

**ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**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

**Загальна характеристика роботи**

Дисертаційна робота присвячена важливій як з фундаментальної, так і з практичної (наглядової) точок зору проблемі - дослідженню гравітаційних і гідродинамічних властивостей тороїдальних структур в астрофізиці та застосуванню отриманих результатів для інтерпретації даних спостережень.

Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 337 сторінок.

**Актуальність обраної теми**

Актуальність представленої до захисту дисертації диктується наступними обставинами:

1. В останні десятиліття в космології виник новий клас спостережуваних об'єктів - астрофізичні об'єкти з тороїдальними структурами. Починаючи з новаторської роботи Антонуччі і Міллера тори розглядаються як необхідний елемент структури активних галактичних ядер (АЯГ) і як основа їх уніфікованої моделі.
2. Клас, що містить тороїдальні структури, включає велику кількість об'єктів (активні галактичні ядра, кільцеві галактики та інші), динаміка яких важлива для нашого розуміння еволюції Всесвіту.
3. Можна очікувати (очікування виправдалися) нетривіальні фізичні ефекти в динаміці систем, що містять тороїдальні структури. Іншими словами, можна очікувати, що результати дослідження виявляться несподіваними в порівнянні з тим до чого ми звикли для топологічно більш простих об'єктів
4. Вже зараз ясно, що клас астрофізичних об'єктів з тороїдальними структурами з плином часу буде тільки збільшуватися.
5. Послідовна теорія опису таких об'єктів відсутня

Що стосується новизни роботи, то відзначимо два її ознаки: новизна об'єкта дослідження (obscuring torus -затінюючий тор) і новизна теорії, побудованої для її опису.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується також тим, що вона є складовою частиною низки проектів по астрофізики та космології.

## Складність розв'язуваної проблеми

Говорячи про складність розв'язуваної в дисертації проблеми, зупинимося лише на одному елементі цієї складності. У дисертації ми маємо справу з двозв'язним об'єктом (тор), який характеризується нетривіальними властивостями, наприклад, гауссова кривизна поверхні тора змінює знак при обході його перетину. Це призводить до необхідності пошуку нових підходів в дослідженні гравітаційного потенціалу і динаміки частинок. Також слід зауважити, що дослідження стабільності тору, який складається з багатьох (порядку 10 тисяч) мас, потребує тривалих чисельних моделювань, що в свою чергу потребує застосування сучасних методів, таких як паралельне обчислювання.

## Аналіз змісту дисертації

Перший розділ дисертації "**Тороїдальні структури в астрофізичних об'єктах**" істотно виходить за рамки огляду літератури і являє всебічний опис поточного стану проблеми, яку передбачається розв'язати. Підкреслюю, що основні положення цього розділу базуються на власних публікаціях автора, що свідчить про те, що він є одним з піонерів в області дослідження тороїдальних структур. Розділ прекрасно ілюстрований і істотно полегшує подальше читання дисертації.

У другому розділі "**Динаміка тороїдального вихору у радіальному потоці**" розглянуто плоску динаміку пари вихорів у радіальному потоці. Вперше показано, що ця задача допускає точний розв'язок. Аналіз отриманих в цьому розділі результатів привів до ряду нетривіальних наслідків, що на відміну у від добре звісного випадку у відсутності потоку, урахування радіального потоку призводить до суттєвих відмінностей. У розбіжному потоці відстань між компонентами пари збільшується, а швидкість руху сповільнюється, а в збіжному потоці ситуація змінюється на протилежну: зменшення відстані між компонентами пари призводить до збільшення їх швидкості. Для інтерпретації спостережних даних представляє інтерес розглянута в цьому розділі динаміка дипольного тороїдального вихору в радіальному потоці в наближенні чотирьох плоских вихорів та показано, що в цьому випадку компоненти пар викидаються збіжним потоком, а швидкість викиду експоненціально збільшується.

В третьому розділі "**Динаміка тороїдальних вихорів в радіальному потоці в 3D випадку**" дослідження поширено на 3D випадок. Це узагальнення викликано бажанням застосувати результати до реальних астрофізичних спостережень. Перехід від плоскої задачі до об'ємної, з одного боку, зажадав нових методів розрахунку, а з іншого, дозволив отримати якісно нові результати. Так наприклад, на відміну від плоского випадку, при достатній потужності потоку відбувається захоплення кільцевих вихорів потоком, що супроводжується їх колапсом.

У розділах 4,5 побудован гравітаційний потенціал тора і вивчена динаміка частинок в цьому потенціалі при наявності центральної маси.

Четвертий розділ "**Гравітаційний потенціал однорідного кругового тора**" на мою думку є ключовим і найбільш цікавим (особливо в історичному плані) розділом дисертації. Ще в дев'ятнадцятому столітті великий Б. Ріман намагався представити потенціал тора подвійним рядом Фур'є, але в задачі Діріхле він не врахував граничні

умови і не довів розв'язок до кінця. За минулі майже півтора століття у вирішенні задачі був досягнутий певний прогрес і навіть отримано формальний розв'язок, що містить подвійні інтеграли. Нові методи, розвинені в теорії потенціалу, дозволили просунути в аналітиці, проте громіздкість і складність отриманого виразу практично виключала можливість його використання для практичних цілей.

У перших трьох підрозділах четвертого розділу проаналізовані існуючі підходи побудови потенціалу тора (пряме об'ємне інтегрування, використання теореми Діріхле, підсумовування по елементарним джерелам гравітації) і вказані недоліки, що виключають їх безпосереднє застосування в практичних цілях. Однак вдалий оригінальний вибір елементарного джерела (в разі однорідного тора з круговим перерізом) нескінченно тонкого кільця дозволив представити потенціал тора в форму (4.14) зручну як для чисельних розрахунків, так і для подальшого просування в аналітиці. Важливо відзначити, що тестування "блокової" формули з результатом, отриманим об'ємним інтеграцією, показує, що в першому випадку потрібно в шість разів менша точність для досягнення порівнянних результатів.

Не можу не відзначити важливий результат, отриманий в цьому розділі: зовнішній потенціал тора з хорошою точністю відповідає потенціалу нескінченно тонкого кільця тієї ж маси, що проходить через центр перетину тора. Цей результат підкреслює природність вибору в якості елементарного блоку саме нескінченно тонкого кільця

У п'ятому розділі **"Динаміка в зовнішньому гравітаційному потенціалі тора і застосування до кільцевих галактик"** вираз для потенціалу тора, отриманий в попередньому розділі, використано для опису динаміки пробної частинки. Динаміка з "точним" потенціалом (4.14) замість раніше використаних в цих проблемах простих модельних потенціалів (нескінченно тонке кільце) дозволяє врахувати більш тонкі ефекти, які в найближчому майбутньому стануть доступні спостереженням.

У розділі введено нове поняття - окружність Лагранжа - геометричне місце точок нестійкої рівноваги в полі кругового тора і центральної маси. При зміні тора масивної окружністю отримано аналітичний вираз для радіуса кола Лагранжа (5.7 точне) і (5.11 наближене)).

У цьому ж розділі детально проаналізовані випадки руху пробної частинки в екваторіальній і меридіональній площинах. Для руху в екваторіальній площині отримано, з моєї точки зору, красивий нетривіальний результат: розташування стійких і нестійких кругових орбіт протилежно ситуації в разі чорної діри Шварцшильда. Як показано в дисертації, причина відмінності в зворотному порядку розташування екстремумів ефективних потенціалів в першому і другому випадках (рис.5.6 і 6.7).

У разі руху в меридіональній площині виконана класифікація замкнених орбіт і встановлений факт існування хаотичного руху при певних початкових значеннях пробних частинок.

Виявлена цікава структурна особливість кільцевих галактик - існування області зі зниженою щільністю речовини, розташованої між центральною галактикою і кільцем. Походження цієї області пов'язано з наявністю в обмеженій частини конфігураційного

простору системи нестійких періодичних орбіт. Використовуючи отримані результати виконана оцінка розмірів основних структурних елементів об'єкта Хога.

У шостому розділі **"Задача N тіл для пошуку рівноважної форми самогравітуючого тора: застосування до пилових торів активних ядер галактик"** класична задача про пошук рівноважної форми гравітуючого об'єкта вирішується стосовно тороїдальних структур в гравітаційному полі центральної маси. У цьому розділі в якості методу дослідження вибрано чисельне моделювання в межах задачі багатьох тіл. Для вирішення задачі в процесі моделювання вивчається динаміка масивних частинок, що утворюють пиловий тор. Отримана відповідь: з масивних частинок, що рухаються в гравітаційному полі центральної маси в процесі еволюції може сформуватися тороїдальна структура з часом життя, який можна порівняти з віком батьківської галактики. В якості початкових умов запропонований новий для астрофізики ідеалізований (в силу цілого ряду додаткових умов на динаміку частинок, що утворюють тор) об'єкт, який названий автором "тором Кеплера". Показано, що рівноважний перетин гравітуючого тора має форму овалу, а розподіл густини частинок в перетині тора підпорядковується гауссовому розподілу з максимумом близьким до центру перетину тора.

У сьомому розділі **"Фізичні властивості і формування газопилових торів в активних ядрах галактик"**, спираючись на результати моделювання, вивчені фізичні властивості пилових торів і отримана оцінка ряду параметрів. Це дозволило перейти до інтерпретації спостережень, пов'язаних з конкретними АЯГ. Отримані красиві розв'язки, що дозволяють краще зрозуміти геометрію запропонованих в дисертації нових об'єктів (еліптичного і кругового торів Кеплера) при граничному переході до нульових нахилень. У цій межі еліптичний тор Кеплера вироджується в нескінченно тонке кільце, а круговий тор Кеплера - в кеплерівський диск. Зазначу винахідливість при моделюванні формування торів. Для опису цього процесу потрібно "зовнішня" анізотропія, яка вводиться в початкові умови.

У восьмому розділі **"Ефекти гравітаційного лінзування на системі тор-центральна маса"**, на мою думку, отриманий дуже красивий (хоча поки і грубий) результат: обмеження на радіуси диска, при якому існують три кільця Ейнштейна. Спостереження широкого яскравого кільця Ейнштейна може стати у майбутньому критерієм для виявлення об'єктів з кільцевою структурою.

У **Висновках** наведені основні наукові результати, що отримані в дисертаційній роботі. Вони відповідають задачам, які були поставлені для досягнення основної мети дисертації.

Перейдемо тепер до загальної оцінки результатів, представлених у дисертації. Дисертація являє органічне поєднання високого рівня аналітики (вона могла бути з успіхом захищена за спеціальністю 01.04.02 - «теоретична фізика»), численних розрахунків (включаючи моделювання) і аналізу спостережень. Звертає на себе увагу різноманітність фізичних і математичних методів, використаних для досягнення мети.

Серед чималої кількості нових результатів, отриманих в дисертації, можна відзначити, зокрема, наступні:

1. Інтегральний вираз для потенціалу однорідного кругового тора, дійсний в довільній точці простору шляхом складання тора з нескінченно тонких кілець.

2. Узагальнення поняття точки Лагранжа
3. Модель затінюючого тора в активних ядрах галактик
4. Опис еволюції самогравітуючого тора з різними початковими умовами .
5. Оціночні вирази для температури хмар внаслідок нагріву їх випромінюванням акреційного диска, які узгоджуються з даними спостережень.
6. Перші дослідження гравітаційного лінзування на системах, що налічують тороїдальні структури.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Результати дисертації достатньо повно відображені в публікаціях. Публікації за темою дисертації (21 робота), публікації які засвідчують апробацію результатів (42 праці конференцій, тези та презентації доповідей на конференціях).

### **Зауваження щодо змісту дисертації**

Я не знайшов в дисертації ніяких серйозних недоліків, проте, слідуючи традиції, зроблю ряд зауважень.

1. Термін "загальна теорія відносності" (ЗТВ) відсутній, використовується термін "релятивістський випадок", який з'явився лише на 182 сторінці, а в списку умовних позначеннях термін ЗТВ відсутній взагалі. На мою думку, питання про зв'язок використовуваного підходу з ЗТВ необхідно було обговорити спочатку.
  2. Прихильність автора до головного героя - затінюючого тора - призводить подекуди до явних (на мій погляд) перебільшень. Наприклад: "Таким чином, УС впорядкувала різноманіття АЯГ, що виявляється різними спостережними ознаками, а також прояснила основні фізичні процеси, що призводять до цього різноманіття. Ключову роль в УС грає газопиловий тор, який також називають затінюючим" (стр.43).
  3. Не зовсім вдалі назви деяких підрозділів (на відміну від гарного тексту самої дисертації)
    - 4.1.1. Потенціал тора прямим інтегруванням за об'ємом.
    - 4.1.2. Потенціал тора по теоремі Діріхле.
    - 4.1.3. Використання потенціалів елементарних тіл.
  4. У дисертації знайдено також вираз для гравітаційного потенціалу еліптичного тора, однак наближені вирази не наведено. Чи можливо отримати розкладання в ряд для цього випадку аналогічно, як це було зроблено для тора з круговим перетином?
  5. Зауваження, яке скоріш побажання, розглянути більш реалістичний випадок гравітаційного лінзування для неоднорідного розподілу речовини в диску-лізні.
- Проте зазначені зауваження жодним чином не понижують загальної високої оцінки дисертації. Підсумовуючи, в дисертаційній роботі О.Ю. Баннікової розв'язано складні і актуальні задачі в галузі сучасної космології та теоретичної фізики в цілому. Більш того,



можна сказати, що дослідження О.Ю. Баннікової відкривають новий напрям в прикладній космології: тороїдальні структури в астрофізиці.

Тому я вважаю, що дисертація О.Ю. Баннікової є завершеним, самостійним дослідженням, що повністю відповідає паспорту спеціальності 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія.

Всі розділи дисертації є взаємопов'язаними. Викладення ведеться загалом доброю українською мовою. Автореферат повністю відображає зміст дисертації. Вважаю, що дисертаційна робота О.Ю. Баннікової "Тороїдальні структури в астрофізичних об'єктах" задовольняє усім вимогам до докторських дисертацій, а її автор, Олена Юрїївна Баннікова, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія.

Офіційний опонент

доктор фіз.-мат. наук,  
завідуючий відділом теоретико-групових властивостей  
елементарних частинок, теорії ядра і нелінійної динаміки  
Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера  
ННЦ "Харківський Фізико-Технічний Інститут"

*Болотін*

Ю.Л. Болотін

Підпис Ю.Л.Болотіна засвідчую.

Вчений секретар ІТФ ННЦ ХФТ



*Кірдіна*

А.І. Кірдіна

*Відгук одержано 16 червня 2020 р*  
*Вчений секретар спецради*