

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

Значний інтерес до досліджень фізики чорних дір не згасає упродовж більше ніж пів століття, а його початок припадає на період, коли у багатьох дослідників були ще поважні сумніви у реальності їх існування, тобто коли їх вважали скоріш за все лише гіпотетичними об'єктами. Ситуація суттєво змінилася за останні десятиліття, коли дані багатьох астрофізичних спостережень розвіяли сумніви щодо існування в природі чорних дір. Особливо актуалізувалося вивчення різних теоретичних і практичних аспектів фізики чорних дір за останні роки, після прямої реєстрації гравітаційного випромінювання, зумовленого зіткненням (злипанням) двох масивних чорних дір. Цю подію резонно вважають одним із яскравих тріумфів загальної теорії відносності.

Водночас потреби побудови послідовної квантової теорії гравітації вимагають розгляду альтернативних підходів до інтерпретації результатів класичної теорії. У цьому контексті важливий напрям сучасних досліджень стосується фізики чорних дір, їх взаємодії з різними полями, передусім полем електромагнітним з урахуванням можливих нелінійних ефектів. Один із актуальних етапів таких досліджень, розроблення термодинаміки чорних дір, започаткували Гокінг, Бекенштайн та ін. близько 50 років тому, їхні результати стали класичними. Автори обширної літератури останніх років розвинули й узагальнили ці результати власне для врахування нелінійних польових ефектів. У цьому ж руслі проведено дослідження в дисертаційній роботі М.Б. Татарина, у фокусі яких є властивості конкретних моделей чорних дір.

Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів

У **першому розділі** подано ґрунтовний огляд історії досліджень фізики чорних дір в рамках загальної теорії відносності, звернуто увагу на розроблення в численній науковій літературі доповнюючих чи альтернативних її варіантів, зокрема з метою побудови послідовної квантової теорії гравітації. Зазначено важливість класичних розв'язків рівнянь Айнштайна, отриманих Шварцшільдом, Керром, Ньюменом, Райснером і Нордстремом, що лягли в основу подальшого аналізу фізичних та астрофізичних процесів поблизу відповідних чорних дір, у тому числі їх термодинаміки. Саме розвитку термодинаміки різних модельних чорних дір з нелінійними електромагнітними полями присвячені подальші три розділи дисертаційної роботи, які супроводжуються відповідними додатками.

У **другому розділі** досліджено тривимірну модель (у сенсі 2+1 розщеплення) статичної електрично зарядженої чорної діри з електромагнітним полем типу Борна-Інфельда, степеневого, логарифмічного й експоненціального характерів. Кожному із цих випадків відповідає конкретний вигляд лагранжіана у функції дії, у якій також враховано космологічну сталу. У рамках стандартної варіаційної процедури записано відповідні польові рівняння. Їх розв'язки, враховуючи сферичну симетрію метрики, записані в термінах радіальної, кутової і часової координат. Послідовно спочатку отримуються розв'язки для електромагнітного поля з графічною ілюстрацією (для усіх розглянутих типів поля) їх залежності від радіальної координати. З урахуванням цих розв'язків проаналізовано відповідні розв'язки рівнянь Айнштайна, які також проілюстровані на графіку. Наступний етап роботи полягав у дослідженні власне термодинаміки системи. Отримано оцінки температури випромінювання Гокінга на горизонті подій чорної діри, її залежність від радіальної координати. Проведено порівняльний аналізовано виразів електричного потенціалу для різних типів нелінійних електромагнітних полів. Отримано графіки залежності маси як термодинамічної функції та ізобарної теплоємності від радіальної координати.

Третій розділ присвячено аналізу тривимірної нестатичної моделі чорної діри з повільним стаціонарним обертанням за наявності нелінійного степеневого електромагнітного поля і з врахуванням від'ємної величини

космологічної сталої. Розглянуто залежність недіагональної метричної функції та компонент магнітного поля від радіальної координати за ненульового значення космологічної сталої. Встановлено, що термодинамічні характеристики такої моделі практично незалежні від значень швидкості повільного обертання.

У **четвертому розділі** досліджено електродинаміку Борна-Інфельда в полі статичної чорної діри за наявності у неї електричного та магнітного зарядів для чотиривимірного випадку (простір $3+1$). Використано запис метрики у стандартних сферичних координатах з урахуванням також плоскої і гіперболічної геометрії горизонту подій. Отримано залежність електричних та магнітних компонент поля від радіальної координати для вказаних трьох типів геометрій. Проаналізовано залежність температури випромінювання Гокінга й електричного потенціалу від радіальної координати. Детально досліджено термодинамічні характеристики системи у випадку сферичної геометрії горизонту подій. Отримане рівняння стану, подібне до рівняння стану газу Ван дер Ваальса. Обчислено критичні значення термодинамічних величин для різних значень параметра нелінійності, електричного і магнітного зарядів, що проілюстровано відповідними графіками. Розглянуто аналог класичного ефекту Джоуля-Томсона при від'ємному значенні космологічної сталої. Проаналізовано зміну температури чорної діри із зміною зовнішнього тиску для сталої маси, залежність процесу від знаку коефіцієнта Джоуля-Томсона.

Дисертаційна робота завершується **Висновками** та **Списком використаних джерел**, який налічує 131 найменування.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і висновків

Наукові положення і висновки дисертації є достатньо обґрунтованими й системно проаналізованими. Вони базуються на строгих аналітичних обчисленнях у поєднанні із застосуванням адекватних чисельних методів. Послідовно аналізується фізичний сенс і несуперечливість отриманих величин. Достовірність результатів дисертації забезпечується їх порівнянням із результатами інших авторів і перевіркою виконання необхідних граничних переходів. Публікації здобувача за темою дисертації пройшли об'єктивне рецензування у відомих міжнародних журналах.

Новизна отриманих результатів

1. Реалізовано системний підхід при дослідженні термодинамічних характеристик різних моделей чорних дір за наявності нелінійних електромагнітних полів.
2. Вперше отримано й проаналізовано розв'язки, які виявляють відмінності впливу параметрів нелінійності різних типів електромагнітних полів на термодинамічні характеристики статичної тривимірної чорної діри.
3. Для тривимірної чорної діри з повільним обертанням у випадку степеневого електромагнітного поля отримано розв'язки для цього поля без накладання додаткових обмежень. Оцінено вплив обертання на термодинамічні характеристики чорної діри.
4. Вперше для чотиривимірної статичної електрично і магнітно зарядженої чорної діри в рамках електродинаміки Борна-Інфельда встановлено основні термодинамічні характеристики, проаналізовано ефект Джоуля-Томсона.

Практична цінність отриманих результатів

Результати роботи мають теоретичний характер. Вони заповнюють прогалини попередніх досліджень інших авторів стосовно властивостей нелінійних електромагнітних полів на фоні чорних дір і є добрим орієнтиром для вибору актуальних напрямків подальших досліджень термодинаміки більш загальних типів чорних.

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

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно викладено в трьох статтях, опублікованих в наукових журналах, які індексуються в базах даних Scopus та Web of Science (одна – в журналі кватилію Q1, дві – в журналах кватилію Q2), і відображені в семи тезах наукових конференцій.

Зауваження до роботи

1. Доцільно було б повніше аргументувати важливість дослідження тривимірних моделей, розглянутих у роботі, в контексті більш загального вивчення властивостей гравітації за умов $2+1$ розщеплення.
2. Основні висновки роботи можна було сформулювати більш лаконічно.

Ці зауваження не впливають на високу загальну оцінку дисертаційної роботи.

Відсутність порушень академічної доброчесності

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

Загальний висновок

Дисертаційна робота 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 самостійним науковим дослідженням. Його результати дають змогу встановити термодинамічні властивості низки моделей чорних дір з нелінійним електромагнітним полем різних типів. Виклад матеріалу чіткий і послідовний.

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 йому ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
Інституту прикладних проблем механіки
і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

Р. М. Пляцко