

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

Шевцової Аліси Ігорівни

«МІРА ОБЕРТАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ

У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

Актуальність дисертаційного дослідження. З часу відкриття пульсарів у 1967 році на частоті 85,7 МГц за допомогою меридіанного радіотелескопу Маллардської радіоастрономічної обсерваторії Кембриджського університету, реєстрації випромінювання пульсара в оптичному діапазоні в 1969 році і в Х-діапазоні в 1971 році – пульсари як різновид нейтронних зорь залишаються об'єктами інтенсивних досліджень. Унікальні спостережні та отримані теоретично властивості радіопульсарів – імпульсний характер випромінювання синхротронного походження, майже 100 % лінійна поляризація випромінювання, спалахові збільшення густини потоку окремих імпульсів, потужне магнітне поле, структура магнітосферного середовища, механізм генерації випромінювання та акреції у разі входження пульсара до подвійної системи, як і наявність планетних систем поблизу пульсарів, відкритих у 1990-ті роки за зміщенням радіоліній, – дають змогу отримати нові фундаментальні знання не тільки в фізиці зір і планетних систем, а й теорії гравітації та астрофізиці високих енергій, розробити нові математичні методи для коректного опису фізичних процесів, які не можливо відтворити в земних умовах.

Декаметровий спектральний радіодіапазон є найцікавішим для дослідження властивостей середовища поширення по його впливу на імпульсні сигнали пульсара на коротких часових масштабах (~1 мс). Також переваги дослідженням у декаметровому радіодіапазоні додає можливість спостереження дипольної структури магнітного поля магнітосфери пульсара, наявність аномально інтенсивних імпульсів, які можна зареєструвати над галактичним фоном за допомогою радіотелескопа з великою ефективною площею, та використання саме в цьому діапазоні частотної залежності міри обертання і міри дисперсії поширення радіовипромінювання. Такого роду світового рівня спостереження започатковані та проводяться за допомогою радіотелескопа УТР-2 в Радіоастрономічній обсерваторії імені С.Я. Брауде Радіоастрономічного інституту НАН України, що дало змогу як відкрити нові пульсари, так і провести ґрунтовні теоретичні оцінки фізичних параметрів і структури імпульсних джерел. Дисертація Шевцової А.І. присвячена дослідженням можливостей зондування верхніх шарів магнітосфери пульсара вглиб за допомогою аналізу зареєстрованих радіотелескопом УТР-2 аномально інтенсивних імпульсів та розробленого дисертанткою надчутливого до швидких змін методу визначення міри обертання декаметрового радіовипромінювання пульсарів.

Структура, обговорення та зауваження до дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, в яких представлені результати досліджень автора, висновків, списку використаних джерел, який нараховує 108 найменувань, та одного додатка. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено наукову новизну та практичне значення, також зазначені особистий внесок здобувача та апробація результатів.

У першому розділі представлена загальна інформація про пульсари, історія досліджень радіовипромінювання пульсарів та методи визначення параметрів, а саме міри обертання у високочастотному (розділ 1.2) і низькочастотному (розділ 1.3) спектральних діапазонах.

Обговорення.

Приведений у першому розділі огляд робіт досить змістовний (53 бібліографічних посилання, включно найважливіші) і надає опис всіх принципових досліджень радіопульсарів; обговорення методів супроводжується дискусійним порівнянням; охарактеризовано основні пакети програмного забезпечення застосування методів та каталоги пульсарів, складені за оглядами неба на різних радіотелескопах, у т.ч., УТР-2. Варто відмітити, що особливу увагу приділено проблемі врахування іоносферної частки міри обертання при вивченні магнітосфери пульсара та/або пульсарного вітру, розвинутій у роботах астрономів Радіоастрономічного інституту НАН України (розділ 1.4), у т.ч. за участі А.І. Шевцової. Автор дисертації зазначає нестачу досліджень поляризаційних характеристик випромінювання пульсарів в декаметровому діапазоні на коротких часових масштабах індивідуальних імпульсів та робить важливий висновок про недостатню розвиненість методів оцінки міри обертання, тим самим висвітлюючи квінтесенцію і здобутки виконаного дисертаційного дослідження, яке заповнює прогалину знань в цій області.

Другий розділ присвячено опису розробленого методу визначення міри обертання в напрямку на пульсар на коротких часових масштабах в декаметровому діапазоні. Для цього запропоновано теоретичні моделі імпульсного поляризованого радіовипромінювання (розділ 2.1) та слабо анізотропного середовища його поширення (розділ 2.2).

Обговорення.

У вступі до розділу автор окреслює проблеми низькочастотних спостережень та ті переваги, які дозволяють при спостереженнях на УТР-2 з лінійно-поляризованими диполями або УРАН-2 у варіанті двох ортогонально схрещених диполів отримати поляризацію радіовипромінювання пульсарів. Автор при цьому робить посилання на класичні роботи українських авторів – С.Я. Брауде, А.В. Меня, Л.Г. Содіна, засновників декаметрової радіоастрономії, та на роботи Браженка А.І. та ін. щодо конструкцій антен УТР-2 і УРАН-2 відповідно. Феноменологічна модель поляризованого радіоімпульсу на сітці частот і наборі відліків білого шуму розписана автором по кроках алгоритму (розділ 2.1) та враховує характеристики, які має реальний сигнал від пульсара – імпульсний характер, наявність еліптичної поляризації, заданий хід позиційного кута та задане співвідношення сигнал/шум.

У розрахунку моделі середовища поширення сигналу (розділ 2.2) автором застосовано два основних ефекти, які мають найбільший вплив, – частотна дисперсійна затримка та обертання площини лінійної поляризації (ефект Фарадея). Для аналізу фази гармонічних хвиль використовувалося рівняння ейконалу. При цьому автор докладно описує визначення векторів магнітних полів в системах відліку джерела випромінювання і лабораторній системі відліку з урахуванням різних напрямків «спостерігач-джерело» розповсюдження електромагнітної хвилі та коефіцієнту заломлення в середовищах поширення сигналу, зазначаючи, що в багатьох літературних джерелах якраз «не вказуються всі складові хвильових векторів та напрямки обертання мод випромінювання».

Чисельними методами змодельовано поширення штучного сигналу крізь середовище та отримано відгук радіотелескопу на цей сигнал. Автором розглядаються різні ділянки середовища поширення – магнітосфера пульсара, міжзоряне і міжпланетне середовище, іоносфера Землі – для визначення коефіцієнта еліптичності власних мод радіо-

випромінювання (рівняння 2.4 і 2.5) та інших параметрів, та приводиться основне рівняння (2.9) зв'язку модельного сигналу при проходженні цих середовищ.

У розділі 2.3 автор аналізує запропонований новий підхід до визначення міри обертання в залежності від фази імпульсу, який відпрацьовано на розробленій моделі на мілісекундних інтервалах часу. Метод дає можливість зондування верхніх шарів магнітосфери пульсара вглиб вздовж середнього профілю імпульсу з методологічною точністю визначення $\sim 10^{-4}$ рад/м² приймальною апаратурою УТР-2. Алгоритм послідовно й аргументовано подано в рамках рівнянь 2.10–2.12 та гарно проілюстровано на рис. 2.10–2.16. Зокрема результати, подані на рис. 2.13–2.15, показують переваги модельного сигналу, отриманого з урахуванням мінімальних середньо-квадратичних відхилень, для оцінки міри обертання і ходу позиційного кута в залежності від фази імпульсу радіовипромінювання. Запропонований метод дозволяє зменшити методологічну похибку визначення міри обертання радіовипромінювання в декаметровому діапазоні до ~ 40 дБ (рис. 2.16).

Зауваження та дискусійні запитання до розділу 2.

При означенні формули 2.1 мова йде про частоту Найквіста f_{Nq} , яка ніде не фігурує, мова йде тут і далі (розділ 2.3) про номер частоти Найквіста, – це варто пояснити. На рис. 2.3 помилково вказано рис. 2.3(в), який є рис. 2.4. Опонент також не зрозумів, що означає фраза «огинаюча сигналу в каналах А і В адекватно відображає наше інтуїтивне уявлення про властивості даної моделі та сигналів» (с. 88).

У розділі 2.1 (с. 59) варто було обґрунтувати вибір центральної частоти 23.7 МГц при заповненні сигналу (автор обмежується фразою, що це «типовий діапазон частот при спостереженнях на УТР-2 і УРАН-2»), оскільки ця частота потім присутня в розрахунках коефіцієнта еліптичності власних мод радіовипромінювання (розділ 2.2, с. 76) та інших параметрів моделі поширення імпульсного сигналу в різних розглянутих ділянках середовищах (так, на рис. 2.7 поведінка коефіцієнта еліптичності порівнюється для середовища магнітосфери пульсара і іоносфери Землі на двох частотах 23.7 МГц і 111 МГц, а у розділі 2.3 на частотах 23.7 МГц і 30 МГц).

Автор зазначає, що смуга пропускання в моделі обрана у 0.5 МГц у зв'язку з «обмеженістю персонального комп'ютера» (с. 59). Наскільки відомо опоненту, УТР-2 і Відділення декаметрової радіоастрономії РІ НАН України має розвинену комп'ютерну інфраструктуру і сервер. Тим більше, що автор далі пише про «не принциповість цих обмежень» в моделі радіовипромінювання пульсара. Так само, варто було пояснити введення порогу на ширину імпульсу при моделюванні його формування (с. 63).

У тексті дисертації не пояснюється, чому вибір параметрів моделі міжпланетного і міжзоряного середовища був саме таким. Зокрема в чисельних розрахунках приймається «кордон Сонячної системи у 50 а.о.». Зауважу, що границя міжпланетного середовища Сонця зазвичай приймається у 100 а.о., зокрема відкриті не так давно карликові планети розсіяного диску Сонячної системи мають орбіти в середньому більше за 50 а.о. (зокрема для Ериди – 67 а.о.). У таблиці 3.1 це середовище (50–100 а.о.) вважається міжзоряним. Для моделі міжпланетного середовища зазначено, що використано показники концентрації електронів на орбіті Землі «за даними космічних апаратів», – варто було зазначити яких саме (величини електронної концентрації вказано вірно).

У зв'язку з цим виникають такі дискусійні питання.

Якщо буде обрана інша центральна частота, менша 20 МГц, та інші параметри міжпланетного середовища, чи буде отримано у моделі «міжзоряного + міжпланетного +

іоносферного земного» середовища квазі-повздожний характер поширення радіовипромінювання із лівою та правою круговою поляризацією власних мод хвилі?

Відомо, що по мірі уповільнення обертання пульсара його спектр у радіодіапазоні, становлячись більш вузьким, буде все більше зміщуватися в бік довших хвиль. Робота базується на спостереженнях пульсарів в інтервалі частот 16-33 МГц, при цьому чи можна використати запропоновану модель середовищ проходження радіоімпульсів для відкриття нових пульсарів (транзієнтів) на ще нижчих частотах, технічно доступних для УТР-2?

У третьому розділі дисертації наведено результати застосування розробленого методу визначення міри обертання для аналізу радіовипромінювання пульсарів J0242+6256, J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08), дані для яких були отримані за допомогою УТР-2 в діапазоні 16–33 МГц. Ці три найближчі до Землі пульсари було обрано за аналізом карти розподілу яскравісної температури галактичного фону на частоті 20 МГц (цитуються роботи Сидорчука М.А. та ін., 2008; Коноваленко О.О. та ін., 2016). Автор зазначає, що спостереження відбувалися в нічний час взимку для уникнення іоносферних та штучних завад у режимі хвильової реєстрації сигналів (WF) і зазначає особливості цього режиму реєстрації та первинної обробки спостережуваних даних (розділи 3.1 і 3.2), у т.ч. з параметрами, які реалізовані в радіоприймачах-реєстраторах DSP-Z (робота Захаренко В.В. та ін., 2016). Аналізувалось радіовипромінювання аномально інтенсивних імпульсів.

Обговорення.

Головним за наявною науковою новизною отриманих результатів в дисертації є розділ 3.3, в якому запропонований метод визначення швидких змін модуля міри обертання в залежності від фази імпульсу застосовується для обробки зареєстрованих на УТР-2 аномально інтенсивних імпульсів цих трьох пульсарів. Виявлені швидкі зміни значення міри обертання на мілісекундних часових масштабах дисертантка закономірно пов'язує зі змінами параметрів магнітного поля та концентрації зарядів плазми у верхніх шарах магнітосфери пульсара та пульсарному вітрі (в області формування поляризованого випромінювання). Також А.І. Шевцовою було отримано оцінки середнього значення модуля міри обертання для досліджуваних пульсарів, для пульсара J0242+6256 поляризаційні параметри радіовипромінювання отримано вперше в світі. Оцінки модуля середнього значення для інших пульсарів близькі до отриманих на більш високих частотах, що підтверджує адекватність застосування розробленого в дисертаційному дослідженні методу.

Результати, представлені в цьому розділі дисертації, переконливо доводять, що аномально інтенсивні імпульси на коротких часових інтервалах в якості об'єкту аналізу є достатньою умовою пошуку швидких змін міри обертання декаметрового радіовипромінювання пульсарів.

Зауваження та запитання до розділу 3.

На графіках середніх профілів імпульсів пульсарів, що аналізувалися, вказане співвідношення сигнал/шум має тільки пульсар J0243+6257, для двох інших пульсарів (J0814+7429, J0953+0755) це співвідношення не зазначене.

Дисертантка на с. 114 звертає увагу на виявлення спостережних флуктуацій міри обертання в напрямку на пульсар J0243+6257 та пов'язує їх із тонкою структурою магнітосфери пульсара, зокрема з можливим диференціальним внеском магнітних трубок. Чи існують інші роботи в цьому напрямі, які підтвердили б чи спростували це передбачення теоретичних розробок С.А. Петрової, на які посилається дисертантка? База даних ADS NASA

показує, що тільки в 2020 році є більше десяти цитувань робіт С.А. Петрової, серед них див. зокрема Jones P.B., Li H.-Q. et al., Dyks J. et al.

У тексті дисертації автор не зазначає про свою участь у спостереженнях досліджуваних пульсарів за допомогою радіотелескопа УТР-2, зокрема J0814+7429, це можна зрозуміти лише з автореферату в описі особистого внеску в опублікованих статтях (с. 17–22) та зі вступу дисертації, де про це сказано в цілому (с. 33). Вважаю особисту участь у проведенні спостережень одним із найважливіших складників дисертаційного дослідження і здобутків А.І. Шевцової, на яких треба було наголосити в роботі.

Зазначені вище зауваження до розділів 2 і 3 не впливають на високу оцінку дисертаційного дослідження. Опонент підтверджує наукову новизну основних результатів:

- Вперше для всіх діапазонів дано оцінку модулю міри обертання для пульсара J0243+6257, яка становить 4.4 ± 0.3 рад/м². Визначення цього параметра виконано за допомогою радіотелескопа УТР-2 в діапазоні 16–33 МГц.

- Вперше в декаметровому діапазоні для двох пульсарів J0814+7429 (B0809+74) і J0953+0755 (B0950+08) отримана величина модуля міри обертання, що становить $|RM| = 12.3 \pm 0.7$ рад/м² для пульсара J0814+7429 та $|RM| = 2.4 \pm 0.3$ рад/м² для пульсара J0953+0755. Достовірність результатів досліджень та доцільність застосування розробленого методу для оцінки міри обертання в декаметровому та метровому діапазонах підтверджує те, що дані оцінки близькі до отриманих в інших частотних діапазонах.

- Вперше на масштабах ~ 0.3 мс показано швидкі зміни міри обертання в залежності від фази індивідуального імпульсу для найближчих до Землі пульсарів. Підхід, в якому міра обертання має динамічний, а не сталий характер в часових рамках індивідуального імпульсу, є оригінальним. Наявність швидких змін міри обертання була підтверджена завдяки аналізу аномально інтенсивних імпульсів за допомогою розробленого чутливого до таких змін методу оцінки цієї величини.

- Розроблено новий метод визначення «миттєвих» абсолютних значень міри обертання в масштабах одного імпульсу ~ 0.3 мс у декаметровому діапазоні. Оцінки швидких змін міри обертання при цьому мають набагато вищу точність визначення, ніж оцінки середнього значення. Розроблений метод має рекордно малу методологічну відносну похибку -40 дБ, є універсальним та може застосовуватися для аналізу даних інших радіотелескопів близького низькочастотного діапазону та дозволяє отримати оцінки міри обертання навіть при аналізі даних з радіотелескопа, який реєструє лише одну лінійну поляризацію.

- Для трьох обраних пульсарів J0242+6256, J0814+7429, J0953+0755 були отримані профілі міри обертання від фази імпульсу з часовою роздільною здатністю до 0.3 мс. Обґрунтовано можливості зондування найближчого до пульсара середовища – верхньої магнітосфери та пульсарного вітру.

Автором дисертації для побудови феноменологічної моделі поляризованого радіоімпульсу та визначення міри обертання використано різні математичні методи – Фур'є-аналіз і метод Монте-Карло генерації випадкових чисел для створення сітки частот, амплітуд для заданої сітки частот та початкової фази сигналу. Математичний аналіз та тензорна алгебра необхідні були автору для моделювання сигналу імпульсного характеру та поширення радіохвилі в різних середовищах, як і знання теорії нелінійних диференціальних рівнянь при впровадженні квазікласичного наближення для визначення міри обертання радіовипромінювання. Зазначу тут велику ретельність відпрацювання поданої в розділі 2

дисертації моделі поширення декаметрової радіохвилі в іоносфері Землі з урахуванням параметрів магнітного поля в залежності від географічних координат фазового центру радіотелескопу УТР-2, – це важливо, оскільки внесок іоносфери є вагомим у інтегральній величині оцінки міри обертання. Особливу увагу привертає та скрупульозність, з якою дисертантка розглянула вплив різного роду помилок фізичного і математичного змісту на оцінку міри обертання для зондування верхньої магнітосфери пульсарів.

Вважаю за необхідне побажати тут продовження роботи в цьому напрямі як для досліджених, так і для більшої кількості пульсарів, та удосконаленні методики для оцінки знаку міри обертання, про що дисертантка пише наприкінці розділу 3.3.1.

Отже, використання і володіння зазначеними вище математичними методами, класичними розділами фізики і радіофізики є сильною стороною дисертантки та демонструє високий рівень фізико-математичної підготовки та ерудиції А.І. Шевцової в галузі астрофізики і радіоастрономії. Запропонований А.І. Шевцовою новий метод оцінки міри обертання та застосування його до спостережних даних про радіовипромінювання пульсарів, отриманих за допомогою УТР-2, переконливо доводять можливість зондування верхніх шарів магнітосфери та пульсарного вітру за аналізом швидких змін міри обертання в масштабах індивідуальних аномально інтенсивних імпульсів в декаметровому діапазоні.

Результати дисертації опубліковані в 31 науковій праці, із яких 6 – у наукових фахових виданнях України, одне з яких індексується в міжнародних наукометричних базах SCOPUS та Web of Science, 4 – в зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до SCOPUS та Web of Science, 21 – у матеріалах наукових конференцій.

Дисертаційна робота написана гарною літературною мовою з використанням усталеної наукової лексики та термінології. Результати роботи, що виносяться на захист, викладені змістовно, є необхідні посилання на важливі праці за темою дослідження. Автору вдалося складні питання пояснити просто, що аргументує пропозицію опонента використати в подальшому матеріали дисертації в лекційному процесі для студентів фізичних і радіофізичних факультетів закладів вищої освіти. Отримані результати та розроблений метод є вагомим підґрунтям подальших астрофізичних досліджень пульсарів та властивостей міжзоряного і міжпланетного середовища поширення радіохвиль, як спостережного, так і теоретичного характеру.

Автореферат повністю відображає зміст і основні результати дисертації.

На основі викладеного можна зробити висновок, що дисертаційна робота А.І. Шевцової «Міра обертання радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні» є завершеною працею, в якій отримані нові наукові теоретичні та експериментальні результати, що становлять вагомий внесок у розвиток астрономічних досліджень. Дисертаційна робота відповідає всім вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, а її автор Шевцова Аліса Ігорівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 «астрофізика, радіоастрономія».

Офіційний опонент

Вавилова Ірина Борисівна, доктор фізико-математичних наук,
зав. відділом позагалактичної астрономії
та астроінформатики ГАО НАН України

24.04.2021 р.

Підпис Вавилової І.Б. засвідчує

Нач. відділу кадрів ГАО НАН України

Панченко Л.В.



Відгук одержано 26 квітня 2021 р.

Згенерувано секретар спецради