

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Татарина Михайла Богдановича
«Термодинаміка чорних дір з нелінійними матеріальними полями»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 10 «Природничі науки»
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність теми дисертації

Принципова теоретична проблема об'єднання загальної теорії відносності, квантової механіки і термодинаміки за кілька десятиліть відобразилась у фізиці чорних дір – об'єктах гравітаційного походження. Це привело до появи окремого напрямку теоретичних досліджень – термодинаміки чорних дір, де зв'язок із термодинамікою впливає зі знаменитого застосування Хокінгом квантової теорії до чорних дір. Перевага цього підходу полягає в можливості опису складних взаємодій, притаманних цим об'єктам, за допомогою термодинамічних співвідношень, встановлених ще для газів.

На відміну від астрофізичних чорних дір, які спостерігаються і досліджуються у Всесвіті, дисертант розглядає теоретичні моделі чорних дір, а саме, розв'язки рівнянь загальної теорії відносності (ЗТВ) з горизонтом подій у (2+1)- і (3+1)-вимірному просторі-часі з космологічною сталою за наявності електромагнітного поля (матерії) з нелінійною самодією. Поставлені задачі розширюють уявлення про властивості електрично заряджених чорних дір та термодинаміку їхніх внутрішніх ступенів вільності: змінюючи характер нелінійності електромагнітного поля, зумовленої поляризаційними ефектами, змінюємо й різноманітні параметри, зокрема додатковий магнітний заряд. Розглядувані у просторі-часі (анти-)де-Сіттера моделі слугують узагальненням таких відомих розв'язків рівнянь ЗТВ для чорних дір, як Райснера–Нордстрьома і Керра–Ньюмена з електродинамікою Максвелла, а також моделей з варіантами нелінійної електродинаміки Ейлера–Гайзенберга і Борна–Інфельда. Також вивчається низьковимірний випадок, що спирається на розв'язок BTZ (Banados, Teitelboim, Zanelli).

Дослідження термодинаміки чорних дір потребує залучення температури Хокінга, зв'язку між (інформаційною) ентропією і площею горизонту подій, обґрунтованого Бекенштейном і Хокінгом, а також зв'язку між тиском і (від'ємною) космологічною сталою. Наявність різних взаємодій з відповідними потенціалами зумовлює розширення фазового простору при формулюванні основних термодинамічних співвідношень і співвідношення Смарра. Важливими шуканими термодинамічними ефектами є ефект Джоуля–Томсона і фазовий перехід першого роду, щоправда, вони відсутні в низьковимірному випадку.

Загальна характеристика роботи та отриманих в ній результатів

У **вступі** надається загальна характеристика дисертаційної роботи згідно з атестаційними вимогами.

У **першому розділі** окреслено передумови та сучасний стан досліджень термодинаміки чорних дір. Обговорюються відомі розв'язки польових рівнянь загальної теорії відносності і (нелінійних версій) електродинаміки для електрично заряджених чорних дір, а також виявлені термодинамічні ефекти.

У **другому розділі** порівнюються термодинамічні властивості електрично заряджених чорних дір у $(2+1)$ -вимірному просторі-часі, які є статичними розв'язками рівнянь загальної теорії відносності (з космологічною сталою) і таких версій нелінійної електродинаміки: Борна–Інфельда, степеневі, логарифмічної й експоненціальної. Останні два випадки приводять до нових розв'язків. Спорідненість обчислень і результатів дозволяє об'єднати всі чотири випадки в єдину модель – Модель-1. Її термодинаміка описується у розширеному фазовому просторі через врахування електричного потенціалу.

Третій розділ присвячений опису $(2+1)$ -вимірної електрично зарядженої чорної діри з повільним обертанням (Модель-2), просторово-часовий розв'язок для якої зумовлюється нелінійною електродинамікою зі самодією степеневого виду. Знайдено загальний розв'язок для компонент електромагнітного поля як функцій радіальної координати. Наведено оригінальний вираз для магнітного поля. Аналітично отримано точні квадратурні й асимптотичні вирази для (недіагональних) компонент метричного тензора. Проаналізовано фізичний зміст сталих інтегрування. Одержано рівняння стану та обчислено ізобарну теплоємність чорної діри.

У **четвертому розділі** дисертант одержує статичний розв'язок рівнянь Айнштейна–Борна–Інфельда в $(3+1)$ -вимірному просторі-часі для чорної діри з електричним і магнітним зарядами (Модель-3). Стверджується, що він має спільний вигляд у просторах зі сферичною, пласкою і гіперболічною топологією. Зосереджуючись на випадку сферичної топології, показується, що включення магнітного заряду спричиняє появу додаткового магнітного поля і зумовлює узагальнення відомих інваріантів поля. Побудова термодинаміки моделі потребує розширення фазового простору не лише за рахунок електростатичного і магнітного потенціалів, але й поляризаційних ефектів. Це приводить до узагальнення співвідношення Смарра з рівноправним внеском електричного і магнітного зарядів. На основі одержаних співвідношень і термодинамічних функцій, коли маса чорної діри збігається з ентальпією, описано ефект Джоуля–Томсона і фазовий перехід першого роду. Цікаво, що числове значення комбінації критичних параметрів останнього виявляється таким, як для газу Ван-дер-Ваальса.

Дисертаційна робота завершується **Висновками** та **Списком використаних джерел** (131 посилання, серед яких – 3 публікації автора), а також містить 7 **Додатків**.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і висновків дисертаційного дослідження

Результати і висновки дисертації є достатньо обґрунтованими. Це впливає з різнобічних аналітичних, а також чисельних оцінок, поданих на графіках. У формулюванні основних результатів та висновків автор долучає відповідну фізичну інтерпретацію виявлених закономірностей.

Достовірність результатів дисертації забезпечена застосуванням загальноновизнаних означень шуканих величин у загальній теорії відносності, класичній електродинаміці і термодинаміці, підтвердженням правильності отриманих аналітично функцій за допомогою асимптотичних методів, порівнянням і зв'язком з результатами інших авторів, одержаними в граничних випадках. Представлені результати є достатньо переконливими, науково обґрунтованими, а їхній аналіз проведено з урахуванням останніх даних фахової наукової літератури. Додатковим свідченням обґрунтованості і достовірності наукових результатів слугують рецензовані публікації автора та представлення отриманих результатів на наукових конференціях.

Новизна отриманих результатів

1. У (2+1)-вимірному просторі-часі отримано статичні розв'язки рівнянь Айнштайна з від'ємною космологічною сталою, асоційовані з електрично зарядженими чорними дірами, за наявності електромагнітного поля з нелінійністю таких типів: у формі Борна–Інфельда, степеневою, а також логарифмічною й експоненціальною, розгляд яких є новим. Одержано термодинамічні функції відповідних чорних дір та проведено їх порівняння за різних значень параметрів нелінійності.
2. У (2+1)-вимірному просторі-часі отримано новий статичний розв'язок системи рівнянь загальної теорії відносності з від'ємною космологічною сталою і електродинаміки із степеневою нелінійністю, який описує електрично заряджену чорну діру з повільним обертанням. Одержано загальний розв'язок для електромагнітного поля та точні вирази для компонент метрики. Надано фізичну інтерпретацію сталих інтегрування. Виведено рівняння стану та ізобаричну теплоємність чорної діри.
3. У (3+1)-вимірному просторі-часі отримано статичний розв'язок рівнянь Айнштайна–Борна–Інфельда для чорної діри з електричним і магнітним зарядами. Наявність останнього зумовлює появу магнітного

поля і узагальнення відомих виразів для польових інваріантів. На основі одержаних термодинамічних функцій і співвідношення Смарра з рівноправним внеском електричного і магнітного зарядів описано ефект Джоуля–Томсона і фазовий перехід першого роду.

Практична цінність отриманих результатів

Результати дисертаційного дослідження мають теоретичний характер. Вони розширюють відомості про фізичні, зокрема термодинамічні, властивості електрично заряджених чорних дір у просторі-часі з числом вимірів $(2+1)$ і $(3+1)$, а також можуть бути використані як базис для подальших теоретичних досліджень у даному напрямку.

Результати доцільно використати в навчальному процесі при вивченні загальної теорії відносності, термодинамічних аспектів чорних дір, нелінійної електродинаміки та інших курсах в межах спеціальності 104 «Фізика та астрономія».

Повнота викладу сформульованих у дослідженні наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях

Основні наукові результати дисертаційної роботи викладено в 3 публікаціях в наукових журналах, які індексуються в базах даних Scopus та Web of Science. Одна стаття опублікована у виданні, що належить до першого квартиля (Q1), дві статті — у виданні другого квартиля (Q2). Окрім того, 7 публікацій засвідчують представлення і апробацію отриманих результатів на наукових конференціях.

Це дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають науково-практичне значення для науки і техніки.

Зауваження до роботи

1. Бракує пояснень щодо розглядуваного типу (мікроскопічних/макроскопічних) чорних дір і відповідних числових характеристик, що вимагає звернення до цитованої літератури.
2. У Моделі-2 (Розділ 3), для просторів зі сферичною, пласкою і гіперболічною топологією не вказана відмінність області визначення координати θ .
3. У виносці 32 (Розділ 3) некоректно сформульована границя відношення типу "0/0".
4. У Розділі 4 вартувало би проінтерпретувати в контексті (ступенів вільності) чорної діри ефект Джоуля–Томсона і фазовий перехід "рідина-газ", для ознайомлення з якими використовуються лише явища в газах.

5. Можна було б покращити підсумкову частину дисертації, уникаючи недоречних посилань на роботи інших авторів.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі Татарина Михайла Богдановича та його наукових публікаціях не виявлено.

Загальний висновок

Дисертація Татарина М.Б. на тему «Термодинаміка чорних дір з нелінійними матеріальними полями», подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» є завершеним науковим дослідженням, результати якого можуть бути використані для опису термодинамічних властивостей електрично заряджених чорних дір із різновидами нелінійності створеного електромагнітного поля. У роботі та наукових публікаціях немає порушень академічної доброчесності. Вважаю, що за актуальністю, новизною, практичним значенням та обсягом результатів дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року, а її автор, Татарин Михайло Богданович, заслуговує присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент
провідний науковий співробітник
Інституту теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова НАН України
доктор фізико-математичних наук

Андрій НАЗАРЕНКО