

Хабилитационна справка за оригиналните научни приноси на гл. ас. д-р Галин Николаев Гюлчев

Научната работа на гл. ас. д-р Галин Гюлчев включва 10 публикации в международни списания с висок импакт фактор, 12 публикации в реферирани и индексирани сборници от доклади на национална и международни конференции и една монография на български език публикувана от Университетско издателство „Св. Климент Охридски“ през 2018 г. За настоящия конкурс са представени 10 публикации с импакт фактор, 8 публикации в сборници на конференции и описаната монография. Всички представени научни трудове са в областта на модифицираните теории на гравитацията и общата теория на относителността като обхващат явления от релятивистката астрофизика. Д-р Галин Гюлчев притежава значителни научни резултати както в класическата така и в релятивистката теорията на гравитационните лещи приложена в общата теория на относителността и алтернативните теории на гравитацията за изследване на компактни астрофизични обекти и свързаните с тях феноменологични ефекти в режим на силно гравитационно поле, които могат да бъдат експериментално потвърдени. Основните приноси на автора могат да бъдат причислени към следните научни направления:

- I. Изследване на релятивистичния ефект на гравитационната леща създаден от компактни обекти, включително черни дупки и голи сингулярности при големи ъгли на отклонение на светлинните лъчи.
- II. Изследване на честотите на квазинормалните моди на черни дупки и тяхната връзка с релятивистичния ефект на гравитационната леща, и изучаване на квазипериодичните осцилации.
- III. Получаване на сенките на компактни обекти, включително черни дупки и пространствено-времеви тунели.
- IV. Построяване и изследване на релятивистките образи на акреционни дискове в пространство-време на компактни обекти, включително черни дупки и голи сингулярности.
- V. Изследване на ефекта на гравитационната леща създаден от компактни обекти, включително черни дупки, голи сингулярности и пространствено-времеви тунели при малки ъгли на отклонение на светлинните лъчи и масивните частици.
- VI. Изследване на нерелятивистичния ефект на гравитационната леща създаден от купове от галактики при малки ъгли на отклонение на светлинните лъчи.

I. Изследване на релативистичния ефект на гравитационната леща създаден от компактни обекти, включително черни дупки и голи сингулярности при големи ъгли на отклонение на светлинните лъчи (публикации А.6, А.9, А.10, Б.2, Б.6, Б.7, Б.8, В.1).

В поредица от публикации е направено задълбочено изследване на ефекта на гравитационната леща и наблюдателните следствия, до които водят алтернативните теории на гравитацията, в граничните случаи на големи ъгли на отклонение на светлинните лъчи. Обект на изследване са заредени не-въртящи се черни дупки и заредени въртящи се черни дупки, следващи съответно от Einstein-Maxwell дилатонната гравитация и от Einstein-Maxwell дилатон-аксионната гравитация. Разгледани са също така и голи сингулярности получаващи се от теорията на Einstein с безмасово скаларно поле и черни дупки получени в рамките на Айнщайн-(анти-)Максуел-(анти)-дилатонната теория на гравитацията. Основните приноси на автора са изследване на характерните величини свързани с ефекта на гравитационната леща предизвикан от представените кандидати за лещи като е установено явното въздействие на дилатонното и аксионното поле, безмасовото скаларно поле и фантомните скаларни и електромагнитни полета върху ъгъла на отклонение, върху местоположенията на формираните релативистични изображения и техните увеличения, както и върху критичните криви и каустиките. Този резултат поражда идеята за евентуалното потвърждаване на алтернативните теории на гравитацията в околност на компактните обекти, където ефекта на лещата води до ясно разграничаване на наблюдателните величини в сравнение с тези за общата теория на относителността. Получените резултати свързани с релативистичните изображения, могат да осигурят важна информация за физическите параметри на изследваните компактни обекти, тяхната маса, ъглов импулс, заряд, обемен размер, вътрешна структура или физическо състояние и да бъдат показател за ключовите характеристики, които са от съществено значение за фундаменталната физика, а именно какъв е видът на пространство-времето около различните компактни обекти. Последната фундаментална характеристика е централен обект на изследване на съвременните експерименти като наблюдателният проект Event Horizon Telescope.

В работи [А.10, Б.7] е изследван ефекта на гравитационната леща предизвикан от дилатон-аксионната черна дупка на Кер-Сен в хетеротичната струнна теория цел изследване влиянието на дилатонното и аксионното поле върху релативистичните изображения и техните характеристики. Ключов елемент в изследването е намирането на затворените фотонни повърхнини характерни за пространство-времето на Кер-Сен и изследване на динамика на изотропния геодезичен поток в параметричното пространство на физическите параметри на заредената въртяща се черна дупка, при които съществува фотонен регион. Установено е, че за аксиално симетричното, стационарно пространство-време на Кер-Сен фотонната повърхнина има топологията на двумерна сфера. Чрез прилагане на стандартни аналитични техники е намерено общото степенно разложение на релативистичния ъгъл на отклонение на светлинните лъчи в малка околност на фотонната сфера и е установена неговата логаритмична разходимост за светлинни лъчи намиращи се върху фотонната повърхнина. Констатирана е и невъзможността използването приближение да бъде приложено в случая на екстремално въртяща се черна дупка. В

резултат е установено, че релативистичните изображения са разпределени експоненциално спрямо най-вътрешно намиращото се изображение, което би създавала черната дупка в граничен преход на безкраен брой завъртания на фотоните около фотонната сфера. Всеки един от горните техники на изследване е приложен в екваториалната равнина на симетрия на аксиалносиметричното пространство-време, в която ефекта върху наблюдаемите величини има най-голям принос. Един от съществените резултати в работа [А.10] е квазиэкваториалното изследване на геодезичния поток, което е от решаващо значение за установяване на азимуталната динамика на критичните криви и каустиките на въртящата се черната дупка. Поради малките ъгли на инклинация на светлинните лъчи спрямо екваториалната равнина на симетрия на въртящата се гравитационна леща е констатирано, че фотонните орбити прецесират около оста на въртене на черната дупка и каустиките се отместват от оптичната ос като се завъртат по посока на часовниковата стрелка в сравнение с каустиките за черната дупка на Кер. Намерени са екваториалните точки от критичните криви, и е установено, че те намаляват с нарастване на ъгловия момент a и заряда на черната дупка $r_{\alpha} = Q^2/M$. Всички величини характерни за ефекта на гравитационната леща са сравнени с подслучаите на черните дупки на Шварцшилд, Кер, и Гибънс-Маеда.

Описаните вече техники за изследване на релативистичния ефект на гравитационната леща са използвани и в публикации [А.9, Б.6] за компактен обект без хоризонт на събитията, представляващ въртяща се аксиалносиметрична гола сингулярност, която е решение на полевите уравнения на гравитацията при наличие на безмасово скаларно поле. Направените изследвания показват че при определени стойности на скаларния заряд и ъгловия импулс въртящата се гола сингулярност притежава фотонен регион, имащ топологията на двумерна сфера, поради което е способна да създаде релативистични изображения. Един от основните резултати в публикациите е свързан с установяване на валидността във въртящия се случай на приетата до този момент в литературата класификация, определяща невъртящата се гола сингулярност като *слаба* или *силна* в зависимост от това дали притежава фотонен регион или не. В резултат от проведените изследвания са определени характерните съотношения за скаларния заряд и импулса на въртене, определящи вида на гола сингулярност и на базата на установените области от параметричното пространство на физическите параметри е направен независим числен анализ демонстриращ очакваното разходящо поведение на ъгъла на отклонение при слабата гола сингулярност в околност на фотонната сфера. В допълнение един от съществените резултати на числения анализ показва, че в случай на отсъствие на фотонна сфера силната гола сингулярност проявява репулсивно въздействие върху светлинните лъчи в близост до сингулярността като допуска отрицателни стойности в ъгъла на отклонение, което демонстрира, че тя проявява не само пречупващи, но и отражателни свойства. В случая на въртяща се слаба гола сингулярност са пресметнати позициите на релативистичните изображения и тяхното взаимно отстояние в приближението на големи ъгли на отклонение, като е установено значително въздействие на безмасовото скаларно поле и момента на въртене на лещата върху наблюдаемите величини, които са сравнени в конкретни случаи на черните дупки на Шварцшилд и Кер, както и в случаите на невъртящите се голи сингулярности на Джанис-Нюман-Уиниър.

Използваните аналитични техники за изследване на релативистичния ъгъл на отклонение на светлината в околност на фотонната сфера са приложени и в работи [А.6, Б.2], в които са изучени наблюдателните следствия от ефекта на гравитационната леща породен от възможното съществуване на тъмна енергия в околност на черни дупки, получени в рамките на Айнщайн-(анти)Максуел-(анти)-дилатонната теория. За целта тъмната материя е моделирана като фантомно скаларно поле и/или фантомно електромагнитно поле. Установено е, че изследваните статични черни дупки притежават фотонна сфера, в следствие, на което са пресметнати съществуващите релативистични изображения, ъгловото разстояние между най-външното релативистично изображение и всички останали релативистични изображения, както и отношението на техните лъчисти потоци на енергията. Получените числени резултати за наблюдаемите величини характерни за релативистичния ефект на гравитационната леща предизвикан от Айнщайн-Максуел-дилатонната черна дупка, Айнщайн-анти-Максуел-дилатонната черна дупка с фантомно електромагнитно поле, Айнщайн-Максуел-антидилатонната черна дупка с фантомно дилатонно поле и Айнщайн-анти-Максуел-антидилатонната черна дупка с фантомно дилатонно и фантомно електромагнитното поле демонстрират значително въздействие на фантомните скаларни и електромагнитни полета върху ъгловото разположение, яркостта и взаимното разположение на релативистичните изображения.

В работа [Б.8] са представени числени изследвания на релативистичния ефект на гравитационната леща, породен от статичната и сферичносиметрична дилатонна черна дупка на Гарфинкъл–Хоровиц–Стромингер. Показано е явното въздействие на дилатонното поле върху наблюдаемите за ефекта на лещата величини. В рамките на метода за третиране на ъгъла на отклонение на светлинните лъчи в близост до фотонната сфера е пресметнат ъгълът на отклонение, като е показано, че степента на закривяване намалява с нарастване на заряда на черната дупка, Q/M . Намерени са положенията на релативистичните изображения, на ъгловото разстояние между най-външното и най-вътрешното релативистично изображение, както и техният относителен фактор на увеличение, като е демонстрирана зависимостта на тези величини при промяна на отношението Q/M . Всички величини, свързани с ефекта на гравитационната леща, са съпоставени с резултатите, следващи от разпространението на светлината около фотонните сфери на черните дупки на Гибънс–Маеда–Гарфинкъл–Хоровиц–Стромингер и Райснер–Нордстрьом.

В монографията [В.1] е направен подробен анализ на релативистичния ефект на гравитационната леща в алтернативните теории на гравитацията, реализиращ се в околност до фотонните региони на компактните обекти, където пространство-времето притежава значителна кривина. Обърнато е специално внимание на използваните съвременни математически техники за анализ на изотропния геодезичния поток в най-простия случай на статично и сферичносиметрично пространство-време, така и в необходимия за релативистката астрофизика сценарий на стационарно и аксиалносиметрично пространство-време при моделиране на въртящи се компактни обекти, действащи като гравитационни лещи. В изданието са представени част от научните изследвания на авторите в областта.

II. Изследване на честотите на квазинормалните моди на черни дупки и тяхната връзка с релативистичния ефект на гравитационната леща, и изучаване на квазипериодичните осцилации (публикации А.5, А.7, Б.5).

Един от начините за получаване на информация за физическите свойства на различните компактни обекти е чрез излъчените от тях на гравитационни вълни и изучаване на характерните честоти на „звънене“, а именно, честотите на квазинормалните моди (КНМ). КНМ позволяват да се установи вида на различните компактни обекти – черни дупки и неутронни звезди, както и да се разграничат различните видове теории на гравитацията, поради това, че прогнозираат различни характеристични спектри, и позволяват да се определят глобалните асимптотични заряди като маса, заряд и ъглови импулс на наблюдаваните черни дупки и неутронни звезди. Един от начините за изчисляване на КНМ е третирането на гравитационните вълни в приближението на геометричната оптика като безмасови частици, разпространяващи се от последната изотропна нестабилна кръгова орбита до безкрайност спрямо компактния обект. В рамките на този алтернативен подход реалната част на честотата на КНМ може да бъде свързана с агловата скорост на последната кръгова изотропна орбита, докато имагинерната част е свързана с експонента на Ляпунов, която определя времевия мащаб на нестабилността на орбитата. От друга страна тъй като изотропните геодезични линии също така са свързани с разпространението на светлинните лъчи и в статично и сферичносиметрично пространство-време те са ограничени в равнина, то последната изотропна нестабилна, кръгова орбита е просто пресечница на фотонната сфера с равнината на разпространение на вълните. Именно поради това е естествено да се очаква наличието на връзка между двете явления – ефекта на гравитационната леща и излъчването на гравитационни вълни. Върху тази идея са положени и резултатите в работи [А.7, Б.5], състоящи се в намирането на сравнително прости връзки между КНМ и релативистичния ефект на гравитационната леща и е предложен метод за измерване на честотите на КНМ на сферичносиметрични черни дупки посредством местоположенията на наблюдаваните релативистични изображения и взаимното увеличение на техните светлинни потоци. Един от съществените приноси на кандидата тук е свързан с аналитичното имплементиране на уравнението на фотонната сфера за статично и сферичносиметрично пространство-време в честотите на КНМ и пряката им връзка с измерваемите величини, характеризиращи релативистичните изображения. Друг важен резултат в работата е намирането на обща аналитична връзка между експонентата на Лапунов, времезакъснението между първото и второто релативистично изображение и относителния поток на енергията на изображенията, както и връзка между ъгловата скорост на последната кръгова изотропна орбита и времезакъснението между релативистичните изображения. Тази връзка дават надежда за установяване на честотите на КНМ на гравитационните вълни посредством ефекта на гравитационната леща в близко бъдеще при измерване на времезакъснението между релативистичните изображения за определени галактики. Получените съотношения могат да бъдат приложени при установяване на местоположението на източниците на гравитационни вълни и да ни дадат

информация какви честоти на гравитационните вълни можем да очакваме от черна дупка, действаща едновременно като гравитационна леща и източник на гравитационни вълни.

Друг способ за изследване на пространството-времето в околност на черните дупки и масивни звезди и тестване на гравитацията в режим на силни гравитационни полета е изучаване на квазипериодичните осцилации (КПО) на рентгеновия поток излъчен от двойни звездни системи [А.5]. Едно от главните възможни приложения на КПО, което ги прави толкова привлекателни, е измерването на ъгловия момент на централния масивен обект в излъчваща рентгенови лъчи двойна система. Докато КПО с ниски и средни честоти се смята, че се дължат на физични процеси в акреционните дискове, то високочестотните КПО са отражение на природата на пространство-времето в околност на компактните обекти, в това число черни дупки и неутронни звезди. В няколко рентгенови източника честотите на КПО се срещат по двойки, чието съотношение е 3:2. Физическия механизъм за създаване на тези КПО до сега е неизвестен. Една от основните хипотези за създаването на тези характерни КПО е нелинейния резонансен модел (НРМ), съгласно който КПО са свързани с характерните епициклични и орбитални честоти на трептене на пробни частици, орбитиращи около компактния обект и удовлетворяващи нелинейно резонансно съотношение $m:n$. Въз основа на тази идея в публикация [А.5] са изследвани свойствата на трите характерни честоти на частица разпространяваща се по кръгова орбита в екваториалната равнина на симетрия на пространство-времето на Томимацу-Сато, а именно радиалната, вертикалната и орбиталната кеплерова четота на въртене. За изчисляване на честотите са приложени стандартни вариационни методи върху уравненията на геодезичните линии, а за тяхното решаване са създадени специални числени кодове. Един от основните резултати от направения числен анализ демонстрира, че за целия интервал от допустими стойности на ъгловия момент в областите на параметричното пространство, за които орбитите на частиците са над най-вътрешната устойчива кръгова орбита, качествено поведение на честотите е същото като в случая за черна дупка на Кер. В работата е приложен нелинейния резонансен модел и са направени оценки за ъгловите моменти на три кандидати за черни дупки със звездни маси GRO 1655-40, XTE 1550-564 и GRS 1915 + 105. Получените резултати недвусмислено показват, че съществува съгласуваност с прогнозите, основащи се на 3:2 нелинейния резонансен модел приложен в пространство-времето на Томимацу-Сато с $\delta = 2$ и настоящите оценки, намерени в литературата. В заключение от направените изследвания може да се констатира, че геометрията на Томимацу-Сато с $\delta = 2$ е възможен модел на пространство-време, характерно за микроквазарите.

III. Получаване на сенките на компактни обекти, включително черни дупки и пространствено-времени тунели (публикации А.4, Б.1).

Публикации [А.4, Б.1] са посветени на моделиране на сянката на екзотични компактни обекти и техния анализ при различни физически сценарии. Идеята за съществуване на сянка на компактните обекти в това число черни дупки, голи сингулярности и пространствено-времени тунели е изследвана от десетилетия, като започва през 1972 г.,

когато Джеймс Бардийн, надграждащ по-ранните аналитични изследвания на Брендън Картър, инициира изследване на ефекта на гравитационната леща в пространство-времето на въртяща се черна дупка. По този начин Бардийн прави задълбочен анализ на разпространението на светлинните лъчи в пространство-времето на Кер, което описва незаредена и въртяща се черна дупка. Той изчислява как въртенето на черната дупка би повлияло на формата на сянката, получена при разпространение на излъчените от отдалечени звезди светлинни лъчи в околност на фотонния регион, обграждащ масивния въртящ се обект. Изследванията свързани със съществуване на сянка на компактните обекти получиха експериментално потвърждение едва преди няколко години благодарение на наблюденията от международната програмата Event Horizon Telescope в рамките на, която беше получено първото изображение на сянката на черна дупка [V. L. Fish, et al. (EHT Collaboration), *Galaxies* 4, 54 (2016)].

Освен черните дупки, пространствено-времените тунели и голите сингулярности, притежаващи фотонна сфера, също са способни да създадат изображения на сенки, наподобяващи тези на черните дупки. Кандидата има съществен пронос към откритията в тази научна област при изследване на сянката на въртящ се проходим пространствено-временен тунел, описана в работи [A.4, B.1]. Направените изследвания демонстрират, че пространствено-времените тунели също притежават фотонна сфера, както в случая с ролята на гърловината, и следователно са способни да формират релативистични изображения. Установено е също така, че за определени класове от пространствено-временни тунели гърловината играе ролята на потенциална бариера за светлинни лъчи с подходящи прицелни параметри, като по този начин оказва влияние върху контура на сянката. Разгледани са две решения, описващи пространствено-временни тунели и са изучени структурата на образите на техните сенки и физическите механизми за тяхното формиране. За някои от образите контурът на сянката е негладка крива, като ефектът се дължи на въздействието на две фамилии от неустойчиви сферични орбити на фотоните. Изучените решения представляват примери, при които механизмът за формиране на негладки контури на сянката може да се опише в явен вид. Един от основните приноси на кандидата в направеното изследване е създаването на уникални специализирани числени кодове и съгласно експертизата му в областта на релативистичната астрофизика и във физическа интерпретация на получените резултати.

IV. Построяване и изследване на релативистичните образи на акреционни дискове в пространство-време на компактни обекти, включително черни дупки и голи сингулярности (публикация A.1).

Идеите за появата на сянка на компактните обекти е свързана и с формирането на акреционни дискове около тях, при наличие на азимутална симетрия. Изследванията в научното направление започват с работите на Кънингам, който изчислява ефекта на червено отместване и разпределение на емисионния поток на енергията на акреционния диск около черната дупка на Кер за широк спектър от електромагнитни вълни [C. T. Cunningham, *Astrophysical Journal*, 202, 788 (1975)]. Първите изследване на оптичните ефекти, свързани с изобразяване на една статична и сферичносиметрична черна дупка

заобиколена от тънък акреционен диск, са направени от Жан Пиер Люмине, който изчислява изорадиалните криви, съответстващи на фотони, излъчвани от орбити на диска с постоянен радиус спрямо черната дупка, както биха се виждали те от отдалечен наблюдател. Именно тези две основополагащи изследвания позволят да тестваме алтернативните теории за гравитацията в близост до компактните обекти, където ефектът на гравитационната леща води до ясно разграничаване на наблюдаваните ефекти от тези, характерни за Общата теория на относителността, както и да приложим модели, тясно свързани с реални астрофизични ситуации като случаите на образуване на акреционни дискове около компактните обекти. В работа [A.1] за първи път е изследван образът на акреционен диск около компактен обект, който не представлява черна дупка. Разгледана е гола сингулярност в присъствието на скаларно поле, като за описание на акреционния диск формиран в нейната околност е използвано приближението на тънък диск. Избран е астрофизично най-значимият случай, когато решението притежава фотонна сфера, а излъчването на акреционния диск се описва от модела на Новиков-Торн. Получените релативистични изображения на диска са сравнени с образа на акреционен диск около черна дупка на Шварцшилд като е показано, че в случаите, когато съществува фотонна сфера двата компактни обекта водят до качествено сходни изображения. Въпреки това съществуват количествени разлики, тъй като акреционния акреционният диск около гола сингулярност се изобразява в по-малък образ и се отличава с по-висок интензитет на излъчения поток концентриран в по-тъсна околност на неговия максимум. Получената форма на релативистичните изображения на акреционния диск при отсъствие на фотонна сфера са разгледани в друга работа, която в момента е изпратена в *Eur. Phys. J. C*. Приносите на кандидата покриват целия изследователски процес свързан с направеното изследване – физическото поставяне на задачата и математическото формулиране, създаването на уникални специализирани числени кодове за проследяване на фотонното движение посредством интегриране на изотропните уравнения на геодезичните линии за произволна аксиално-симетрична пространствено-времева метрика, физически интерпретиране на резултатите и тяхното визуализиране. Ключова роля на кандидата за създаване на резултатите е неговата експертиза в релативистичния ефект на гравитационната леща довела до ефективното прилагане на механизмите на формиране на акреционния диска и изграждане на релативистичните образи.

V. Изследване на ефекта на гравитационната леща създаден от компактни обекти, включително черни дупки, голи сингулярности и пространствено-времеви тунели при малки ъгли на отклонение на светлинните лъчи и масивните частици (публикации A.2, A.3, A.8, A.9, B.4).

В поредица от работи [A.3, A.8, A.9, B.4] е изследван нерелативистичния ефект на гравитационната леща предизвикан от клас фантомни черни дупки и пространствено-времеви тунели, от заредената, стационарна и аксиално-симетрична дилатон-аксионна черна дупка на Кер-Сен, както и от стационарни, аксиално-симетрични голи сингулярности в полевата теорията на Айнщайн с безмасово скаларно поле в приближението на слаби гравитационни полета и малки ъгли на отклонения на светлинните лъчи.

В работата [А.3] първо е изследван светлинния ъгъл на отклонение предизвикан от черната дупка на Гарфинкъл-Хоровиц-Стромингър и черна дупка в теорията на Айнщайн-Максуел с анти-дилатонно поле, използвайки оптичната геометрия и теоремата на Гаус-Боне. Направените изследвания красноречиво показват, че ефекта на гравитационната леща е повлиян от фантомното скаларно поле. В последствие в работата е изследван ъгъла на отклонение на светлината от три вида пространствено-времеви тунела: тунели с ограничена и неограничена функция на масата, както и пространствено-времеви тунел с метрика нечувствителна към червеното отместване. Използваните методи на изследване се състоят в получаване на светлинния ъгъл на отклонение посредством теоремата на Гаус-Боне, след изчисляване на Гаусовата оптична кривина на разглежданото пространство-време, при налагане на условието, че светлинните лъчи се разпространяват в области с малка кривина. Едновременно с това са приложени стандартни аналитични техники върху уравненията на изотропните геодезични линии, посредством които алтернативно е изведен ъгълът на отклонение на светлинните лъчи, в приближението на малки отклонения на лъчите. Резултатите демонстрират, че конкретният избор на функцията на формата и функцията на масата играе решаваща роля в крайния резултат за ъгъла на отклонение на светлината. В допълнение в работата е конструирано точно уравнение на гравитационната леща посредством, което са предсказани теоретично нерелативистичните пръстени на Айнщайн за малки ъгли на закривяване на светлинните лъчи.

В работи [А.8, Б.4] е изследван аналитично ефекта на гравитационната леща предизвикан от заредена, стационарна, аксиално-симетрична дилатон-аксионна черна дупка на Кер-Сен като в рамките на разглежданото приближение за ъгъла на отклонение на светлинните лъчи са намерени пертурбативни решения на изотропните уравнения на геодезичните линии с точност от трети порядък по малките величини M/b , a/b и r_a/b , където M е масата на черната дупка, a е ъгловия момент, $r_a = Q^2/M$, като Q представлява заряда и b е прицелния параметър на лъчите. Основния принос в изследването е изчисляване позициите на двете изображения създадени при разпространение на лъчите в слаби гравитационни полета и съответстващите им увеличения в пост-нютонново приближение. Демонстрирано е, че съществуват статични пост-нютоннови поправки на индивидуалните увеличения и на тяхната сума, както и на критичните криви, които са функции на заряда. Намерено е очакваното отместване на критичните криви като функция на ъгловия момент на лещата и е показано, че критичните криви намаляват незначително с увеличаването на заряда. Каустиките, имащи нулева размерност в рамките на разглежданото приближение, се отдалечават от оптичната ос и не зависят от заряда. Установено е, че разгледаните наблюдаеми величини характерни за ефекта на гравитационната леща, се различават съществено от стойностите им в конкретни случаи на черните дупки на Шварцшилд и Кер, както и в случая на черната дупка Гибънс-Маеда-Гарфинкъл-Хоровиц-Стромингър.

В работа [А.9] е изследван аналитично ефекта на гравитационната леща предизвикан от масивни компактни обекти в галактичните ядра моделирани като стационарни, аксиално-симетрични голи сингулярности в полевата теорията на Айнщайн с безмасово скаларно поле. В приближението на слаби гравитационни полета са приложени стандартни аналитични техники за изчисляване на позициите на двете създадени изображения,

съответстващите им абсолютни увеличения, както и центроидалната крива в пост-нютонново приближение. Демонстрирано е, че съществуват статични пост-нютоннови поправки на всяко индивидуално увеличение и на тяхното общо увеличение, както и на критичните криви, които са функция на скаларния заряд. Установено е наличието на отместване на критичните криви като функция на ъгловия момент на лещата и е показано, че те намаляват незначително при слабите голи сингулярности (с фотонна сфера) и съществено при силните голи сингулярности (без фотонна сфера) с увеличаването на скаларния заряд. Установено, е че каустики са едномерни обекти, които се отдалечават от оптичната ос с нарастване на ъгловия момент на въртене на лещата и не зависят от скаларния заряд. От направеното сравнение с конкретните случаи на черните дупки на Шварцшилд и Кер, както и в случаите на голите сингулярности на Джанис-Нюман-Уиникър се забелязва, че наблюдаемите величини характерни за ефекта на гравитационната леща от въртящата се голя сингулярност съществено се разграничават по ъглово разстояние.

В попълнение на светлинния ефект на гравитационната леща в работа [А.2] е направено проучване на гравитационното отклонение на масивни частици в пространство-времето на голата сингулярност на Джанис-Нюман-Уиникър и в геометрията на въртящ се Кер-подобен пространствено- времеви тунел, с цел експериментално разграничаване на двете изследвани геометрии. Използвания подход се основава на координатна трансформация, правеща линейния елемент на пространство-времето изотропен, при което се възпроизвежда светлинния показател на пречупване на ефективната оптична среда. Впоследствие е изчислен показателят на пречупване за масивните частици, въз основа на интерпретацията на дьо Броил за вълновите пакети. За тази цел е приложена теоремата на Гаус-Боне в изотропната оптична метрика и са намерени ъглите на отклонение. Извършеното изследване показва, че в двата случая на пространство-времето на Джанис-Нюман-Уиникър и в случая на Кер-подобната геометрия ъгъла на отклонение е повлиян от метричните параметри. Като алтернатива на използвания метод, ъгъла на отклонение е изчислен независимо с помощта на уравнението на Хамилтон-Якоби, което води до същия резултат. Получените резултати за ъгъла на отклонение на масивни частици възпроизвежда правилно светлинния ъгъл на отклонение. Като основен резултат изследването демонстрира, че отклонението на частиците, разпространяващи се в Кер-подобните пространствено-времеви тунели навдига този характерен за пространството-времето на Джанис-Нюман-Уиникър.

VI. Изследване на нерелативистичния ефект на гравитационната леща създаден от купове от галактики при малки ъгли на отклонение на светлинните лъчи (публикация Б.3).

В класически аспект ефекта на гравитационната леща се разглежда от галактики и купове от галактики. Изследването направено в публикация [Б.3] има за цел да изучи ефекта на гравитационната леща от галактичния куп Coma Cluster (Abell 1656), като се установи големината на ъгъла на отклонение на светлинните лъчи и се направи оценка на фокусното разстояние на лещата. Направените оценки стъпват на идеята за общата маса на клъстера и неговият импулс на въртене като е използван модела на сингулярната изотермна сфера

за повърхнинно разпределение на масата в купа. Един от получените резултати е, че наблюдател намиращ се на Земята не може да наблюдава ефекта на леща създаден от клъстера в случай на отдалечен светлинен източник. Друг от резултатите показва, че съдържанието на тъмна материя в галактичния клъстер Coma Cluster променя фокусното разстояние на гравитационната леща 34 пъти. Получени са също така и измененията на ъгъла на отклонение и фокусното разстояние в случай на въртяща се гравитационна леща и е демонстрирано, че те се различават приблизително с 0,1% спрямо невъртящия се случая.

Преподавателският опит на гл. ас. Галин Гюлчев включва лекции по 5 различни дисциплини, семинарни упражнения и практически занятия, след които лекции на английски език и курсове по Теоретична астрофизика и Увод във физиката на черните дупки пряко свързани с научното направление на конкурса. Общата преподавателска натовареност за периода 2015-2020г. е еквивалентна на 12 години и надвишава двукратно годишния норматив за пълната учебна заетост в Софийски университет. Д-р Галин Гюлчев е ръководител на една бакалавърска дипломна работа защитена в Астрономическата обсерватория на Софийски университет. Ръководител е на един научноизследователски проект и на един проект за научен форум финансирани от научноизследователската програма на СУ „Св. Климент Охридски“ и е участвал като член в научния екип на други 10 проекта. Има международен опит под формата на научно сътрудничество, отразено в публикации във водещи списания с импакт фактор и краткосрочни научни визити една от които е в групата по Теоретична астрофизика в университета в Тюбинген.

10.09.2020г.
гр. София

Подпис: 
/гл. ас. д-р Галин Гюлчев/

Библиография

- A.1.** G. Gylchev, P. Nedkova, T. Vetsov and S. Yazadjiev, „*Image of the Janis-Newman-Winicour naked singularity with a thin accretion disk*“, *Phys. Rev. D* **100** 024055 (2019).
- A.2.** K. Jusufi, A. Banerjee, G. Gylchev and M. Amir, „*Distinguishing rotating naked singularities from Kerr-like wormholes by their deflection angles of massive particles*“, *Eur. Phys. J. C* **79**, 28 (2019).
- A.3.** A. Övgün, G. Gylchev and K. Jusufi, „*Weak Gravitational lensing by phantom black holes and phantom wormholes using the Gauss-Bonnet theorem*“, *Annals Phys.* **406**, 152-172 (2019), *arXiv:1806.03719 [gr-qc]*.
- A.4.** G. Gylchev, P. Nedkova, V. Tinchev and S. Yazadjiev, „*On the shadow of rotating traversable wormholes*“, *Eur. Phys. J. C* **78**, 544 (2018), *doi:10.1140/epjc/s10052-018-6012-9*.
- A.5.** I. Z. Stefanov, G. G. Gylchev and S. S. Yazadjiev, „*Quasiperiodic oscillations and Tomimatsu-Sato $\delta=2$ space-time*“, *Phys. Rev. D* **87**, 083005 (2013), *doi:10.1103/PhysRevD.87.083005*.
- A.6.** G. N. Gylchev and I. Z. Stefanov, „*Gravitational Lensing by Phantom Black holes*“, *Phys. Rev. D* **87**, 063005 (2013), *doi:10.1103/PhysRevD.87.063005*.
- A.7.** I. Z. Stefanov, S. S. Yazadjiev and G. G. Gylchev, „*Connection between Black-Hole Quasinormal Modes and Lensing in the Strong Deflection Limit*“, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 251103 (2010), *doi:10.1103/PhysRevLett.104.251103*.
- A.8.** G. N. Gylchev and S. S. Yazadjiev, „*Analytical Kerr-Sen Dilaton-Axion Black Hole Lensing in the Weak Deflection Limit*“, *Phys. Rev. D* **81**, 023005 (2010), *doi:10.1103/PhysRevD.81.023005*.
- A.9.** G. N. Gylchev and S. S. Yazadjiev, „*Gravitational Lensing by Rotating Naked Singularities*“, *Phys. Rev. D* **78**, 083004 (2008), *doi:10.1103/PhysRevD.78.083004*.
- A.10.** G. N. Gylchev and S. S. Yazadjiev, „*Kerr-Sen dilaton-axion black hole lensing in the strong deflection limit*“, *Phys. Rev. D* **75**, 023006 (2007), *doi:10.1103/PhysRevD.75.023006*.
- B.1.** G. Gylchev, P. Nedkova, V. Tinchev and S. Yazadjiev, „*Cusp structure in shadows casted by rotating wormholes*“, *Proceedings of the 10th Jubilee Conference of the Balkan Physical Union, AIP Conf. Proc.* **2075**, no.1, 040005 (2019), *doi:10.1063/1.5091165*.
- B.2.** Galin. N. Gylchev and Ivan. Zh. Stefanov, „*Strong Gravitational Lensing by Phantom Black Holes*“, *Proceedings of the 13th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, pp. 2091-2093 (2013), *World Scientific, Singapore*, *doi:10.1142/9789814623995_0365*.

B.3. V. Kalinova and G. Gylulchev, „**Gravitational Aberration of a Cluster of Galaxies: Dark Matter**“, Proceedings of the 3rd School and Workshop on Space Plasma Physics, AIP Conf. Proc. 1356 (2011) no.1, pp. 60-66, doi:10.1063/1.3598093.

B.4. G. N. Gylulchev and S. S. Yazadjiev, „**Gravitational lensing by Kerr-Sen dilaton-axion black hole in the weak deflection limit**“, Proceedings of the 2nd Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS 10), AIP Conf. Proc. 1301, no.1, 327-335 (2010), doi:10.1063/1.3526629.

B.5. I. Stefanov, S. Yazadjiev and G. Gylulchev, „**Relation between the Parameters of a Gravitational Lens and the Frequencies of Black-hole Quasi-normal Modes**“, Proceedings of the 2nd Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS 10), AIP Conf. Proc. 1301 (2010) no.1, p. 355, doi: 10.1063/1.3526632.

B.6. G. Gylulchev and S. Yazadjiev, „**Gravitational lensing by rotating naked singularities in the equatorial plane**“, Proceedings of the 33rd International Conference on Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'07), AIP Conf. Proc. 946 (2007) no.1, pp. 106-118, doi:10.1063/1.2806045.

B.7. G. N. Gylulchev and S. S. Yazadjiev, „**Strong gravitational lensing by Kerr-Sen dilaton-axion black hole**“, Proceedings of the Sixth International Conference of the Balkan Physical Union, Istanbul, Turkey, August 22-26, 2006, AIP Conf. Proc. 899, no.1, 145-146 (2007), doi:10.1063/1.2733078.

B.8. G. N. Gylulchev and S. S. Yazadjiev, „**Garfinkle-Horowitz-Strominger dilaton black hole gravitational lensing in the strong deflection limit**“, Modern mathematical physics. Proceedings, 4th Summer School, Dedicated to Irina Ya. Arefeva's Jubilee, Belgrade, Serbia, September 3-14, 2006, SFIN A 1, pp. 229-238.

B.1. Г. Гюлчев, С. Язджиев, „**Гравитационни Леци**“, УИ „Св. Климент Охридски“, 2017 г., <https://unipress.bg/gravitacionni-leshti>.