

Відгук офіційного опонента на дисертаційну роботу

Баннікової Олени Юріївни

“Тороїдальні структури в астрофізичних об’єктах”,

поданої на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія

У позагалактичних системах спостерігають не тільки однозв’язні об’єкти, але й структури тороїдального типу. Прикладом таких структур є газопилові торі в активних ядрах галактик (АЯГ), а також кільцеві галактики, в яких маса центральної галактики порівняна з масою кільця зореутворення. Схожу форму можуть мати і протопланетні диски. Але, незважаючи на велику кількість спостережних даних, тороїдальні структури залишаються маловивченими. Щоб відповісти на низку питань, які виникають при інтерпретації спостережень, необхідно мати адекватні представлення гравітаційного потенціалу тороподібних структур, дослідити пов’язані з цим питання динаміки газу; цілком природним чином тут виникають традиційні питання про динаміку вихрових течій. Ці обставини свідчать про сучасність та актуальність дисертаційної роботи О.Ю. Баннікової.

Основний текст дисертації складається з оглядової частини на 40 стор. (розділ 1), результативних розділів 2–8 на 214 стор., висновків та списку літератури з 235 джерел.

У «Вступі» повно сформульовані мета та задачі роботи, обґрунтована актуальність теми дослідження, продемонстровано зв’язок з науковими програмами та зазначені новизна та цінність отриманих результатів.

У розділі 1 дисертації надано детальний огляд літератури, присвячений спостереженням газопилових торів в АЯГ. Подано аналіз спостережень в різних діапазонах із залученням як оптичних інтерферометрів (VLTI), так і радіоінтерферометрів (VLA, VLBI, VLBA). Особливу увагу приділено розгляду уніфікованої схеми АЯГ з надмасивною чорною дірою (НМЧД) в центрі з акреційним диском та газопиловим тором, яка наразі підтверджується різноманітними спостереженнями електромагнітного випромінювання від рентгенівського до радіодіапазону. Оглянуто спостережні дані щодо кільцевих галактик та дослідження динаміки в гравітаційному полі таких систем. Обґрунтовано необхідність побудови динамічної моделі затінюючого тора, яка враховує його самогравітацію і кламповану структуру, а також актуальність дослідження динаміки вихорів в системах з радіальними течіями.

Перейдемо до основного тексту дисертації.

Розділи 2,3 дисертації присвячені дослідженням руху вихорів в нестисливій ідеальній рідині.

У розділі 2 проведено теоретичне дослідження одиночного і дипольного тороїдального вихору в радіальному потоці в рамках двовимірної розгляду. Знайдено аналітичний розв’язок, який детально проаналізовано для випадків динаміки вихорів в збіжному та розбіжному потоці. Розв’язок демонструє важливий ефект, пов’язаний з прискоренням кільцевого вихору акреційним

поток, коли швидкість вихору може збільшуватися експоненційно в залежності від потужності стоку та інтенсивності вихору. Розглянуто динаміку і більш складних плоских течій.

У розділі 3 задача про динаміку кільцевих вихорів в радіальному потоці узагальнена на тривимірний випадок і розглянута в рамках гамільтонова формалізму. Продемонстровано, що важливий результат про прискорення вихорів в потоці, який був отриманий для 2D випадку зберігається також і при врахуванні тривимірності. Однак аналіз розв'язків рівнянь руху демонструє, що для випадку дипольного тороїдального вихору існує критична потужність стоку, яка розділяє два випадки: викид компонент тороїдального вихору і колапс його у сток. У наступних підрозділах досліджено вплив орбітального руху на динаміку вихору, що безумовно важливо для астрофізичних об'єктів. Отримані результати демонструють нетривіальну поведінку, яка пов'язана зі зворотним рухом тороїдальних вихорів.

Резюмуючи результати розділів 2 та 3, слід відзначити, що, незважаючи на те, що динаміку вихрових течій вивчають вже понад 100 років, автору вдалося знайти нові аналітичні розв'язки рівнянь Ейлера. Основне значення цих розв'язків, на мою думку, полягає у тому, що вони дають якісні приклади нестисливих течій, які наводять на думку про гідродинамічні режими, що можуть бути (за певних умов) реалізовані в АЯГ при формуванні викидів з центральної машини, а також при утворенні кільцевих галактичних структур.

Розділи 4,5 присвячені вивченню потенціалу тора та руху частинок у цьому потенціалі.

У розділі 4 дисертації подано новий вираз для потенціалу тора шляхом складання його з масивних кілець. Отримані наближені вирази для цього потенціалу в зовнішній і внутрішній областях, які зручні для подальшого використання в задачах динаміки. Показано, що зовнішній потенціал тора з гарною точністю можна подати як потенціал масивної окружності аж до поверхні тора. Отримані результати дозволяють спростити деякі задачі динаміки і звести їх до аналітичного виду. Розділ 5 містить важливі результати про рух пробної частинки в зовнішньому гравітаційному полі тора за наявності центральної маси; ці дослідження проведено на основі попереднього розділу. Виявлено, що в такій системі існує радіус останньої (зовнішньої) стійкої колової орбіти між центральною масою і тором. Отримано як аналітичні розв'язки, так і чисельні траєкторії руху частинки, які демонструють нетривіальність динаміки в такому гравітаційному полі. Результати застосовано для інтерпретації спостережної щілини в об'єктах типу об'єкта Хога, що дозволяє не тільки пояснити структуру таких об'єктів, але також зробити висновки про фізичні характеристики кільцевих галактик.

Розділи 6,7 присвячені чисельним моделюванням тороподібних структур, маючи на увазі застосування до АЯГ. Ці результати дисертації, на мою думку, є найбільш астрофізично цікавими і вагомими.

У розділі 6 розглянуто багаточастинкову задачу про пошук рівноважної форми самогравітуючого тора в полі центральної маси в рамках. В якості

початкових умов автор запропонувала розподіл N частинок, що рухаються по нахиленим орбітам з розкидом за ексцентриситетами у полі центру (в дисертації це названо тором Кеплера). Далі цей розподіл використовується як початкові умови для чисельних експериментів в задачі N тіл з урахуванням взаємодії між частинками. Моделювання показало, що тор досягає рівноважного стану, зберігаючи геометрично товсту структуру без чіткої границі. Розподіл частинок (хмар) в центральній частині тора має певні ознаки гауссового (але це не означає, що він є точно гауссовим). Зазначу, що для вивчення руху частинок тут використано опис внутрішнього потенціалу тора, запропонований в розділі 4.

Розділ 7 присвячений дослідженню впливу початкових умов на рівноважну форму самогравітуючого тора. Отримано важливий висновок, що тор залишається стабільним і геометрично товстим, якщо в початковому стані існує розкид хмар по нахилах та по ексцентриситетах. На підставі результатів моделювання запропонована динамічна модель затінюючого тора в АЯГ. Запропоновано сценарій формування тора в АЯГ, отримано оцінки фізичних та геометричних характеристик тора. Зазначено, що ефекти самогравітації тора, які призводять до більш низьких швидкостей хмар на його зовнішній границі, необхідно враховувати при оцінках оцінки маси НМЧД.

Розділ 8 присвячений дослідженню ефектів гравітаційного лінзування на системі "тор і центральна маса" в моделі диска з отвором. Отримано рівняння лінзи, проведені чисельні моделювання ефектів гравітаційного лінзування з використанням алгоритму трасування променів. Показано, що така система допускає формування декількох кілець Ейнштейна в залежності від поверхневої густини в диску. Проведено детальне дослідження системи аналітично та чисельно. Один з результатів фактично стосується зміни напрямку шири (shear), що може приводити до радіально витягнутих зображень у випадку спеціального розподілу темної матерії в центрально симетричній системі. Подібна ситуація може бути цікавою для пошуку систем із значним вмістом темної матерії в галактиці-лінзі. Слід зазначити, що розглянута в дисертації гравітаційно-лінзова система є узагальненням відомих класичних випадків і граничні переходи до цих випадків також детально розглянуті.

Сформулюємо основні зауваження до тексту дисертації.

1. У оглядовому розділі при обговоренні структури затінюючих торів в АЯГ не приділено достатньої уваги даним рентгенівським спостереженням, які, разом з іншими діапазонами електромагнітного випромінювання, є зараз одними з основних джерел інформації про ці об'єкти. Зокрема, є велика кількість робіт в контексті рентгенівських спостережень, де використовується (в інших постановках задач, під іншими назвами) модель клампованого тора, про який йдеться, напр., в п.1.1.6, п.7.5,7.6 (див. напр. "X-ray spectral model for Compton-thick toroidal reprocessors", Murphy, K. D., Yaqoob, T., 2009, MNRAS, 397, 1549) та статті, що посилаються на цю роботу, а також обчислювальні програми, що дозволяють аналізувати рентгенівські спектральні параметри в рамках цієї моделі). Було б цікаво порівняти, як результати п. 7.6, зокрема, по

числу та параметрам хмар в газопиловому торі АЯГ, узгоджуються з даними рентгенівських спостережень для конкретних об'єктів.

2. Розділи 2,3 спираються на рівняння Ейлера (ідеальна нерелятивістська нестислива рідина). Хоча в п. 2.7 обговорено певні умови щодо застосування до АЯГ, залишається нез'ясованою низка питань, які можуть вплинути на якісні результати щодо динаміки вихорів – за винятком застережень, які лише мимохідь зроблені в цих розділах. А саме, за яких конкретних обмежень урахування потужних магнітних полів, дисипативних та релятивістських ефектів не змінить якісні властивості розв'язків? Зрозуміло, що повний розгляд цих питань вимагає складного чисельного моделювання, не кажучи вже про можливість аналітичних підходів до вивчення конкретних об'єктів. Тому ці зауваження слід сприймати скорше, як побажання для подальших досліджень. Але в дисертації можна було б обговорити це хоча б на оціночному рівні.

3. У дисертації та в роботах автора (зокрема, в MNRAS) є необхідні посилання на роботи Кондрат'єва (з співавторами) та Фукушіми, які пов'язані з темою розділу 4 досить щільно, й зазначено відмінності підходу автора при обчисленні гравітаційного потенціала тору. Але, оскільки задача про потенціал тору має досить тривалу історію, бажано було сформулювати переваги оригінального методу у висновках до розділу 4, а у самому розділі 4 не завадило б продемонструвати оцінки обчислювального часу в різних підходах.

У тексті дисертації зустрічаються неточні формулювання. Найбільш суттєві, на нашу думку, приклади зазначені нижче.

4. У розділі 7 є неодноразове твердження про гауссів розподіл частинок (хмарок) по різних параметрам у торі (напр., «гауссів розподіл хмар в перетині тора», стор. 252). По-перше, для того, щоб вважати подібні твердження строго доведеними, потрібний аналіз залишків при порівнянні з гауссіанами розподілів, отриманих чисельними методами; цього в дисертації немає. Більше того, з результатів дисертації випливає, що цей розподіл як раз не є гауссовим. Найбільш явно – з Рис. 7.7, де є очевидна асиметрія розподілів в перерізі тору та наявність «носику». Але все стане на свої місця, якщо термін «гауссовий» замінити на «гауссоподібний» і застосовувати це до центральної частини перерізу тору. Аналогічна неточність є у висновках до розділу 1, де на стор. 79 написано "Дані спостережень показують, що затінюючі тори складаються з хмар, а їх розподіл гауссів зі згладженими межами", а в тексті є відповідне посилання на роботу [190]. Однак в [190] гауссів розподіл розглядається як приклад моделі тора з розмитими краями, але не як спостережно доведений факт.

5. На стор. 282 написано, що в системі «існують радіальні критичні криві (умова $dy/dx=0$)», що приводить до формування зображень, витягнутих уздовж радіуса. Висновок щодо можливої форми зображень, безумовно, правильний і підтверджується моделюванням зображень, напр., на Рис. 8.4.б, але це пов'язано з малими розмірами джерел та зі згаданим вище напрямком ширину. А критичні криві не можуть бути «радіальними» в центрально-симетричній системі; вони є кільцевими.

У дисертації є інші неточності, а також описки як в основному тексті, так і в списку посилань, які, однак, не впливають на загальну позитивну оцінку роботи і не применшують її наукової і практичної цінності.

Перейдемо до загальної оцінки докторської дисертації О.Ю. Баннікової, яка провела об'ємну роботу по різнобічному вивченню тороїдальних структур в астрофізичних системах. Результати дисертації апробовані на представницьких наукових конференціях та семінарах і опубліковані в авторитетних виданнях, значна частина яких має високий міжнародний статус. Ці результати є новими, вони створюють стимули для подальших досліджень і мають значення у позагалактичній астрономії, у першу чергу, для фізики активних ядер галактик. Вони можуть бути використані в дослідженнях, що проводиться астрономічними установами НАН України, а також в астрономічних обсерваторіях університетів МОН України. Автореферат правильно відображає зміст дисертації.

Дисертаційна робота “Тороїдальні структури в астрофізичних об'єктах” виконана на високому науковому рівні та задовольняє сучасним науковим стандартам та усім вимогам Міністерства освіти і науки України до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, а її автор — Баннікова Олена Юріївна — безумовно заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія.

Завідувач відділу астрофізики
Астрономічної обсерваторії
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктор фіз.-мат. наук, професор

В.І. Жданов

Підпис Жданова В. І. ЗАСВІДЧУЮ

ПІДПИС
ВЧЕЮМ СЕНАТОМ
КАРАУЛЬНА
18.06



Відгук сфериано 18 червня 2020 р
Вчений секретар спецради