mechanism which suggests supermassive black holes as sources of ultra-high-energy cosmic rays (UHECRs) provides verifiable constraints on the mass, distance and magnetic field of the UHECR source.

novel observational test proposed for determination of the black hole charge will be possible to perform in the near future by the new generation of X-ray telescopes.

it has been shown that unscreened charge of a black hole can effectively mimic the spin parameter of the black hole up to 60% of its maximal value, which is reflected in considerable shift of the innermost stable circular orbits for charged particles.

new expressions for the gravitational lensing in a plasma and the shadow of black holes may be used to constrain parameters of two black hole candidates, M87 and Sgr A* and surrounding plasma based on the data from the Event Horizon Telescope.

Reliability of the research results is provided by the following: use of methods of general theory of relativity (GR) and the theoretical physics, highly efficient numerical methods and codes; most of the figures were plotted on Wolfram Mathematica software. Careful tests of a consistence of the obtained theoretical results with available observational data and results from other scientists are performed; conclusions are well consistent with the main provisions of the field theory of gravitational compact objects.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the research results is determined by the ability of the developed formalism in the dissertation to analyse the electromagnetic fields of astrophysical black holes, energy extraction mechanisms from astrophysical black holes and determination of black holes shadow obtained by a new generation of radiotelescopes in the near future, and get an information on the various parameters and properties of the supermassive black holes at the centers of galaxies. In addition, future X-ray observations at the galactic center of the bremsstrahlung surface brightness could provide tight constraints on the presence of electric charge of the black hole, which plays crucial role in acceleration mechanisms around supermassive black holes, related to AGNs, quasars etc.

The practical significance of the results of research lies in the fact that they can be used to obtain estimates of black holes of different parameters such as mass, spin, orientation, charge and magnetic field. Results can also be useful for the analysis of the nature and dynamics of the gravitational field, in the development of observational experiments and criteria for the detection and identification of compact black hole alternatives.

Application of the research results. Based on the study of astrophysical phenomena and processes in the vicinity of black holes and high-energy cosmic

rays:

results of the parameters of SMBH Sgr A* in the center of our galaxy and plasma dynamics in its vicinity have been used in the SFB-956 project of the German Science Foundation and programs funded from the structural funds of the European Union and the Polish Science Center to test the theory of gravity in a strong field regime (letter from Center for Theoretical Physics of the Polish Academy of Sciences dated July 8, 2019). The results were used to obtain restrictions on the electric charge of Sgr A*;

the results on the study of the electromagnetic properties of supermassive black hole in the center of our galaxy were used by foreign researchers (cited in refereed scientific journals *Physical Review D*, 2018, 2019; *International Journal of Modern Physics D*, 2019; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019) to study the interaction of interstellar space and the neighborhood of a black hole in the center of the Galaxy, as well as to test the predictions of the theory of gravity of Hordesky in the case of a black hole with electric charge;

study on the energy properties of black holes, realistic methods of electromagnetic extraction of the rotational energy of black holes, and high-energy processes were used to carry out projects of the Indian Inter-University Grant Committee (letter from Indian Inter-University Grant Committee dated June 15, 2019), as well as foreign researchers (cited in refereed scientific journals *Physics of the Dark Universe*, 2019; *The European Physical Journal C*, 2019; *Physical Review D*, 2019; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019). The results were generalized for the case of extracting the energy of black holes in brane by colliding particles in the ergosphere. In addition, the results were used to obtain the limiting values of the parameters of astrophysical compact candidates;

the motion of charged particles around a magnetized black hole, as well as the corresponding quasi-periodic oscillations were used in the work of foreign colleagues (cited in scientific journals *Physical Review D*, 2019; *International Journal of Modern Physics D*, 2019; *The European Physical Journal C*, 2019; *Physics of The Dark Universe*, 2019; *The Astrophysical Journal*, 2018) for determining the mass, spin and magnetic fields of some microquasars and stellar-mass black holes;

studies on the optical properties of black holes in plasma were used to carry out projects funded from the State budget of the Czech Republic, in particular, registered under number SGS/12/2019, as well as by foreign researchers (cited in foreign scientific journals *Physical Review D*, 2018, 2019; *Astrophysics and Space*, 2016; *The European Physical Journal C*, 2018, 2019; *International Journal of Modern Physics D*, 2018; *Modern Physics Letters A*, 2018; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016) for obtaining many new results, such as effects of gravitational lensing in plasma, shadows of black holes in plasma, in Einstein's theory of gravity, and in alternative theories of gravity.

Approbation of the research results. The research results were reported in the form of reports and tested at 8 international and local scientific conferences.

Publication of the research results. On the dissertation theme there were

published 22 scientific works, including 12 scientific papers in international scientific journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing basic scientific results of doctoral theses.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion and a bibliography. The size of the dissertation is 216 pages.

THE MAIN CONTENTS OF THE DISSERTATION

In the introduction the topicality and relevance of the dissertation theme were justified, the aims and objectives were formulated, the scientific novelty and the practical results of the study were set out, the reliability of the obtained results was proved and their theoretical and practical significance were disclosed, a summary of the application of the research results and the structure of the dissertation were given.

The first chapter of the thesis entitled “**Electrodynamics of black hole magnetospheres**” is devoted to the study of electromagnetic characteristics of astrophysical black holes. It starts from the manifestation of the *Kerr black hole hypothesis*, which pronounces that an astrophysical black hole can be well characterized solely by two parameters, namely its mass M and spin a . However, according to the *no-hair theorem*, there can exist the third black hole parameter, electric charge arising from Einstein-Maxwell equations for rotating charged mass. The charge parameter of a black hole is usually set explicitly equal to zero, which is well justified by quick discharge of any net charge of a black hole due to selective accretion of a plasma matter surrounding any astrophysical black hole. However, as any astrophysical black hole is always embedded into external magnetic field, twisting of magnetic field lines due to the frame dragging of effect in the vicinity of a rotating black hole induces electric field in both vacuum and plasma cases. It posits a net quadrupole charge on the black hole, which appears to be dynamically important. This charge is weak in the same sense as magnetic field, i.e. its stress-energy tensor does not alter spacetime metric. Thus the assumption of the Kerr hypothesis is well founded and spacetime metric in the standard form given in the Boyer-Lindquist coordinates reads

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma}\right) dt^2 - \frac{4Mr a \sin^2 \theta}{\Sigma} dt d\phi + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \left(r^2 + a^2 + \frac{2Mr a^2}{\Sigma} \sin^2 \theta\right) \sin^2 \theta d\phi^2, \quad (1)$$

where $\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$ and $\Delta = r^2 - 2Mr + a^2$. Physical singularity occurs at the ring $r = 0, \theta = \pi/2$. The roots of $\Delta = 0$ define outer and inner horizons located at

$$r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}. \quad (2)$$

It is the outer horizon which is referred as the event horizon $r_+ \equiv r_H$. The geometry is characterized by existence of the two Killing vectors, timelike, $\delta/\delta t$ and spacelike, $\delta/\delta\phi$, indicating the corresponding conserved quantities, energy E and angular momentum L.

It is natural to assume that external magnetic field would also share symmetries of stationarity and axial symmetry of Kerr spacetime. This assumption can be described using the Killing equation $\xi_{\alpha;\beta} + \xi_{\beta;\alpha} = 0$, so the solution for electromagnetic field takes the form

$$A^\mu = C_1 \xi_{(t)}^\mu + C_2 \xi_{(\phi)}^\mu, A_t = \frac{B}{2}(g_{t\phi} + 2ag_{tt}), A_\phi = \frac{B}{2}(g_{\phi\phi} + 2ag_{t\phi}). \quad (3)$$

One can notice that rotation of black hole generates quadrupole electric field given by A_t which is the result of twisting of magnetic field lines. Last two equations in (3) are obtained for the asymptotically uniform magnetic field. However, electric field due to induced charge appears in arbitrary magnetic field configuration around arbitrary axially symmetric black hole.

The first chapter continues with the general relativistic description of the electromagnetic radiation-reaction force acting on a test charged particle revolving black hole in the presence of external magnetic field. In many astrophysically relevant scenarios, one cannot neglect the effects of radiation reaction due to the synchrotron radiation of charges near black holes, which are believed to be immersed into an external magnetic field. Resulting equation of motion of a charged particle in a curved spacetime reads

$$\begin{aligned} \frac{Du^\mu}{d\tau} = & \frac{q}{m} F_{\nu}^{\mu} u^\nu + \frac{2q^2}{3m} \left(\frac{D^2 u^\mu}{d\tau^2} + u^\mu u_\nu \frac{D^2 u^\nu}{d\tau^2} \right) \\ & + \frac{q^2}{3m} (R_{\lambda}^{\mu} u^\lambda + R_{\lambda}^{\nu} u_\nu u^\lambda u^\mu) + \frac{2q^2}{m} f_{tail}^{\mu\nu} u_\nu, \end{aligned} \quad (4)$$

where in the last term, the tail integral is given by

$$f_{tail}^{\mu\nu} = \int_{-\infty}^{\tau-0^+} D^{[\mu} G_{+\lambda}^{\nu]}, (z(\tau), z(\tau')) u^{\lambda'} d\tau'. \quad (5)$$

Here u^μ is the four-velocity of the particle with charge q and mass m . The tensor of electromagnetic field is $F_{\mu\nu} = A_{\nu,\mu} - A_{\mu,\nu}$, where A_μ is the four-vector potential of external electromagnetic field. R_{ν}^{μ} is the Ricci tensor, $G_{+\lambda}^{\mu}$ is the retarded Green's function, and the integration is taken along the worldline of the particle z , i.e., $u^\mu(\tau) = dz^\mu(\tau)/d\tau$. The Ricci term is irrelevant, as it vanishes in the vacuum metrics, while the tail term can be neglected for elementary particles, as shown in the dissertation. In particular, for electrons the ratio of the "tail" force

and the “gravitational” force at the horizon of a black hole of 10 solar masses is of the order of 10^{-19} . Thus, the motion of electrons and protons in the vicinity of astrophysical black holes can be well described by the covariant form of the Lorentz-Dirac equation (LD). However, the Lorentz-Dirac equation contains the Schott term – the third order derivative of coordinate, which leads to the appearance of pre-accelerating solutions in the absence of external forces. We have shown that one can effectively reduce the order of the equation by substituting the third order terms by derivatives of the external force. This is identical to imposing Dirac’s asymptotic condition $\left. \frac{Du^\mu}{d\tau} \right|_{\tau \rightarrow \infty} = 0$. Then, the resulting equation of motion reads

$$\frac{Du^\mu}{d\tau} = \frac{q}{m} F_\nu^\mu u^\nu + \frac{2q^2}{3m} \left(F_{\beta;\mu}^\alpha u^\beta u^\mu + \frac{q}{m} (F_\beta^\alpha F_\mu^\beta + F_{\mu\nu} F_\sigma^\nu u^\sigma u^\alpha) u^\mu \right), \quad (6)$$

where semicolon denotes the covariant coordinate derivative.

Equation (6), which is in fact the covariant form of the Landau-Lifshitz equation (LL), is a habitual second order differential equation that satisfies the principle of inertia and does not contain runaway solutions. We integrate both LD and LL equations numerically and obtain identical results. Computational ways of integration of dynamical equation (6) and corresponding analyses of trajectories were presented in the dissertation. In particular, it was shown that for equatorial motion of a charged particle depending on the orientation of external Lorentz force, the final fate of the particle is either collapse to the black hole or stable circular orbit, i.e., the radiation reaction force leads to decay of any oscillations around equilibrium radius. Moreover, it was shown that the radiation reaction force leads to decreasing of the order of chaoticity around magnetized black hole, which leads to several important consequences, such as the formation of the accretion disk, observed in variety of cosmic objects. We have also derived the cooling timescale for charged particle with mass m and charge q , moving around black hole of mass M and magnetic field B . Inserting all constants, the cooling timescale of radiating charged particle is given by

$$\tau_{cooling} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right)^{-1} \frac{3m^3 c^5}{2q^4 B^2}. \quad (7)$$

In this case the Lorentz force is dominant over gravitational “force” which happens in realistic settings as discussed in the dissertation. Closer to black hole the cooling timescale increases. In Table 1 we give typical cooling timescales of electrons, proton and fully ionized iron nuclei for various values of magnetic field.

Table 1

Typical cooling times of electrons τ_e , protons τ_p and fully ionized iron nucleus τ_{Fe} for various values of magnetic field strength B .

| B (Gauss) | τ_e (s) | τ_p (s) | τ_{Fe} (s) |
|------------------|--------------|--------------|-----------------|
| 10^{12} | 10^{-16} | 10^{-6} | 10^{-5} |
| 10^8 | 10^{-8} | 10^2 | 10^3 |
| 10^4 | 1 | 10^{10} | 10^{11} |
| 1 | 10^8 | 10^{18} | 10^{19} |
| 10^{-4} | 10^{16} | 10^{26} | 10^{27} |

Due to cubic dependence on mass, electrons cool 10^{10} times faster than protons. One can compare the cooling timescale with an orbital timescales of particles at ISCO $\tau_{orb} = 4\pi r_{isco} / c$, which is of order of $\sim 10^{-3}$ s for non-rotating stellar mass black holes or $\approx 10^5$ s for supermassive black holes. Thus, the energy loss can be quite relevant especially in case of lighter particles, such as electrons.

The rate of the energy loss of a charged particle can be calculated directly from the time component of the equation of motion. Skipping over details, one can write for uniform magnetic field configuration

$$\frac{dE}{d\tau} = -K_1 E^3 + K_2 E x(\tau), \quad (8)$$

where $K_1 = 4kB^2$ and $K_2 = 2kB$ are constants and $x(\tau) = 2kBf(\tau) + u^\phi(\tau)/r(\tau)$. The analytical solution of this equation can be found in the form

$$E(\tau) = \frac{E_i e^{K_2 X(\tau)}}{\left(1 + 2K_1 E_i^2 \int_0^\tau e^{2K_2 X(\tau')} \tau' d\tau'\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

where $X(\tau) = \int_0^\tau x(\tau) d\tau$.

Integrating equations of motion numerically, the new effect of *radiative orbital widening* has been found. Radiation reaction acting on a charged particle moving at a stable circular orbit of a magnetized black hole can lead to the shift of the orbital radius outwards from the black hole. The effect causes increase of the energy and angular momentum of the particle measured by an observer at rest at infinity. It has been shown that “widening” of such orbits is independent from the field configuration, however, it appears only in the cases with the external Lorentz force acting outwards from the black hole. This condition corresponds to $qLB > 0$, where q and L are the charge and angular momentum of the particle and B is intensity of the external magnetic field. Representative view of the effect of radiative orbital widening is given in Figure 1.

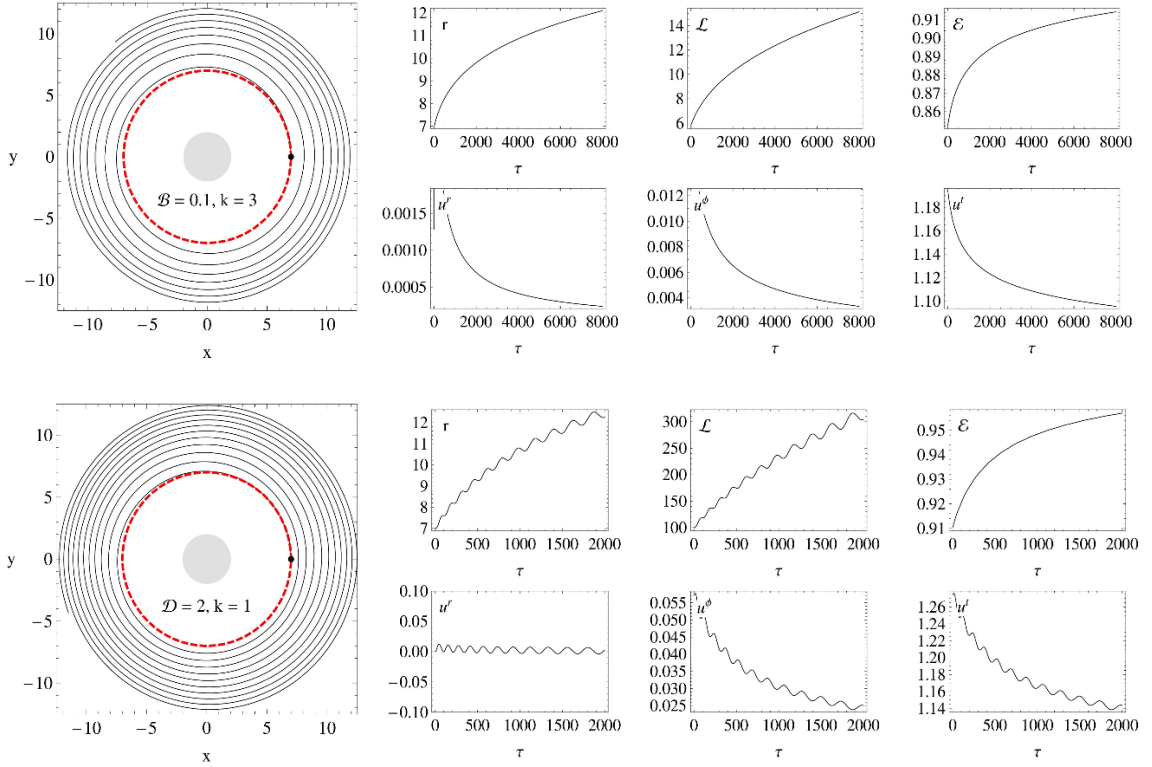


Figure 1: Radiative widening of circular orbit of a charged particle around black hole in uniform (top) and dipole (bottom) magnetic field with corresponding evolutions of orbital radius, angular momentum, energy and different components of velocity of the particle. Starting point on the trajectory is indicated by black dot. The trajectory without radiation is shown by dashed red circle.

Actual escape of the charged particle from the black hole in the equatorial plane fixed by magnetic field implies that the potential energy of the charged particle increases while the kinetic energy always decreases. Defined as the ratio between gained energy to the final energy at infinity ($E_\infty = mc^2$), the efficiency of orbital widening depends on the position of ISCO, which is a function of the magnetic field strength for the charged particles. Since the ISCO of a charged particle can be located very close to the event horizon, the maximal efficiency can reach the values up to 100% .

However, 100% efficiency is unreachable, since it would require the ISCO to be located at the black hole horizon and $B \rightarrow \infty$. In the absence of magnetic fields, the formal efficiency of the inverse mechanical process of shifting the particle orbit from infinity to the ISCO is 5.7% . One needs to note that in realistic scenarios the effect of radiative widening of orbits is many orders of magnitude slower than the orbital timescales. However, in some astrophysical scenarios with large magnetic fields this effect can be potentially relevant.

The second chapter of the thesis entitled **“Supermassive black hole at the center of the Milky Way”** is devoted to study of the central region of Milky Way and the closest to us supermassive black hole SgrA*. The chapter starts from the description of the relativistic environment of the Galactic center and review of the most recent results obtained with state of the art instruments, which provide sensitive measurements at their highest angular resolution. The chapter continues with the realistic constraints on the charge of the Galactic centre black hole based

on various methods and models, namely the accretion of charged constituents of plasma and the induction mechanism based on a rotating SMBH in the external magnetic field. Summary of results on the constraints on the electric charge of SgrA* is given in the Table 2.

All the upper limits on the electric charge presented in Table 2 are at least ten orders of magnitude below the maximum charge and hence the spacetime metric is not affected. However, the dynamics of charged particles is significantly affected by even these small values and can be observationally tested via the change in the bremsstrahlung brightness profile. Therefore, in the dissertation, novel observational test of the black hole charge has been proposed. Another important characteristics of black holes in accretion theory is the location of the innermost stable circular orbit (ISCO). In case of like-charges (e^- , $Q.<0$ or p^+ , $Q.>0$) the ISCO can be shifted from the distance $r=3r_s$ up to $r=1.83r_s$, which can effectively mimic the spin with the value of $a_* = 0.64$. This should be taken into account in the models of spin determination of Sgr A*.

Table 2

Various constraints on the electric charge of the SMBH at the Galactic centre.

| Process | Limit | Notes |
|---------------------------------|--|-----------------|
| Mass difference between p and e | $Q_{eq} = 3.1 \times 10^8 \left(\frac{M.}{4 \times 10^6 M_{\odot}} \right) C$ | stable charge |
| Accretion of protons | $Q_{max}^+ = 6.16 \times 10^8 \left(\frac{M.}{4 \times 10^6 M_{\odot}} \right) C$ | unstable charge |
| Accretion of electrons | $Q_{max}^- = 3.36 \times 10^5 \left(\frac{M.}{4 \times 10^6 M_{\odot}} \right) C$ | unstable charge |
| Magnetic field & SMBH rotation | $Q_{ind}^{max} = 10^{15} \left(\frac{M.}{4 \times 10^6 M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{B_{ext}}{10G} \right) C$ | stable charge |
| Extremal SMBH | $Q_{max}^{theor} = 6.86 \times 10^{26} \left(\frac{M.}{4 \times 10^6 M_{\odot}} \right) \sqrt{1-a_*^2} C$ | uppermost limit |

The chapter continues with the investigation of the Galactic center by analysis of the properties and dynamics of flaring hot-spots orbiting SgrA*. Recently, near-infrared GRAVIY@ESO observations at $2.2\mu m$ have announced detection of three bright “flares” in the vicinity of the Galactic center black hole that exhibited orbital motion at the radius about 6-11 gravitational radii of $4.14 \times 10^6 M_{\odot}$ black hole. The origin and nature of flares/hot spots still remains unclear. Despite many speculations, they are most likely connected to dynamical changes in the hot, magnetized accretion flow. As transient phenomena, they could originate from magnetohydrodynamic instabilities or magnetic reconnection events as is the case of X-ray flares on the Sun.

On the other hand, the relativistic motion of a plasma in the presence of

magnetic field leads to the charge separation in a plasma and consequent grow of its net charge density. This charge rises in a compensation of an electric field in the co-moving frame induced by the motion of a plasma in external magnetic field. Partially ordered magnetic field in the vicinity of Sgr A* has been estimated with the strength of 10 - 100G. Observations of horizontal polarization loops with the timescales comparable to the orbital periods of the recently observed bright flares imply the direction of magnetic field lines perpendicular to flares' orbital plane. This may indicate that the hot spots associated with flares orbiting at the relativistic orbits can possess net electric charge due to charge separation in a plasma. Therefore, we investigated the effect of electromagnetic interaction on the properties and dynamics of flare components around SgrA*.

Taking into account the error bars of the measurement arising mainly due to astrometric errors and incomplete orbital coverage we put constraints on the strength of the Lorentz force, electric charges of hot spots and net charge densities. In particular the obtained constraints on the charge of the flare components is 10^{13-16} C. This corresponds to the net charge number density of a plasma of order 10^{-5} cm⁻³, while the plasma number density is of order 10^{6-8} cm⁻³. The electromagnetic effects on the hot-spot dynamics were previously not taken into account. In particular, we addressed how the electromagnetic field can affect the measuring of the spin of Sgr A*. Similar situation may occur if the black hole possess small non-vanishing electric charge, which can be induced due twisting of magnetic field lines due to black hole rotation. Results of the orbital fit with proposed model are presented in the Figure 3.

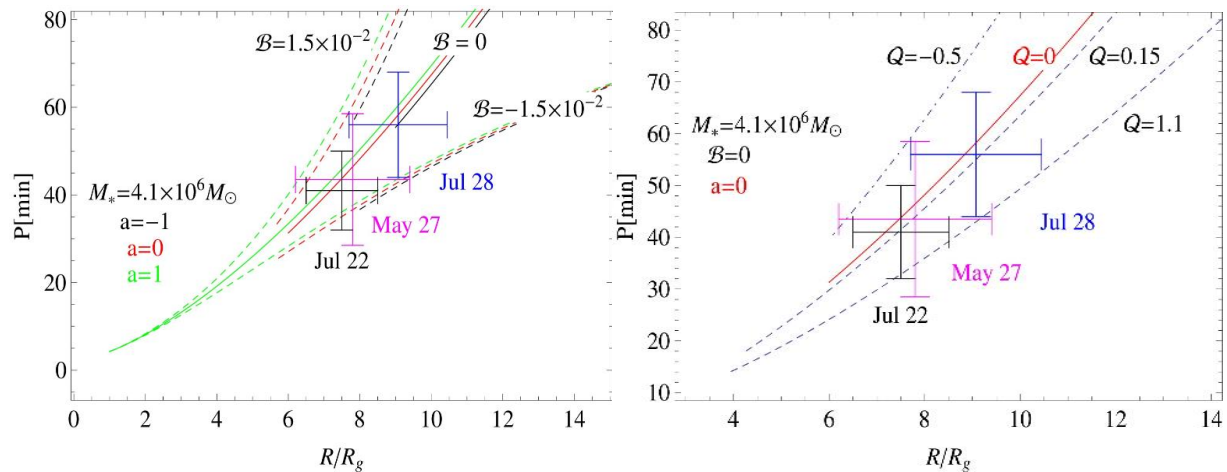


Figure 2: Left: Orbital period - radius relations of three flares observed by GRAVITY on July 22 (black), May 27 (pink) and July 28 (blue) fitted with the charged hot-spot orbiting around Kerr black hole of mass $4.14 \times 10^6 M_{\odot}$ immersed into external magnetic field oriented perpendicular to the orbital plane. Case $B=0$ (solid lines) corresponds to the pure Kerr black hole case, while $B = \pm 1.5 \times 10^{-2}$ denotes the ratio of the Lorentz force to the gravitational force. The mid value of all three flares correspond to the value of parameter $B = -3 \times 10^{-3}$. Right: same for black hole with small induced charge.

The chapter continues with the investigation of the stellar fly-by close to the Galactic centre black hole. The Galactic centre Nuclear Star Cluster is one of the densest stellar clusters in the Galaxy. The stars in its inner portions orbit the

supermassive black hole Sgr A* at the orbital speeds of several thousand km/s. The B-type star S2 is currently the best case to test the general relativity as well as other theories of gravity based on its stellar orbit. Yet its orbital period of $\sim 16\text{yr}$ and the eccentricity of ~ 0.88 yields the relativistic pericentre shift of $\sim 11'$, which is observationally still difficult to reliably measure due to possible perturbations as well as reference-frame uncertainties. A naive way to solve this problem is to find stars with smaller pericentre distances, $r_p \approx 1529$ Schwarzschild radii (120AU), and thus more prominent relativistic effects. In this part of the chapter we have shown that to detect stars on relativistic orbits is progressively less likely given the volume shrinkage and the expected stellar density distributions. Finally, one arrives to a sparse region, where the total number of bright stars is expected to fall below one. One can, however, still potentially detect stars crossing this region. We have also provided a simple formula for the detection probability of a star crossing a sparse region and examined an approximate time-scale on which the star reappears in the sparse region, i.e. a “waiting” time-scale for observers.

The third chapter of the thesis entitled “**Black holes as sources of ultra-high-energy cosmic rays**” is devoted to formulation of the novel, ultra-efficient regime of the electromagnetic energy extraction from rotating black holes and its application for the explanation of ultra-high-energy cosmic rays. The chapter starts from the key points of the black hole thermodynamics and review of the works related to the energy extraction mechanisms.

One of the most interesting properties of the Kerr black hole geometry is the existence of direct analogy between event horizon area A_H of a black hole with thermodynamical entropy S_H , which implies that a black hole of mass M and spin a has irreducible energy,

$$E_{irr} = \sqrt{\frac{S_H \hbar c^5}{4\pi G k_B}} \equiv \sqrt{\frac{A_H}{16\pi G^2}} c^4 = \frac{Mc^2}{\sqrt{2}} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{M}\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

For extremally rotating black hole this is 71% of its total energy, while the rest of 29 % is the rotational energy and is thus available for extraction. For stellar mass black holes this energy is of order 10^{63} eV, while for supermassive black holes of mass $M = 10^9 M_\odot$ it is of order 10^{74} eV making them the largest energy reservoirs in the Universe. It is therefore most pertinent to tap this enormous source most effectively and ultra efficiently. Following analysis of the decay of infalling particle into two fragments near rotating black hole we have classified three regimes of energy extraction from rotating black hole as low, moderate and ultra. The efficiency of the process is defined as ratio of extracted to infalling energy.

The process under investigation is called magnetic Penrose process (MPP). In the absence of magnetic field, MPP turns to original Penrose process giving its lower limit with the maximum efficiency 20.7%, corresponding to extremally rotating black hole. If all particles are charged the efficiency reduces to the expression

$$\eta_{MPP}^{mod.} = \frac{q_3}{q_1} - 1. \quad (11)$$

This is the moderate regime of MPP, which can operate, as we see, when $q_3 > q_1$, thus neutralizing gravitationally induced electric field of black hole. MPP in moderate regime has direct analogy with another famous process, namely Blandford-Znajek mechanism (BZ). In both cases, the driving engine is a quadrupole electric field of a black hole that arises due to twisting of magnetic field lines by the frame-dragging effect. It is important to note, that the efficiency of BZ and moderate regime of MPP cannot grow ultra-large due to natural restrictions of global plasma neutrality surrounding black hole. In moderate regime, MPP approximates to BZ and that explains why ultra-high efficiency has not been observed in numerical simulations of the process.

There exists as well the third and the most efficient regime of MPP, which requires special attention leading to several important predictions. If the infalling particle is neutral splitting into two charged fragments, the dominant contribution in efficiency is due to

$$\eta_{MPP}^{ultra} \approx \frac{q_3}{m_1} A_t. \quad (12)$$

For elementary particles, such as electrons and protons, ratio q/m is very large, which makes the efficiency to grow to enormous values. This causes MPP to turn ultra regime imparting ultra-high energy to escaping particle. It appears that efficiency exceeds 100% already for magnetic field of order of Gauss. In case of electrons, same happens already for milliGauss fields. The important point to be noted is that electromagnetic interaction effectively expands ergosphere beyond the geometric bound, $r=2M$. That is negative energy orbits are available in much enlarged region that goes on to enhance efficiency and overall working of the process.

One of the fascinating applications of MPP in ultra regime is the explanation of the origin and production mechanism of ultra-high-energy cosmic rays (UHECR). These are the most energetic among particles detected on Earth, with energy $E > 10^{18}$ eV unreachable by current most powerful particle accelerators as LHC with maximum energy $\sim 10^{13}$ eV per beam. There are extragalactic charged particles with mixed composition, although previous cosmic ray fluorescence measurements have demonstrated proton dominated flux. Spectrum of cosmic rays demonstrate the presence of so-called knees and ankle. The cosmic rays with energy up to $\sim 10^{15.5}$ eV (knee) are generally believed to be produced in Galactic supernova explosions, while significant lowering of flux between knee and $10^{18.5}$ eV (ankle) suggests change of source of such particles. Though several studies suggested extragalactic origin of cosmic rays with energy exceeding $10^{15.5}$ eV, the origin of cosmic rays with energies between knee and ankle is still under debate.

In order to explain the highest-energy cosmic rays several exotic scenarios have been proposed including extra dimensions, violation of Lorentz invariance, existence of new exotic particles etc. Among the astrophysical acceleration mechanisms for UHECRs, the relativistic shocks in a plasma of relativistic jets has been previously considered as the most plausible. The recent results and estimates indicate that shock acceleration is not able to account for protons with energies

above 10^{20} eV. In addition, in realistic situations unavoidable interaction losses of UHECRs with matter and light reduce the energies of primaries significantly. Therefore, the production and acceleration mechanisms of UHECRs remain unclear.

Table 3

Maximum efficiency of magnetic Penrose process and corresponding energy extraction regime for some typical radioactive decay modes in the vicinity of a black hole of mass $10M_{\odot}$ with the spin parameter $a = 0.8M$ and magnetic field of strength 10^4 G, aligned along the rotation axis. Initial energy of decaying particle is of order of its rest mass, $m_X c^2$. In case of the pair production the energy of photon is taken to be $E_{\gamma} = 2m_e c^2$ with recoil term neglected for simplicity.

| Decay mode | Generic equation | Escaping particle | Efficiency η_{\max} | Regime of MPP |
|-------------------|---|-------------------|--------------------------|--------------------|
| α decay | ${}^A_z X^0 \rightarrow {}^{A-4}_{z-2} Y^{2-} + {}^4_2 \alpha^{2+}$ | Y | <0 | - |
| | | α | $2824/A$ | ultra |
| | ${}^A_z X^+ \rightarrow {}^{A-4}_{z-2} Y^- + {}^4_2 \alpha^{2+}$ | Y | <0 | - |
| | | α | ~ 1 | moderate |
| | ${}^A_z X^- \rightarrow {}^{A-4}_{z-2} Y^{3-} + {}^4_2 \alpha^{2+}$ | Y | ~ 2 | moderate |
| | | α | <0 | - |
| β^- decay | ${}^A_z X^0 \rightarrow {}^A_{z+1} Y^+ + e^- + \bar{\nu}$ | Y | $1412/A$ | ultra |
| | | e^- | <0 | - |
| | | $\bar{\nu}$ | 0.06 | low |
| β^+ decay | ${}^A_z X^+ \rightarrow {}^A_{z-1} Y^0 + e^+ + \nu$ | Y | <0 | - |
| | | e^+ | ~ 0 | low ² - |
| | | ν | <0 | - |
| γ emission | ${}^A_z X^0 \rightarrow {}^A_z X'^0 + {}^0_0 \gamma^0$ | X' | 0.06 | low |
| | | γ | 0.06 | low |
| Pair production | $\gamma^0 \rightarrow e^- + e^+$ | e^- | <0 | - |
| | | e^+ | 2.6×10^6 | ultra |

We demonstrated that extraction of rotational energy of a black hole by novel, ultra-efficient regime of the magnetic Penrose process (MPP) could indeed foot the bill for UHECRs. In order to qualitatively estimate the energy of escaping cosmic ray particle we choose the external magnetic field to be asymptotically homogeneous with the strength B. In general, magnetic field has complicated structure in vicinity of black hole horizon, however in a small fraction of a space where split occurs one can always consider field to be approximately uniform. Applying MPP to the neutron beta-decay in vicinity of a SMBH, we get energy of the escaping proton after the beta-decay determined by the relation

$$E_p = 1.33 \times 10^{20} eV \left(\frac{q}{e} \right) \quad (13)$$

predicting energy of escaping proton E_p exceeding 10^{20} eV for $M=10^9 M_\odot$ and $B=10^4 G$. Notable point of the model is that it does not require extreme or rapid rotation of the black hole, in spite of the fact that the black hole rotation is of essential and crucial requirements. Above described process can be generalized to arbitrary decay mode. In the Table 3 we classify the efficiency of energy extraction in different regimes for various typical radioactive decay modes.

We have tested the process of acceleration of UHECRs numerically. In the Figure 3, the results of the numerical simulations are presented. Noticeable result is the increase of energy of escaping particle over 50 times in comparison with energy of infalling particle. In realistic situations the energy gain can exceed 10^{10} due to large values of the dimensionless parameter $B = \frac{qGBM}{mc^4}$, which is of order 10^{11} for protons and 10^{14} for electrons around SMBH of mass $10^9 M_\odot$ and magnetic field of strength $10^4 G$.

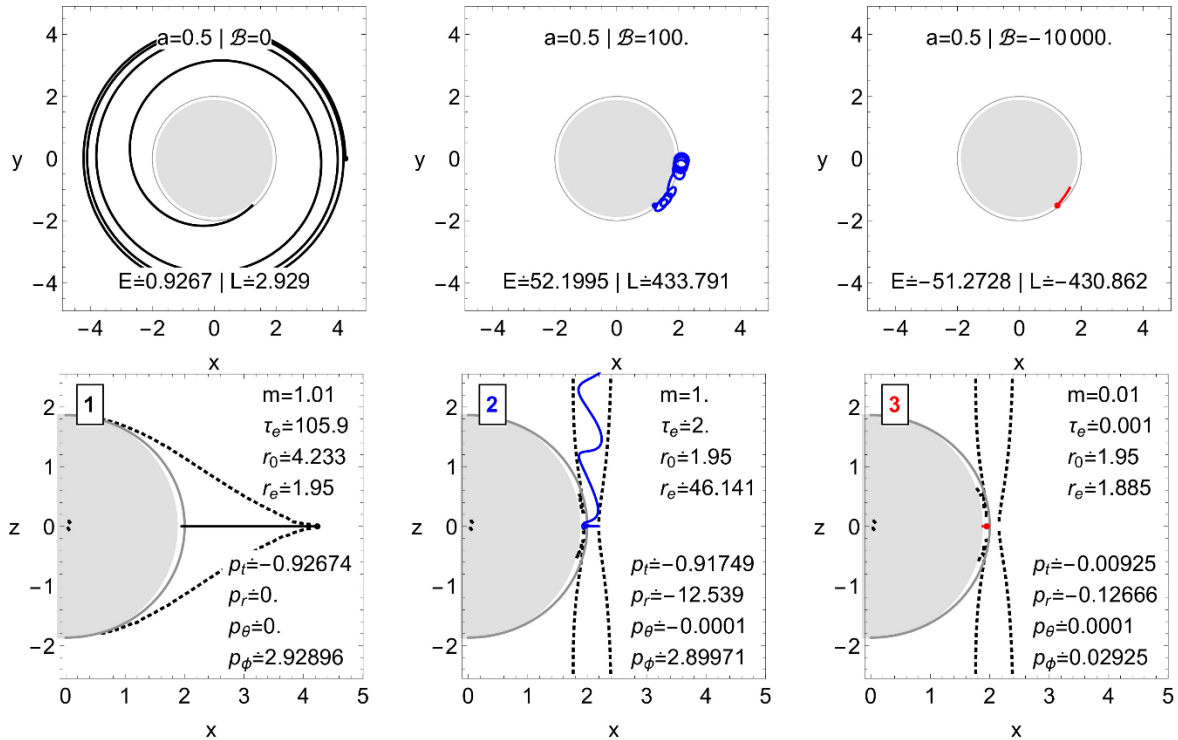


Figure 3: Simulation of neutral particle split (black thick curve) into two charged particles (blue and red curves) in the ergosphere of rotating black hole (space between grey disk and circle) immersed into external magnetic field. Dashed lines represent particle energetic boundary.

The presented effect of production of ultra-high energy particles due to neutral particle ionization is independent from the configuration of magnetic field. More important is the existence of A_t component of electromagnetic field, which naturally arises due to black hole rotation in arbitrary magnetic field. Although the configurations with open field lines could seem more promising for particle's escape, once the particle is accelerated to ultra relativistic velocities it may cross the field lines and escape from black hole with corresponding deflections. Testing MPP for various magnetic field configurations (uniform, dipole and split

monopole) one can conclude that the total energy of escaping particle is nearly same for any field configuration, while the direction of escape varies. For uniform magnetic field all escaping particles (with slightly different initial conditions) are collimated maximally, while for radial magnetic fields of monopole character the charged particles (in various numerical setups) escape black hole isotropically. In addition one can note that initial energy and angular momentum of incident neutral particle do not play significant role in the acceleration of its charged fragments.

In Figure 4, we plot the energy of escaping proton after neutron beta-decay in dependence on magnetic field and the black hole spin.

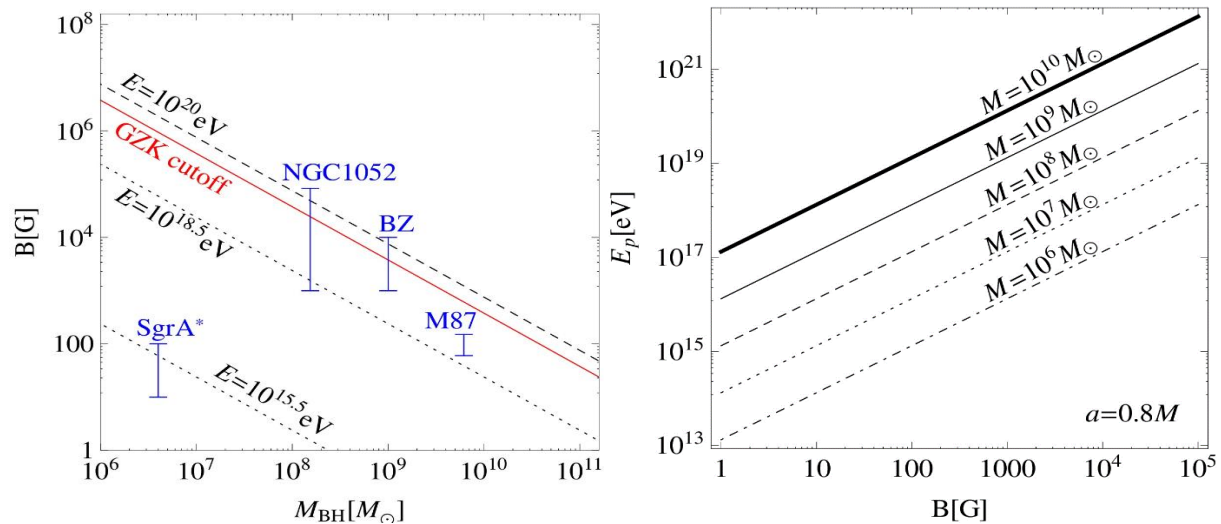


Figure 4: Left: the constraints on the black hole’s mass and magnetic field to accelerate protons with various energies: 10^{20} eV (dashed), GZK-cutoff $10^{19.7}$ eV (solid), ankle $10^{18.5}$ eV (dotted) and knee $10^{15.5}$ eV. Blue vertical bars correspond to SMBH candidates, such as SgrA*, M87 and NGC 1052 with the constraints obtained from observations. The source marked as BZ corresponds to SMBH with mass $10^9 M_\odot$ and magnetic field $10^3 - 10^4$ G, consistent with Blandford-Znajek model of relativistic jets. Right: energy of a proton after neutron beta-decay in dependence on magnetic field (right) various values of the SMBH’s mass, respectively.

The presence of magnetic field along trajectory of primary cosmic rays can lead to synchrotron radiation reaction and corresponding energy loss, especially in the source regions where magnetic fields can be considerably large. We have shown that electrons loose their energies 10^{10} times faster than protons. Therefore, for typical SMBH with magnetic field of 10^4 G order the primary cosmic rays are more plausibly protons or ions, while the decay timescales of electrons are extremely short to be able to escape from the vicinity of SMBH. On the other hand, in the case of neutron star (sometimes suggested as UHECRs source), whose magnetic field is typically above 10^{12} G, the timescale of synchrotron energy loss is extremely short even for protons and ions, so cosmic rays are not able to escape sufficiently far from neutron star preserving energy ultra-high.

In addition to GZK-cutoff and synchrotron emission the UHECRs may loose major parts of their energies in interactions with astrophysical background matter, which is especially dense in the SMBH environments. In this case various scenarios could be involved. Kinematics of the process shows that the UHECR produced in MPP escapes along the magnetic field lines due to chaotic scattering at

the corresponding effective potential. However, field lines can be broken due to magnetic reconnection events occurring in a strong gravity regime, which can lead the direction of escape of primary cosmic rays out of the dense accretion disk and jet dominated regions. On the other hand, UHECRs resulting the ultra-efficient MPP can be part of jets and combined effects of accelerations by MPP and relativistic shocks in jets could be applied. MPP in this case can play a role of supporting engine in the various models of UHECRs acceleration by relativistic shocks in a plasma jets. UHECRs produced in MPP can also be tracers of secondary cosmogenic messengers, such as high-energy neutrinos and gamma rays.

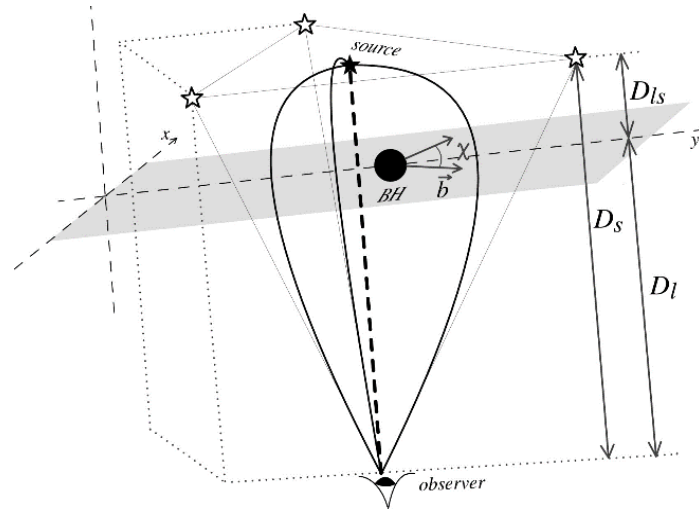


Figure 5: The background source, which is indicated as black star is lensed by the central black hole. D_s is the distance between observer (below) and the source (star). D_{ls} is the distance from the lens (black hole) to the source. D_l is the distance between observer and lens. χ represents the inclination angle between the projection of the vector J to xy plane and vector b . Schematic representation of the gravitating lensing

The fourth chapter of the thesis entitled “**Optical properties and shadow of black holes**” is devoted to study of the gravitational lensing and shadow of black holes in the presence of plasma and influence of the black hole charge on the shadow image. The chapter starts from the state of the art review on the works related to the topic and general description of the gravitational lensing by rotating black hole immersed into plasma. In particular, the effect of amplification of brightness and the Faraday rotation of the plane of polarization of light propagating through plasma has been investigated and the deflection angle of light by lensing object in a plasma has been calculated for the first time. Schematic representation of the gravitating lensing system is shown in the Figure 5.

Further, in the chapter, geodesic equations in the Reissner-Nordstrom de-Sitter dyon spacetime are found. Critical impact parameters for photon geodesics separate capture and scattering regions and the parameters characterize shadow sizes (radii). Analytical expressions for the shadow radii and critical values of relevant parameters have been found and discussed. Results can be represented in the Figure 6.

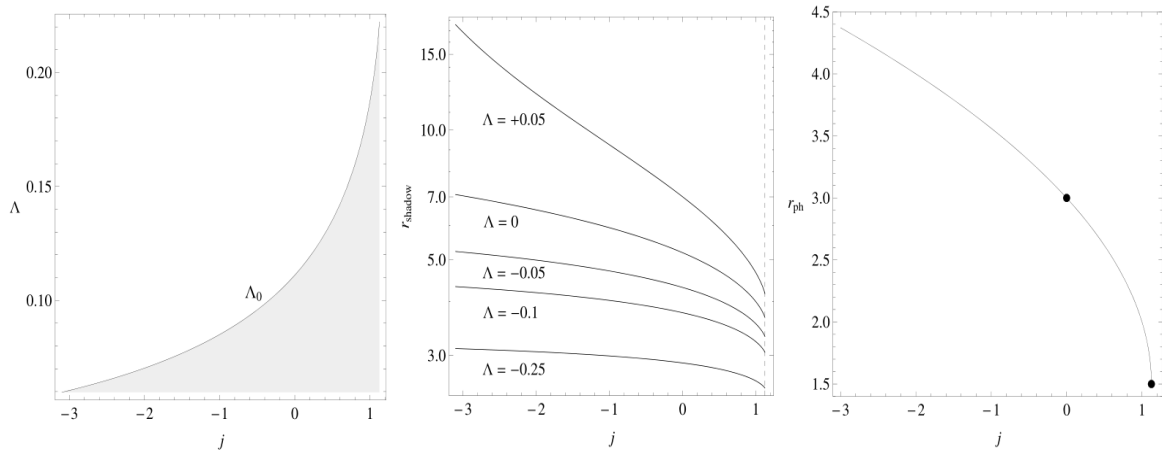


Figure 6: Left: dependence of the critical value of cosmological constant Λ_0 , for which the radius of a shadow diverges, on the charge parameter $j = Q^2 + P^2$, where $Q \wedge P$ are the dyon charge parameters of a black hole. The region where the shadow can exist $\Lambda < \Lambda_0$ is shaded. Middle: shadow radius in dependence on the parameter j for different values of Λ . The critical value of $j = 9/8$ is dashed. Right: dependence of radius of photon orbit on the parameter j . The minimal value of photon orbit ($r_{\text{ph}}=1.5$ for $j = 9/8$) and Schwarzschild limit ($r_{\text{ph}}=3$ for $j = 0$) are marked by black points.

In order to obtain results, two different approaches have been used, namely, the method of “multiple roots” and the “effective potential approach”. Both lead to identical results. The expressions may be used to constrain parameters of black hole candidates with current and future interferometric observations, for instance with the Event Horizon Telescope in the case if magnetic or tidal charge is significant. Since we considered a spherically symmetric metric, the shadow shape is circular, distribution of bright spots around shadows could violate the symmetry due to different reasons, for instance due to an asymmetry of an accretion flow.

CONCLUSION

Below we list the main results and predictions of the dissertation work being of astrophysical relevance.

1. It has been shown that the black hole at the center of the Galaxy possesses stable unshielded electric charge with an upper limit of $Q \approx 10^{15}C$, which does not have an influence on the spacetime metric. A novel test based on the observed flattening and decrease of the surface brightness profile of the thermal bremsstrahlung inside the innermost 10^5 Schwarzschild radii has been proposed. According to Chandra X-ray data detecting a weak indication of the drop in the brightness profile at $R_{\text{proj}} \approx 0.4''$, an observational upper limit on the charge of SgrA* has been obtained as $Q_{\text{SgrA}^*} \approx 3 \times 10^8 C$.

2. It has been shown that unshielded charge of a black hole can effectively mimic the spin parameter of the black hole up to 60% of its maximal value, which is reflected in considerable shift of the innermost stable circular orbits for charged particles. Thus, the models estimating the spin of a black hole may require

reconsideration due to arising underdetermination in the measurements of the spin.

3. New, electromagnetic properties of bright flare components orbiting SgrA*, detected by GRAVIY instrument in May-July 2018 have been analyzed. In particular, it has been shown that a plasma surrounding SgrA* is relativistic and magnetized, which leads to the charge separation in plasma. The net charge number density of plasma surrounding Sgr A* is estimated by order 10^{-5}cm^{-3} , while the plasma number density is of order $10^{7\pm 1} \text{cm}^{-3}$.

4. A simple formula for the detection probability of a star crossing a sparse region of Galactic center, where the total number of bright stars is expected to fall below one has been derived. It has been shown that it is unlikely to detect a bright star in the innermost $R=1500$ Schwarzschild radii from Sgr A*, although stellar fly-by at highly-eccentric orbit is possible.

5. The original ultra-efficient mechanism of acceleration of ultra-high-energy cosmic rays has been proposed, based on the energy extraction from rotating black holes. Applying the magnetic Penrose process to the radioactive decays and ionizations of ions it has been shown that proton's energy can naturally exceed 10^{20} eV for supermassive black hole of $10^9 M_{\odot}$ and magnetic field of 10^4 G. This gives constraints on UHECRs source parameters, such as mass, distance and magnetic field.

6. Applied to the Galactic center supermassive black hole Sgr A* the energy of escaping proton has been obtained by order $10^{15.5}$ eV, which coincides with the knee of the cosmic ray energy spectra, where the flux of particles shows significant decrease. The sharpness of the knee energy spectra may indicate the existence of a single source at knee energy level. The results are confirmed numerically by the simulation of the ionization in the vicinity of rotating black hole immersed into external magnetic field. It was shown that the process is almost independent of the magnetic field configuration.

7. New effect of orbital widening in the vicinity of magnetized black holes has been found. Radiation reaction force can shift the circular orbits of charged particles outwards from the black hole, which may occur in the case with repulsive Lorentz, i.e. when $qLB > 0$, where q and L are charge and angular momentum of the particle and B is intensity of magnetic field. The effect operates in magnetic fields sharing the symmetries of background spacetime. It has been shown that synchrotron radiation loss of relativistic electrons is of $\sim 10^{10}$ times faster than for protons.

8. New analytical expressions for the shadow sizes of the black holes with nonzero charge and cosmological constant have been derived. The expressions may be used to constrain parameters of these black holes with current and future interferometric observations, for instance with the Event Horizon Telescope. The influence of a plasma on the gravitational lensing and Faraday rotation of the plane of polarization in case of highly nonuniform plasma surrounding compact object has been investigated.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2019.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ,
АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, НАЦИОНАЛЬНОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ТУРСУНОВ АРМАН АЛТАЕВИЧ

**АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОКРЕСТНОСТИ
ЧЕРНЫХ ДЫР И КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

01.03.01 – Астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ (DSc)
ДОКТОРА ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора (DSc) физико-математических наук зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2019.1.DSc/FM133.

Диссертация выполнена в **Астрономическом институте Академии наук Республики Узбекистан.**

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

| | |
|-------------------------------|--|
| Научный консультант: | Ахмедов Бобомурат Жураевич доктор физико-математических наук, профессор |
| Официальные оппоненты: | Абишев Медеу Ержанович доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент НАН РК Миргаджиева Каромат Тахировна доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Олимов Хуснитдин Косимович доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник |
| Ведущая организация: | Астрономический институт Российской академии наук, Москва |

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2019 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел.: (+99871) 289–31–41; факс: (+99871)289–36–65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (зарегистрирована за № ____). Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, НУУз. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2019 г.
(Реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2019 г.).

М. Ю. Ташметов
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Э.М.Турсунов
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

И. Нуриддинов
председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской диссертации (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире астрофизические процессы в окрестности черных дыр привлекают большое внимание многих ученых. Черные дыры – это экзотические астрофизические объекты с чрезвычайно компактными размерами и огромными массами, представляющие современную физику в ее чрезвычайно экстремальных условиях. Будучи самыми темными космическими объектами, черные дыры считаются самыми яркими, мощными и массивными объектами во Вселенной, деформирующими пространство–время и нагревающими окружающую среду до огромных температур. Прогресс в разработке современных наблюдательных и экспериментальных установок позволил предоставить как прямые, так и косвенные доказательства их существования в природе.

В настоящее время в мире ведущими исследователями сделан ряд важных открытий, связанных с темой диссертации и определяющих ее актуальность и востребованность. В апреле 2019 года в сотрудничестве с телескопом «Горизонт событий» (ЕНТ) было обнаружено первое в истории изображение черной дыры – внегалактической сверхмассивной черной дыры (СМЧД), расположенной в центре эллиптической галактики М87 на длине волны 1,3 мм. В июле 2018 года было объявлено о беспрецедентном открытии внегалактических нейтрино высоких энергий в антарктической нейтринной обсерватории IceCube, которое позволило определить источник как блазар, представляющий собой СМЧД на расстоянии $\sim 1,75$ Гпк с релятивистскими струями, направленными в сторону Земли. В мае–июле 2018 года впервые проводились прямые наблюдения движения вещества, вращающегося в непосредственной близости к черной дыре Стрелец А* (SgrA*) в центре Млечного Пути. Наблюдения, проведенные в ближней инфракрасной области спектра группой GRAVITY на очень большом телескопе (VLT) Европейской южной обсерватории (ESO), показали, что компоненты горячих вспышек движутся со скоростью около 30% от скорости света. Первая успешная проверка общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна в режиме сильного гравитационного поля вокруг СМЧД в центре нашей Галактики объявлена в середине 2018 года на основе наблюдений за движением звезды S2. Также, начиная с 2015 года LIGO (лазерная интерферометрическая обсерватория гравитационных волн) объявила о обнаружении десятков случаев регистрации гравитационных волн от слияния черных дыр и нейтронных звезд в тесных двойных системах.

В нашей Республике уделяется большое внимание изучению астрофизических процессов в окрестности черных дыр. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны, связаны со Стратегией¹ действий по дальнейшему

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

развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг. За последние 20 лет в Республике развита релятивистская астрофизика компактных гравитационных объектов, исследованы энергетические и оптические свойства черных дыр, кротовых нор и голых сингулярностей, найдены эффекты общей теории относительности в релятивистской астрофизике нейтронных звезд, развита релятивистская электродинамика и плазменная магнитосфера вращающихся намагниченных релятивистских объектов, прояснена природа частично излучающих пульсаров и радиотихих магнитаров.

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

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Исследованиями сверхмассивных черных дыр и связанных с ними наблюдательных эффектов, в частности изучением динамики вещества и электромагнитных полей вокруг черных дыр, гравитационным линзированием и исследованием свойств теней черных дыр, занимаются ведущие научно-исследовательские центры и высшие учебные заведения, такие как Институт физики Кельнского университета (Германия), Институт радиоастрономии общества Макса Планка (Германия), Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе (США), Институт астрофизики в Андалузии (Испания), Институт гравитационной физики общества Макса Планка – Институт Альберта Эйнштейна (Германия), Франкфуртский университет (Германия), Межуниверситетский центр астрономии и астрофизики (Индия), Институт фундаментальных исследований им. Тата (Индия), Центр прикладных космических технологий и микрогравитации (Германия); Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга (Россия), Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова (Россия), Университет Фудань (Китай), Астрономический институт АН РУз (Узбекистан) и другие.

По исследованию космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) сделан ряд важных научных открытий на мировом уровне. Например, изучение анизотропии направлений движения детектируемых космических лучей, с помощью Обсерватории Пьера Оже (Аргентина) и Антенной решётки Аллена (США) показали внегалактическую природу возникновения

КЛСВЭ с энергий выше $10^{18.5}$ эВ. Так как поток частиц КЛСВЭ очень мал, был предложен новый способ детектирования частиц с помощью мобильных устройств, таких как, например, смартфоны, использующих полупроводниковую технологию КМОП. Проект реализуется коллаборацией Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory (CREDO – Чрезвычайно распределенная обсерватория космических лучей), в которую входит автор представленной диссертации, а также коллектив ученых из 13 стран и 22 научных учреждений и университетов, таких как Институт ядерной физики Польской академии наук (Польша), Силезский университет в Опаве (Чехия), Университет им. Я.А.Коменского (Словакия), Канзасский университет (США), Объединённый институт ядерных исследований (Россия), Массачусетский технологический институт (США) и другие.

Свойствами электромагнитных полей вокруг вращающихся черных дыр, а также теоретическим описанием вращающихся черных дыр занимаются ведущие мировые исследовательские центры и высшие учебные заведения, в частности, Центр Альберта Эйнштейна (Чехия), Силезский университет в Опаве (Чехия), Университет Альберты (Канада), Центр теоретической физики (Польша), Астрономический институт Академии наук Республики Узбекистан и другие.

В настоящее время для изучения энергетических процессов в окрестности компактных гравитационных объектов в мире проводятся исследования в ряде приоритетных областей, в том числе теоретические и экспериментальные исследования состава и происхождения космических лучей сверхвысоких энергий и внегалактических высокоэнергетических нейтрино, поиск способов эффективного извлечения энергии из вращающихся черных дыр и объяснение релятивистских струй из черных дыр, наблюдения за эффектами, происходящими вокруг черной дыры Галактического центра, теоретическое моделирование электромагнитных полей вокруг черных дыр и анализ движения частиц вокруг этих объектов, изучение энергетических процессов в окрестности вращающихся черных дыр при наличии внешнего магнитного поля.

Степень изученности проблемы. Свойства вещества, окружающего астрофизическую черную дыру, а также ограничения на параметры черной дыры были исследованы теоретически и экспериментально многими учеными, например, германскими (Р. Ганцель, А. Экарт, А. Зенсус, С. Бритзен), испанскими (Р. Шодел, Б. Шахзаманян), итальянскими (Р. Руффини, К. Кремаскини, М. Тессаротто), чешскими (З. Стухлик, Я. Колош), российскими (А. Захаров, Д. Гальцов), американскими (А. Гез), китайскими (К. Бамби, А. Абдикамалов) и др. Однако, влияние электромагнитного взаимодействия вещества с черной дырой на наблюдаемые свойства компактных кандидатов и окружающего аккреционного потока должным образом не изучено.

Среди лучших современных детекторов космических лучей сверхвысоких энергий можно выделить две крупнейшие обсерватории

космических лучей, такие как массив телескопов в северном полушарии и Обсерватория Пьера Оже в южном полушарии. Помимо наблюдательного исследования КЛСВЭ, существуют различные теоретические и полуфеноменологические модели, пытающиеся описать происхождение и механизм их формирования. Можно упомянуть группы в США (коллорабация Fly's Eye), Антарктиде (коллорабация IceCube), Германии (Р. Энгель, К. Манхайм) и др., которым удалось описать наблюдаемые события КЛСВЭ в рамках экзотических моделей. Тем не менее, до сих пор происхождение и механизмы формирования космических лучей сверхвысоких энергий не совсем понятны. Более того, возможное происхождение КЛСВЭ в непосредственной близости черных дыр еще не обсуждалось.

Свойства электромагнитного поля вокруг вращающейся черной дыры Керра, погруженной во внешнее однородное магнитное поле, исследование динамики заряженных частиц вращающейся черной дыры при наличии внешнего поля, столкновения и распада частиц в окрестности черной дыры Керра были исследованы и обсуждены многими учеными, среди которых выделяются, например, английские (Р. Вальд, Р. Блендфорд, Р. Пенроуз), американские (М. Банадос и др.), российские (Д. В. Гальцов и др.), канадские (В. Фролов и А. Шум), узбекистанские (Б. Ахмедов, А. Абдужаббаров и др.), турецкие (А. Алиев и Н. Оздемир) и многие другие. Однако подробное изучение механизмов извлечения энергии в сверхэффективном режиме ранее не упоминалось, так как эти результаты были впервые объявлены автором диссертации в его работах. Исследование этих эффектов приводит к объяснению различных важных явлений, наблюдаемых в космических лучах, релятивистских джетах, квазарах и т.д.

Тень черных дыр как в вакуумных, так и в плазменных конфигурациях с различными дополнительными параметрами центрального объекта, включая параметры альтернативных теорий, изучалась многими учеными, в том числе японскими (К. Маеда и К. Хиоки), германскими (А. Grenzebach, V. Perlick, C. Laemmerzahl, L. Rezzolla и др.), узбекистанскими (Б. Ахмедов, А. Абдужаббаров, Ф. Атамуротов и др.), аргентинскими (Е. Eiroa, L. Amarilla), чешскими (J. Schee, Z. Stuchlik), российскими (Г. Бисноватый-Коган, О. Цупко) и многими другими. Однако остается неясным вопрос о степени применимости полученных аналитических и численных результатов к реалистичной среде горячей плазмы вокруг конкретных кандидатов в черные дыры.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертация выполнена в рамках научных проектов Астрономического института Академии наук Республики Узбекистан ВА-ФА-Ф2-008 «Астрофизические процессы в стационарных и динамических объектах релятивистской гравитации» (2017–2020); ВА-ФА-Ф2-008а «Релятивистская астрофизика изолированных черных дыр в тесных

двойных системах, содержащих черные дыры» (2017–2020), ЁФА-АТех-2018-8 «Частицы и сильные гравитационные и электромагнитные поля в окрестности компактных объектов в релятивистской астрофизике» (2018–2019); Белорусско-узбекского проекта MRB-AN-2019-29 «Моделирование компактных астрофизических объектов и корреляции их наблюдательных характеристик с параметрами телескопа РТ-70 и российского орбитального телескопа Гамма-400» (2019–2021).

Целью исследования является изучение электромагнитных свойств и энергетических характеристик астрофизических черных дыр и окружающего вещества, а также применение результатов к описанию ряда наблюдаемых явлений, таких как космические лучи высоких энергий, релятивистские выбросы плазмы черными дырами, тени черных дыр и т.д.

Задачи исследования:

анализ движения, столкновения и распада заряженных и нейтральных частиц в окрестности вращающихся черных дыр в присутствии внешнего магнитного поля;

изучение электромагнитных полей в криволинейных координатах;

разработка модели для описания космических лучей сверхвысоких энергий, возникающих в непосредственной близости астрофизических черных дыр;

проведение сравнительного анализа предсказаний предлагаемой модели КЛСВЭ с данными наблюдений;

изучение влияния неоднородной плазмы на форму тени вращающейся черной дыры;

обсуждение реинтерпретации наблюдательных данных при учете электромагнитного взаимодействия черной дыры и вещества в рамках существующих моделей;

применение теоретических результатов к конкретным кандидатам черных дыр, в том числе к сверхмассивной черной дыре SgrA* в центре Галактики.

Объектом исследования являются вращающиеся черные дыры во внешнем магнитном поле и такие кандидаты, как SgrA*, M87, NGC1052 и блазары.

Предметом исследования являются механизмы извлечения энергии из черных дыр в астрофизических условиях; электромагнитные свойства реалистичных черных дыр, электромагнитное излучение вещества в режиме сильной гравитации, характеристики плазмы вокруг компактных объектов и тени черной дыры, окруженной плазмой, а также связанные с ними наблюдательные данные.

Методы исследования. Феноменологическое моделирование свойств различных высокоэнергетических астрофизических процессов методами математического аппарата общей теории относительности в сочетании с электродинамикой и численным моделированием реалистичных процессов путем решения нелинейных дифференциальных уравнений для вещества и

полей.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые получено предельное значение величины электрического заряда сверхмассивной черной дыры Sgr A* в центре Млечного Пути с верхним пределом $Q_{SgrA*} \approx 10^{15} Кл$, который может имитировать эффект спина черной дыры;

впервые показано, что плазма, вращающаяся вокруг сверхмассивной черной дыры SgrA*, является релятивистской и намагниченной, что приводит к разделению зарядов в плазме с плотностью избыточных зарядов $10^{-5} см^{-3}$, тогда как полная плотность частиц в плазме имеет порядок $10^{7\pm 1} см^{-3}$;

показана маловероятность обнаружения ярких звезд на расстояниях ближе 1500 радиусов Шварцшильда от черной дыры Sgr A*, однако облет звезд на таких расстояниях возможен на высокоэксцентричных орбитах;

предложен новый ультра-эффективный механизм ускорения космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) путем извлечения энергии из сверхмассивных черных дыр. Впервые показано, что энергия вылетающего протона может превышать 10^{20} эВ для сверхмассивной черной дыры массой $10^9 M_{\odot}$;

впервые показано, что энергия вылетающего протона из окрестности черной дыры Sgr A* в центре Галактики достигает порядка $10^{15.5}$ эВ, что совпадает с коленом энергетического спектра космических лучей, где поток частиц значительно уменьшается;

получены новые аналитические выражения для размеров теней черных дыр Райсснера–Нордстрема с космологическим параметром;

впервые исследованы гравитационное отклонение в плазме, окружающей вращающиеся гравитационные объекты, и вращение плоскости поляризации Фарадея и получено выражение для угла линзирования в случае сильно неоднородной плазмы, окружающей вращающийся компактный объект.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан новый механизм ускорения космических лучей сверхвысоких энергий, накладывающий проверяемые ограничения на массу, расстояние и магнитное поле черной дыры – ускорителя;

предложен новый наблюдательный способ измерения заряда черной дыры в рентгеновском диапазоне, основанный на наблюдаемом сглаживании и снижении профиля поверхностной яркости тормозного излучения на расстоянии до 10^5 радиусов Шварцшильда Sgr A*;

показано, что ненулевой заряд черной дыры может эффективно имитировать параметр спина до 60% от его максимального значения, что отражается в значительном смещении ближайшей стабильной круговой орбиты для заряженных частиц;

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечивается тем, что в работе использовались методы общей теории

относительности (ОТО) и теоретической физики, включая высокоэффективные численные методы и программы, проводилась тщательная проверка соответствия полученных теоретических результатов с имеющимися экспериментальными данными наблюдений и результатами других ученых, а также тем, что выводы диссертационной работы хорошо согласуются с основными положениями теории поля гравитационных компактных объектов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования определяется способностью разработанного в диссертации формализма анализировать электромагнитные поля астрофизических чёрных дыр и механизмы извлечения энергии из астрофизических чёрных дыр, определения тени чёрных дыр, полученных с помощью радиотелескопов нового поколения, что необходимо для получения информации о различных параметрах и свойствах сверхмассивных черных дыр в центрах галактик. Кроме того, будущие рентгеновские наблюдения яркости тормозного излучения в Галактическом центре могут обеспечить наблюдательные ограничения на наличие электрического заряда чёрной дыры, играющего решающую роль в механизмах ускорения вокруг сверхмассивных чёрных дыр, связанных с AGN, квазарами и т.д.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что их можно использовать для получения оценок параметров черных дыр, таких как масса, спин, ориентация, заряд и магнитное поле. Результаты могут быть полезны для анализа природы и динамики гравитационного поля, при разработке наблюдательных экспериментов и критериев обнаружения и идентификации альтернатив компактных чёрных дыр.

Внедрение результатов исследования. На основе исследования астрофизических явлений и процессов в окрестности черных дыр и космических лучей высоких энергий:

результаты по параметрам сверхмассивной черной дыры SgrA* в центре нашей галактики и динамики плазмы в ее окрестности были использованы в рамках проекта SFB-956 немецкого научного фонда и программ, финансируемых из структурных фондов Европейского Союза и Польского научного центра, для проверки теории гравитации в режиме сильного поля (письмо Центра теоретической физики Польской академии наук от 8 июля 2019 года). Использование научных результатов позволило получить ограничения на электрический заряд SgrA*;

предложенный новый ультраэффективный механизм ускорения космических лучей сверхвысоких энергий путем извлечения энергии из сверхмассивных черных дыр был использован зарубежными исследователями (Physical Review D, 2018, 2019; International Journal of Modern Physics D, 2019; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2019) для изучения взаимодействия межзвездного пространства и окрестности черной дыры в центре Галактики. Использование научных результатов

позволило проверить предсказания теории гравитации Хорндески в случае наличия у такой черной дыры электрического заряда;

результаты по исследованию энергетических свойств черных дыр, реалистичных способов электромагнитного извлечения вращательной энергии черных дыр, а также высокоэнергетических процессов были использованы в рамках программ Межуниверситетского комитета грантов (письмо Индийского Межуниверситетского комитета грантов от 15 июня 2019 года), а также зарубежными исследователями (ссылки в иностранных научных журналах *Physics of the Dark Universe*, 2019; *The European Physical Journal C*, 2019; *Physical Review D*, 2019; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019) для получения предельных значений параметров астрофизических компактных кандидатов. Использование научных результатов позволило обобщить данные для случая извлечения энергии бранных черных дыр путем столкновения частиц в эргосфере;

полученные новые аналитические выражения для размеров теней черных дыр Райсснера–Нордстрема с космологическим параметром были использованы зарубежными исследователями (*Physical Review D*, 2019; *International Journal of Modern Physics D*, 2019; *The European Physical Journal C*, 2019; *Physics of the Dark Universe*, 2019; *The Astrophysical Journal*, 2018). Использование научных результатов позволило определить движение заряженных частиц вокруг намагниченной черной дыры, а также соответствующие им квази-периодические осцилляции для определения массы, спина и магнитных полей некоторых микроквazarов и черных дыр звездных масс;

полученное выражение для угла линзирования в случае сильно неоднородной плазмы, окружающей вращающийся компактный объект, были использованы в рамках государственного проекта Чешской Республики № SGS/12/2019, а также зарубежными исследователями (ссылки в иностранных научных журналах *Physical Review D*, 2018, 2019; *Astrophysics and Space*, 2016; *The European Physical Journal C*, 2018, 2019; *International Journal of Modern Physics D*, 2018; *Modern Physics Letters A*, 2018; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016) для исследования оптических свойств черных дыр в плазме. Использование научных результатов позволило получить множество новых результатов, таких как эффекты гравитационного линзирования в плазме, теней черных дыр в плазме, как в теории гравитации Эйнштейна, так и в альтернативных теориях гравитации.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, в том числе 12 научных статей в международных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем составляет 216

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме докторской диссертации «Астрофизические процессы в окрестности черных дыр и космические лучи высоких энергий», представлены следующие выводы:

1. Установлен верхний реалистичный предел электрического заряда черной дыры в центре Млечного Пути $Q \approx 10^{15} Кл$, не влияющий на геометрию пространства–времени. Предложен новый способ измерения заряда черной дыры при помощи наблюдений в рентгеновском диапазоне. На основе данных телескопа Чандра, демонстрирующих снижение профиля яркости тормозного излучения вблизи SgrA*, получен верхний наблюдательный предел на заряд, $Q_{SgrA*} \approx 3 \times 10^8 Кл$.

2. Показано, что ненулевой заряд черной дыры может эффективно имитировать параметр спина до 60% от его максимального значения, что отражается в значительном смещении ближайшей стабильной круговой орбиты для заряженных частиц. Таким образом, большинство моделей, оценивающих спин черной дыры, требуют пересмотра и учета электромагнитного взаимодействия из-за возникающей недоопределенности параметра спина.

3. Впервые проанализированы электромагнитные свойства ярких вспышечных компонентов, вращающихся вокруг Sgr A*, обнаруженные коллаборацией GRAVITY в мае–июле 2018 года. В частности, впервые показано, что плазма, окружающая Sgr A*, является релятивистской и намагниченной, что приводит к разделению зарядов в плазме. Получена оценка плотности числа избыточных зарядов в квази-нейтральной плазме, окружающей Sgr A*, что составляет $10^{-5} см^{-3}$, тогда как полная плотность частиц в плазме имеет порядок $10^{7 \pm 1} см^{-3}$.

4. Получена формула для расчета вероятности обнаружения звезды, пересекающей ближайшую область Галактического центра, где вероятность нахождения ярких звезд, как ожидается, упадет ниже единицы. Показана маловероятность обнаружения ярких звезд на расстояниях ближе 1500 радиусов Шварцшильда от черной дыры Sgr A*, однако облет звезд на таких расстояниях возможен на высокоэксцентричных орбитах.

5. Предложен оригинальный, сверхэффективный механизм ускорения космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) с помощью извлечения энергии из сверхмассивных черных дыр. Применением магнитного процесса Пенроуза к радиоактивным распадам или ионизации ядер показано, что энергия вылетающего протона может превышать 10^{20} эВ около типичной сверхмассивной черной дыры массой $10^9 M_{\odot}$, погруженной во внешнее магнитное поле порядка 10^4 Гс.

6. Впервые показано, что энергия вылетающего протона из окрестности черной дыры в центре Галактики достигает порядка $10^{15.5}$ эВ, что совпадает с коленом энергетического спектра космических лучей, где поток частиц

значительно уменьшается. Острота спектрального колена также может указывать на существование единственного источника при энергии колена, что подтверждает предложенную модель. Результаты подтверждены численно, с помощью симуляций процесса ионизации нейтральной частицы в окрестности черной дыры в присутствии внешнего магнитного поля. Показано, что процесс практически не зависит от выбора конфигурации магнитного поля.

7. Обнаружен новый эффект орбитального расширения заряженных частиц вблизи намагниченной черной дыры. Вследствие торможения излучением в сильном гравитационном поле круговые орбиты заряженных частиц могут смещаться в сторону от черной дыры, что обнаруживается в случае с отталкивающей силой Лоренца, т.е. когда $qLB > 0$, где q и L – заряд и угловой момент частицы, B – напряженность магнитного поля. Эффект не зависит от конфигурации магнитного поля при условии аксиальной симметрии. Показано, что протоны охлаждаются в среднем в 10^{10} раз медленнее, чем электроны, в идентичных условиях вокруг черных дыр.

8. Получены зависимости размера и формы тени черной дыры от заряда черной дыры и космологической постоянной. Выражения могут быть использованы для получения предельных значений параметров черных дыр SgrA* и M87 путем сравнения с данными будущих радиоинтерферометрических наблюдений, полученных, например, с помощью телескопа «Горизонт событий». Получены выражения для угла вращения плоскости поляризации в случае сильно неоднородной плазмы, окружающей вращающийся компактный гравитационный объект.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ

LIST OF PUBLISHED WORKS СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Tursunov A., Kološ M., Stuchlik Z., Gal'tsov D.V. Radiation Reaction of Charged Particles Orbiting a Magnetized Schwarzschild Black Hole // *Astrophysical Journal*. - The American Astronomical Society (USA), 2018. – Vol. 861. – pp. 2-18. (№ 1. Web of Science: IF=5.551).

2. Dadhich N., Tursunov A., Ahmedov B., Stuchlik Z. The distinguishing signature of magnetic Penrose process // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*. – Oxford University Press (Great Britain), 2018. – Vol. 478. – pp. 89-94. (№ 1. Web of Science: IF=5.194).

3. Zajaček M., Tursunov A., Eckart A., Britzen S. On the charge of the Galactic centre black hole // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – Oxford University Press (Great Britain), 2018. – Vol. 480. – pp. 4408-4423. (№ 1. Web of Science: IF=5.194).

4. Tursunov A., Kološ M., Stuchlik Z. Orbital widening due to radiation reaction around a magnetized black hole // *Astronomische Nachrichten*. – Wiley Online Library (Germany), 2018. – Vol. 339. – no. 5 – pp. 341-346. (№ 1. Web of Science: IF=1.322).

5. Tursunov A., Kološ M. Constraints on Mass, Spin and Magnetic Field of Microquasar H 1743-322 from Observations of QPOs // *Physics of Atomic Nuclei – Pleiades Publishing (Russia)*, 2018. – Vol. 81, – pp. 279-282. (№ 1. Web of Science: IF=0.524).

6. Zajaček M., Tursunov A. A stellar fly-by close to the Galactic center: Can we detect stars on highly relativistic orbits? // *Astronomische Nachrichten*. – Wiley Online Library (Germany), 2018. – Vol. 339. – pp. 324-330. (№ 1. Web of Science: IF=1.322).

7. Kološ M., Tursunov A., Stuchlik Z. Some astrophysical processes around magnetized black hole // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. – SAS (Slovakia), 2018. – Vol. 48. – pp. 282-283. (№ 1. Web of Science: IF=0.733).

8. Zajaček M., Tursunov A. Electric charge of black holes: Is it really always negligible? // *Observatory*. – Oxford (Great Britain), 2019. – Vol. 149. – pp. 215-222. (№ 1. Web of Science; IF=0.130).

9. Eckart A., Tursunov A., Zajaček M., Parsa M., Hosseini E., Subroweit M., Peissker F., Straubmeier C., Horrobin M., Karas V. Mass, Distance, Spin, Charge, and Orientation of the super massive black hole SgrA // *Proceedings of Science*. – SISSA (Italy), 2019 – Vol. 342. – pp.48-59, 11p. (№3. Scopus; IF=0.3)

10. Zajaček M., Tursunov A., Eckart A., Britzen S., Hackmann E., Karas V., Stuchlik Z., Czerny B., Zensus J.A. Constraining the charge of the Galactic

centre black hole, //Journal of Physics Conference Series – IOP Publishing (Great Britain), 2019, 17pp. (№40. ResearchGate: IF = 0.69)

11. Eckart A., Zajaček M., Valencia-S M., Parsa M., Hosseini E., Straubmeier C., Horrobin M., Subroweit M., Tursunov A. The central light-year of the Milky Way: How stars and gas live in a relativistic environment of a super-massive black hole, // Journal of Physics Conference Series. – IOP Publishing (Great Britain), 2019. - 14pp. (№40.ResearchGate: IF = 0.69)

12. Tursunov A., Dadhich N. Fifty years of energy extraction from rotating black hole: revisiting magnetic Penrose process // Universe – MDPI (China), Invited Review for the special issue on Accretion Disks, Jets, GRBs and related Gravitational Waves, 2019. – Vol. 5. – pp. 125-150. (№ 1.Web of Science; IF=2.165)

II бўлим (Часть II; Part II)

13. Abdujabbarov A., Hakimov A., Turimov B., Tursunov A. Effect of geometric optics in conformal Weyl gravity // Arabian Journal of Mathematics. – Springer (Germany), 2019. – Vol.8. – pp. 1-9.

14. Tursunov A. Synchrotron radiation reaction of charged particles around astrophysical black holes // 42nd COSPAR Scientific Assembly on 14-22 July, 2018. - Pasadena, California, 2018. - Vol. 42 .- pp. E1.4-80-18.

15. Tursunov A. Production of ultra-high-energy particles in the vicinity of supermassive black holes //42nd COSPAR Scientific Assembly on 14-22 July, 2018. - Pasadena, California, 2018. - Vol. 42 .- pp. E1.5-82-18.

16. Zakharov A., Stuchlik Z., Jaluvkova P., Tursunov A., Shadow sizes around black holes as possible signatures of Horndeski gravity // 42nd COSPAR Scientific Assembly on 14-22 July, 2018. - Pasadena, California, 2018. - Vol. 42 .- pp. H0.1-12-18.

17. Zakharov A., Stuchlik Z., Jaluvkova P., Tursunov A. Shadows around supermassive black holes as a tool to test GR and alternative theories of gravity // 42nd COSPAR Scientific Assembly on 14-22 July, 2018. - Pasadena, California, 2018. - Vol. 42 .- pp. E1.8-25-18.

18. Tursunov A., Kološ M., Stuchlík Z., Zamora-Saa J., Alvarez-Castillo D., Supermassive black hole as a source of ultra-high-energy cosmic rays // Fifteenth Marcel Grossmann Meeting - MG15, July 1 to 7, 2018. –Rome (Italy), 2018. - HE6, N8.

19. Zakharov A., Stuchlik Z., Jaluvkova P., Tursunov A. Shadows for Reissner-Nordstrom - de-Sitter dyon black holes // Fifteenth Marcel Grossmann Meeting - MG15, July 1 to 7, 2018. –Rome (Italy), 2018. - PT2, N5.

20. Tursunov A. Ultra-high-energy cosmic rays from supermassive black holes // Ultra High Energy Cosmic Rays, 8-12 October, 2018. – Paris (France), 2018. - P196.

21. Tursunov A. Motion of radiating charged particle in curved spacetime //

Invited Talk at the International School "Advanced Methods of Modern Theoretical Physics: Integrable and Stochastic Systems", 2018, dubnaschool.cz/2018

22. Tursunov A. Brief tutorial on energy mining from rotating black holes // Invited Talk at the International School "Advanced Methods of Modern Theoretical Physics: Integrable and Stochastic Systems", 2019, dubnaschool.cz/2019

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, унинг ўзбек, рус тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (04.07.2019 йил).

Босишга рухсат этилди: ____ .07.2019 йил.

Бичими 60x84 1/16 «Times New Roman»

гарнитурда босма усулида босилди.

Шартли босма табағи 4.5. Адади: 100. Буюртма № 80

МЧЖ «Fan va ta'lim poligraf» босмахонасида чоп этилди.

Манзил: 100170, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 24-уй.

