

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

Однією із найбільш красивих і важливих властивостей чорних дір є та обставина, що вони мають термодинамічні властивості. Вони мають температуру. Ентропія, вони підпорядковуються 1-му узагальненому закону термодинаміки. Після відкриття цих властивостей у 70-х рр. (пов'язаного насамперед з іменами Бекенштейна та Хокінга), другий прорив у термодинаміці чорних дір (на жаль, не повною мірою освоєний у літературі досі) відбувся у 80-х рр. Це відбулось у роботах Йорка, який зрозумів ключову роль скінченних розмірів самогравітуючих систем та запропонував коректну побудову статистичних ансамблів для них. Протягом останнього десятиліття спостерігається новий сплеск активності у цій сфері, пов'язаний із роллю космологічної постійної, як термодинамічної змінної. Вона призводить до тиску, який враховується у 1-му законі. Ця нова підобласть одержала назву «хімії» чорних дір. Це абсолютно новий аспект термодинаміки, який активно розвивається і зараз. Тому актуальність теми не викликає жодних сумнівів.

Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів

Характерні властивості об'єктів, проаналізованих у роботі, полягають у тому, що (1) вони являють собою пов'язані системи електромагнітного та гравітаційного полів, (2), при цьому космологічна константа є термодинамічною змінною, так що йдеться про так звану розширену термодинаміку, (3) електродинаміка є нелінійною. Автор докладно проаналізував 3 моделі, із яких моделі 1 і 2 є низькорозмірними і належать $2+1$ -вимірному простору-часу. Модель 3 є $3+1$ -вимірною. Як лагранжіани нелінійної електродинаміки вибираються лагранжіан Борна-Інфельда, а також з експоненційною, логарифмічною та степеневою залежностями від інваріанту поля. Останній випадок відрізняється від інших тим, що не існує границі, в якій поле стає максвелівським.

Дослідження цих систем включає наступні компоненти. 1) Виписування рівнянь поля; 2) їх розв'язання (точно або у квадратурах для моделей 1 і 3, наближене для моделі 2, коли обертання є повільним); 3) аналіз термодинаміки.

Вводяться величини, характерні для термодинаміки – температура, тиск, рівняння стану, термодинамічний об'єм, ентропія та ентальпія. Отримано рівняння стану та досліджено можливість фазових переходів, знайдено критичну точку (у моделі, де вона існує). Для моделі 1 дослідження проведено одночасно для цілого ряду різних моделей нелінійної електродинаміки – Борна-Інфельда, степеневої, логарифмічної та експоненційної. Як цікавий результат хочу відзначити наявність фазового переходу в 3-й моделі для сферичного горизонту та його відсутність для інших топологій (гіперболічних та плоских). Для подальших досліджень було б цікаво з'ясувати, чи все це є лише властивістю даної конкретної моделі, чи за цим ховаються загальні закономірності зв'язку фазових переходів і топологій горизонту подій. Дисертації властиві єдність структури та методів дослідження, які застосовуються до всіх трьох моделей.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і висновків дисертаційного дослідження

Дисертант спирається на фундаментальні закони, справедливості яких не викликає сумнівів. Це рівняння Айнштейна та 1-й закон термодинаміки для чорних дір. Причому рівняння для пов'язаних гравітаційного та електромагнітного полів виведені з перших принципів – варіюванням дії для системи загалом. Аналогія рівняння стану з рівнянням Ван-дер-Ваальса, отримана для усіх 3-х моделей, узгоджується з подібним рівнянням, яке було отримано у літературі для інших моделей. Із вказаних причин наукові положення дисертації є достовірними, а одержані результати надійними.

Новизна отриманих результатів

Лагранжіани нелінійної електродинаміки, розглянуті в роботі, в даному контексті (тобто в термодинаміці чорних дір з космологічною постійною, як термодинамічною змінною) ще не досліджувалися. Відповідно, результати є новими. Єдине невелике застереження тут можна зробити щодо ефекту Джоуля Томсона, де (як зазначає сам дисертант) результати були отримані у статті [130]. Однак, у дисертації це було зроблено незалежно, а крім того, у контексті дисертації цей ефект є деталями, другорядними по відношенню до основних результатів. (Принадно зазначу, що такий збіг, коли різні автори практично одночасно отримують одні й ті самі результати – є ще одним свідченням актуальності роботи.)

Наукова та практична цінність отриманих результатів

За своїм змістом робота є теоретичною. Фізика чорних дір має фундаментальний характер і розширює наші уявлення про простір та час. Тому й результати слід розглядати з урахуванням цих особливостей. Робота відноситься не до

астрофізики, і вимагати її порівняння зі спостереженнями тут не можна. Це робота з теоретичної фізики і оцінювати її треба, виходячи саме з цього. У цьому плані робота представляє безумовну цінність, оскільки об'єднує настільки різні, начебто, сфери теоретичної фізики як, електродинаміка і фізика чорних дір, причому за наявності космологічної постійної. Також результати можуть бути використані в навчальному процесі в рамках просунутих курсів теорії гравітації.

Зауваження до роботи

1) Відповідно до Рис. 4.5 температура в моделі 3 може дорівнювати нулю. Це означає виникнення екстремальної чорної діри. Зазвичай такий стан є граничним між неекстремальною чорною дірою та голою сингулярністю. Про це в роботі не сказано нічого, відповідного аналізу немає.

2) Метрика моделі 3 описується формулою (4.24). Неясно, якими є умови існування горизонту, такий аналіз відсутній. Бажано було би бачити умову додатності маси в (4.25), але цього матеріалу немає.

3) Ефект Джоуля-Томсона у розглянутому контексті є чистою умовністю, яка не має фізичного сенсу (або принаймні такого сенсу не виявлено), оскільки зміна тиску еквівалентна зміні космологічної постійної. На ст. 97 сам дисертант пише, що розглядає його формально, але залишається незрозумілим, у чому полягає мотивація такого розгляду.

4) Не цілком зрозумілим є зміст маси, як її отримано, і яка «точка відліку» для її обчислення. У розв'язку Банадоса та ін. для $2+1$ чорних дір для маси, що прямує до нуля, горизонт зникає. Що ж відбувається тут, неясно, відповідний аналіз рівнянь (2.31)—(2.33) у роботі відсутній. Коректне визначення маси мало би включати аналіз поверхневих інтегралів у дії та гамільтоніані, подібно до того, як це було зроблено в роботі Банадоса та ін. [22]. На жаль, такий матеріал у дисертації відсутній.

5) У розділі 2 розглянуто модель чорної діри з повільним обертанням. Однак, при цьому термодинаміка в лінійному наближенні «не відчуває» обертання, так що залишається незрозумілим, як обертання може впливати на неї. Тут варто було би розглянути вищі порядки малості для обертання, чи зробити якісний аналіз обертання. Однак, такий матеріал у роботі відсутній.

Всі ці зауваження ніяк не відмінюють високого професійного рівня роботи. Ряд прогалин, присутніх у дисертації, міг би стати стимулом для подальших досліджень. Зокрема, це стосується умов додатності маси та існування горизонту, а також умов існування регулярних рішень та сингулярностей, властивостей екстремальних чорних дір. Також було б цікаво спробувати проаналізувати точні розв'язки за наявності як електромагнітного поля, так і обертання, хоча б чисельно. Термодинаміці чорних дір з горизонтами, які мають несферичну топологію варто було би присвятити окремі дослідження.

Відсутність порушень академічної доброчесності

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

Загальний висновок

В цілому дисертаційна робота Татарина Михайла Богдановича «Термодинаміка чорних дір з нелінійними матеріальними полями» є завершеною науковою працею в межах поставлених завдань, в якій розв'язана наукова проблема щодо ролі космологічної постійної у різних електродинамічних моделях у рамках загальної теорії відносності. Дисертаційна робота Татарина Михайла Богдановича «Термодинаміка чорних дір з нелінійними матеріальними полями» відповідає галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» та вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та п. 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а Татарин Михайло Богданович без сумніву заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика і астрономія».

Офіційний опонент
провідний науковий співробітник
Харківського національного університету
ім. В.Н. Каразіна
доктор фізико-математичних наук

Олег Борисович Заславський