

## Відгук офіційного опонента

на дисертацію Баннікової Олени Юріївни

“Тороїдальні структури в астрофізичних об’єктах”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

Дисертація О.Ю. Баннікової присвячена дослідженням гравітаційних і гідродинамічних властивостей тороїдальних структур в астрофізичних об’єктах. Такі структури є поширеними та пов’язані із спостережуваними властивостями різноманітних об’єктів, найвідомішими серед яких є активні ядра галактик, радіогалактики, сейфертівські галактики, квазари, кільцеві галактики тощо. Попри величезну увагу до цих об’єктів як астрофізиків-теоретиків так спостерігачів, багато питань залишаються маловивченими. Серед них - динаміка газу в гравітаційному полі тора та центральної маси галактики, стійкість самогравітуючого тора, випромінювання торів, динаміка і кінематика тороїдальних вихорів, їх роль у формуванні компонент джетів та ефекти гравітаційного линзування. Ці питання є предметом досліджень дисертаційної роботи, а їх розв’язання є актуальним напрямком досліджень в сучасній астрофізиці, оскільки вони є ключем до інтерпретації ряду спостережуваних даних високої роздільної здатності, отриманих в останні роки за допомогою новітніх технологій.

Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, в яких представлені оригінальні результати досліджень, висновків та списку цитованої літератури, який нараховує 244 джерел. Загальний об’єм дисертації – 337 стор. У вступі обгрунтовано актуальність теми дослідження та наведено загальний опис дисертації. Основну частину дисертації складає виклад результатів досліджень. Перший розділ присвячено огляду літератури за темою дисертаційного дослідження, аналізу спостережуваних проявів торів в активних ядрах галактик різних типів і кільцевих галактиках, а також їх теоретичних моделей. У 2-му розділі представлено результати досліджень динаміки кільцевого та дипольного тороїдальних вихорів у радіальному осесиметричному 2D потоці. Серед них важливими є розв’язки рівнянь Кірхгофа руху вихорів, які підтверджують можливість прискорення викидів акреційним потоком, що може бути додатковим механізмом формування компонент викидів в астрофізичних об’єктах. У 3-му розділі представлено результати досліджень динаміки дипольного тороїдального вихору у радіальному 3D збіжному потоці: Показано, що а) впродовж усього часу руху радіус вихрового кільця зменшується, а його швидкість зростає; б) існує сепаратриса розв’язків, яка відділяє тороїдальні вихори, які викидаються, від тих, що колапсують; і в) існує ефект бумеранга (зворотній рух) у випадку наявності ще й орбітального руху кільця. У 4-му розділі досліджується гравітаційний потенціал однорідного кругового тора шляхом сумування потенціалів елементарних тонких кілець, паралельних площині симетрії тора. Отримано точний інтегральний вираз — подвійний інтеграл з ядром у вигляді повного еліптичного інтегралу 1-го

роду, досліджено його асимптотики, та знайдено простіші наближені вирази зовнішнього потенціалу, які дають відхилення від точного потенціалу в межах відсотка. У 5-му розділі досліджено рух пробної частинки в гравітаційному полі нескінченно тонкого кільця при наявності центральної маси. Показано, що в такій системі є область, де не існує стійких колових орбіт для пробних частинок, що рухаються в екваторіальній площині. Цим пояснено існування та положення щілини в кільцевій галактиці Хога. Виявлено нові типи замкнених орбіт пробних частинок в меридіональній площині та досліджено виникнення хаосу з використанням відображення Пуанкаре. У 6-му розділі шляхом числового моделювання задачі  $N$  тіл розв'язується задача про рівноважну форму самогравітуючого тора в полі центральної маси. В якості початкових умов використовувався тор Кеплера, який складається з частинок, що рухаються по незбурених кеплерівських орбітах. Виявлено, що в рівноважному стані перетин тора має форму овалу з гаусівським розподілом густини частинок. При цьому стабільність тора досягається за рахунок того факту, що хмари рухаються в ньому по нахилених орбітах. У 7-му розділі представлено результати дослідження фізичних властивостей газопилових торів в активних ядрах галактик шляхом моделювання задачі  $N$  тіл з різними початковими умовами. Вони показують, що для стабільності товстого тора необхідно, щоб в початковому стані елементи орбіт хмар мали розкид не тільки за нахилами, а й за ексцентриситетами. Початковий випадковий розкид за всіма елементами орбіт при наявності анізотропії уздовж осі симетрії призводить в результаті самогравітації до формування більш товстої тороїдальної структури. У 8-му розділі представлено результати досліджень ефектів гравітаційного лінування гаусових джерел системою тор і центральна маса. Числовим моделюванням методом *ray-tracing* вивчено різні випадки співвідношень мас, розмірів та поверхневої густини диску. Показано, що можливі формування трьох, двох і одного кільця Айнштайна та виведено умови для них, фізичний сенс яких автор пов'язує з "конкуренцією" областей гравітаційного впливу центральної маси та диску.

Основні результати, які складають наукову новизну та винесені на захист є такими:

- особливості динаміки кільцевого та дипольного тороїдальних вихорів у радіальному осесиметричному 2D та 3D потоках: прискорення, зворотній рух, викиди, колапс, вплив орбітального руху;
- новий інтегральний вираз для потенціалу однорідного кругового тора: аналіз поведінки потенціалу всередині та зовні тора при різних співвідношеннях радіусів тора, співставлення з відомими асимптотичними розв'язками задачі;
- аналіз руху пробних частинок в системі "тор - центральне тіло": доведення існування області, де не існує стійких колових орбіт, що рухаються в екваторіальній площині, та виявлення нових типів замкнених орбіт в меридіональній площині;
- аналіз властивостей тора в задачі  $N$  тіл: умови стабільності товстого тора в полі



центральної маси, рівноважна форма самогравітуючого тора в полі центральної маси, можливі орбіти у внутрішньому потенціалі тора (гало, коробчаті, квазі-замкнені);

- ефекти гравітаційного лінзування в системі центральна маса і тор: можливі формування трьох, двох і одного кільця Ейнштейна, які зумовлені "конкуренцією" областей гравітаційного впливу центральної маси та диску.

Усі результати дисертаційного дослідження опубліковані у 21 статті у реферованих наукових журналах, з них 7 у журналах, що належать до 1-ої квартилі, у 10 статтях у працях конференцій та у 32 тезах доповідей на конференціях різного рівня.

Наукові положення та методи, на яких базується дисертаційна робота, є цілком обґрунтованими. Винесені на захист результати дисертації є новими, вони апробовані на наукових конференціях та опубліковані у фахових вітчизняних та міжнародних журналах. Дисертаційна робота оформлена згідно з чинними вимогами до дисертацій на здобуття доктора фізико-математичних наук, отримані результати, які винесені на захист, викладені змістовно, важливі роботи за темою дисертаційного дослідження процитовані.

Характеризуючи дисертацію О.Ю. Баннікової в цілому, слід відзначити, що в ній використано як сучасний інструментарій комп'ютерної астрофізики, що включає методи числових моделювань, так і спостережувані дані, отримані наземними телескопами. Вона містить багато цікавих та оригінальних результатів, які мають значну наукову цінність. Текст дисертації написано доброю літературною мовою та ілюстрована якісними рисунками.

Тим не менше, можна зробити кілька зауважень по суті роботи:

- У розділі 1 приведено огляд статей, які пов'язані в основному із спостереженнями об'єктів, які є кандидатами на існування в них тороїдальних структур, і практично не згадані роботи теоретичного характеру, в яких такі структури аналізувались аналітичними, напів-аналітичними та методами N-частинкового моделювання.
- У розділі 6 робиться висновок про стабільність тора в гравітаційному полі центральної маси, який на мою думку справедливий тільки для тора з дуже спеціальними початковими умовами — "тор Кеплера". Це цікаво з теоретичної точки зору, але застосування для астрофізичних об'єктів може привести до помилкових інтерпретацій спостережуваних даних. Необхідно розвинути підхід в напрямку загальніших початкових умов в N-частинкових моделюваннях динаміки тора.
- У розділі 8 вивчено гравітаційне лінзування гаусових джерел системою тор і центральна маса і обговорюються відмінності від зображень точкової лінзи у випадку одного кільця Ейнштейна. Варто було б обговорити ефекти зміщення чи проходження джерела в площині такої системи, які мали б бути цікавими з точки зору їх утотоження.
- Варто у текстах опису майбутніх досліджень замість "клочковата структура" вживати "клоччаста структура", "безперервне середовище" — "суцільне середовище",

“стабільність тора” — “стійкість тора”, “споти” -- ”цятки”, “темна речовина” -- ”темна матерія”, “радіус прагне до нуля” -- “радіус прямує до нуля”.

Згадані недоліки, однак, не зменшують наукової цінності дисертації, яка є завершеною науково-дослідною роботою і має перспективи подальшого розвитку та застосування у фізиці галактик та активних ядер галактик, атмосфер планет тощо. Її новизна, актуальність та обґрунтованість результатів не викликають сумнівів.

Автореферат повністю відображає зміст і основні результати дисертації.

За актуальністю тематики, об’ємом виконаних досліджень та науковою цінністю результатів дисертація О.Ю. Баннікової повністю відповідає чинним вимогам до докторських дисертацій. Вважаю, що її авторка Олена Юріївна Баннікова заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія.

Головний науковий співробітник,  
д.ф.-м. н., професор

Б.С. Новосядлий

Підпис Б.С. Новосядлого завіряю:  
Вчений секретар Львівського національного  
університету імені Івана Франка



О.С. Грабовецька

22 червня 2020 р.

*Відгук одержано 23 червня 2020р.*

*Ученій секретар спецради*